6th INTERNATIONAL CONGRESS

OF ENGINEERING AND NATURAL SCIENCES STUDIES

FULL PAPERS

4-5 JUNE 2026

ICENSS

BİDGE

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences Studies

Full Papers

4-5 June 2026

Ankara/Turkey

BIDGE Publications

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences Studies Full Papers

ISBN: 978-625-8989-37-3

Editors

Hikmet Yeter Çoğun

Page Layout: Gözde YÜCEL

1st Edition: BIDGE Publications, 2025

All rights of this work are reserved. It cannot be reproduced in any way without the written permission of the publisher and editor, except for short excerpts to be made for promotion by citing the source.

Certificate No: 71374

Copyright © BIDGE Publications

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

SCIENTIFIC COMMITTEE

DR. AHMET BENLİ – BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
DR. AHMET TOPAL – ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
DR. ALAEDDİN BOBAT – KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
DR. ALEVCAN KAPLAN – BATMAN ÜNİVERSİTESİ
DR. ALİ ALLAHVERDİ – KUWAİT UNİVERSİTY
DR. ALİ DİNC – AMERICAN UNIVERSITY OF THE MIDDLE EAST
DR. AŞKIN KİRAZ – YAKIN DOĞU ÜNİVERSİTESİ
DR. ATİLA KUMBASAROGLU – ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
DR. AYDIN ŞIK – GAZİ ÜNİVERSİTESİ
DR. AYHAN ESİ – MALATYA TURGUT ÖZAL ÜNİVERSİTESİ
DR. BEHRUZ BEKBABAYİ – ALLAMEH TABATABA'İ ÜNİVERSİTESİ
DR. BEKİR ŞAN – ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
DR. BELGİN COŞGE ŞENKAL – YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
DR. BESTE CUBUKCUOGLU – YAKIN DOĞU ÜNİVERSİTESİ
DR. BÜLENT TOPRAK – İZMİR KATİP ÇELEBİ ÜNİVERSİTESİ
DR. CİGDEM SAYIL – İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
DR. CİHAN BAYINDIRLI – NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
DR. COŞKUN FIRAT – İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
DR. ÇAĞLAR AKÇAY – DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
DR. ÇETİN MEKİK – HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
DR. ÇİĞDEM MORAL – AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
DR. DİDAR UCUNCUOĞLU – THE UNIVERSITY OF MANITOBA
DR. DİLEK ARSOY – NEAR EAST UNIVERSITY
DR. EBRU EMİNE ŞÜKÜROĞLU – GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
DR. EBRU ŞEBNEM YILMAZ – HATAY MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
DR. EBRU YILMAZ – AYDIN ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ
DR. ELAHE REYHANİ – ZANJAN MEDİCAL SCİENCE UNİVERSİTY
DR. ELİF ÇELENK KAYA – ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
DR. ELİF ŞENKUYTU – ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
DR. EMRAH ÖZTÜRK – ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
DR. ENGİN NAS – DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
DR. ENGİN YARALI – AYDIN ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ
DR. ERDEM ÇİFTÇİ – GAZİ ÜNİVERSİTESİ
DR. ERDEM ŞAKAR – ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
DR. FATİH APAYDIN – BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ
DR. FATMA OĞUZ ERDOĞAN – KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
DR. FERDA ESER – AMASYA ÜNİVERSİTESİ
DR. FİLİZ BORAN – HİTİT ÜNİVERSİTESİ
DR. FİLİZ MEDİHA NAMDAR PEKİNER – MARMARA ÜNİVERSİTESİ
DR. FUAT KARA – DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
DR. FULYA TAKTAK – UŞAK ÜNİVERSİTESİ
DR. FUNDA DÖKMEN – KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
DR. GULSUM YALDİZ – BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
DR. GÜLŞAD USLU ŞENEL – FIRAT ÜNİVERSİTESİ
DR. HAKAN DİLİPAK – GAZİ ÜNİVERSİTESİ
DR. HALİL ZEKİ GÖK – BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
DR. HASAN GÖKSEL OZDİLEK – ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
DR. HASAN ÖZ – ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
DR. HASAN ÜZMUŞ - VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
DR. HATİCE PEKMEZ – GAZİANTEP ÜNİVERSİTESİ
DR. HATUN BARUT – DOĞU AKDENİZ TARIMSAL ARAŞTIRMA ENSTİTÜSÜ

DR. HİDAYET MAZI – GAZİANTEP ÜNİVERSİTESİ
DR. HÜLYA ÇELİK – AĞRI İBRAHİM ÇEÇEN ÜNİVERSİTESİ
DR. HÜLYA DEMİR – YEDİTEPE ÜNİVERSİTESİ
DR. HÜLYA ÖZTÜRK DOĞAN – ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
DR. İBRAHİM GÜNEŞ – GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
DR. İLYAS UYGUR – DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
DR. İSHAK PARLAR – VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
DR. KAMİL KAYGUSUZ – KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
DR. KAZİM YETİŞ – İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
DR. KEMAL YAMAN – OSTİM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
DR. KEZİBAN ATACAN – SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
DR. KORAY KARABULUT – SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
DR. KÜBRA CİHANGİR-ÇAMUR – GAZİ ÜNİVERSİTESİ
DR. LUQMAN ALATRUSHİ – NORTHERN TECHNİCAL UNİVERSİTY-IRAQ
DR. MEHMET AKKAŞ – KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
DR. MEHMET ALP FURAN – VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
DR. MEHMET ALP ILGAZ – LJUBLJANA UNIVERSİTESİ
DR. MEHMET CENGİZ KARAİSMAİLOĞLU – BARTIN ÜNİVERSİTESİ
DR. MEHMET GÜVENÇ NEGİZ – ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
DR. MEHMET MERDAN – GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
DR. MERT BAYRAKTAR – TÜRK HAVACILIK VE UZAY SANAYİ

DR. MİRAÇ ALAF – BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ
DR. MUHARREM İNCE – MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
DR. MUHSİN AYDIN – ADIYAMAN ÜNİVERSİTESİ
DR. MURAT TOLGA ÖZKAN – GAZİ ÜNİVERSİTESİ
DR. MUSTAFA AYTEKİN – UNIVERSITY OF BAHRAIN
DR. MUTLU BUKET AKIN – HARRAN ÜNİVERSİTESİ
DR. NEBİ GEDİK – SAĞLIK BİLİMLERİ ÜNİVERSİTESİ
DR. NECİBE FÜSUN OYMAN SERTELLER – MARMARA ÜNİVERSİTESİ
DR. NERMİN SÖKMEN – NATİONAL UNİVERSİTY OF SCİENCE AND TECHNOLOGY MİSİS
DR. NEŞE ERTUGAY – ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
DR. NEŞE ÜZEN – DİCLE ÜNİVERSİTESİ
DR. NURAY GÜY – SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
DR. NURHAN KOÇAN – BARTIN ÜNİVERSİTESİ
DR. NURİ ÖZTÜRK – GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
DR. NURSEL BAYDEMİR – KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
DR. OEXAN BAĞIROV – AZƏRBAYCAN MİLLİ ELMLƏR AKADEMİYASININ NAXÇIVAN BÖLÜMÜ
DR. ÖZGÜR EKEN – İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
DR. ÖZGÜR ÖZGÜN – BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
DR. ÖZLEM GÜNGÖR – GAZİ ÜNİVERSİTESİ FEN FAKÜLTESİ
DR. PELİN ÖZKARTEPE – GAZİANTEP ÜNİVERSİTESİ
DR. PRAKASHA KN – VİDYAVARDHAKA COLLEGE OF ENGİNEERİNG
DR. RANA ÖZBAKIR – SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
DR. RECEP TAŞ – BARTIN ÜNİVERSİTESİ
DR. REDVAN GHASEMLOUNIA – İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
DR. RIDVAN KARACAN – KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
DR. RUKİYE UZUN ARSLAN – ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
DR. SAFİYE EMİRDAĞ – EGE ÜNİVERSİTESİ
DR. SEVAL ÖZGEL FELEK – ORDU ÜNİVERSİTESİ
DR. ŞAHABETTİN ÖZTÜRK – VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
DR. ŞAHANE FUNDA ARSLANOĞLU – ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
DR. ŞEHRİBAN OĞUZ - VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
DR. TAHİR YÜCEL - VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ

REVIEWER COMMITTEE

DR. ABDÜLVAHAP ÇAKMAK – SAMSUN ÜNİVERSİTESİ
DR. AHMET ÇAKANEL – KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
DR. ALPER DURMAZ – ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
DR. AYÇA UÇKUN – ZEYTİNCİLİK ARAŞTIRMA ENSTİTÜSÜ
DR. AYŞEGÜL YÜCEL – İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
DR. BAHDİŞEN GEZER – UŞAK ÜNİVERSİTESİ
DR. BARIŞ YILDIZ – KAFKAS ÜNİVERSİTESİ
DR. BEHRUZ BEKBABAYİ – ALLAMEH TABATABA'İ ÜNİVERSİTESİ
DR. BEKİR TOSUN – BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
DR. BEKİR YİTİK – BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
DR. CANER YERLİ – VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
DR. CEM GÖL – BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
DR. CİHAN BAYINDIRLI – NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
DR. ÇAĞLA ERCANLI – İZMİR KAVRAM MESLEK YÜKSEKOKULU
DR. ÇAĞRI BEKİRCAN – KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
DR. ÇETİN MEKİK – HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
DR. ELİF ÇİL – ORDU ÜNİVERSİTESİ
DR. ENGİN YARALI – AYDIN ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ
DR. ERTUĞRUL ÇAM – BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ
DR. ESRA TUĞRUL TUNÇ – FIRAT ÜNİVERSİTESİ
DR. EYLEM AYDEMİR ÇİL – SİNOP ÜNİVERSİTESİ
DR. FAİK CEYLAN – DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
DR. FATİH APAYDIN – BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ
DR. FATMA GÖNÜL SEZGİN – ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
DR. GÜLSÜM EBRU ÖZER UYAR – KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
DR. HALİL ZEKİ GÖK – BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
DR. HAMİT ÖZYURT – KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
DR. HAMZA NEGİS – SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
DR. HASAN GÖKSEL ÖZDİLEK – ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
DR. HİCRİ YAVUZ – AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
DR. HİLAL KILINÇ – DOKUZ EYLUL ÜNİVERSİTESİ
DR. HÜSEYİN ÇAĞDAŞ ASLAN – YALOVA ÜNİVERSİTESİ
DR. İBRAHİM ÇAVUŞOĞLU – GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
DR. İBRAHİM YAVUZ – AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
DR. KAPLAN KAPLAN – KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
DR. KORAY KARABULUT – SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
DR. KUTLUĞ SAVAŞIR – DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
DR. KÜBRA GÜL – KAFKAS ÜNİVERSİTESİ

DR. MEHMET AKİF ÖZCAN – BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
DR. MEHMET ALP FURAN – VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
DR. MERVE BAYHAN – DİCLE ÜNİVERSİTESİ
DR. MERVE GÜNEŞ – AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
DR. MERYEM BURCU KÜLAHCI – GAZİ ÜNİVERSİTESİ
DR. MUHAMMED AZIM IRGEŞ – KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
DR. MUSTAFA DEĞİRMENCİ – SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
DR. MUSTAFA YEĞİN – ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
DR. NAFEL DOĞDU – AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
DR. NAZLI TOKATLI – İSTANBUL SAĞLIK VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
DR. NEŞE ÜZEN – DİCLE ÜNİVERSİTESİ ZİRAAT FAKÜLTESİ
DR. NİHAYET KOÇYİĞİT – BATMAN ÜNİVERSİTESİ
DR. NİLDENİZ TOP KARAKUS – MUĞLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ
DR. NURDOĞAN TOPAL – UŞAK ÜNİVERSİTESİ
DR. ONUR ALKAÇ – FIRAT ÜNİVERSİTESİ
DR. ORHAN DOĞAN – KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
DR. ORHAN ULUÇAY – KAFKAS ÜNİVERSİTESİ
DR. OYA KESKİN – ANTALYA BİLİM ÜNİVERSİTESİ
DR. ÖMER FIRAT TURŞUCULAR – BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
DR. PELİN YİĞİT – NİŞANTAŞI ÜNİVERSİTESİ
DR. RAHİLE ÖZTÜRK – SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
DR. SADETTİN ÇELİK – BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
DR. SELDA SEZER – MALATYA TURGUT ÖZAL ÜNİVERSİTESİ
DR. Ş SELÇUK SEÇİLMİŞ – GAZİANTEP ÜNİVERSİTESİ
DR. ŞAHİKA ÖZDEMİR – İSTANBUL SABAHATTİN ZAİM ÜNİVERSİTESİ
DR. ZEYNEB KILIÇ – ADIYAMAN ÜNİVERSİTESİ

ORGANIZERS COMMITTEE
DR. ÖĞR. ÜYESI İSHAK PARLAR-VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNIVERSITESI
DR. ÖĞR. ÜYESI HASAN ÜZMUŞ-VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNIVERSITESI
DR. TAHIR YÜCEL-VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNIVERSITESI
DR. ŞEHRIBAN OĞUZ-VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNIVERSITESI
DR. NESLIHAN ÇELEBI-ATATÜRK ÜNIVERSITESI
DR. ONUR SARAN-VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNIVERSITESI
DR. ABDULLAH MALTAŞ-VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNIVERSITESI
DR. ALI CAN ÇABUKER- ARTVIN ÇORUH ÜNIVERSITESI
MÜHENDIS ARMAĞAN UMUT ALKAN- VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNIVERSITESI
ARŞ.GÖR. MUHAMMED DEMIRBAĞ-VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNIVERSITESI

Contents

Optimization of HVAC Systems According to User Profiles & Investigation of Effects on Thermal Comfort 16

Osman SÜMER 16

Simge TAŞLICA 16

Berkay ORCAN 27

Orhun BOSTAN 27

Architectural Implications of Multi Energy Platform Strategies for L5e Category Vehicles 35

Şaban KOÇ 35

Özer ÖZDEMİR 35

700 BAR TYPE IV COMPOSITE HYDROGEN TANKS: STRUCTURAL OPTIMIZATION OF BOSS–LINER INTERFACE SEALING 46

Başak TEKİN ERBAĞ 46

Hayriye Göksu ARALIK 46

Investigation of the Effects of Different Infill Density and Infill Pattern on Mechanical Properties in Additive Manufacturing 54

Recep YILDIZ 54

Design and Functional Evaluation of Vehicle Fender Components 64

Araç Çamurluk Parçalarında Tasarım ve Fonksiyonel Değerlendirmeler 64

Cihangir GÜNDÜZ 64

Bell Type Industrial Furnace Retort Cooling: An Experimental and Numerical Study 77

Alper KELEŞOĞLU 77

A Study on the Design and Evaluation of Shielding Structures for High-Voltage Component Protection in Electric Vehicle Frontal Crashes 84

İlkay SARITAŞ 84

Fırat ARAS 84

Gear Design Mekanik Direksiyon Dişli Kutusu Tasarımında Üç Değişkenli Boyutsal Tasarım Çalışması 94

Murat GÜNEY 94

Birtan GÜLER 94

Thermoform Prosesinin Otomotiv Parça Geometrisi ve Tasarım Süreçlerine Etkisi 100

Fatma SİRKECİ 100

Engin Can ASLANDERE 100

Vahdet ÖZDEMİR 100

Mechanical Design and Operational Characteristics of Secondary Safety Hook Mechanisms in Automotive Hood Latch Systems 113

Barış ULUÇAY 125
Büşra GÜLEÇ 125
Overview of Vehicle Occupants Architectural Performance 134
Muhammed Ali VURAL 134
Görkem ÖZTAŞ 140
Berkan KÖKSALAR 140
The Impact of Drag Area (***CdA***) on Cabin Wind Noise at 140 km/h: A Comparative Analysis across Diverse Vehicle Segments 149
Muhammed Taha SIRMA 149
Applications of Roll Forming Technology in Automotive 175
Çiğdem BİLGE 175
İbrahim İNAN 183
Murat SÜMER 183
Önder YILMAZ 183
Zafer GÜLER 183
Impact Analysis of Euro 7 Emission Regulations on Vehicle System Architecture & Integration 197
Mert DONMEZ 197
Burak BEKTAS 197
Erhan YAMAN 197
Otomotiv Sızdırmazlık Elemanlarında Geri Dönüştürülebilir ve Biyo-Bazlı Malzeme Alternatiflerinin Çevresel Sürdürülebilirlik Açısından İncelenmesi 206
Eyüp KURTULUŞ 206
A COMPARATIVE REVIEW OF FRONTAL IMPACT SAFETY REQUIREMENTS IN EMEA AND NAFTA 213
Müzeyyen Nur KAPLAN 213
Comparison Study of Static Load Compensation CAE Analysis and Physical Test Results on Hood 228
Kübra Nur Kulaoğlu 228
Tamer Aydıner 228
Effect of a Lower Bumper Structural Element on Tibia Bending Moment in Pedestrian Collisions 239
Zubeyir Ramazan Aktasgil 239
Firat Aras 239
Impact of Crash Sensor Bracket Design and Mounting Location on Airbag Signal Quality 246
Halil İbrahim SANCAR 246

Fırat ARAS 246
Simulation–Test Correlation of ECE R17 Luggage Retention Performance in a Commercial Vehicle 256
Tamer AYDINER 256
Tuğberk İsmail ŞİMŞEK 256
A Design Approach for Meeting the Noise, Vibration, and Harshness Requirements in Reinforcement-Free Instrument Panel Structures 262
Ahmet AKMAN 262
Çağrı GENÇOL 262
Hilal DOĞANAY KATI[3] 262
Binek Araçlarda Kapı Barlarının Rolü ve Önemi 270
Erdem GÜRSOY 270
Electromagnetic Investigation of Magnet Embrace and Offset Effects on Torque Ripple in In-Runner Servo Motors for Precision CNC Feed-Drive Applications 279
Mustafa ÖZSOY 279
Sami ARSLAN 279
Otomotivde Kullanılan Koltuk Havalı Sistemlerinin Dinamik Özellikleri ve Sürücüye Etkileri 303
Furkan Melih EFE 303
FEM-Based Analysis of Output Torque Degradation in PCB Drilling Spindle Servo Motors Due to Permanent Magnet Demagnetization 315
Sami ARSLAN 315
Mustafa ÖZSOY 315
STATCOM Tabanlı Reaktif Güç Kontrolü ile Dağıtım Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Analizi: Diyarbakır-3 Trafo Merkezi Uygulaması 331
Faysal YARAMIŞ 331
TUNCAY KARAMAN 331
Yurdagül BENTEŞEN YAKUT 331
Otomotivde Sensor Teknolojisi Ve Otomatik Far Seviyeleme Sistemi 346
Hüseyin CELAP 346
Thermal Runaway E&E Function Designs and Applications 354
Musa YILMAZ 354
Impact of Gaussian Noise and Spatial Filtering on MobileNetV2-Based Breast Cancer Histopathological Image Classification 365
Samiullah SHIRZAD 365
Murat Alparslan GUNGOR 365
Sustainability in Software Defect Prediction Processes: A Conceptual Review from the Perspective of Green AI 371

Turgay TAYMAZ 371
Kökten Ulaş BİRANT 371
An Integrated Digital Marking Management System for Industrial Product Traceability 382
Ebru Ustunbas 382
Merve Temur 382
Taşıtlarda Enerji Depolama Teknolojilerinin Tarihsel Evrimi ve Sistem Düzeyinde Analizi 398
Mustafa ALKIN 398
Meltem SÜPÜRTÜLÜ 398
Physics-Informed Neural Network Approaches for 2D Magnetic Field Modeling in Cartesian Coordinates: Residual-Based and Energy-Based Training Strategies 408
Hüseyin YILDIZ 408
Yasemin POYRAZ KOÇAK 408
Erol UZAL 408
Otomotiv Koltuk Isıtma Sistemleri ve Performans Faktörleri 424
Kemal Can YARPUZOĞLU 424
Toward Sustainable Materials: PCL/PEG-Based Biocomposite Films with Sepiolite Clay and *Pelargonium graveolens* Essential Oil 434
Büşra MUTLU 434
A corrosion problem about Fe & Al Contamination on AISI 304 Stainless Steel Parts in Automotive Industry 446
Merve VATANSEVER 446
Giancarlo MARCHIARO 446
Gürkan YILMAZOGLU 446
Uğur UZEL 446
Influence of Fabric Structure on Color, Gloss and Hardness in Automotive Textiles 455
Burcu GÜL 455
Comparison of clustering algorithms to construct data-adaptive network design for regional gravity field modeling via SRBFs 460
Raşit Uluğ 460
Design and Numerical Investigation of a Full Germanium Metalens at 850 nm 473
Şeyma YENER 473
Ekin ASLAN 473
Otomotiv Koltuk Kılıflarında Gizli Bağlantı Yöntemi 483
Mehmet ÖZKAN 483
Muğla/Fethiye Koşullarında PV Destekli Sera Isıtması İçin Saatlik Isıtma Talebi ve Fotovoltaik Üretim Eşleşmesinin Değerlendirilmesi 490

Dilşah ONUŞ 490
Volkan Ramazan AKKAYA 490
Impact of Accelerated Weathering on Mechanical Behavior of Sheet Molding Compound Panels 498
Selvi Naz ÇETİN 498
Çağrı ÇALIŞKAN 498
Determination of Thermal Decomposition Kinetics and Thermodynamic Parameters of Shoe Manufacturing Industry Wastes by the Coats-Redfern Method 505
Gülce ÇAKMAN 505
Sığır Islahında Genomik Seleksiyon: Mevcut Durum, Yöntem ve Gelecek Perspektifleri 519
Eda TAYFUR 519
Women in Beekeeping: Challenges, Opportunities and Future Perspectives 531
Mustafa GÜNEŞDOĞDU 531
İsmail Yaşhan BULUŞ 531
Investigation of Carry-Over Component Strategy in Instrument Panel Architecture for Automotive Cockpit Development 538
Mesut Can DÖNDÜ 538
Cem İÇİER 538
Manufacturing Technologies for Automotive Interior Decorative Components: A Comparative Study 548
Cem İÇİER 548
Mesut Can DÖNDÜ 548
Mehmet Burak AKSU 548
The Role of Press Hardening Hot Stamping Components in Automotive Body Structures 564
Enes CEBE 564
Sönüm Oranı Hassasiyetinin Mod Şekilleri, Rezonans Tepkisi ve Lambda Doğruluğu Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi 572
Uğurcan SERBEST 572
Mustafa NAZLI 572
Güvenlik Kritik Otomotiv Yapısal Bileşenlerinde Gigacasting Teknolojisinin Kullanımı 580
Necdet Selim KOÇYİĞİT 580
Yağız SELÇUK 580
Ferhat Can Köse 580
Otomotiv Üretiminde Soğuk Kaynak ve Katı Hal Birleştirme Teknolojilerinin Uygulamaları 587
Necdet Selim KOÇYİĞİT 587
Yağız SELÇUK 587

Ferhat Can KÖSE 587
Otomotiv Üretiminde BIW (Gövde İskeleti) Yapıları İçin Rheocast Bileşenler 594
Yağız SELÇUK 594
Necdet Selim KOÇYİĞİT 594
Ferhat Can KÖSE 594
Modern Üretimde Demir Dışı Sac Metaller İçin Birleştirme Teknolojileri 600
Necdet Selim KOÇYİĞİT 600
Yağız SELÇUK 600
Ferhat Can KÖSE 600
BIW Fastening Strategies in Automotive 606
Otomotivde BIW Bağlantı Stratejileri 606
Harun YENİ 606
Necdet Selim KOÇYİĞİT 606
A Comparative Study of Backbone Architectures in Faster Region-Based Convolutional Neural Network with Feature Pyramid Networks for Printed Circuit Board Defect Detection and Classification 619
Atakan YENİPAZARLI[2] 619
Mehmet Gökhan HABİBOĞLU 619
Simulating V2V-Based Dynamic Priority Management of Autonomous Vehicles at Unsignalized Intersections 630
Selim İŞCAN 630
Cem Tolga MÜNYAS 630
Can ÖNCEL 630
Abdulkerim ÇEKİNMEZ 630
Sibel DEMİR 630
RF Conducted Testing in LTE and 5G Systems: Design Verification, Measurement Methodologies, and Comparative Analysis 641
Özge ÖZDAMAR 641
HPLC-Based Evaluation of Phenolic Constituents in *Leucojum aestivum* L. Leaves Across Different Localities and Developmental Stages 648
Arzu Birinci YILDIRIM 648
Arzu Uçar TÜRKER 648
Sina Cafer DEMİR 648
Fire Safety Issues in Sustainable Façade Design 656
Bilgehan BAKIRHAN 656
Minimally Invasive Sensor Deployment in Historic Buildings Using Digital Twins 665

Bilgehan BAKIRHAN 665
Architectural Challenges Related to Fire Evacuation and Patient Mobility in Healthcare Facilities 675
Bilgehan BAKIRHAN 675
Digital Ecosystems for Sustainable Cities: Digital Twin Integration in Climate and Resource Management 684
Ebru KILIÇ BAKIRHAN 684
Shaping the Architecture of the Future with Innovative Building Materials 696
Ebru KILIÇ BAKIRHAN 696
Comparative Investigation of The Nonlinear Behavior of Concentrically Braced Steel Frames Under Near-Fault and Far-Fault Earthquakes 705
İlayda KATILMIŞ 705
Mehmet Aydın KÖMÜR 705
Approximate Solution of the Nonlinear Equation (fKdV) using the Multiple Scale Method 718
Murat KOPARAN 718
A Multiple Scales Method for Solving the Nonlinear (fKdV) Equation 729
Murat KOPARAN 729
A Multiple Scales Method for Solving the Nonlinear (fKdV) Equation 740
Murat KOPARAN 740
Effects of Salinity and Drought Stress on Morphological Parameters in Wheat (Triticum Aestivum L.) 751
Seymen CIMBIZ 751
Ergun KAYA 751
Doğu Karadeniz (Trabzon ve Rize) Bölgesinin doğal peyzaj özelliklerinin kırsal turizm potansiyeli açısından incelenmesi 756
Selvinaz Gülçin BOZKURT 756
Manisa Kenti Kentsel Açık ve Yeşil Alan Yeterliliğinin İncelenmesi 772
Şevval VARLIK 772
Nurhan KOÇAN 772
Silver-Boron Based İnorganic Pigments: Synthesis, Structural, Morphological and Optical Properties 783
Dilek ÇANAKÇI 783
h° 791
Akdamar Kilisesi Çevresi İçin Peyzaj Tasarım Önerisi 795
Safiye Münevver SİVRİTEPE 795
Nurhan KOÇAN 795
Gıdalarda Antioksidan Kapasitesinin Belirlenmesinde Voltametrik Yöntem Uygulamaları 808

Applications of Voltammetric Methods for the Determination of Antioxidant Capacity in Foods 808
Leyla DOĞDU UZUNLAR 808
Abdullah Sinan ÇOLAKOĞLU 808
Mustafa ÇEŞME 808
Effect of the addition of starch and collagen to donkey milk on physicochemical, microbiological and sensory properties of yoghurt 820
Sude ALKAN 820
Ece GÜNAL[1] 820
Kaan UYSAL 820
Aybüke AVKIRAN 820
Gülsen KANDEMİR[2] 820
Furkan HAYTAOĞLU[3] 820
Zeynep YILDIRIM[4] 820
Firuze ERGİN ZEREN[5] 820
Ahmet KÜÇÜKÇETİN[6] 820
Friction Identification and Compensation for Enhanced Torque Control in Collaborative Robotic Actuation Systems 833
Ghaith ALKADDOUR 833
Kenan IŞIK 833
Bagaj Eşik Kaplama Bileşenlerinde Yapısal Tasarım Optimizasyonu ile EPP Malzemelerinin Eliminasyonu 842
Reşat Oğuzhan SÜMER 842
Orhun BOSTAN 842
TEDARİK ZİNCİRİNDE YER ALAN FİRMALARİN ÜRETİM VE ÜRÜN GELİŞTİRME SÜRECİNE ENTEGRASYONU 851
Ali AKTAŞ 851
Sami SAYER 851
Aydın ÜLKER 851
The Ecological Significance of Native Flood-Tolerant Riparian Species in Floodplain Ecosystems 863
Gülkız EKRİ 863
Ayşe ÖZTÜRK PULATOĞLU 863
Nagihan SEKİ 863
Veri Güvenliği Kısıtları Altında Üretim Hattı Kalite Ekipleri İçin Şirket İçi RAG Tabanlı Bilgi Asistanı Tasarımı ve Uygulaması 872
Beyza BOZ 872

Tekstil Yüzeylerinde Böcek Kovucu Fonksiyon Kazandırmaya Yönelik Güncel Yaklaşımlar.....880
Emine BAKAN 880
SOLAR SIMULATION TESTING AND EVALUATION OF RESULTS FOR AUTOMOTIVE EXTERIOR TRIM COMPONENTS.....895
Berna ÖZTÜRK 895
Onur GÜDEK 895
Gizem KILCI 895
İhsan Can PEHLİVAN 895

6th International
Congress of Engineering and Natural
Sciences

Optimization of HVAC Systems According to User Profiles & Investigation of Effects on Thermal Comfort

Osman SÜMER[1]
Simge TAŞLICA[2]

Abstract

This study presents a user-centric optimization of automotive HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) systems, focusing on thermal comfort, energy efficiency, and environmental impact. User expectations were classified through the KANO methodology, generating profiles representing diverse operational scenarios. Corresponding heating (heat-up) and cooling (cool-down) strategies were defined for each profile. The performance of the optimized HVAC system was evaluated using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations.

Simulation results demonstrate that, during cooling scenarios, the system maintains cabin conditions within the "comfortable" thermal zone, while in heating scenarios, it achieves the "warm but comfortable" range. Surface temperature analysis across key driver body regions (head, chest, right arm, left arm) shows deviations from target thermal comfort values ranging from 3.9% to 21%, indicating improved zone-specific regulation. Compared with conventional HVAC strategies, the optimized approach maintains cabin temperatures closer to user-preferred comfort ranges and reduces response time for achieving desired thermal states.

The findings confirm that integrating user profiles into HVAC control enables adaptive, region-specific temperature management, enhancing occupant comfort while reducing energy consumption. This approach supports environmental sustainability by minimizing HVAC-related emissions and demonstrates the potential of intelligent, personalized climate control systems in next-generation vehicles. Overall, the study highlights the critical role of user behavior modeling, scenario-specific optimization, and CFD-based validation in developing energy-efficient, comfort-oriented automotive HVAC solutions.

Keywords: HVAC, Optimization, CFD, Thermal Comfort, Energy Saving, KANO Method

[1] Sanal Analizler Teknik Uzman, Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Güç Sistemleri Müdürlüğü, Orcıd: 0009-0007-9074-0959
[2] Hvac Tasarım Mühendisi, Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Güç Sistemleri Müdürlüğü, Orcıd: 0000-0002-5384-9812

Giriş

Günümüzde bireyler, günlük yaşamlarının önemli bir kısmını taşıma araçlarında geçirmekte olup, bu sürenin araç içi konforla doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir. (Fanger, 1970: 12; Macpherson, 1962: 154). Araştırmalara göre, bireyler günlerinin yaklaşık %7'sini taşıma araçlarında geçirmekte, bu da konforun kullanıcı memnuniyeti ve sürüş güvenliği açısından kritik bir unsur haline gelmesine neden olmaktadır. (Lan vd., 2008: 330). Özellikle otomobillerde kullanılan klima sistemleri, yüksek enerji tüketimleri nedeniyle çevresel etkiler açısından önemli bir sorun teşkil etmektedir. (Weng ve Kau, 2012: 148). Bu durum, fosil yakıt kullanımını artırarak karbon emisyonlarının yükselmesine ve dolayısıyla iklim değişikliğinin derinleşmesine katkı sağlamaktadır. (Zhou vd., 2017, paragraf 2).

Karayolu taşımacılığından kaynaklanan emisyonların toplam hava kirleticilerinin %30-40'ını oluşturduğu raporlanmıştır. (Yu vd., 2023, paragraf 4). Bu bağlamda, düşük enerji tüketimi ve düşük karbon salımı sağlayan araç teknolojilerinin geliştirilmesi sürdürülebilir ulaşım açısından büyük önem arz etmektedir. (Park vd., 2018: 1085). Bu gereksinim doğrultusunda, özellikle yüksek enerji tüketen HVAC (Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme) sistemlerinin akıllı kontrol stratejileri ile optimize edilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. (Liu vd., 2020: 110368).

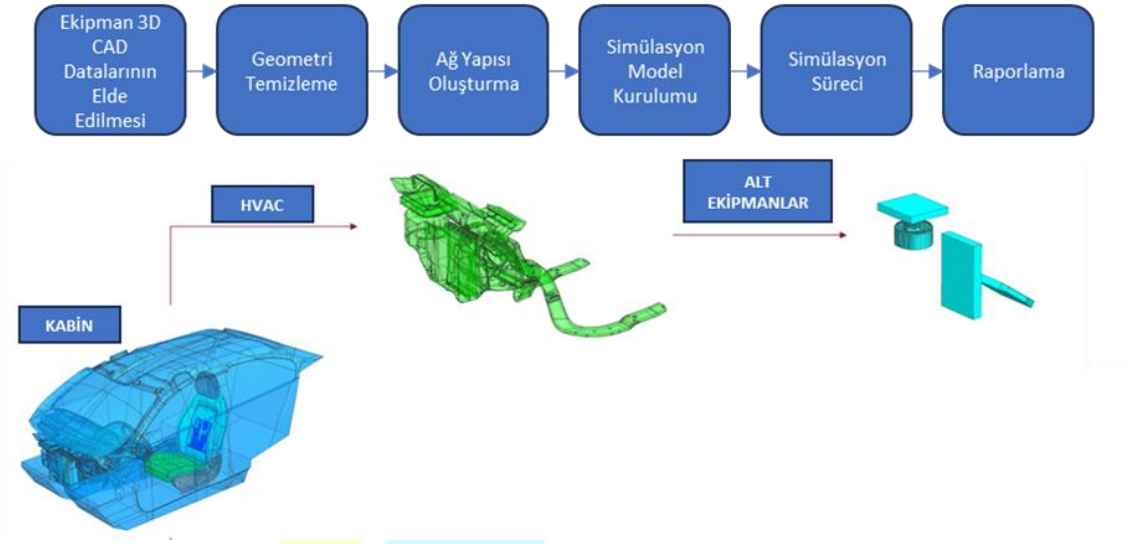
HVAC sistemleri yalnızca konfor sağlamakla kalmayıp, sürüş güvenliğini de doğrudan etkilemektedir. Literatürde, araç içi termal konforsuzluğun sürücü dikkatini olumsuz etkilediği ve potansiyel riskler doğurduğu belirtilmektedir. (Aroussi, 2000: 6).Isıl konfor, insan vücudunun çevresiyle olan ısı alışverişinin dengede olduğu bir durumu ifade ederken; (Fanger, 1970: 45), bu konforu etkileyen çevresel ve kişisel birçok faktör bulunmaktadır. (Macpherson, 1962: 155).

Bu çalışmada, farklı kullanıcı profillerine yönelik yerel konfor bölgeleri oluşturularak HVAC sistem parametrelerinin enerji verimliliği ve konfor açısından optimize edilmesi hedeflenmiştir. (Park vd., 2018: 1085). KANO analizi ile kullanıcı beklentileri değerlendirilmiş, ardından Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemleriyle kullanıcıya özel iklimlendirme senaryoları geliştirilmiştir. Elde edilen bulgular, klasik HVAC kontrol stratejilerinin yetersizliğine dikkat çekmekte ve kişiselleştirilmiş, akıllı sistemlerin gerekliliğini ortaya koymaktadır. (Liu vd., 2020: 110368).

Yöntem

Sayısal model oluşturma sürecinin ilk adımında, CAD tasarımı analiz gereksinimlerine uygun şekilde hazırlanmıştır (Mazzei vd., 2005: 350). Geometri, malzeme özellikleri ve kullanıcıya ait fiziksel parametreler detaylı olarak değerlendirilmiş; doğru veri aktarımı için modelleme süreci titizlikle yürütülmüştür (Tian vd., 2021: 108026). Modelleme iki aşamada gerçekleştirilmiştir: İlk olarak HVAC ünitesi ayrı modellenerek menfez çıkış hızları hesaplanmış, ardından araç kabin modeli oluşturularak gereksiz geometrik detaylar

temizlenmiştir. Bu yaklaşım, simülasyon doğruluğu ve çözüm kararlılığı açısından kritik önem taşımaktadır.



Şekil 1: *3D Data Temizleme ve Model Oluşturma Şeması*

Bu çalışmada sayısal analizler, STAR-CCM+ yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Unigraphics NX ortamında hazırlanan HVAC ünitesi ve kabin modülüne ait CAD modelleri, giriş-çıkış bölgeleri tanımlanarak yazılıma aktarılmıştır. Kabin içindeki diğer bileşenler katı geometri olarak bırakılmış, ardından iç akış analizleri için kabin iç hacmi oluşturularak modelleme süreci tamamlanmıştır.

Modelleme ve Simülasyon Kurulumu

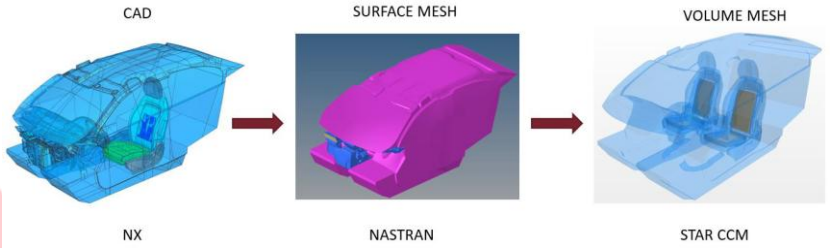
HAD hesaplamalarında kullanılan kabin, gerçek araç ölçüleri referans alınarak üç boyutlu olarak modellenmiştir. Hava kanalı analizlerinde çıkışlardaki hacimsel debi ve akış durumu dikkate alınmış; havanın sıkıştırılabilirliği, viskozitesi ve termal iletkenliği ihmal edilmiştir. Bu nedenle akışkan modeli sıkıştırılamaz ve ideal gaz kabul edilmiştir.

Akışkan modeli sıkıştırılamaz, gaz-viskoz, adyabatik bir akışkan olduğu için türbülanslı kinetik enerjiye ve difüzyon hızına yarı deneysel formül olan standart K-Epsilon modeli seçilmiştir. (Welty vd., 2008: 220).

Tablo 1 *– Kabin–HVAC CFD Modeli için Ağ Yapısı ve Fiziksel Model Kurulum Parametreleri*

Kategori	Parametre	Değer
Yüzey Ağı	Kritik yüzeyler (HVAC, kanallar, kabin)	Min: 0,8 – 10 / Hedef: 1 – 20
Ağ Yapısı	Tet/Poly yoğunluğu	0,9 – 1,1
	Prism katman sayısı / kalınlığı	5 / 3
	Başlangıç prism kalınlığı	0,3
Akış Modeli	Akış tipi / yoğunluk	Gaz / Sabit
Türbülans	Model	RANS – Gerçekleştirilebilir K-ε
Hareket	Fan modeli	RBM
Ek Özellik	Gözenekli bölgeler	Poroz yapı

Hesaplamalarda, insan vücudu ile çevresi arasındaki ısı ve kütle transferini incelemek amacıyla gerçek insan ölçülerine sahip, 100 W ısı üreten bir sanal manken modeli kullanılmıştır (Liu vd., 2020: 110368). Bu model sayesinde kabin içi ısı transferi ve termal konfor daha gerçekçi analiz edilmiştir. CFD analizleri süreklilik, momentum ve enerji denklemleriyle gerçekleştirilmiş; düzensiz geometri nedeniyle tetrahedral ağ yapısı tercih edilmiştir. Modelde toplam 32.841.430 eleman kullanılmıştır.



Şekil 2: *Kabin Modelleme Süreci (Tasarım-Yüzey ve Hacim Ağ Yapısı Oluşturma)*

Isı Akış Denklemleri

Bu çalışmada gerçekleştirilen CFD analizleri, kütle, momentum ve enerji korunumu denklemlerine dayanmaktadır.

Kütle korunumu (Süreklilik):

$$\partial t \partial \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$

Momentum korunumu (Navier–Stokes):

$$\partial t \partial (\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g$$

Enerji korunumu:

$$\partial t \partial (\rho E) + \nabla \cdot (u(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi$$

Burada ρ yoğunluk, $\vec{\mathbf{u}}$ hız vektörü, p basınç, τ viskoz gerilme tensörü, E toplam enerji ve k ısı iletkenliğini ifade etmektedir.

İletim Yoluyla Isı Kaybı

İnsan vücudunda iletim yoluyla ısı transferi, vücut dokuları ve cilt arasındaki doğrudan temasla gerçekleşir. Bu süreç, biyolojik iletkenlik katsayısı ($h_{(}$BL$_{)}$), deri yüzey alanı (A) ve sıcaklık farkına bağlı olarak modellenmiştir. Kanın özgül ısısı 4.145 J/kg·K ve yoğunluğu 1.010 kg/m³ olarak alınmıştır.

$$Q_{cond}=h_{BL}\cdot A\cdot(T_{body}-T_{skin})$$

Konveksiyon Yoluyla Isı Kaybı

Cilt veya giysi yüzeyinden ortama konveksiyon yoluyla gerçekleşen ısı kaybı aşağıdaki ifade ile tanımlanmıştır:

$$Q_{conv}=h_{CV}\cdot f\cdot A\cdot\Delta T$$

Burada $h_{(}$CV$_{)}$ konvektif ısı transfer katsayısı, f etkin yüzey alanı oranı ve ΔT sıcaklık farkıdır.

Radyasyon Yoluyla Isı Kaybı

Radyasyonla ısı kaybı, Stefan–Boltzmann yasasına göre aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$Q_{rad} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{env}^4)$$

Burada ε emisyon katsayısı ve σ Stefan–Boltzmann sabitidir.

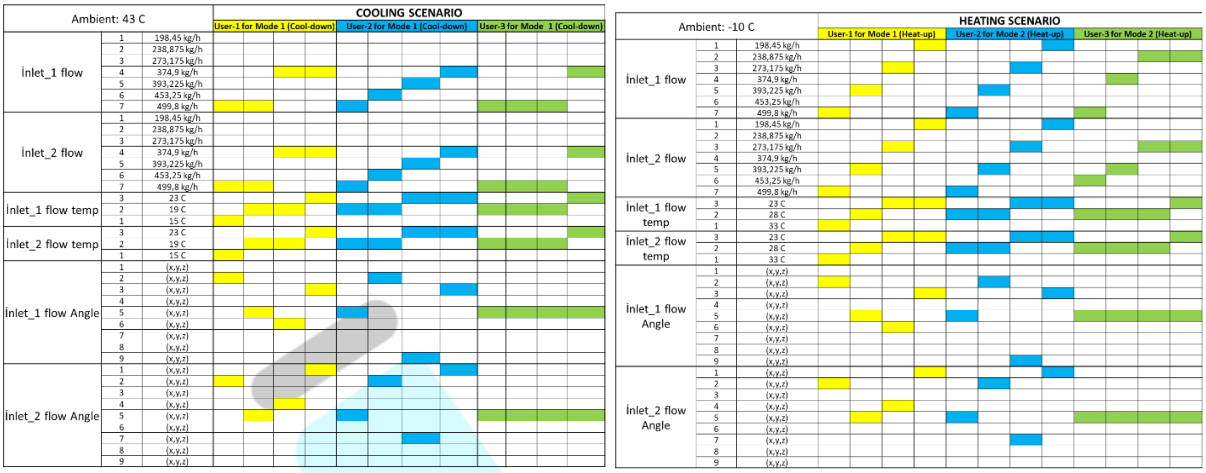
Ağ Yapısından Bağımsızlık Çalışması

CFD benzetimlerinde sonuçların güvenilirliği için çözüm yakınsaması residual analizleri ve fiziksel parametre takibi ile değerlendirildi. Yaklaşık 500 iterasyon sonunda tüm denklemler için artık değerler sabit ve düşük seviyelere ulaştı, böylece çözümün kararlı olduğu doğrulandı. Ağ yapısı (mesh) çarpıklık, yüzey düzgünlüğü, hacim oranları ve eleman şekil kriterleri açısından incelendi. Yüksek kaliteli ağlar ile farklı tasarım ve sınır şartları altında çözümler karşılaştırıldı; karakteristik sıcaklık noktaları izlenerek fiziksel yakınsama teyit edildi.

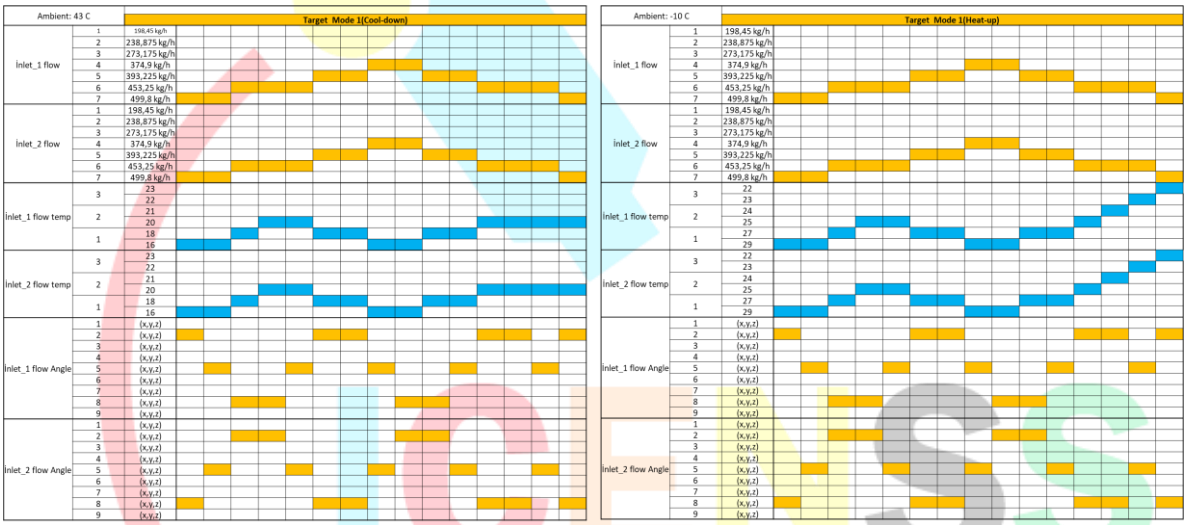
Kano Çalışması

Araç içi ısıl konfor, sürüş güvenliği ve uzun yolculuklarda kritik bir parametredir. Kullanıcı deneyimleri doğrultusunda akıllı HVAC sistemlerinin performansı KANO modeli ile analiz edildi. Model, kullanıcı beklentilerini temel ve performans kriterleri olarak sınıflandırdı. Temel kriterler kabin sıcaklığının belirlenen sınırlar içinde tutulmasını, performans kriterleri hedef sıcaklığa ulaşma süresi, enerji verimliliği ve sıcaklık stabilizasyonunu içerdi. Heat-up ve cool-down senaryoları için veri toplama ve sistem tepki süresi analizleri gerçekleştirildi; sonuçlar hedef kullanıcı senaryoları olarak HVAC optimizasyon çalışmalarında kullanıldı.

Tablo 2. *Cool-down ve Heat-up Kullanıcı Senaryoları*

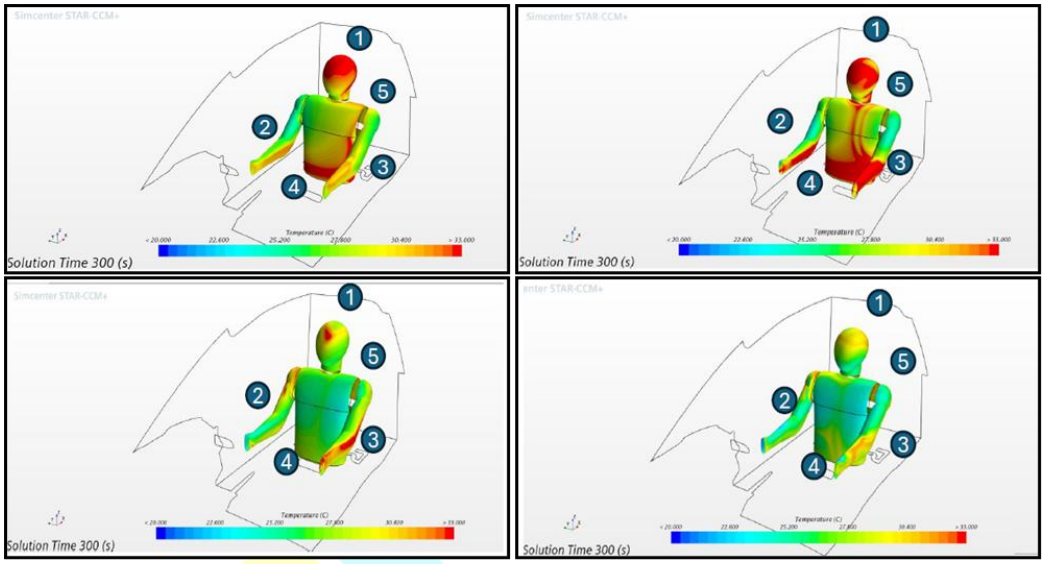


Tablo 3. *Cool-Down ve Heat-up Hedef Kullanıcı Senaryoları*

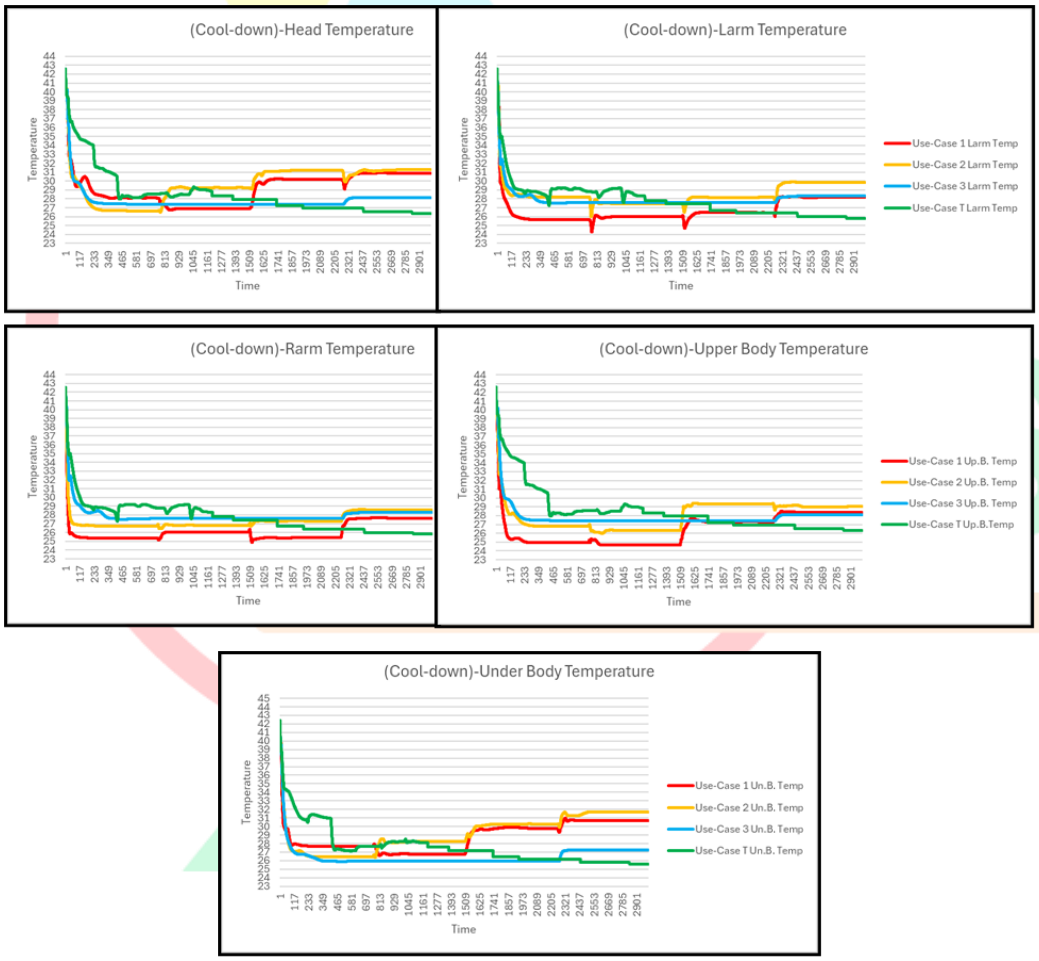


Cool-down ve Heat-up Senaryolarında Sürücü Vücut Bölümlerine Göre Simülasyon Sonuçları

Akıllı klima sisteminin Cool-down senaryolarında sürücünün baş, göğüs, sağ kol ve sol kol bölgeleri analiz edilmiştir. CD1, CD2 ve CD3 senaryolarında tüm bölgelerde sıcaklıkların HEDEF CD değerlerinin üzerinde kaldığı belirlenmiştir. En yüksek fark baş bölgesinde CD2 senaryosunda %15.77, ikinci en yüksek fark ise sol kol bölgesinde %13.56 olarak ölçülmüştür. Göğüs bölgesinde farklar %10–13, sağ kol bölgesinde ise %9–11 arasında değişmiştir. Sonuçlar, özellikle baş ve sol kol bölgelerinde mevcut soğutma stratejilerinin termal konfor için yetersiz kaldığını göstermektedir.



Şekil 5. *User 1-2-3-T Zamana Bağlı Cool-down Vücut Sıcaklık Düşüş Değerleri*

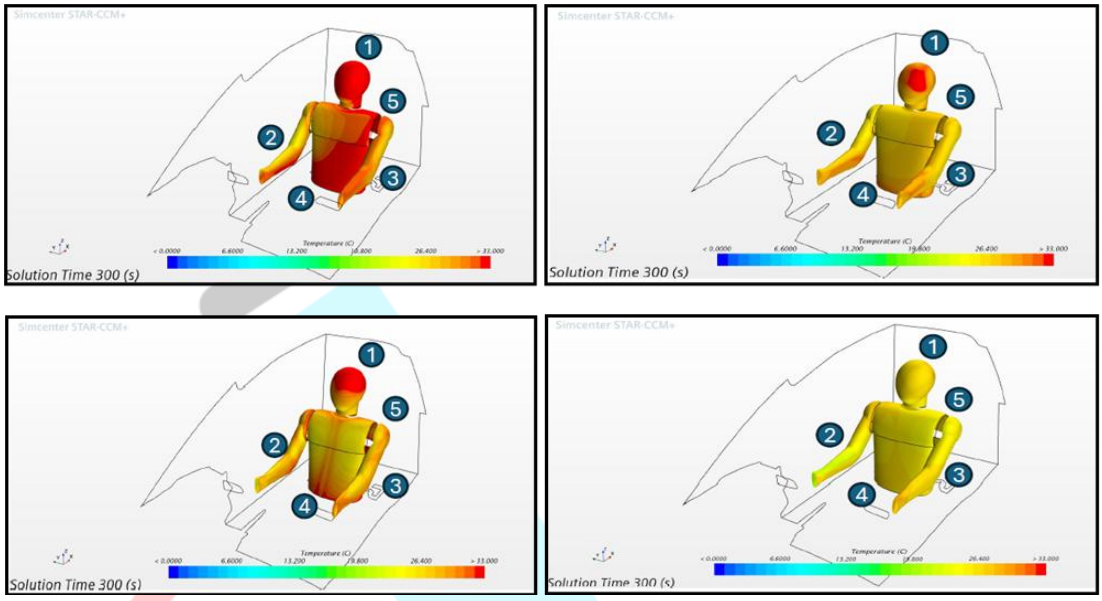


Şekil 6. *User 1-2-3-T Zamana Bağlı Cool-down Vücut Sıcaklık Düşüş Değerleri*

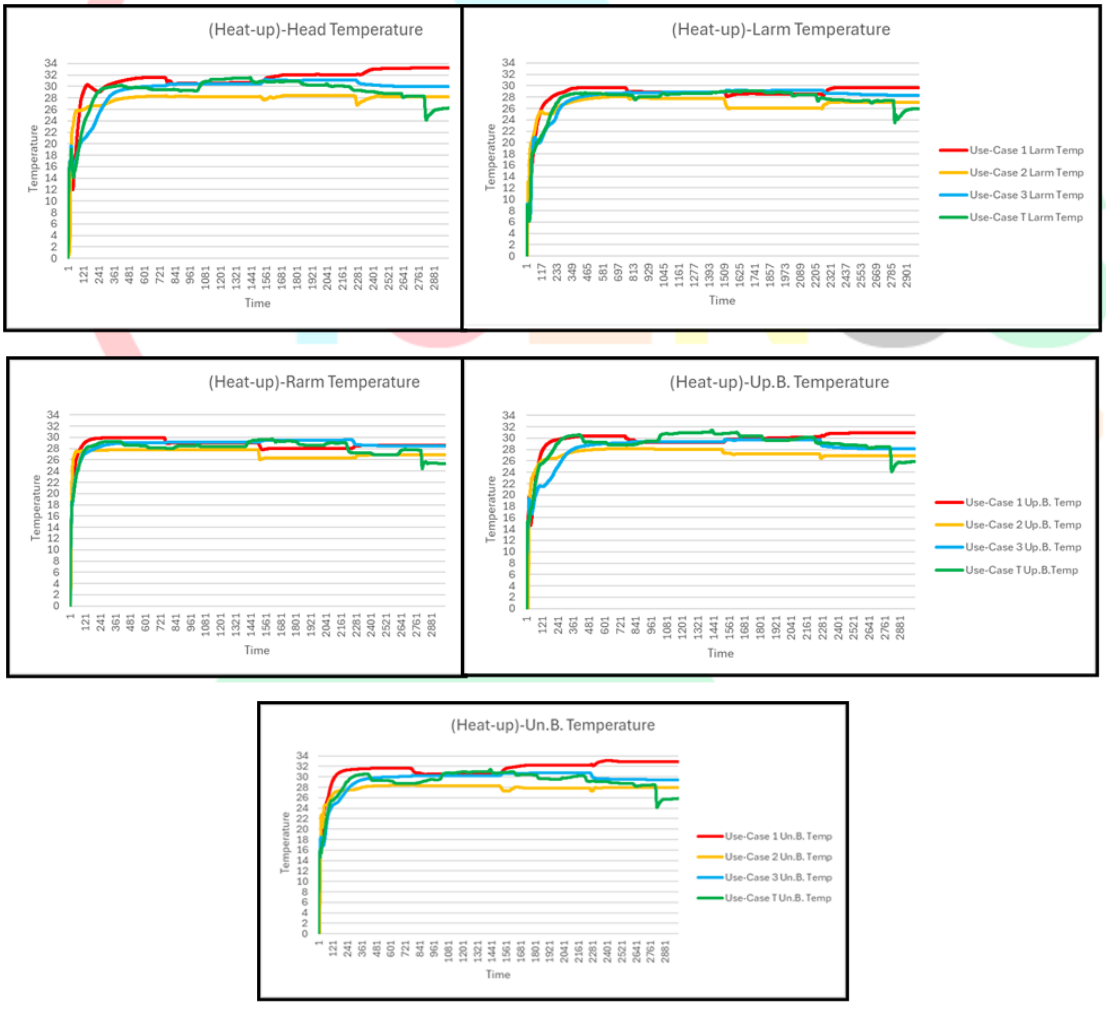
Heat-up Sürücü Vücut Bölümlerine Göre Simülasyon Sonuçları

Akıllı klima sisteminin Heat-up senaryolarında sürücünün baş, göğüs, sağ kol ve sol kol bölgelerindeki sıcaklık değişimleri analiz edilmiştir. HU1, HU2 ve HU3 senaryolarında tüm bölgelerde sıcaklıkların HEDEF HU değerlerinin üzerinde olduğu belirlenmiştir. En yüksek fark baş bölgesinde HU1 senaryosunda %21, en düşük fark ise sol kol bölgesinde HU2

senaryosunda %4.34 olarak hesaplanmıştır. Bulgular, özellikle baş ve göğüs bölgelerinde aşırı ısınma eğilimi olduğunu ve termal konfor için daha hassas sıcaklık kontrolüne ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.



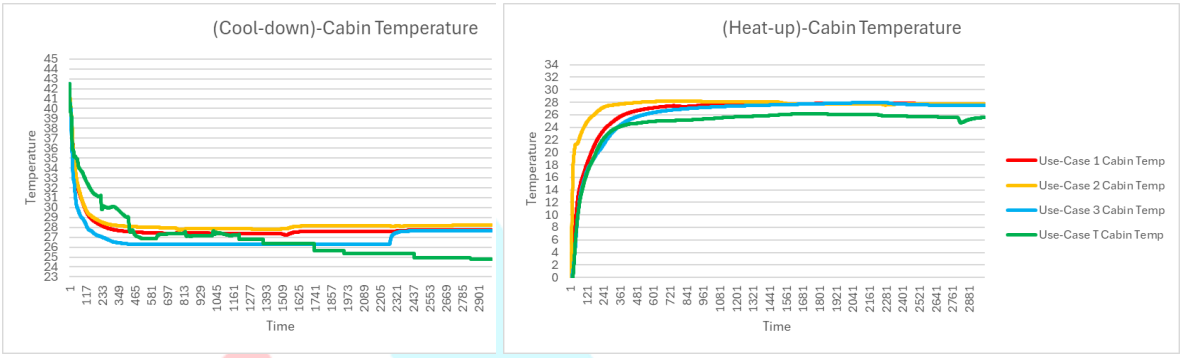
Şekil 7. *User 1-2-3-T Zamana Bağlı Heat-up Vücut Sıcaklık Artış Değerleri*



Şekil 8. *User 1-2-3-T Zamana Bağlı Heat-up Vücut Sıcaklık Artış Değerleri*

Genel Değerlendirme

Her iki senaryoda da akıllı klima sistemlerinin, geleneksel sistemlere göre bölgesel sıcaklık kontrolünü daha hassas sağladığı görülmüştür. Ancak özellikle baş ve üst ekstremite bölgelerinde bazı konfor sapmaları tespit edilmiştir. Nilson Chart konfor analizleri, akıllı HVAC sistemlerinin kullanıcıya özel konfor sağlamada daha başarılı olduğunu göstermekte; bölgesel kontrol ve adaptif sıcaklık yönetiminin gelecekteki sistem optimizasyonlarında önemli rol oynayacağını ortaya koymaktadır.

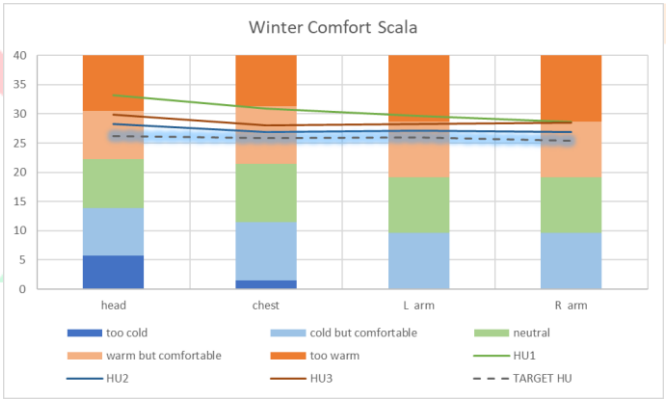


Şekil 9. *User 1-2-3-T Zamana Bağlı Cool-Down-Heat-up Vücut Sıcaklık Düşüş Değerleri Kıyaslama*

Sonuçlar ve tartışma

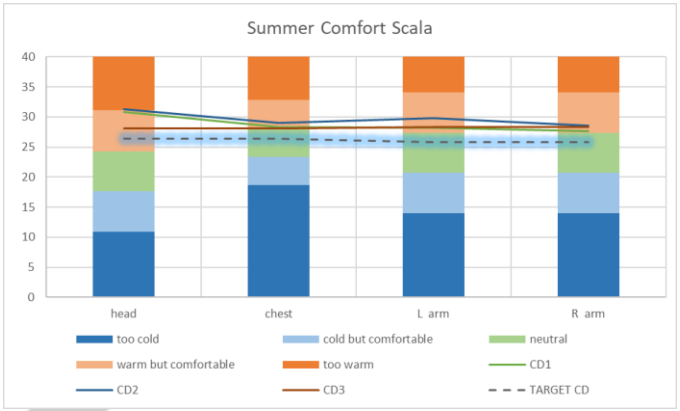
Bu çalışmada, baş, göğüs, sağ kol ve sol kol bölgelerindeki sıcaklıklar Heat-up (HU) ve Cool-down (CD) senaryoları altında analiz edilmiştir. Sıcaklıklar "Çok Soğuk", "Soğuk ama Rahat", "Nötr", "Sıcak ama Rahat" ve "Çok Sıcak" kategorileriyle sınıflandırılmıştır. Sonuçlar, HU1–HU3 ve CD1–CD3 senaryolarında tüm bölgelerde sıcaklıkların HEDEF HU ve HEDEF CD değerlerinin üzerinde olduğunu göstermektedir.

Heat-up senaryosunda sıcaklık farkları HEDEF HU'ya göre %3.9–%21 aralığında değişmiştir. En yüksek fark baş bölgesinde HU1 senaryosunda %21, en düşük fark ise sol kol bölgesinde HU2 senaryosunda %4.34 olarak belirlenmiştir.



Şekil 10. *User 1-2-3-T Nilson Chart Konfor Alan Grafiğine Göre Use-Case Konfor Kıyaslamaları (Heat-up)*

Cool-down senaryosunda ise, baş, göğüs, sağ kol ve sol kol bölgelerinde, sıcaklık seviyeleri HEDEF CD'nin üzerinde kalmaya devam etmektedir. Bu senaryoda da HEDEF CD'ye yaklaşan en yüksek farklar, baş bölgesinde CD2 için %15.77, sol kol bölgesinde ise CD2 için %13.56 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 11. *User 1-2-3-T Nilson Chart Konfor Alan Grafiğine Göre Use-Case Konfor Kıyaslamaları (Cool-down)*

Her iki senaryoda da HEDEF HU ve HEDEF CD değerleri, vücut bölgelerinde termal konfor aralığına daha yakın sıcaklık seviyeleri sağlamıştır. Sonuçlar, ısıtma ve soğutma senaryolarında hedeflenen konfor seviyelerinin büyük ölçüde sağlandığını ve optimize edilmiş sıcaklık yönetimi stratejilerinin kullanıcı konforunu artırabileceğini göstermektedir.

KAYNAKÇA

Aroussi, A. (2000). *Thermal comfort issues in vehicle cabins*. SAE Technical Paper 2000-01-3516.

Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. McGraw-Hill.

Lan, L., Lian, Z., & Pan, L. (2008). The effects of air temperature on office workers' well-being, workload and productivity—evaluated with subjective ratings. *Applied Ergonomics*, 39(3), 329–336.

Liu, Y., Xu, Y., Zhang, H., & Li, Z. (2020). CFD-based evaluation of personalized climate control systems in vehicle cabins. *Energy and Buildings*, 226, 110368.

Macpherson, R. K. (1962). The assessment of the thermal environment: A review. *British Journal of Industrial Medicine*, 19(3), 151–164.

Mazzei, D., Cattanei, A., & Piuzzi, E. (2005). CFD modelling for thermal comfort evaluation in vehicles. *International Journal of Vehicle Design*, 37(4), 348–360.

Park, J., Lee, B., & Kim, H. (2018). Personalized air-conditioning system for vehicle passengers based on user preferences. *International Journal of Automotive Technology*, 19(6), 1083–1090.

Tian, Y., Zhang, Y., & Chen, C. (2021). Investigation of local thermal comfort and energy saving by a CFD simulation of a personalized HVAC system in electric vehicles. *Building and Environment*, 202, 108026.

Weng, C. I., & Kau, C. M. (2012). Study on performance and environmental impact of automotive air-conditioning system. *Energy Conversion and Management*, 64, 147–153.

Welty, J., Rorrer, G. L., & Foster, D. G. (2008). *Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer*. John Wiley & Sons.

Yu, C., Zhou, M., & Zhang, X. (2023). Intelligent HVAC control strategies for electric vehicles based on real-time thermal comfort prediction. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119588.

Zhou, F., Du, J., & Yang, Z. (2017). Energy-saving strategies for electric vehicle air conditioning systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 784–796.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Integrated Interior Trim Mounting and Curtain Airbag Guidance için Çok Fonksiyonlu Bir Ramp Braketinin Tasarımı

Berkay ORCAN[1]
Orhun BOSTAN[2]

Abstract

Automotive interior trim components not only fulfill aesthetic and comfort requirements but also play a critical role in ensuring the safe and controlled deployment of curtain airbag systems. In conventional designs, ramp brackets responsible for guiding airbag deployment and trim support brackets used for mounting interior components to the vehicle body are designed and manufactured separately. This approach increases part count, labor costs, and assembly complexity. In this study, a multi-functional bracket design is proposed, integrating both airbag guidance and trim mounting functions into a single component. The design is optimized by incorporating surfaces that effectively control the deployment direction of the curtain airbag along with robust interfaces for secure trim attachment. As a result, the number of parts and fasteners is reduced, labor costs are minimized, and assembly processes are simplified. In addition, tolerance management is improved, packaging efficiency is enhanced, and the overall manufacturing process is streamlined. In practical application, the proposed multi-functional bracket ensures the mechanical stability of interior trim components while supporting the safe deployment of curtain airbag systems. The design provides functional integration in automotive interior and safety systems, delivering significant benefits in terms of manufacturing efficiency and cost reduction. This approach also facilitates engineering validation during the design phase, reducing overall development time. The single-component solution minimizes assembly errors while improving system reliability and enabling more stable results in mass production. Additionally, it provides faster adaptation to different vehicle programs, increasing flexibility in product development processes.

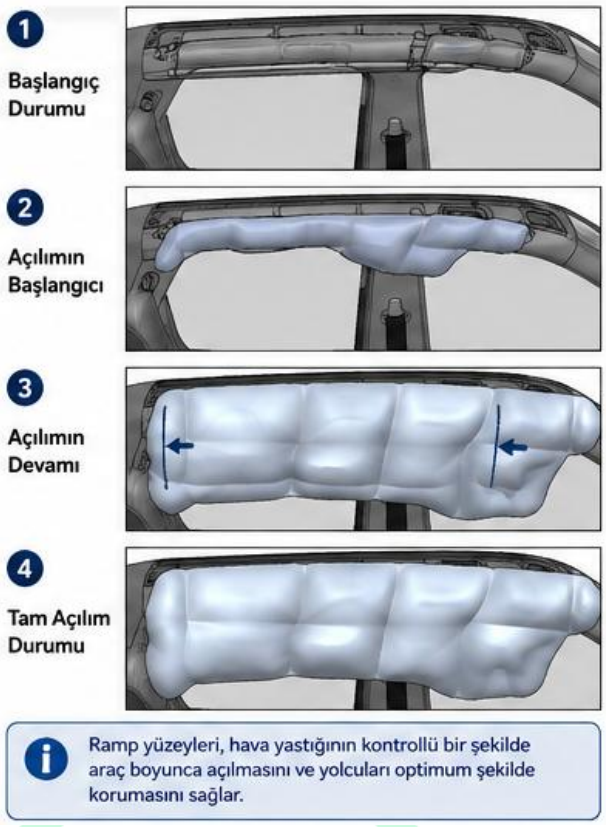
Keywords: Curtain airbag, Ramp bracket, Trim support, Interior trim, multi-functional bracket

[1] Engineering Designer, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş Ar-Ge Merkezi, Bursa, Türkiye, 0009-0008-1742-034X
[2] Engineering Designer, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş Ar-Ge Merkezi, Bursa, Türkiye, 0009-0006-4374-7296

GİRİŞ

Otomotiv sektöründe ürün geliştirme faaliyetleri, araç güvenliğini artırırken aynı zamanda maliyetleri azaltma ve üretim süreçlerini sadeleştirme hedefleri doğrultusunda yürütülmektedir. Özellikle iç trim sistemleri, kullanıcı algısı açısından estetik ve kalite beklentilerini karşılamanın yanı sıra aktif ve pasif güvenlik sistemleri ile uyumlu şekilde çalışmalıdır (Bosch, 2014: 890-895).

Perde hava yastığı sistemleri, yan darbe ve devrilme senaryolarında yolcuların baş bölgesini korumak amacıyla geliştirilmiştir. Bu sistemlerin etkinliği, hava yastığının belirlenen zaman içinde ve öngörülen geometri boyunca açılmasına bağlıdır. Açılım sırasında hava yastığının iç trim parçalarına takılmadan kontrollü biçimde yönlendirilmesi gerekir. Bu nedenle C ve D direklerinde kullanılan ramp braketleri kritik güvenlik bileşenleri olarak kabul edilir (National Highway Traffic Safety Administration [NHTSA], 2011a: 12-15; Autoliv, 2020: 8-12).



***Şekil 1**- Perde Hava Yastığı Açılım Prensibi*

Geleneksel araç tasarımlarında ramp braketler ile trim support bileşenleri ayrı parçalar olarak kullanılır. Ramp bracket, hava yastığını yönlendirme görevini üstlenirken; trim support, pillar trim veya diğer iç trim bileşenlerinin araç gövdesine sabitlenmesini sağlar. Ayrı tasarlanan bu parçalar, ilave bağlantı elemanları, ek montaj operasyonları ve daha karmaşık tolerans zincirleri oluşturur (Bosch, 2014: 902-905). Fonksiyon entegrasyonu yaklaşımı, farklı görevleri tek bir bileşende birleştirerek ürün mimarisini sadeleştirmeyi amaçlar. Bu yaklaşım, otomotiv mühendisliğinde parça sayısının azaltılması, ağırlık optimizasyonu ve maliyet düşürme çalışmaları için yaygın olarak kullanılmaktadır (Ulrich ve Eppinger, 2016: 189).

Bu çalışmanın amacı, perde hava yastığı açılımını yönlendirme ve iç trim montajı işlevlerini tek bir plastik braket içinde birleştiren yenilikçi bir tasarım konsepti geliştirmek ve bu konseptin teknik ve üretimsel avantajlarını değerlendirmektir.

YÖNTEM

Bu çalışma, otomotiv ürün geliştirme süreçlerinde yaygın olarak kullanılan sistematik bir mühendislik yaklaşımı doğrultusunda yürütülmüştür. İlk aşamada, mevcut araç mimarisinde kullanılan ayrı ramp bracket ve trim support bileşenleri detaylı olarak incelenerek bu parçaların araç içindeki konumları, görevleri ve montaj yöntemleri değerlendirilmiştir. Ardından her iki bileşenin fonksiyonları analiz edilerek ortak yapısal ve geometrik gereksinimler belirlenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda Siemens NX ortamında konsept tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiş ve perde hava yastığının kontrollü açılımını sağlayan yönlendirme yüzeyleri ile iç trim montaj özellikleri tek bir bileşen içerisinde birleştirilmiştir.

Geliştirilen tasarım; tolerans zinciri, paketleme kısıtları, üretilebilirlik ve montaj uygunluğu açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca güvenlik performansı, yapısal dayanım ve enjeksiyon kalıplama gereksinimleri dikkate alınarak teknik analizler yapılmıştır. Son aşamada ise önerilen çok fonksiyonlu braket tasarımı, geleneksel iki parçalı sistem ile parça sayısı, montaj süresi, operasyon sayısı, kalite riski ve maliyet kriterleri açısından karşılaştırılarak elde edilen kazanımlar ortaya konmuştur.

Şekil 2- *Geleneksel Sistem Mimarisi*

1. Mevcut Sistem Analizi

Referans araç mimarisinde C direği bölgesinde iki ayrı plastik parça kullanılmaktadır:

- Ramp Bracket: Perde hava yastığının açılım yönünü belirler.
- Trim Support: İç trim parçasını gövde sacına sabitler.

Bu iki parça genellikle enjeksiyon kalıplama ile üretilmekte ve farklı snap-fit bağlantıları veya metal klipslerle araç gövdesine monte edilmektedir.

2. Fonksiyon Analizi

Her iki parçanın fonksiyonları incelenerek ortak yapısal gereksinimler belirlenmiştir.

2.1. Güvenlik Fonksiyonları

- Hava yastığı açılım yönünü kontrol etmek,
- Yeterli yüzey sürekliliği sağlayarak airbag kumaşının takılmasını önlemek.

Şekil 3- *Önerilen Çok fonksiyonlu Braket Tasarımı*

2.2. Yapısal Fonksiyonlar

- Trim yüklerini taşımak,
- Titreşim kaynaklı hareketleri sınırlamak,
- Snap-fit bağlantı geometrileri sağlamak.

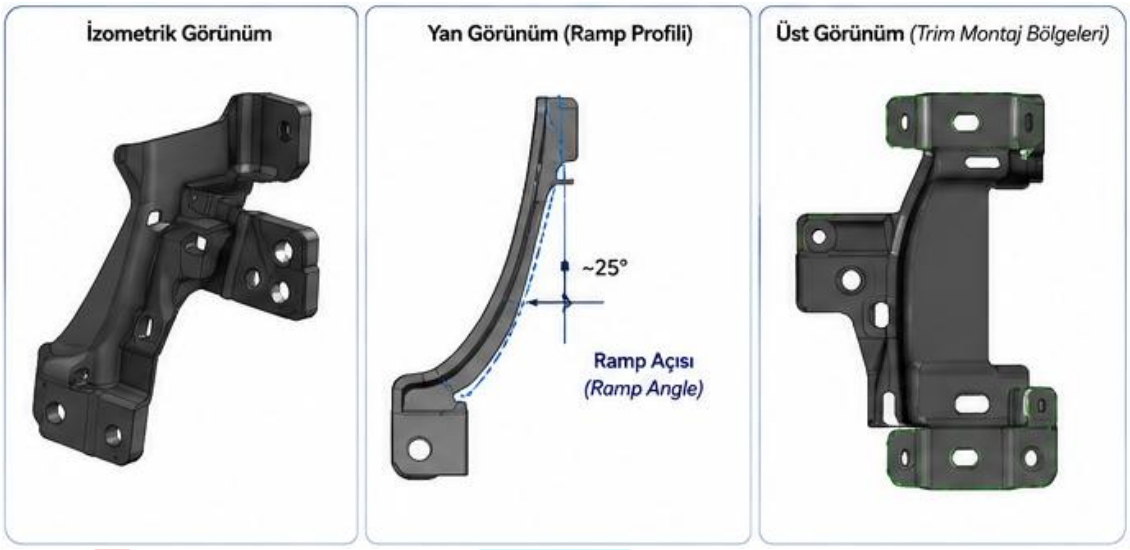
2.3. Üretim Fonksiyonları

- Enjeksiyon kalıplamaya uygun olmak,
- Kalıptan çıkış açılarını sağlamak,
- Minimum çarpılma davranışı göstermek.

3. CAD ve Tasarım Çalışmaları

Konsept tasarımı Siemens NX ortamında üç boyutlu olarak modellenmiştir. Tasarımda aşağıdaki kriterler dikkate alınmıştır:

- Airbag açılımına uygun sürekli ramp yüzeyi,
- Yüksek rijitlik için nervür yapıları,
- Trim bağlantı noktaları,
- Gövdeye snap-fit montaj detayları,
- Uygun et kalınlığı dağılımı.



Şekil 4- *Çok Fonksiyonlu Braket Detaylı Görünüşleri*

4. Güvenlik ve Üretilebilirlik Analizi

Geliştirilen çok fonksiyonlu braket tasarımı, hem güvenlik performansı hem de seri üretime uygunluk açısından detaylı olarak değerlendirilmiştir. Güvenlik analizinde, perde hava yastığının açılım sırasında braket yüzeyleri boyunca takılmadan ve gecikmeye neden olmadan kontrollü şekilde yönlendirilmesi temel kriter olarak ele alınmıştır. Bu doğrultuda, hava yastığı kumaşı ile temas eden tüm yüzeylerde keskin kenarlardan kaçınılmış, yeterli radyuslar tanımlanmış ve yüzey sürekliliği sağlanmıştır. Üretilebilirlik analizinde ise parçanın enjeksiyon kalıplama yöntemiyle ekonomik ve kararlı şekilde üretilebilmesi hedeflenmiştir. Et kalınlığı dağılımı, kalıptan çıkış açıları, nervür yerleşimi ve olası çarpılma riskleri değerlendirilerek tasarım optimize edilmiştir. Ayrıca snap-fit bağlantı geometrilerinin kalıp toleransları içinde güvenilir şekilde üretilebilir olması ve montaj sırasında hasar oluşturmadan çalışması dikkate alınmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda tasarımın hem perde hava yastığı sisteminin güvenlik gereksinimlerini karşıladığı hem de seri üretim koşullarına uygun olduğu belirlenmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

1. Fonksiyonel Kazanımlar

Çok fonksiyonlu braket tasarımı ile aşağıdaki kazanımlar elde edilmiştir:

- İki ayrı parçanın tek parçada birleştirilmesi,
- Bağlantı elemanı sayısının azaltılması,

- Montaj adımlarının sadeleştirilmesi,
- Tolerans birikiminin düşürülmesi,
- Kalite risklerinin azaltılması.

2. Maliyet ve Üretim Etkileri

Tek parçalı tasarımın etkileri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1*- Geleneksel ve Önerilen Tasarımın Karşılaştırılması*

Kriter	**Geleneksel Sistem**	**Önerilen Sistem**
Plastik parça sayısı	2	1
Bağlantı elemanı sayısı	2–4	1–2
Montaj operasyonu	2	1
Tolerans zinciri	Uzun	Kısa
Paketleme karmaşıklığı	Yüksek	Düşük
Hata olasılığı	Daha yüksek	Daha düşük
Lojistik maliyet	Daha yüksek	Daha düşük

3. Mühendislik Doğrulama Süreci

Parça sayısının azalması ile birlikte:

- CAD veri yönetimi sadeleşmiştir.
- DFMEA çalışmaları kolaylaşmıştır.
- DVP kapsamı optimize edilmiştir.
- Seri üretim onay süreçleri hızlanmıştır.

4. Farklı Araç Programlarına Uyarlanabilirlik

Parametrik tasarım yaklaşımı sayesinde montaj noktaları ve ramp açıları kolaylıkla güncellenebilmekte, böylece yeni araç programlarına daha kısa sürede uyum sağlanabilmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, perde hava yastığı açılımını yönlendiren ramp bracket ile iç trim montajını sağlayan trim support fonksiyonlarını tek bir bileşende birleştiren çok fonksiyonlu bir braket tasarımı geliştirilmiştir.

***Şekil 5**- Montaj Süresi Karşılaştırması*

Geliştirilen tasarım sayesinde:

- Parça sayısı azaltılmış,
- Bağlantı elemanı ihtiyacı düşürülmüş,
- Montaj süreci sadeleştirilmiş,
- Tolerans yönetimi iyileştirilmiş,
- NVH kaynaklı kalite riskleri azaltılmış,
- Üretim ve lojistik maliyetleri düşürülmüş,
- Mühendislik doğrulama süresi kısaltılmıştır.

Sonuç olarak önerilen çok fonksiyonlu braket tasarımı, otomotiv iç trim ve güvenlik sistemlerinde fonksiyon entegrasyonuna dayalı yenilikçi ve uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır. Bu yaklaşım, hem ürün geliştirme verimliliğini artırmakta hem de seri üretim süreçlerinde daha güvenilir ve ekonomik bir sistem mimarisi oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

Autoliv. (2020). *Curtain Airbag Systems: Technical Overview*. Stockholm, Sweden: Autoliv Inc.

Bosch, R. (2014). *Bosch Automotive Handbook* (9th ed.). Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg.

DuPont. (2019). *Engineering Polymers for Automotive Interior Applications*. Wilmington, DE: DuPont.

National Highway Traffic Safety Administration. (2011a). *Federal Motor Vehicle Safety Standards; Side Impact Protection (FMVSS No. 214)*. Washington, DC: U.S. Department of Transportation.

Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2016). *Product Design and Development* (6th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Architectural Implications of Multi Energy Platform Strategies for L5e Category Vehicles

Şaban KOÇ[1]
Özer ÖZDEMİR[2]

Abstract

L5e three wheeled vehicles are becoming increasingly relevant for urban passenger transport and small scale freight mobility because they combine compact dimensions, practical usability, and architectural efficiency. Under Regulation (EU) No 168/2013, the L5e category covers both passenger oriented and commercial tricycles, which makes it a suitable basis for shared platform development across different use cases. At the same time, the growing visibility of electric light vehicles in urban mobility and the continuing importance of two and three wheeled vehicles in many developing markets have increased the need for platform strategies that can accommodate more than one propulsion architecture.

This study investigates the geometric effects of managing battery electric vehicle and internal combustion engine derivatives on a common L5e platform. The analysis compares passenger and cargo oriented vehicle layouts and focuses on the interaction between rear propulsion package, energy storage location, rear axle architecture, wheelbase definition, ground clearance, cargo floor height, and passenger package efficiency. The findings show that the main challenge is not simply integrating different propulsion systems into one structure, but allocating limited vehicle volume among propulsion, energy storage, occupant package, cargo function, and clearance requirements. BEV derivatives can provide a more compact rear propulsion package, but battery placement creates strong constraints in occupant and cargo related zones. ICE derivatives require a larger and more sensitive rear module because of engine size, supporting systems, driveline arrangement, and service needs, while CNG based variants intensify competition for the same protected package areas. The study concludes that common platform feasibility in L5e vehicles must be addressed as an early geometry driven architecture problem, and that successful commonality depends on defining controlled common and derivative specific package zones from the concept stage.

Keywords: L5e, three wheeled vehicle, vehicle geometry, common platform, BEV and ICE integration

[1] Otomotiv Mühendisi, Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0006-2631-4552
[2] Makine Mühendisi, Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0000-0002-2695-2523

1.Introduction

1.1. L5e Vehicle Category and Urban Mobility Context

Under Regulation (EU) No 168/2013, category L5e covers powered tricycles, and the regulation distinguishes between L5e A tricycles and L5e B commercial tricycles. This distinction is especially relevant for shared platform studies because passenger oriented and cargo oriented derivatives are located within the same regulatory family while preserving different functional priorities (European Union, 2013, Annex I).

Three wheeled vehicles also remain important in urban mobility systems. GIZ reports that two and three wheelers account for close to 30 percent of total motorised vehicles worldwide, and that their share can range from 50 to 90 percent in many middle and low income cities. The same source highlights affordability, manoeuvrability, access, and urban transport relevance as key reasons for their persistence in everyday mobility and freight activity (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ], 2024: 4–5).

In Europe, light electric vehicles are becoming increasingly visible as part of the urban mobility ecosystem. ERTRAC notes that light electric vehicles in Europe are booming, that vehicle solutions are becoming more diverse, and that passenger transport use cases now include electric cargo cycles, e mopeds, and light three and four wheeled vehicles (ERTRAC, 2023: 4). In parallel, the European Commission links urban mobility directly to first and last mile passenger and freight connections and emphasises efficient zero emission urban logistics and lower emission urban transport pathways (European Commission, 2021: 2–4).

1.2. Problem definition

These developments create a strategic product development challenge. In some use cases, manufacturers may need battery electric derivatives. In others, conventional internal combustion engine derivatives remain necessary. In some markets, CNG fuelled combustion derivatives may also remain relevant. The resulting pressure for common platform development is clear. However, in L5e vehicles, commonality is far more geometry sensitive than in conventional four wheeled vehicles because available package volume is limited and the same zones are repeatedly claimed by propulsion hardware, energy storage, occupant packaging, cargo functionality, and clearance requirements.

Accordingly, the central research question of this paper is the following:

How does the coexistence of BEV and ICE derivatives on a common L5e platform reshape vehicle geometry in passenger and cargo applications?

The objective of the study is to identify the main geometry sensitive conflict zones generated by shared BEV and ICE platform development and to synthesise which architecture regions can remain common and which require controlled derivative specific treatment.

2. Literature Review

2.1. Regulatory and mobility background

The reviewed literature establishes three key background points. First, L5e vehicles are formally recognised in EU regulation as a class containing both passenger oriented and

commercial tricycles, which is directly relevant to multi derivative product strategies (European Union, 2013, Annex I). Second, two and three wheelers remain structurally important in many cities because they address affordability and accessibility in ways larger vehicles often cannot (GIZ, 2024: 4–5). Third, electrified light vehicles are becoming more significant in European passenger and logistics ecosystems as cities pursue lower emission and zero emission mobility strategies (ERTRAC, 2023: 4; European Commission, 2021: 2–4)

2.2. Research gap

However, the same literature is primarily regulatory, policy oriented, or roadmap oriented. It clarifies why L5e vehicles matter and why light electric vehicles are becoming more relevant, but it does not directly explain how shared BEV and ICE platforms generate geometric conflicts in under driver packaging, rear module definition, wheelbase, floor height, or cargo interface design. The gap addressed in this paper therefore lies at the intersection of vehicle architecture and multi energy platform strategy. Rather than asking whether compact light vehicles matter in urban mobility, this study asks how a common L5e platform can remain technically feasible when different propulsion systems compete for the same limited geometric envelope.

From a technical perspective, battery packaging has direct consequences for passenger compartment geometry, seat positioning, and floor definition in electric vehicle architectures. Nicoletti et al. showed that the traction battery and passenger compartment are geometrically interdependent because both compete for the same space between the axles, making early dimensional definition critical in concept development (Nicoletti et al., 2020: 39). In addition, battery topology studies demonstrate that battery shape and battery position influence seating height, passenger compartment layout, and the relationship between interior floor and ground limits (Nicoletti et al., 2021: 457–467). Standardisation studies also indicate that battery envelope definition is constrained by available packaging space and by the geometric relationship between the front and rear axle regions, reinforcing the need for architecture level decisions early in platform development (Sankaran & Venkatesan, 2021).

Nevertheless, these studies mainly address battery related geometric constraints in electric vehicle concepts and do not directly examine how shared BEV and ICE platforms generate architecture level conflicts in L5e passenger and cargo derivatives. Therefore, the present study focuses specifically on the geometry defining effects of common multi energy platform development in L5e vehicles.

3. Method

3.1. Comparative architectural assessment approach

This study adopts a concept level comparative architectural assessment. The aim is not to optimise a single vehicle numerically, but to interpret how different propulsion systems reshape the geometric framework of a shared L5e platform. Two functional derivatives are evaluated within the same platform family:

A passenger oriented derivative aligned with the functional logic of L5e A

A cargo oriented derivative aligned with the functional logic of L5e B

Three propulsion cases are considered within this framework:

Battery electric vehicle

Conventional internal combustion engine

CNG fuelled internal combustion engine

Two functional derivatives are evaluated within the same platform family: a passenger oriented derivative aligned with the functional logic of L5e A, and a cargo oriented derivative aligned with the functional logic of L5e B. Three propulsion cases are considered within this framework: battery electric vehicle, conventional internal combustion engine, and CNG fuelled internal combustion engine.

The assessment was conducted by comparing passenger and cargo derivative layouts against a common L5e reference platform architecture. Each propulsion case was evaluated in terms of its effect on rear propulsion package volume, under driver package demand, battery or tank location, rear axle architecture, wheelbase definition, ground clearance, cargo floor height, and passenger package efficiency. A package region was interpreted as a conflict zone when a change in propulsion architecture directly required changes in one or more of these geometry defining parameters.

In this context, common zones refer to architecture regions that can be preserved across derivatives without major geometric penalties, whereas derivative specific zones refer to regions that require controlled differentiation due to propulsion related package constraints.

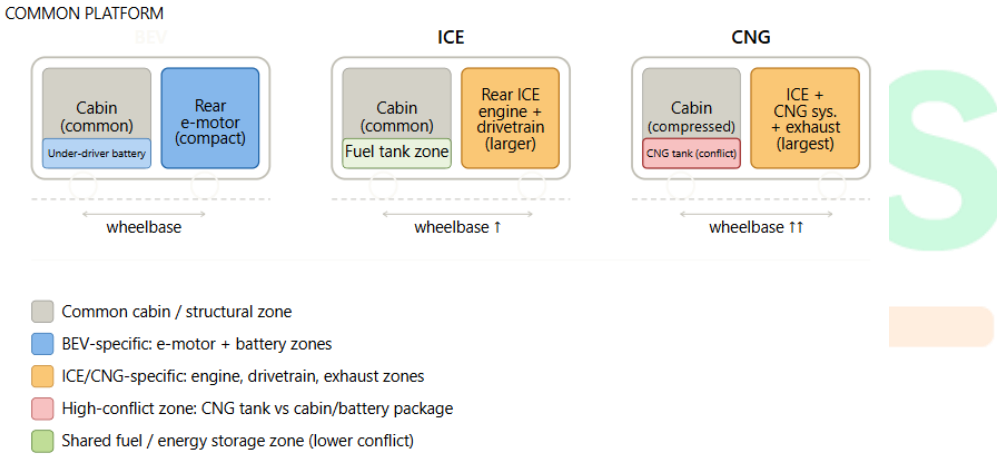


Figure 1. *Common L5e platform with BEV, ICE, and CNG derivative package zones*

3.2. Evaluation parameters

Three propulsion cases are considered: BEV, conventional ICE, and CNG fuelled ICE. CNG is treated as an extension of the combustion derivative because it preserves the same basic powertrain logic while adding competing fuel storage demand.

The evaluation parameters are:

Rear propulsion package volume

Under driver package demand

1. Battery and tank location alternatives

Rear axle architecture

Wheelbase definition

Ground clearance strategy

Cargo floor height

Passenger package efficiency

Common versus derivative specific package zones

The selection of these parameters is consistent with the literature showing that battery position, battery envelope, and passenger compartment dimensions are strongly coupled in compact electric vehicle architectures (Nicoletti et al., 2020: 39; Nicoletti et al., 2021: 457–467).

4. Findings

4.1. Geometric characteristics of BEV derivatives

Within the assessed concept logic, the BEV derivative creates a more compact rear propulsion package than the combustion derivative. The electric drive unit requires less local volume and fewer propulsion related subsystems in the rear module. This can reduce local mechanical complexity and support a simpler rear layout.

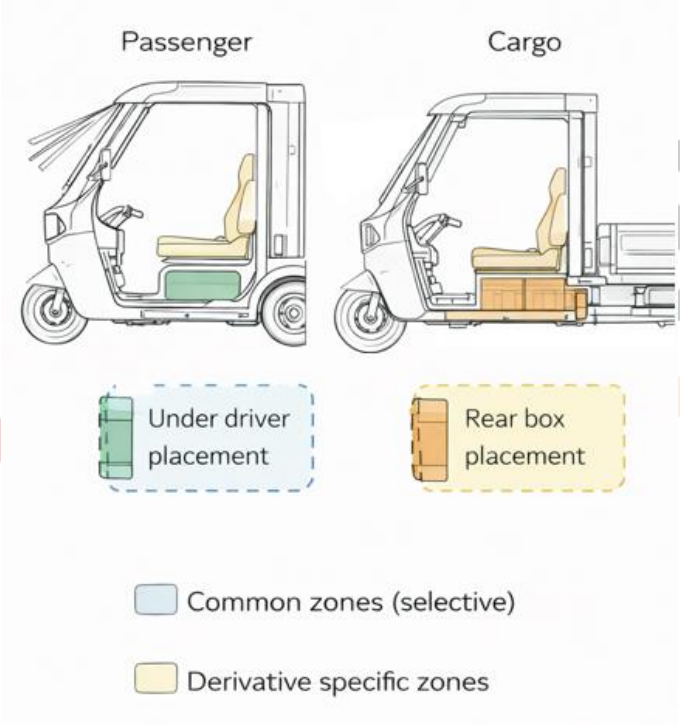


Figure 2. *BEV battery placement alternatives in passenger and cargo L5e derivatives*

However, the packaging gain created by the electric drive unit is partly offset by battery integration requirements. In cargo derivatives, battery placement below the load floor is comparatively manageable because that volume can be used with less direct penalty on occupant packaging. In passenger derivatives, the same volume becomes much more sensitive because battery placement directly affects seat base height, legroom, ingress conditions, and underbody clearance.

In passenger derivatives, two battery location strategies become especially relevant: the under driver region and the rear package region. The under driver region offers greater potential for commonality because it remains closer to the central architecture of both passenger and cargo vehicles. By contrast, rear battery placement may be locally feasible in passenger vehicles but becomes problematic in cargo vehicles because it interferes with load bed continuity and usable rear volume.

This interpretation is consistent with previous studies showing that battery position and battery form affect passenger compartment height, seat reference points, and floor configuration in battery electric vehicle concepts (Nicoletti et al., 2020: 39; Nicoletti et al., 2021: 457–467).

4.2. Geometric characteristics of ICE and CNG derivatives

For the ICE derivative, the rear region emerges as the most compatible installation zone within the L5e architecture. Engine size, transmission layout, cooling demand, exhaust routing, supporting structure, and service needs all converge in that zone. Compared with the BEV case, the combustion package occupies greater longitudinal and vertical volume and creates stronger local constraints.

These constraints also affect rear axle selection. A rear layout that may remain sufficiently simple in a BEV derivative becomes less compatible with an ICE derivative because engine mass, vibration isolation, and half shaft geometry introduce additional requirements. As a result, the combustion derivative tends to require a more complex rear suspension and driveline arrangement.

The cargo derivative is especially sensitive to this condition. As the rear combustion module grows in height and length, the cargo floor tends to rise in order to preserve package clearance, component protection, and service access. In practical terms, the propulsion solution begins to redefine the loading geometry of the vehicle.

CNG based derivatives intensify the same conflict because the tank competes for the limited protected volume that could otherwise be claimed by battery packaging, occupant package expansion, or cargo related structure. In other words, the platform conflict is not only between electric and combustion propulsion. It is also between different forms of energy storage seeking access to the same controlled package zones.

4.3. Main Geometric Conflict Zones

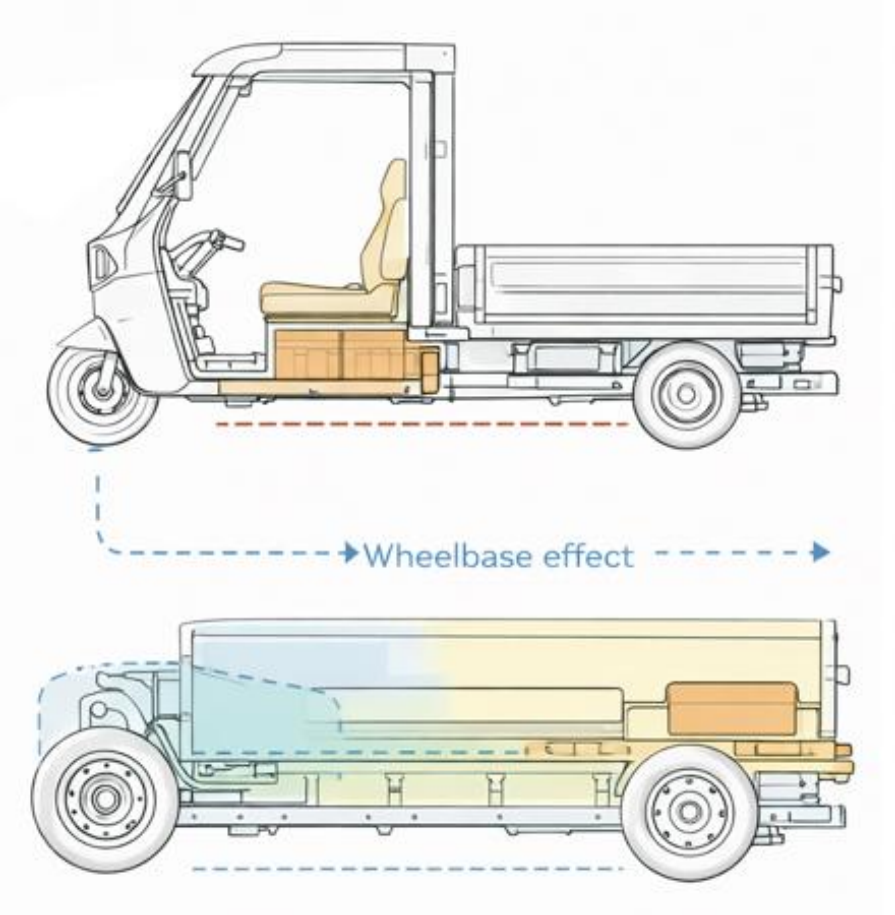


Figure 3. *Main geometric conflict zones in common BEV and ICE platform development*

The assessment indicates that the most critical conflict zones are the under driver package volume, rear propulsion module, rear axle architecture, wheelbase definition, and the coupled relationship between ground clearance and floor height.

These zones are not independent. A solution that improves one may penalise another. Preserving a compact rear package may intensify under driver packaging pressure. Increasing clearance may raise floor height. Protecting occupant volume may lengthen wheelbase. The platform problem therefore cannot be solved by isolated component integration. It must be addressed as a coupled geometry problem

Table 1. *Main Geometric Conflict Zones in Common L5e BEV and ICE Platforms*

Geometric parameter	**BEV derivative effect**	**ICE or CNG derivative effect**	**Platform implication**
Under driver package volume	Favourable for central battery placement	Competes with CNG tank placement and occupant package preservation	High conflict zone
Rear propulsion module	More compact local propulsion package	Larger package due to engine, auxiliaries, driveline, and service needs	Direct source of derivative divergence
Rear axle architecture	Can support simpler rear layout logic	Usually requires more complex rear suspension and driveline arrangement	Limits direct rear commonality
Wheelbase definition	Battery placement can push occupant package rearward in passenger variants	Larger rear module can require additional package length	Shared wheelbase becomes difficult to preserve
Ground clearance strategy	Can benefit from compact propulsion layout, but depends on axle concept	Interacts strongly with driveline geometry and package height	Must be solved together with rear package and floor height
Passenger package efficiency	Under seat or under driver battery reduces package freedom	Larger rear module affects cabin to rear package relationship	Passenger derivative is highly sensitive
Cargo floor continuity	Under floor battery can be manageable in cargo variants	Rear engine package tends to increase floor height	Cargo usability becomes a major architecture driver
Energy storage location	Battery requires protected volume	CNG tank requires competing protected volume	Strong commonality conflict

5. Discussion

5.1. Selective commonality as the main proposal

The central interpretation of this study is that the common platform problem in L5e vehicles is fundamentally a problem of geometric allocation. The same logic appears in the battery packaging literature, where available space between the axles, passenger compartment geometry, and battery envelope are treated as mutually dependent rather than independently optimisable variables (Nicoletti et al., 2020: 39).

A more robust strategy is selective commonality. In this approach, central structural references, cabin logic, and key hard points are stabilised early, while propulsion sensitive regions are allowed to diverge in a controlled way. This interpretation does not weaken the platform concept. On the contrary, it makes platform logic technically feasible.

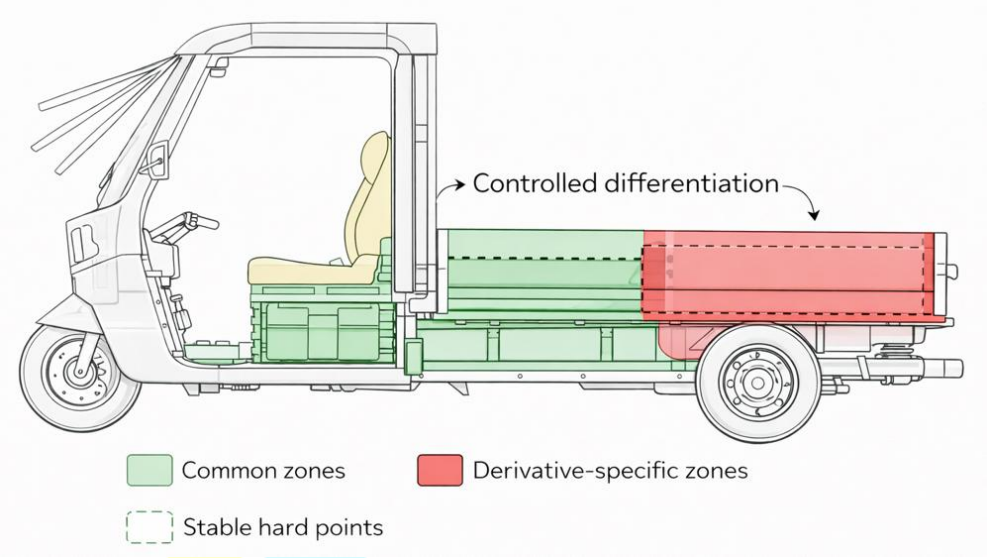


Figure 4. *Selective commonality model for multi-energy L5e platforms*

5.2. Common and derivative specific architecture zones

The analysis suggests that not every zone should be treated with the same commonality target. Some areas can remain shared without creating disproportionate penalties. Others are so sensitive to propulsion type and use case that forcing full commonality produces inefficient geometry.

Table 2. *Common and Derivative Specific Architecture Zones*

Architecture zone	**Commonality potential**	**Interpretation**
Main cabin reference structure	High	Can remain shared if early hard points are fixed
Under driver package zone	Medium to low	Central but highly contested by battery, CNG tank, and occupant package
Rear propulsion interface	Low	Strongly shaped by propulsion type and driveline requirements
Rear cargo floor interface	Low in mixed passenger and cargo family	Sensitive to rear module height and cargo usability
Passenger rear package zone	Medium	Usable in passenger derivative but weakens cargo commonality if overused
Structural hard points	Medium to high	Should be stabilised early to preserve platform logic
Energy storage zones	Low	Battery and CNG tank compete for protected volume

5.3. Design implications

The main design implication is that commonality must be decided at the architecture stage, not after detailed package freeze. If the platform is first optimised around only one derivative, later adaptation to a second propulsion logic is likely to generate penalties in wheelbase, floor height, cargo usability, or passenger package efficiency.

The study therefore argues that successful common platform development in L5e vehicles depends on three principles:

Early hard point definition

Systematic identification of geometry sensitive conflict zones

Controlled differentiation in propulsion sensitive package regions

These three principles form the core proposal advanced by the paper.

6. Conclusion

This study examined the geometric effects of managing BEV and ICE derivatives on a common L5e platform across passenger and cargo vehicle architectures. The decisive issue is not merely integrating different propulsion systems into one structure. It is allocating limited vehicle volume among propulsion, energy storage, occupant package, cargo use, and clearance requirements.

BEV derivatives offer a more compact rear propulsion package, but battery placement introduces strong constraints in central and rear package zones. ICE derivatives require a larger and more sensitive rear module, while CNG variants intensify competition for protected volume. As a result, wheelbase, rear module layout, under driver volume, cargo floor height, and ground clearance emerge as primary geometry defining variables.

The paper therefore concludes that an effective common platform strategy for L5e vehicles should not aim at complete geometric sameness. Instead, it should adopt selective commonality, where stable architectural references are preserved while propulsion sensitive package zones are deliberately differentiated from the concept stage. This is the main design recommendation of the study.

References

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. (2024). Two and three wheelers: A policy guide to sustainable mobility solutions for motorcycles. GIZ.

ERTRAC. (2023). LEVs in urban mobility: Research and innovation priorities. European Road Transport Research Advisory Council.

European Commission. (2021). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: The new EU urban mobility framework. European Commission.

European Union. (2013). Regulation (EU) No 168/2013 of the European Parliament and of the Council of 15 January 2013 on the approval and market surveillance of two or three wheel vehicles and quadricycles. Official Journal of the European Union.

Nicoletti, L., Mirti, S., Schockenhoff, F., König, A., & Lienkamp, M. (2020). Derivation of geometrical interdependencies between the passenger compartment and the traction battery using dimensional chains. World Electric Vehicle Journal, 11(2), 39. https://doi.org/10.3390/wevj11020039

Nicoletti, L., Ostermann, F., Heinrich, M., Stauber, A., Lin, X., & Lienkamp, M. (2021). Topology analysis of electric vehicles, with a focus on the traction battery. Forschung im Ingenieurwesen, 85(2), 457–467. https://doi.org/10.1007/s10010-020-00422-1

Sankaran, G., & Venkatesan, S. (2021). Standardization of electric vehicle battery pack geometry form factors for passenger car segments in India. Journal of Power Sources, 502, 230008. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230008

6th International
Congress of Engineering and Natural
Sciences

700 BAR TYPE IV COMPOSITE HYDROGEN TANKS: STRUCTURAL OPTIMIZATION OF BOSS–LINER INTERFACE SEALING

Başak TEKİN ERBAĞ[1]
Hayriye Göksu ARALIK[2]

Abstract

Hydrogen energy stands out as a key alternative energy technology, particularly for heavy-duty vehicles, due to its high energy density, short refueling time, and low emissions advantages. In these applications, Type IV composite hydrogen tanks with high pressure resistance are used to ensure safe hydrogen storage. Type IV tank structures consist of a thermoplastic liner, metallic boss components, carbon fiber reinforced composite layers, and epoxy resin systems. Owing to their low weight and high mechanical strength, these tanks have significant application potential in heavy-duty transport systems.

In this study, sealing issues encountered in Type IV composite hydrogen tanks operating at 700 bar, developed for heavy-duty vehicle applications, were investigated. Hydrostatic pressure and burst tests revealed that leakage occurred particularly in the dome regions around the boss area. The analysis showed that the root cause of this issue was insufficient adhesion between the metallic boss and the thermoplastic liner. To address this problem, two different structural optimization approaches were evaluated. First, surface treatments such as sandblasting, polyethylene (PE) coating, and heat treatment were applied to the metallic boss surface to enhance the bond strength at the boss–liner interface. Second, the boss geometry was optimized to increase the mechanical interlocking effect. In this context, the hole structures on the boss were redesigned to enable more effective anchoring of the thermoplastic liner material in the connection region.

As a result of these optimization studies, improved boss–liner connection performance was achieved, leakage issues in the dome region were reduced, and the safety performance of the tank under high pressure was enhanced. This study is expected to contribute to the reliability of Type IV composite hydrogen tanks and their industrial applicability in heavy-duty vehicle systems.

Keywords: Hydrogen tank, Type IV composite tank, boss–liner adhesion, filament winding, high-pressure vessels, heavy-duty vehicles.

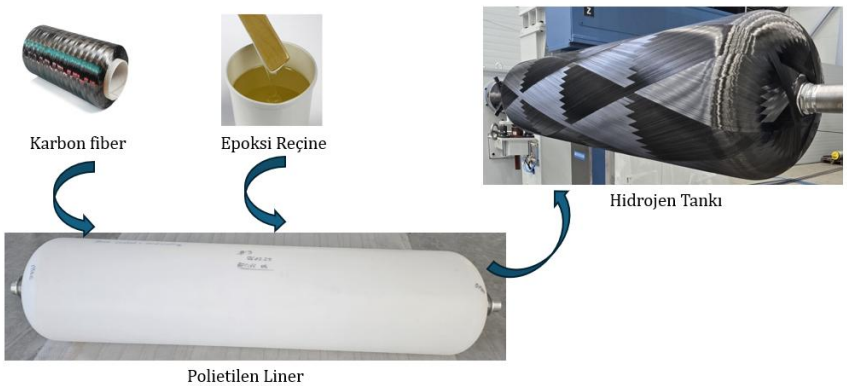
[1] AR-GE Mühendisi, Aksa Composites
[2] AR-GE Mühendisi, Aksa Composites

GİRİŞ

Son yıllarda fosil yakıt kullanımının çevresel etkileri, karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik küresel hedefler ve sürdürülebilir enerji ihtiyacının artmasını sağlamıştır. Böylece alternatif enerji teknolojilerine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır (Staffell vd., 2019; Zheng vd., 2012). Ulaşım sektörü, karbon salınımının yüksek olduğu alanlardan biri olup özellikle ağır vasıta araçları yüksek yakıt tüketimleri nedeniyle çevresel etkilerin yoğun olarak görüldüğü taşıt grupları arasında yer almaktadır. Bu nedenle ağır vasıta uygulamalarında daha verimli, daha sürdürülebilir ve düşük emisyonlu enerji sistemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Elektrikli araç teknolojileri günümüzde yaygın olarak kullanılmasına rağmen ağır vasıta araçlarında bazı önemli teknik sınırlamalar oluşturmaktadır. Yüksek kapasiteli batarya sistemleri araç ağırlığını artırmakta, taşınabilir yük miktarını azaltmakta ve menzil problemlerine neden olmaktadır. Bunun yanında uzun şarj süreleri lojistik ve uzun yol taşımacılığı uygulamalarında operasyonel verimliliği olumsuz etkilemektedir. Ağır vasıta araçlarında kısa sürede enerji dolumu yapılabilmesi ve uzun menzil sağlanabilmesi kritik gereksinimler arasında yer almaktadır. Hidrojen enerjisi, elektrik teknolojisinin yarattığı olumsuzluklardan dolayı ağır vasıta araçları için önemli bir alternatif enerji taşıyıcısı olarak öne çıkmaktadır. Hidrojenin yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması sayesinde daha uzun menzil sağlanabilmekte ve dolum işlemleri kısa süre içerisinde gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca hidrojen yakıt hücreli sistemlerde yalnızca su buharı açığa çıkması çevresel açıdan önemli avantaj sağlamaktadır. Hidrojenin taşıtlarda kullanılabilmesi için yüksek basınç altında güvenli biçimde depolanması gerekmektedir. Bu amaçla geliştirilen yüksek basınçlı hidrojen tankları arasında Tip-IV kompozit hidrojen tankları düşük ağırlık ve yüksek dayanım avantajları nedeniyle ön plana çıkmaktadır (Aceves vd., 2019). Bu çalışmada ağır vasıta araçlarında kullanılmak üzere geliştirilen 700 bar çalışma basıncına sahip Tip-IV kompozit hidrojen tanklarının yapısal performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında boss–liner ara yüzey tasarımı ve dome bölgesi optimizasyonu değerlendirilerek daha güvenli ve daha verimli hidrojen depolama sistemi geliştirilmesi hedeflenmiştir.

TİP-IV HİDROJEN TANKLARINDA KULLANILAN MALZEMELER VE ÜRETİM YÖNTEMİ

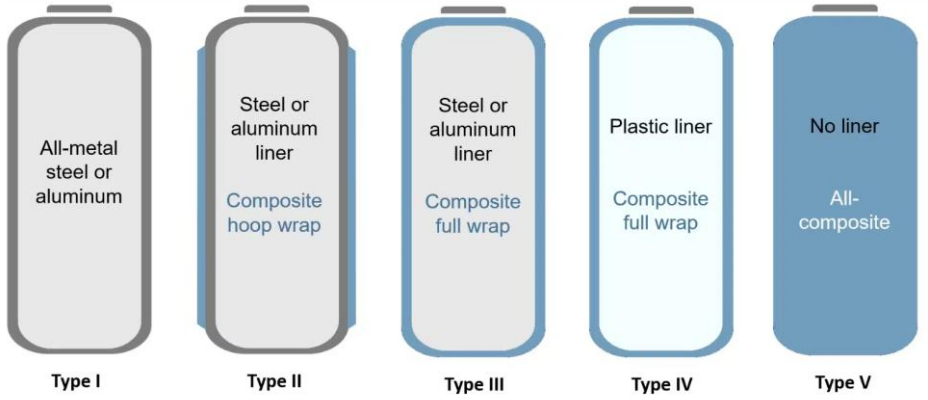
Tip-IV tank yapıları temel olarak termoplastik liner, metal boss parçaları ve epoksi matrisli karbon fiber takviyeli kompozit sarım katmanlarından oluşmaktadır.



Resim 1. *Tip 4 Kompozit Hidrojen Tankı ve Temel Bileşenleri*

Tank yapısında yer alan termoplastik liner, hidrojenin sızdırmaz şekilde depolanmasını sağlayan iç katmanı oluşturmaktadır. Tankın uç bölgelerinde bulunan metal boss parçaları ise dolum ve boşaltım bağlantılarının gerçekleştirildiği kritik bağlantı elemanlarıdır. Yük taşıyan ana yapı karbon fiber takviyeli kompozit katmanlardan oluşmaktadır. Bu katmanlar filament winding (lif sarım) yöntemiyle belirli sarım açıları kullanılarak üretilmektedir. Sarım açısı, sarım hızı ve sarım sırası tankın mekanik performansını doğrudan etkilemektedir (Vasiliev & Morozov, 2018). Karbon fiber katmanların bütünlüğünü sağlayan epoksi reçine sistemi ise yük transferinin gerçekleştirilmesinde önemli rol oynamaktadır.

Tip-IV kompozit hidrojen tanklarının ağır vasıta araçlarında kullanılmasının en önemli nedenlerinden biri yüksek dayanım–düşük ağırlık avantajı sağlamasıdır. Geleneksel metal tank sistemleri yüksek ağırlıkları nedeniyle araç toplam ağırlığını artırmakta ve enerji tüketimini olumsuz etkilemektedir. Kompozit esaslı Tip-IV tanklar ise daha düşük ağırlıkları sayesinde araç verimliliğini artırmakta, taşıma kapasitesini iyileştirmekte ve daha uzun menzil sağlamaktadır. Bunun yanında yüksek basınç dayanımı sayesinde hidrojenin güvenli biçimde depolanmasına olanak sağlamaktadır.



Resim 2. *Basınçlı Hidrojen Tankı Tipleri ve Katman Yapıları*

700 bar çalışma basıncına sahip Tip-IV hidrojen tanklarının ağır vasıta araçlarında kullanılmasıyla araç başına yüksek miktarda hidrojen depolanabilmekte ve uzun yol taşımacılığı için gerekli menzil değerlerine ulaşılabilmektedir. Bu durum hidrojen teknolojilerinin özellikle lojistik ve ağır taşımacılık sektörlerinde önemli potansiyel taşıdığını göstermektedir.

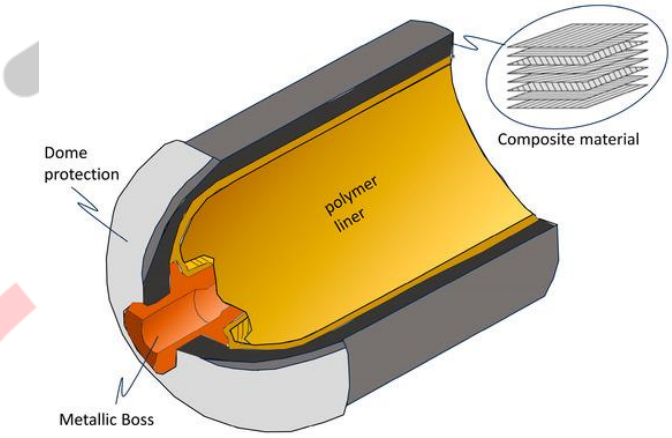
Tip-IV kompozit hidrojen tanklarının geliştirilmesi sırasında bazı kritik mühendislik problemleri ortaya çıkmaktadır. Boss–liner ara yüzeyinde oluşan sızıntılar ve dome bölgelerinde meydana gelen gerilme yığılmaları sonucu kontrolsüz patlama davranışları, bu problemlerin başında gelmektedir. Bu nedenle yüksek basınç altında güvenli, hafif, dayanıklı ve standartlara uygun tank sistemlerinin geliştirilmesi için yapısal optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

KOMPOZİT HİDROJEN TANKLARINDA KARŞILAŞILAN MÜHENDİSLİK PROBLEMİ

Tip-IV kompozit hidrojen tanklarında yüksek basınç altında güvenli çalışma performansının sağlanabilmesi için özellikle boss–liner bağlantı bölgesinin yapısal bütünlüğü büyük önem taşımaktadır. Gerçekleştirilen patlatma ve hidrostatik basınç testleri sonucunda

tankın dome bölgelerinde, özellikle boss çevresinde sızıntı problemleri meydana geldiği görülmüştür.

Testler sırasında tank içerisine su doldurularak sızdırmazlık ve dayanım performansı değerlendirilmiştir. Yapılan incelemelerde oluşan sızıntıların temel nedeninin metal boss ile termoplastik liner arasındaki yetersiz yapışma (adezyon) olduğu tespit edilmiştir (Zheng vd., 2012). Boss ve liner arasında yeterli adezyon sağlanamaması nedeniyle yüksek basınç altında ara yüzeyde ayrılmalar meydana gelmiş ve bu durum dome bölgesinde sızıntıya neden olmuştur.



Resim 3. *Tip 4 Kompozit Hidrojen Tankının Detaylı Kesit Görünümü ve Yapısal Elemanları*

Dome bölgeleri tank geometrisinin değiştiği ve gerilmelerin yoğunlaştığı kritik alanlar olduğundan, boss–liner ara yüzeyindeki yetersiz bağ dayanımı bu bölgelerde daha belirgin hale gelmektedir. Özellikle yüksek basınç altında oluşan çevresel gerilmeler bağlantı bölgesinde lokal gerilme artışına neden olmakta ve sızdırmazlık performansını olumsuz etkilemektedir.

Bu problemin giderilmesi amacıyla bu çalışma kapsamında iki farklı optimizasyon yaklaşımı değerlendirilmiştir.

YAPISAL OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI

Tip-IV kompozit hidrojen tanklarında, Alüminyum boss ile polar olmayan yarı kristalin bir polimer olan Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) liner arasındaki ara yüzey, heterojen malzeme bağ kurma kabiliyetinin düşüklüğü nedeniyle sızdırmazlık açısından sistemin zayıf halkasını oluşturmaktadır. Hidrostatik testlerde karşılaşılan erken dönem sızıntı ve ayrılma (delaminasyon) problemlerini ortadan kaldırmak amacıyla, bu çalışma kapsamında eş zamanlı olarak yürütülen iki aşamalı bir optimizasyon metodolojisi geliştirilmiştir.

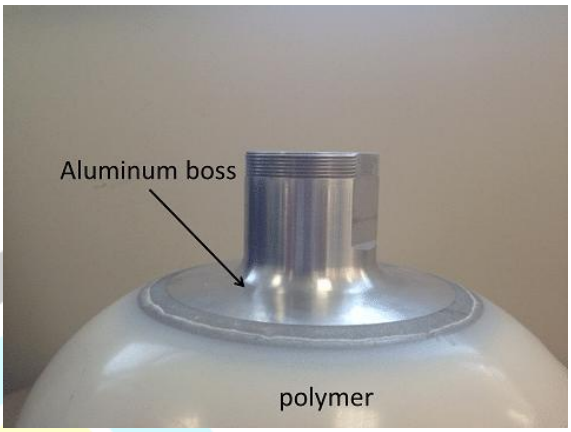
Boss–Liner Adezyonunun Kimyasal ve Yüzeysel Olarak İyileştirilmesi

Metal ve termoplastik fazlar arasındaki mikro seviyedeki tutunma eksikliğini gidermek amacıyla, metal boss yüzeylerine mekanik ve kimyasal modifikasyon kombinasyonlarını içeren bir yüzey hazırlık prosesi uygulanmıştır. Optimizasyon adımları şu aşamalardan oluşmaktadır:

Mekanik Kumlama ile Yüzey Aktivasyonu

Metal boss parçalarının polimer eriyiği ile temas edecek fonksiyonel yüzeyleri, kontrollü basınç altında alüminyum oksit (Al_2O_3) pürüzlendirme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemle amaçlanan, yüzey pürüzlülük (R_a) değerini artırarak metal yüzey alanını genişletmek

ve eriyik haldeki liner malzemesinin katılaşırken tutunabileceği mikro mekanik kilit alanları (mechanical interlocking) oluşturmaktır. Yüzey pürüzlendirmesi, aynı zamanda metal üzerindeki olası oksit katmanlarını temizleyerek yüzey enerjisini yükseltmiştir.



Resim 4. *Polimer Liner ve Alüminyum Boss Bağlantı Bölgesi*

Modifiye Polimer (PE Esaslı) Astar Kaplama ve Isıl Fırınlama

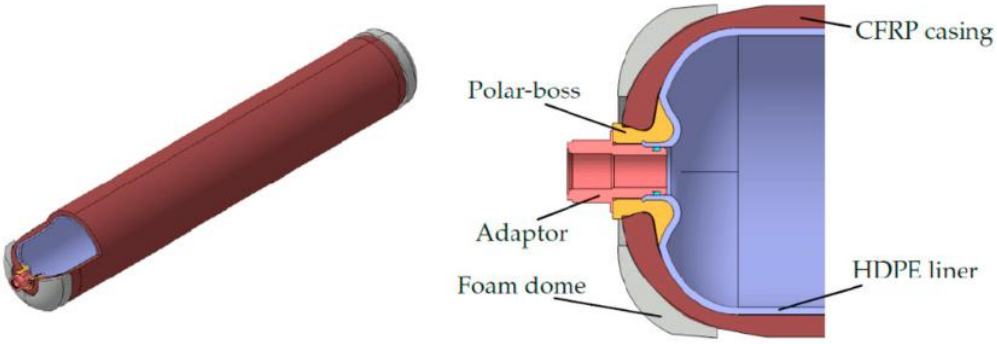
Yalnızca mekanik pürüzlendirmenin yüksek basınç çevrimlerinde tek başına yeterli adezyon sağlamayacağı öngörülerek, makromoleküler düzeyde bağ oluşturacak özel bir fonksiyonel astar (primer) ara fazı tasarlanmıştır. Temizlenen metal yüzeyine eriyik PE bazlı modifiye polimer astar homojen olarak uygulanmış ve ardından belirli bir sıcaklık-zaman matrisine sahip fırınlama döngüsü ile metal yüzeyine termal olarak fikse edilmiştir.

Bu iki aşamalı yüzey modifikasyonu sayesinde, rotomold yöntemi ile liner imalatı esnasında yüksek sıcaklıktaki HDPE matris, metal boss üzerindeki ön kaplamalı astar tabakası ile ısıl olarak ergiyerek birbirine kaynamıştır. Böylece ara yüzeyde, polar ve kovalent bağların baskın olduğu, yüksek kayma mukavemetine sahip homojen bir geçiş bölgesi elde edilmiş ve yüksek iç basınç altında plastik linerin metalden ayrılması (de-bonding) mikroskobik düzeyde engellenmiştir.

Makro-Mekanik Kilitleme Odaklı Boss Geometri Optimizasyonu

Kimyasal ve mikro-mekanik yapışma performansının artırılmasına ek olarak, tankın maruz kalacağı ekstrem iç basınç (700 bar çalışma, 1400 bar patlama) ve dolum-boşaltım sırasındaki termal çevrimler altında yapısal kararlılığı garanti altına almak için makro seviyede bir kilitleme mekanizması tasarlanmıştır.

Yalnızca düz veya pürüzsüz flanş geometrisine sahip geleneksel boss tasarımları, eksenel ve radyal yönlerdeki yüksek gerilmeleri sönümleyememektedir. Bu sınırlamayı aşmak adına, sonlu elemanlar analizi (FEA) çıktıları ve gerilme yığılma bölgeleri dikkate alınarak boss flanş yapısı üzerinde geometrik revizyonlar gerçekleştirilmiştir (Wang vd., 2022):



Resim 5. *Tip 4 Kompozit Tankın Üç Boyutlu Tasarımı ve Dome Bölgesi Detay Kesiti*

Kırlangıç Kuyruğu (Dovetail) ve Eksenel-Radyal Kör Delik Tasarımı: Boss gövdesi üzerinde belirli eksenel açılarla dağıtılmış konik formda kırlangıç kuyruğu (dovetail) benzeri cepler ile radyal/eksenel yönlerde kör delik yapılarının tasarlanması planlanmaktadır.

Makro Mekanik Kilitlenme Mekanizması: Liner üretim aşamasında, yüksek basınç altında şekillendirilen eriyik termoplastik HDPE malzemenin, boss üzerindeki bu optimize edilmiş konik ceplerin ve deliklerin içerisine tam olarak nüfuz ederek mekanik kilitlenme oluşturması hedeflenmektedir. Polimer malzemenin katılaşması sonrasında metal boss ile iç tasarımı polimer yapı tarafından tamamen sarılmış ve sökülemez bir "makro-mekanik kilit" yapısı elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Bu geometrik optimizasyon çalışması üç temel avantaj sağlayacaktır: İlk olarak, tankın dome bölgesinde basınç altında oluşan yüksek eksenel çekme ve ayrılma kuvvetlerinin bu mekanik kilitler tarafından göğüslenmesi değerlendirilecektir. İkinci olarak, malzemelerin farklı termal genleşme katsayılarından (CTE) dolayı sıcaklık değişimlerinde aralarında boşluk açılma eğilimi, bu geometrik kilit tasarımı sayesinde sızdırmazlığı destekleyen bir lokal basma gerilmesi (compressive stress) alanına dönüşmesi analiz edilecektir. Son olarak, gerilme yığılmaları keskin köşelerden uzaklaştırılarak boss geneline homojen biçimde dağıtılmış ve böylece makro düzeyde tam sızdırmazlık ve yapısal bütünlük elde edilecektir.

SONUÇ

Bu çalışmada ağır vasıta araçlarında kullanılmak üzere geliştirilen 700 bar çalışma basıncına sahip Tip-IV kompozit hidrojen tanklarında karşılaşılan sızdırmazlık problemleri değerlendirilmiş ve yapısal optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen hidrostatik basınç ve patlatma testleri sonucunda özellikle dome bölgelerinde, boss çevresinde sızıntılar meydana geldiği belirlenmiştir. Yapılan incelemelerde bu problemin temel nedeninin metal boss ile termoplastik liner arasındaki yetersiz adezyon olduğu tespit edilmiştir.

Belirlenen problemin giderilmesi amacıyla boss–liner ara yüzeyine yönelik iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda metal boss yüzeyine kumlama, PE kaplama ve fırınlama işlemleri uygulanarak ara yüzey bağ dayanımının artırılması hedeflenmiştir. Bunun yanında boss geometrisi yeniden değerlendirilmiş, delik yapılarının optimize edilmesiyle mekanik kilitleme etkisinin artırılması amaçlanmıştır.

Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda boss–liner bağlantı performansının iyileştirilmesi, yüksek basınç altında oluşan ayrılmaların azaltılması ve dome bölgesindeki sızıntı problemlerinin minimize edilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca tankın güvenlik

performansının artırılması, daha kontrollü gerilme dağılımı elde edilmesi ve yüksek basınç altında daha güvenli çalışma davranışı sağlanması amaçlanmıştır.

Tip-IV kompozit hidrojen tanklarının düşük ağırlık ve yüksek dayanım avantajları sayesinde ağır vasıta araçlarında önemli kullanım potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen yapısal optimizasyonların hidrojen depolama sistemlerinin güvenilirliğine ve endüstriyel uygulanabilirliğine katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

Aceves, S. M., Berry, G. D., Martinez-Frias, J., & Espinosa-Loza, F. (2019). Vehicles with high-pressure composite cylinders for hydrogen storage: Technical and safety aspects. *International Journal of Hydrogen Energy, 44*(13), 6750–6762.

Staffell, I., Scamman, D., Velazquez Abad, A., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Shah, N., & Ward, K. R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, *12*(2), 463–491.

Vasiliev, V. V., & Morozov, E. V. (2018). *Advanced mechanics of composite materials and structural elements* (4th ed.). Elsevier Science.

Wang, L., Zhou, W., & Li, X. (2022). Mechanical interlocking and leakage behavior of aluminum-polymer boss structures in Type IV hydrogen storage cylinders. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*(29), 13910–13922.

Zheng, J., Chang, H., & Xu, P. (2012). Leakage and burst behaviors of Type IV composite cylinders for high pressure hydrogen storage. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, *96*, 7–14.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Investigation of the Effects of Different Infill Density and Infill Pattern on Mechanical Properties in Additive Manufacturing

Recep YILDIZ[1]

Abstract

In the determination of the mechanical performance of parts produced using fused deposition modeling (FDM) technology, a type of additive manufacturing, critical parameters such as infill density and infill patterns were examined through a systematic analysis based on the literature. Current academic studies have been compiled to reveal the effects of filler parameters on tensile, yield, compressive strength, and modulus of elasticity. Within a filler density range of 10% to 100%, optimum filling patterns were determined based on mechanical properties. The findings show that the Concentric fill pattern exhibits the highest tensile and yield strength values due to its layer continuity. In performance analyses under compressive force, it was determined that the Grid fill pattern, especially at fill densities between 40% and 80%, is the geometry that best preserves structural integrity and is most resistant to maximum load. It has been observed that the modulus of elasticity varies with different filler densities and filler patterns, and no single filler geometry establishes a dominant advantage. In the FDM method, selecting optimized filler patterns and filler densities according to the direction and type of force the part will be subjected to is critical for achieving the goals of part lifespan, raw material savings, and product lightness. This study serves as a comprehensive guide for selecting the optimum filler pattern for parts manufactured according to the targeted filler ratio. The main outcome of this study is to provide an academic roadmap for designers and engineers that accelerates optimization processes, saves time, and directly contributes to these optimization processes.

Keywords: Additive manufacturing, Infill density, Infill pattern, Fused deposition modeling, 3D printing, Mechanical properties

[1] R&D Engineer, Segula Technologies, AR-GE, Orcıd: 0009-0008-5428-7891

1. Giriş

Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinde parça üzerinden talaş kaldırmak suretiyle eksiltme yapılarak üretilen parçalardan farklı olarak, parçaları katmanlı bir yapıda inşa eden Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing), karmaşık geometrilerin yüksek tasarım özgürlüğü ile üretilmesine imkan tanımaktadır. Bu teknoloji, geleneksel yöntemlere nazaran kompleks geometrilerin tek bir üretim prosesiyle üretilebilmesine olanak sağlamaktadır. Günümüzde prototiplemenin ötesine geçerek nihai parça üretimine odaklanan bu teknoloji; topoloji optimizasyonları ile koordineli olan bu üretim yönteminde mümkün olan en az malzeme ile mekanik performansın korunarak optimize edilmesini amaçlar. Bu optimizasyonun geliştirilmesi adına bir diğer önemli parametre ise parçanın iç yapısıdır. Parçanın iç yapısını belirlerken dolgu oranı ve dolgu geometrisinin doğru seçilmesi oldukça kritiktir. Bu parametrelerin doğru tercih edilmesi, parçanın mukavemet, süneklik ve enerji absorbe kabiliyeti gibi karakteristik özelliklerini doğrudan şekillendirerek mühendislik uygulamalarında verimliliği belirleyen temel faktör haline gelmiştir.

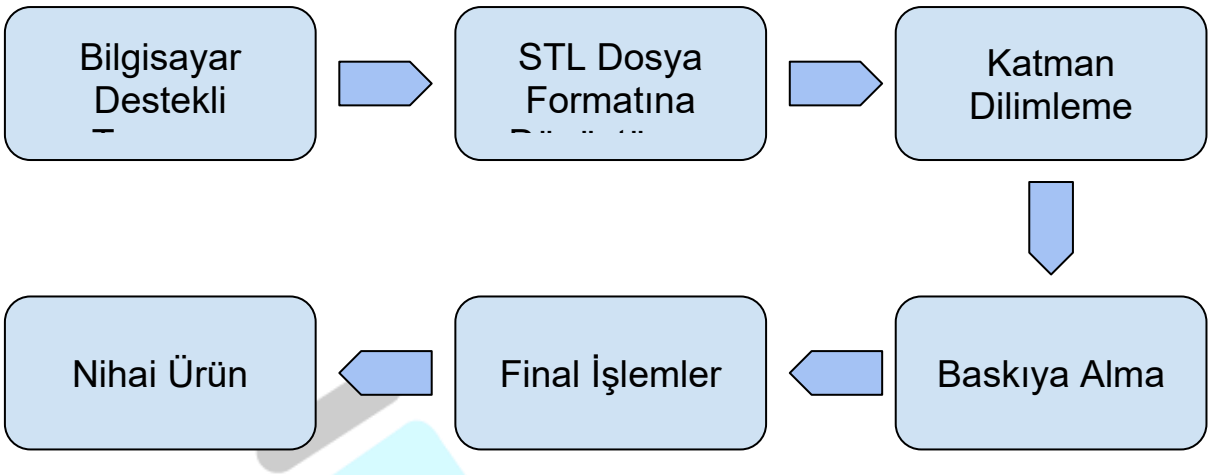
Yapılan bu çalışmanın amacı, eklemeli imalat ile yapılan üretimlerdeki optimizasyon çalışmalarına literatür temelli bir fayda sağlamaktır. Tasarım aşamasında hedeflenen mekanik performans değerlerine ulaşmak için yalnızca malzeme seçimi ve tasarım yeterli olmamakta; iç yapı mimarisini belirleyen parametrelerin stratejik olarak seçilmesi önem arz etmektedir. Bu açıdan yapılan araştırmanın sağladığı en önemli fayda, optimizasyon çalışmalarında kullanılacak olan dolgu yoğunluğuna karşılık seçilecek en optimum dolgu deseninin kararlaştırmasında bir yol gösterici olmasıdır.

Çalışma sonucunda ortaya konulan veriler; mühendislik çalışmalarında, üretim öncesi simülasyon ve tasarım süreçlerinde deneme-yanılma maliyetlerini minimize ederek, doğru dolgu deseni seçimine rehberlik eden bilimsel bir yol haritası sunmaktadır.

2. Metot ve Yöntemler

2.1 Eklemeli İmalat Proses Aşamaları

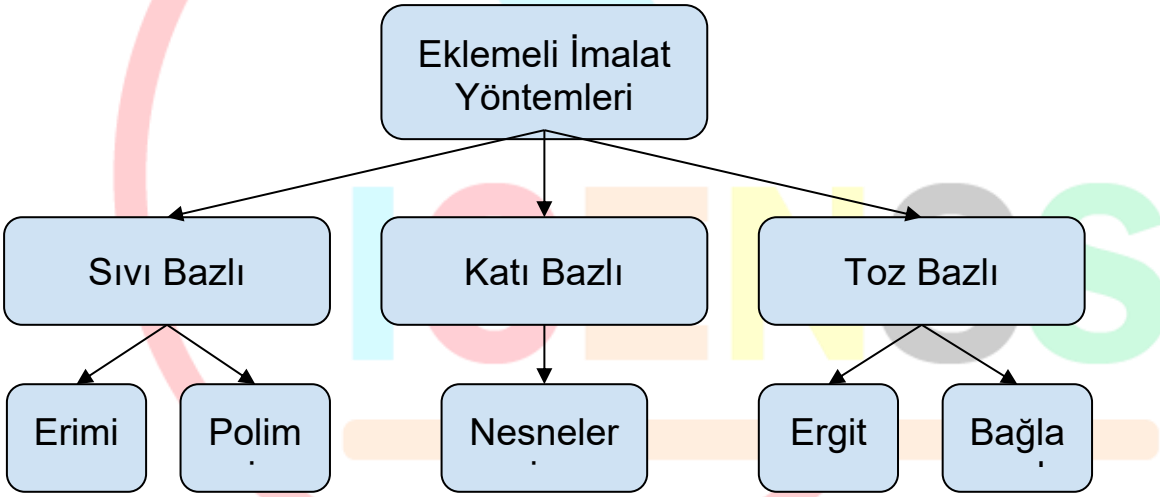
Eklemeli imalat teknolojisinde bir proses, tasarım ile başlamaktadır. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) programları kullanılarak sanal ortamda üretilecek parçanın tasarımı oluşturulur. Bu tasarım dosyası STL dosya formatına çevrilerek dilimleme yazılımlarına (örn. Ultimaker Cura, PrusaSlicer) aktarılır. Bu dilimleme yazılımlarında üretilecek parça katmanlara dilimlenmektedir. Parça iç yapısındaki dolgu oranı ve dolgu deseni gibi önemli parametreler seçilerek ürün baskıya alınır. Baskının tamamlanması ile destek yapılar ve ürünün genel temizleme işlemleri gerçekleştirilerek nihai ürün elde edilmektedir. (Karabıyık ve Apak, 2021: 3)



Şekil 1 - Bir Eklemeli İmalat Prosesinin Aşamaları (Karabıyık ve Apak, 2021: 3)

2.2 Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Eklemeli imalat yöntemlerinin, malzeme türüne ve üretilecek ürünün yapısına göre değişen, zamanla çeşitli sektörlere göre gelişmiş birçok alt sınıfı bulunmaktadır. Her bir sınıf, kendine özgü avantajlar ve üretim metodları sunmaktadır. Güncel literatürde kabul gören eklemeli imalat yöntemleri ve sınıflandırılması aşağıda detaylandırılmıştır.



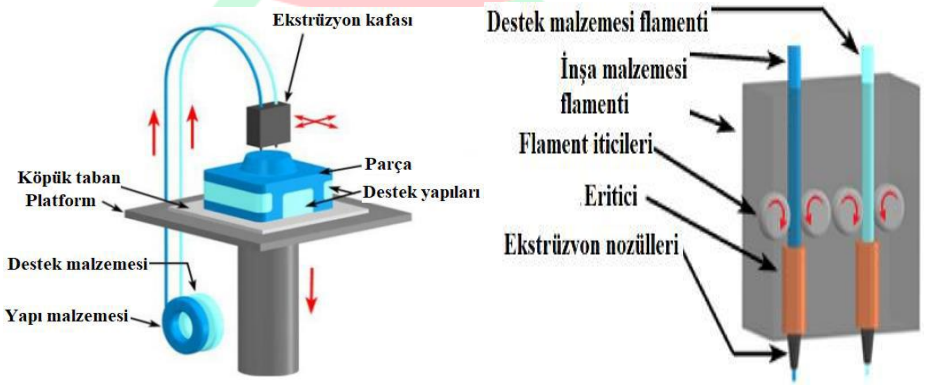
Şekil 2 - Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Sınıflandırılması (Bozkurt vd., 2021: 2)

Tablo 1 - *ASTM F42 Standartlarına Göre Belirlenen Eklemeli İmalat Yöntemleri (Reddy ve Dufera, 2016: 4)*

Eklemeli İmalat Yöntemleri	**Tanım**
Powder Bed and Inkjet Head (PBIH)	Bağlayıcı Püskürtme
Digital Light Processing (DLP)	Dijital Işık İşleme
Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
Electron Beam Melting (EBM)	Elektron Demeti İle Ergitme
Fused Deposition Modeling (FDM)	Eriyik Yığma Modelleme
Laser Metal Deposition (LMD)	Lazer Metal Biriktirme
Laminated Object Manufacturing (LOM)	Lamine Edilmiş Nesne İmalatı
Multijet Modeling (MJM)	Çok Jetli Modelleme
Plaster-Based 3D Printing (PP)	Alçı Bazlı 3D Baskı
Selective Heat Sintering (SHS)	Seçimli Isıtma Sinterleme
Stereolithography (SLA)	Stereolitografi
Selective Laser Sintering (SLS)	Seçimli Lazer Sinterleme
Ultrasonic Consolidation (UC)	Ultrasonik Birleştirme

2.3 Birleştirmeli Yığma Modellemesi (Fused Deposition Modeling- FDM)

FDM teknolojisi eklemeli imalat yöntemleri içerisinde en yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Malzeme ekstrüzyon yöntemiyle gerçekleştirilen bu proseste yaygın olarak polimer malzemeler olan akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve polilaktik asit (PLA) kullanılmaktadır. Başlangıçta, kullanılan polimerler camsı geçiş sıcaklıklarının üzerine ısıtılır. Yarı ergiyik halde, filament şeklinde ekstrüdere beslendikten sonra bir nozuldan itilir. Filament, ekstrüzyon başlığının hareketi ile platform zeminine serilir, soğur ve katılaşır. İlk tabakanın üretimi tamamlandıktan sonra hareketli platform aşağı iner ve üretim tamamlanana kadar süreç tekrarlanır. (Bozkurt vd., 2021: 7) Üretim tamamlandıktan sonra ürün baskı tablasından sökülerek alınır. Ürün üzerindeki çıkıntılar yüzey iyileştirme işlemleri uygulanarak ve varsa destek yapıları da temizlenerek nihai ürün elde edilir.



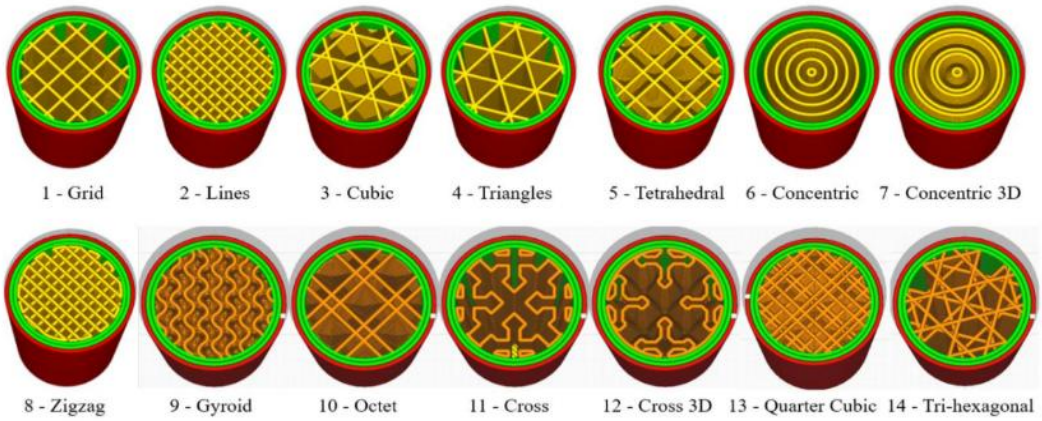
a. b.

Şekil 3 - a. FDM yönteminin çalışma prensibi b. Ekstrüzyon kafası (Sürmen, 2019: 7)

Şekil 4 - Bir uçakta kullanılan parçanın topoloji optimizasyonu sonrasında FDM ile üretilmiş prototip modeli (Tok, 2023: 81)

2.4 Dolgu Desenleri

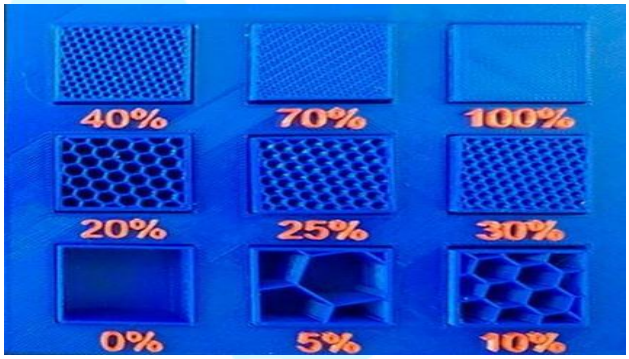
Dolgu desenleri, eklemeli imalat yöntemleriyle üretilecek parçanın iç yapısının sahip olduğu geometrik şekli ifade etmektedir. Dilimleme yazılımlarında kullanılan çok sayıda dolgu deseni mevcuttur. (Podroužek vd., 2018: 4) Her bir dolgu deseninin parçaya kazandırdığı mekanik özellikler birbirinden farklıdır. Bu farklılıklar, seçilen desenin parça içindeki kuvvet iletim yollarını ve gerilme yığılmalarını doğrudan değiştirmesinden dolayı meydana gelmektedir. Bu nedenle, parçanın çalışma koşulları ve maruz kalacağı yükleme tipleri doğrultusunda istenen mekanik özelliklerin belirlenmesinde uygun dolgu deseni seçimi kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 5 - Yaygın olarak kullanılan dolgu desenleri (Pernet vd., 2022: 3)

2.5 Dolgu Yoğunluğu

Eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen parçalarda hafifletmenin ve malzeme tasarrufu sağlanması noktasında en temel parametrelerden biri de dolgu yoğunluğudur. Dolgu yoğunluğu, parçanın dış kabuğu içerisinde kalan hacmin yüzde kaçının malzeme ile doldurulacağının belirlenmesidir. Uygun oranda belirlenerek optimize bir dolgu yoğunluğu seçildiği takdirde, daha az malzeme kullanılarak daha kısa üretim sürelerinde hedeflenen mekanik özelliklerde ürün elde edilmiş olur. Dolgu yoğunluğundaki artış, genellikle parçanın basma ve çekme mukavemetini artırırken, toplam ağırlık, üretim hızı ve maliyeti de doğrudan etkilemektedir. (Qamar Tanveer vd., 2022: 4) Bu nedenle, uygulama alanına göre mekanik özelliklerin karşılanması amacıyla dolgu yoğunluğunun optimize edilmesi mühendislik tasarımlarında önemli bir kriterdir.



Şekil 6 - Farklı Oranlarda Dolgu Yoğunlukları (Qamar Tanveer vd., 2022: 4)

3. Araştırma Bulguları ve Sonuçlar

3.1 Yapılan Testlerde Kullanılan Dolgu Desenleri

Literatürde yer alan ve dolgu deseni ile dolgu yoğunluğu arasındaki ilişkiyi inceleyen bir çok farklı akademik çalışma derlenerek, bu çalışmalarda kullanılan test yöntemleri ve tercih edilen dolgu geometrileri sistematik bir biçimde derlenmiştir. Diğer kaynakları da kapsayan daha genişletilmiş bir çalışmaya sahip yayınlara öncelik verilerek derlenen çalışma Tablo 3.1.1'de özetlenmiştir. Yapılan incelemeler, dolgu desenlerinin basma dayanımı, akma dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü gibi temel mekanik özellikler üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 2 - *Yapılan testlerde kullanılan dolgu desenleri*

Yapılan Test	Dolgu Deseni	Yayın
Basma Dayanımı Altında Maksimum Yük	Grid, Line, Cubic, Triangle, Tetrahedral, Concentric, Concentric 3D, Zigzag, Gyroid, Octet, Cross, Cross 3D, Quarter Cubic, Tri-Hexagonal	Compressive Strength Assessment of 3D Printing Infill Patterns
Akma Dayanımı	Grid, Line, Triangle, Tri-Hexagon, Cubic, Concentric, Gyroid, Octet Cubic Subdivision, Quarter Cubic Zigzag, Cross, Cross 3D,	Effect of Infill Type and Density on Tensile Properties of PLA Material for FDM Process
Çekme Dayanımı (%100 Doluluk Oranı)	Line, Grid, Concentric	Eklemeli İmalat Yöntemiyle PLA Malzemeden Üretilen Ürünlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi
Çekme Dayanımı	Grid, Line, Triangle, Tri-Hexagon, Cubic, Cubic Subdivision, Octet, Quarter Cubic, Concentric, Zigzag, Cross, Cross 3D, Gyroid	Effect of Infill Type and Density on Tensile Properties of PLA Material for FDM Process
Elastisite Modülü (Çekme) (%100 Doluluk Oranı)	Grid, Line, Rectilinear, Concentric, Gyroid	FDM Yöntemiyle Üretilen Hyper-PLA Numunelerde Dolgu Deseni ve Doluluk Oranının Mekanik Özelliklere Etkisi ve Optimizasyonu
Elastisite Modülü (Çekme)	Triangle, Grid, Zigzag, Gyroid	3 boyutlu yazıcıda karbon fiber filamentten üretilen farklı dolgu deseni ve dolgu yoğunluğuna sahip numunelerin mekanik davranışlarının incelenmesi
Elastisite Modülü (Basma)	Triangle, Grid, Zigzag, Gyroid	3 boyutlu yazıcıda karbon fiber filamentten üretilen farklı dolgu deseni ve dolgu yoğunluğuna sahip numunelerin mekanik davranışlarının incelenmesi

3.2 Farklı Yoğunluklarda Optimum Dolgu Desenleri

Toplanan istatiksel veriler ve bulgular sonucunda farklı dolgu yoğunluklarında en yüksek sonucu veren dolgu desenleri karşılaştırılarak belirlenmiştir. Bu dolgu desenleri, yapılan testlerde aynı malzeme ve aynı koşullarda yapılan testler itibariyle belirlenen verilerdir. Yapılan testlerde en yüksek sonuçları veren dolgu desenleri Tablo 3.2.1 de verilmiştir. Bu dolgu desenlerinin seçiminde karşılaştırılmış olan diğer dolgu desenleri Tablo 3.1.1 de verilmiştir.

Tablo 3 - *Dolgu desenlerinin dolgu yoğunluğuna bağlı olarak mekanik performans analizi*

Dolgu Yoğunluğu (%)	Maksimum Yükleme	Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Elastisite Modülü (Çekme)	Elastisite Modülü (Basma)
100	Concentric 3D	-	Grid	Grid	-
90	-	Concentric	Concentric	-	-
80	Grid	Concentric	Concentric	Triangle	Grid
70	-	Concentric	Concentric	-	-
60	Grid	Concentric	Concentric	Zigzag	Giroid
50	-	Concentric	Concentric	-	-
40	Grid	Concentric	Concentric	Zigzag	Zigzag
30	-	Grid	Concentric	-	-
20	Cross	Concentric	Concentric	Concentric	Triangle-Zigzag
10	-	Grid	Grid	-	-

3.3 Sonuçlar ve Yorumlar

Eklemeli imalat yöntemi olan birleştirmeli yığma modellemesi (FDM) kullanılarak üretilen parçaların mekanik performansını etkileyen dolgu desenleri ve dolgu yoğunlukları literatürdeki çalışmaların karşılaştırılması ile analiz edilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, mekanik özellikleri bakımından belirli dolgu oranlarında optimum sonucu veren dolgu desenleri belirlenmiştir.

Bu çalışmanın sonucu olarak akma dayanımı ve çekme dayanımı bakımından concentric dolgu deseninin en yüksek mukavemet değerlerini sağlayan geometrik şekil olduğu gözlenmiştir.

Bu dolgu deseninin akma ve çekme dayanımlarında ki yüksek mukavemet sağlamasının sebebi, parçanın iç dolgu yapısının dairesel ve çok yönlü simetrik yapısından kaynaklanmaktadır. Bu geometri, uygulanan çekme kuvvetini tüm yönlere eşit dağıtarak lokal gerilme yığılmalarını minimum değerlerde tutulmasını sağlar. Bu sayede malzemenin ani kopma riskini azaltmaktadır. (Dağlı vd., 2025: 12)

Basma kuvveti altındaki maksimum yükleme koşullarında grid dolgu deseninin %40, %60 ve %80 dolgu oranlarında en dirençli yapı olduğu görülmektedir.

Basma ve çekme testleri sonucunda, elastisite modülünün dolgu yoğunluğuna doğrudan bağlı olduğu, bu parametre üzerinde belirli bir dolgu deseninin tek başına baskın bir üstünlük kuramadığı gözlemlenmiştir.

Literatür sonuçları incelendiğinde, maksimum yükleme koşulları, çekme dayanımı ve akma dayanımında belirli dolgu desenlerinin baskın olduğu görülmüştür. Bir diğer önemli mekanik özellik olan elastisite modülünde ise dolgu yoğunluklarına göre değişkenlik gösteren dolgu desenlerinin çeşitliliği ile doğru dolgu deseni seçiminin daha kritik bir öneme sahip olduğu görülmektedir.

Kaynakça

Adanur, Ö., Koçar, O., & Güldibi, A. S. (2024). Fdm Yöntemiyle Üretilen Pla Malzemelerde Dolgu Deseninin Mekanik Özelliklere Etkisi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11(2), 294-307. https://doi.org/10.35193/bseufbd.1336572

Ben Hadj Hassine, S., Chatti, S., Louhichi, B., & Seibi, A. (2024). Experimental study of the tensile behavior of structures obtained by fdm 3d printing process. Polymers, 16(11), 1562. https://doi.org/10.3390/polym16111562

Bozkurt, Y., Gülsoy, H., & Karayel, E. (2021). Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Tıbbi Ekipmanların Üretiminde Kullanımı. El-Cezeri, 8(2), 962-980. https://doi.org/10.31202/ecjse.902023

Cengiz, B., & Taylan, F. (2025). 3 boyutlu yazıcıda karbon fiber filamentten üretilen farklı dolgu deseni ve dolgu yoğunluğuna sahip numunelerin mekanik davranışlarının incelenmesi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 17(1), 10-19. https://doi.org/10.55974/utbd.1573225

Cengiz, B. (2024). 3 BOYUTLU YAZICIDA KARBON FİBER FİLAMENTTEN ÜRETİLEN FARKLI DOLGU DESENİ VE DOLGU YOĞUNLUĞUNA SAHİP NUMUNELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

(Master's thesis, Isparta Uygulamalı Bilimler University (Turkey)).

Çevik, Ü., & Kam, M. (2024). FDM METODU İLE YAPILAN ÜRETİMDE FARKLI DOLULUK ORANLARI VE DOLGU ŞEKİLLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ. 8.Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımları Kongresi.

Dağlı, M., Güden, E., & Demirer, A. (2025). FDM Yöntemiyle Üretilen Hyper-PLA Numunelerde Dolgu Deseni ve Doluluk Oranının Mekanik Özelliklere Etkisi ve Optimizasyonu. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 30(3), 1065-1081. https://doi.org/10.53433/yyufbed.1748993

Ganeshkumar, S., Kumar, S. D., Magarajan, U., Rajkumar, S., Arulmurugan, B., Sharma, S., Li, C., Ilyas, R. A., & Badran, M. F. (2022). Investigation of tensile properties of different infill pattern structures of 3d-printed pla polymers: Analysis and validation using finite element analysis in ansys. Materials, 15(15), 5142. https://doi.org/10.3390/ma15155142

Hodzic, D., & Pandzic, A. (2021). Influence of infill design on compressive and flexural mechanical properties of fdm printed pla material. In B. Katalinic (Ed.), DAAAM Proceedings (1st edn, Vol. 1, pp. 0191–0199). DAAAM International Vienna. https://doi.org/10.2507/32nd.daaam.proceedings.029

Karabıyık, Ö., & Apak, K. (2021). Eklemeli imalat yöntemiyle PLA malzemesinden üretilen ürünlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 13(2), 62-68. https://izlik.org/JA83TX77CL

Karakoç, B. (2023). HAVA ARACI PARÇALARININ EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE TASARIMI, OPTİMİZASYONU VE DENEYSEL KARŞILAŞTIRILMASI

(Master's thesis, Gazi University (Turkey)).

Lalegani Dezaki, M., Ariffin, M. K. A. M., Serjouei, A., Zolfagharian, A., Hatami, S., & Bodaghi, M. (2021). Influence of infill patterns generated by cad and fdm 3d printer on surface roughness and tensile strength properties. Applied Sciences, 11(16), 7272. https://doi.org/10.3390/app11167272

Pandzic, A., Hodzic, D., & Milovanovic, A. (2019). Effect of infill type and density on tensile properties of pla material for fdm process. In B. Katalinic (Ed.), DAAAM Proceedings (1st edn, Vol. 1, pp. 0545–0554). DAAAM International Vienna. https://doi.org/10.2507/30th.daaam.proceedings.074

Pernet, B., Nagel, J. K., & Zhang, H. (2022). Compressive strength assessment of 3D printing infill patterns. Procedia CIRP, 105, 682–687. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.114

Podroužek, J., Marcon, M., Ninčević, K., & Wan-Wendner, R. (2019). Bio-inspired 3d infill patterns for additive manufacturing and structural applications. Materials, 12(3), 499. https://doi.org/10.3390/ma12030499

Reddy, K., & Dufera, S. (2019). ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES.

Sürmen, H. K. (2019). EKLEMELİ İMALAT (3B BASKI): TEKNOLOJİLER VE UYGULAMALAR. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24(2), 373-392. https://doi.org/10.17482/uumfd.519147

Tatlı, O. (2020). ÜÇ BOYUTLU YAZICI TASARIMI, İMALATI VE DOLGU GEOMETRİSİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ (Master's thesis, Bursa Uludağ University (Turkey)).

Tok, M. (2023). BİR UÇAK BRAKETİNİN TOPOLOJİ YÖNTEMİYLE OPTİMİZASYONU, SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE ANALİZİ

(Master's thesis, Osmaniye Korkut Ata University (Turkey)).

Qamar Tanveer, Md., Mishra, G., Mishra, S., & Sharma, R. (2022). Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed Parts- a current review. Materials Today: Proceedings, 62, 100–108. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.310

https://adm.atauni.edu.tr/pluginfile.php/4602/mod_resource/content/1/Lojistik%20Bilgi%20Sistemleri%209.%20Hafta%20Ders%20Notu.pdf (13.05.26)

6th International
Congress of Engineering and Natural
Sciences

Design and Functional Evaluation of Vehicle Fender Components
Araç Çamurluk Parçalarında Tasarım ve Fonksiyonel Değerlendirmeler

Cihangir GÜNDÜZ[1]

Abstract

Fenders are critical components in vehicles, positioned around the front and rear wheel areas to provide coverage and isolation. Their primary function is to prevent external elements such as stones, water, and debris from entering sensitive internal parts like the engine compartment and vehicle body. They are used on both cars and bicycles and motorcycles, play a significant role in driving safely and comfort. The use of fenders becomes even more important, especially in rainy weather and bad condition roads. Beyond their main positioning, fenders interact with multiple surrounding components including the hood, bumper, doors, headlights, side panels, attached plastic parts, and the underbody structure. Therefore, their design requires careful consideration of these interfaces to ensure proper fit, functionality, and durability. Design changes in adjacent components can significantly influence fender geometry and performance, making the design process highly interdependent. There are some critical design criteria for fender parts. For example, gaps should be fixed in dimensions between the hood, doors, and headlamps. Fender fixations points should be strong on the body for rigidity. There should be smooth interfaces with bumpers. Ther should be some fixed faces for plastic parts and bumpers. Additionally, fenders can be produced using different material types such as metal, plastic, and composite materials, each offering specific advantages in terms of weight, cost, strength, and manufacturability. Metal fenders are very rigid and have a strong body. Al fenders have advantages for weight. Plastic fenders have more complex shapes. This study highlights the importance of fender design in terms of vehicle aesthetics, structural integrity, and safety, while emphasizing the need for an integrated design approach considering multi-component interactions.

Keywords: Fender, automotive body, design integration, material selection, vehicle safety

[1] Makine Mühendisi, Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., ArGe Merkezi, Orcid 0009-0004-5291-3634

1.GİRİŞ

Otomotiv endüstrisi, teknolojik gelişmeler, artan güvenlik gereksinimleri, hafif araç tasarımı ihtiyacı ve kullanıcı beklentilerindeki değişim doğrultusunda sürekli gelişen bir mühendislik alanıdır. Modern araçlarda yalnızca motor ve aktarma sistemleri değil, gövde yapıları ve dış panel tasarımları da performans, güvenlik, yakıt tüketimi ve estetik kalite açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda araç gövdesini oluşturan dış panel elemanları arasında yer alan çamurluklar hem fonksiyonel hem de yapısal açıdan kritik bileşenlerden biridir.

Çamurluklar, araçlarda ön ve arka tekerlek bölgelerinde konumlanan, tekerlek hareketi sırasında oluşan taş, su, çamur ve yol kalıntılarının araç gövdesine ve çevre bileşenlere ulaşmasını engelleyen koruyucu yapılardır. Bunun yanında motor bölmesi, kapı iç yüzeyleri ve alt gövde elemanlarının dış ortam etkilerinden korunmasına katkı sağlarlar. Özellikle yağışlı hava koşullarında ve kötü yol şartlarında çamurlukların etkin çalışması sürüş güvenliği, görüş kalitesi ve yolcu konforu açısından büyük önem taşımaktadır (Davies, 2012). Araç üzerinde çamurluk yerleşimi ve tekil hali Şekil 1'de gösterilmektedir.

Şekil 1 - *Örnek bir otomobil çamurluğu ((Inland Empire Autobody & Paint, n.d.).*

Günümüzde çamurluklar yalnızca koruyucu bir gövde elemanı olarak değerlendirilmemektedir. Araç tasarımındaki estetik beklentilerin artmasıyla birlikte çamurluk geometrileri araç stil çalışmalarının önemli bir parçası haline gelmiştir. Özellikle modern otomobillerde tekerlek çevresindeki yüzey geçişleri, karakter çizgileri ve aerodinamik form yapıları araç tasarım dilini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle çamurluk tasarımı, endüstriyel tasarım ve mühendislik disiplinlerinin birlikte çalışmasını gerektiren çok disiplinli bir süreç olarak değerlendirilmektedir.

Çamurluk tasarımı sırasında yalnızca parçanın kendi geometrisi değil, çevresindeki birçok araç komponenti ile olan ilişkisi de dikkate alınmalıdır. Çamurluk; kaput, tampon, far, ön kapı, marşpiyel, A sütunu, plastik trim parçaları ve alt gövde elemanları ile doğrudan bağlantılıdır. Bu nedenle ilgili parçalarda gerçekleştirilen herhangi bir geometrik değişiklik çamurluk tasarımını doğrudan etkileyebilmektedir. Özellikle otomotiv sektöründe "gap" ve "flush" olarak adlandırılan parçalar arası açıklık ve yüzey hizası kriterleri araç kalite algısını belirleyen temel parametreler arasında yer almaktadır (Söderberg & Lindkvist, 2002).

Araç gövdesinde kullanılan dış panel elemanlarının rijitliği ve montaj performansı da büyük önem taşımaktadır. Çamurluk bağlantı noktalarının yetersiz olması durumunda titreşim

kaynaklı deformasyonlar, NVH (gürültü ve titreşim) problemleri ve montaj tolerans hataları ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle çamurluk tasarımında bağlantı yüzeyleri, takviye bölgeleri ve montaj yöntemleri detaylı şekilde analiz edilmektedir (Lorenzo et al., 2000).

Son yıllarda otomotiv sektöründe hafif araç tasarımına yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Yakıt tüketimini azaltmak ve emisyon değerlerini düşürmek amacıyla araç ağırlığının azaltılması büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda çamurluk üretiminde kullanılan malzemelerde de önemli değişimler yaşanmaktadır. Geleneksel çelik çamurlukların yanında alüminyum, plastik ve kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle kompozit ve plastik çamurluklar daha düşük ağırlık ve karmaşık geometrilerin üretilebilmesi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır (Swamy et al., 2018).

Bununla birlikte çamurluk tasarımında yalnızca hafiflik değil; dayanım, üretilebilirlik, maliyet, korozyon direnci ve geri dönüştürülebilirlik gibi kriterler de dikkate alınmaktadır. Sac metal çamurluklarda derin çekme operasyonları, kalıp çıkış açıları ve yaylanma davranışları üretim sürecinin temel problemleri arasında yer alırken, plastik ve kompozit çamurluklarda kalıp maliyetleri ve termal davranışlar önemli tasarım parametreleri olarak değerlendirilmektedir (Kalpakjian & Schmid, 2014).

Bu çalışmada araç çamurluklarının temel fonksiyonları, tasarım kriterleri, bağlantı yapıları, malzeme alternatifleri ve çoklu komponent etkileşimleri incelenmiştir. Ayrıca modern otomotiv tasarım süreçlerinde çamurlukların araç estetiği, yapısal bütünlük ve güvenlik açısından taşıdığı önem değerlendirilmiş ve bütünleşik tasarım yaklaşımının gerekliliği vurgulanmıştır.

2. ÇAMURLUĞUN FONKSİYONLARI

Çamurluklar, otomotiv gövde yapısında hem koruyucu hem de yapısal görevler üstlenen önemli dış panel elemanlarıdır. Temel işlevleri tekerlek hareketi sırasında oluşan dış etkilerin araç gövdesine ulaşmasını engellemek olsa da modern araç tasarımında çamurluklar; aerodinamik performans, estetik görünüm, montaj entegrasyonu ve güvenlik açısından da kritik görevler üstlenmektedir. Günümüzde otomotiv sektöründe çamurluk tasarımı yalnızca bir kaplama elemanı olarak değil, çok fonksiyonlu bir mühendislik bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle çamurluk tasarımı, araç geliştirme süreçlerinde multidisipliner mühendislik yaklaşımı gerektiren önemli bir çalışma alanıdır.

2.1 Dış Etkenlere Karşı Koruma

Çamurlukların en temel görevi, araç hareket halindeyken tekerleklerden sıçrayan taş, çamur, su, kar ve diğer yol kalıntılarının araç gövdesine ve çevre bileşenlere ulaşmasını engellemektir. Özellikle yüksek hızlarda tekerlek dönüşüyle birlikte oluşan parçacık hareketleri motor bölmesi, kapı içleri ve alt gövde bileşenleri için ciddi risk oluşturabilmektedir.

Çamurluklar sayesinde:

Motor bölmesi kirlenmeye karşı korunur,

Elektrik ve elektronik sistemlerin zarar görmesi engellenir,

Boya yüzeylerinde taş çarpması kaynaklı hasarlar azaltılır,

Alt gövde bileşenlerinin ömrü uzatılır.

Özellikle yağışlı hava koşullarında su sıçramasının kontrol edilmesi sürüş güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Çamurluk yapısı ve iç davlumbaz sistemi birlikte çalışarak suyun kontrollü şekilde tahliye edilmesini sağlar. Araçların ortam şartlarında maruz kalabileceği dış etkenler Şekil 2'de gösterilmiştir.

Şekil 2 - *Araçlara çamurluk bölgesinden gelen dış etkenler (Amazon.com.tr, n.d.).*

2.2 Sürüş Güvenliği ve Görüş Kalitesine Katkı

Araç hareketi sırasında tekerleklerden sıçrayan su ve çamurun kontrol edilmesi yalnızca araç koruması açısından değil, sürüş güvenliği açısından da kritik öneme sahiptir. Çamurluklar tarafından yönlendirilmeyen su parçacıkları:

Ön cam görüşünü azaltabilir,

Yan aynaların kirlenmesine neden olabilir,

Arkadaki araçların görüşünü etkileyebilir.

Bu nedenle çamurluk geometrileri, su ve hava akışını kontrollü şekilde yönlendirecek biçimde tasarlanmaktadır. Özellikle ticari araçlarda ve SUV segmentinde genişletilmiş çamurluk yapıları yol güvenliğini artırmak amacıyla kullanılmaktadır.

2.3 Aerodinamik Performansa Katkı

Modern otomotiv tasarımlarında aerodinamik performans yakıt tüketimi, sürüş stabilitesi ve rüzgâr gürültüsü açısından büyük önem taşımaktadır. Çamurluklar tekerlek çevresindeki hava akışını yönlendiren temel dış yüzey elemanlarından biridir. Tekerlek bölgeleri araç üzerindeki en yüksek türbülans oluşan alanlardan biri olduğu için çamurluk tasarımı hava akışının optimize edilmesinde önemli rol oynar. Uygun tasarlanmış bir çamurluk:

Hava sürükleme katsayısını azaltabilir,

Yakıt tüketimini düşürebilir,

Rüzgâr kaynaklı gürültüyü azaltabilir,

Yüksek hız stabilitesini artırabilir.

Özellikle elektrikli araçlarda aerodinamik verimlilik daha önemli hale geldiğinden çamurluk tasarımlarında CFD (Computational Fluid Dynamics) analizleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.4 Yapısal Destek ve Rijitlik Sağlama

Çamurluklar doğrudan ana taşıyıcı gövde elemanı olmasa da araç gövdesinin genel rijitliğine katkıda bulunmaktadır. Özellikle bağlantı bölgeleri sayesinde:

Ön gövde yapısının stabilitesi desteklenir,

Titreşim davranışları iyileştirilir,

Montaj toleransları korunur.

Çamurluk bağlantı noktalarının yetersiz rijitliğe sahip olması durumunda titreşim kaynaklı deformasyonlar ve NVH problemleri oluşabilmektedir. Bu nedenle modern araçlarda çamurluk bağlantı bölgeleri takviye elemanları ile desteklenmektedir (Lorenzo et al., 2000).

2.5 Estetik ve Tasarım Kimliği Oluşturma

Araç tasarımında çamurluklar, aracın genel karakterini belirleyen en önemli dış yüzey elemanlarından biridir. Özellikle:

Tekerlek kemeri formu,

Yüzey geçişleri,

Karakter çizgileri,

Geniş omuz yapıları araç tasarım dilini doğrudan etkilemektedir.

Sportif araçlarda geniş çamurluk yapıları agresif görünüm sağlarken, şehir araçlarında daha kompakt ve yumuşak geçişli tasarımlar tercih edilmektedir. Günümüzde araç markaları tasarım kimliklerini oluştururken çamurluk geometrilerini önemli bir stil unsuru olarak kullanmaktadır.

3. DİĞER ARAÇ PARÇALARI İLE ETKİLEŞİMİ

Çamurluk tasarımı, otomotiv gövde geliştirme sürecinde bağımsız olarak ele alınabilecek bir tasarım problemi değildir. Aksine, araç üzerindeki birçok dış ve iç gövde komponenti ile doğrudan geometrik, yapısal ve montaj ilişkisi bulunan, yüksek derecede bağımlı bir sistemin parçasıdır. Bu nedenle çamurluk tasarımı, “çoklu komponent etkileşimi” (multi-component interaction) yaklaşımı çerçevesinde değerlendirilmelidir. Modern araçlarda özellikle Body-in-White (BIW) yapısı içerisinde tüm dış panel elemanları birlikte geliştirilmekte ve çamurluk geometrisi; kaput, tampon, farlar, kapılar, yan paneller ve alt gövde yapıları ile eş zamanlı olarak optimize edilmektedir. Bu yaklaşım, tasarım sürecinde oluşabilecek çakışmaları azaltmak, montaj hatalarını önlemek ve araç genel kalite seviyesini artırmak amacıyla kullanılmaktadır (Davies, 2012; Swamy et al., 2018). Çamurluklar birçok araç komponenti ile doğrudan bağlantılıdır. Bunlar arasında:

Kaput,

Tampon,

Farlar,

Ön kapılar,

Marşpiyel,

Plastik trim parçaları,

Davlumbaz sistemleri yer almaktadır.

Bu nedenle çamurluk tasarımı sırasında çevre parçalar ile olan gap-flush ilişkileri dikkatli şekilde kontrol edilmelidir. Çevre komponentlerde yapılan küçük geometrik değişiklikler bile çamurluk yüzeyini doğrudan etkileyebilmektedir. Bu durum otomotiv sektöründe eş zamanlı mühendislik yaklaşımının önemini artırmaktadır. Araç üzerinde çamurluk bölgesindeki parçaların yerleşimi Şekil 3'te gösterilmektedir.

Şekil 3- *Araçlara çamurluk bölgesindeki parçalar (Bing, n.d.).*

3.1 Kaput ve Çamurluk Etkileşimi

Kaput ve çamurluk arasındaki ilişki, özellikle araç ön yüzey geometrisinin belirlenmesinde kritik rol oynar. Bu bölgede belirlenen gap ve flush değerleri hem estetik algıyı hem de aerodinamik performansı doğrudan etkiler. Kaput açılma mekanizması, menteşe yapısı ve kilit sistemi çamurluk üst geometrisi ile doğrudan ilişkilidir.

Kaput tasarımında yapılan küçük bir değişiklik bile çamurluk üst kenar formunun yeniden şekillendirilmesini gerektirebilir. Bu durum özellikle tasarım döngülerinde tekrar mühendislik (re-engineering) ihtiyacı doğurabilir (Söderberg & Lindkvist, 2002).

Tampon ile Etkileşim

Çamurluk ve tampon birleşim bölgesi, araç ön ve arka tasarımının en kritik yüzey geçişlerinden biridir. Bu bölgede; yüzey sürekliliği, montaj toleransı, darbe emme performansı, plastik- metal birleşim noktaları dikkate alınmalıdır.

Tampon geometrisindeki değişiklikler çamurluk alt bağlantı noktalarını ve yüzey eğriliğini doğrudan etkileyebilir. Ayrıca çarpışma durumlarında enerji emme davranışı da bu iki komponentin birlikte çalışmasıyla sağlanır (Lorenzo et al., 2000).

Far ve Aydınlatma Sistemleri ile Etkileşim

Far grupları çamurluk geometrisi ile doğrudan entegre çalışan bileşenlerdir. Far yerleşimi; çamurluk üst yüzey formunu, yan yüzey geçişlerini, montaj braketi tasarımını doğrudan etkiler.

Ayrıca modern araçlarda LED ve adaptif far sistemlerinin boyut ve şekil değişiklikleri, çamurluk yüzeyinde önemli tasarım revizyonlarına neden olmaktadır. Bu durum özellikle yüzey kalitesi ve gap kontrolü açısından kritik bir tasarım problemidir.

3.4 Kapılar ve Yan Gövde Panelleri ile Etkileşim

Ön kapılar ile çamurluk arasındaki bağlantı, araç yan görünüş estetiğini belirleyen en önemli alanlardan biridir. Bu bölgede:

Kapı açılma hareketi,

Menteşe konumu,

Sızdırmazlık elemanları,

Yüzey hizalama (flush) kriterleri dikkate alınır.

Yan gövde panelleri ile çamurluk arasındaki süreklilik, araç gövdesinin "fit & finish" kalitesini belirler. Küçük geometrik sapmalar bile kullanıcı algısında kalite düşüşüne neden olabilmektedir (Malan & Van der Walt, 2010).

Alt Gövde ve Davlumbaz Sistemleri ile Etkileşim

Çamurluk iç yapısı, tekerlek bölgesindeki davlumbaz (wheel housing liner) ile birlikte çalışır. Bu sistem; su ve çamur yönlendirme, taş sıçramasının engellenmesi, gürültü azaltımı (NVH), aerodinamik akış kontrolü gibi fonksiyonları yerine getirir.

Davlumbaz geometrisi çamurluk iç yüzeyine doğrudan bağlı olduğu için malzeme seçimi ve montaj toleransları birlikte değerlendirilmelidir. Özellikle plastik liner sistemlerinde klips yerleşimleri çamurluk bağlantı tasarımını doğrudan etkiler.

4. ÇAMURLUK TASARIMINDA KRİTERLER

Çamurluk tasarımı, yalnızca geometrik bir dış panel oluşturma süreci değil; aynı zamanda estetik, fonksiyonel, yapısal ve üretim gereksinimlerini aynı anda karşılayan çok disiplinli bir mühendislik problemidir. Bu nedenle tasarım sürecinde birçok kriter birlikte değerlendirilmelidir. Bu kriterler, aracın kalite algısını, dayanımını, montaj verimliliğini ve uzun dönemli performansını doğrudan etkiler.

Çamurluk tasarımında kritik konular; gap-flush kontrolü, bağlantı rijitliği, darbe dayanımı, aerodinamik performans, üretilebilirlik, montaj kolaylığı, malzeme seçimi ve estetik uyum gibi çok boyutlu parametrelerden oluşmaktadır. Bu kriterlerin tamamı birlikte değerlendirildiğinde, çamurluk tasarımının yalnızca bir şekil oluşturma süreci değil, bütünleşik bir mühendislik optimizasyon problemi olduğu görülmektedir.

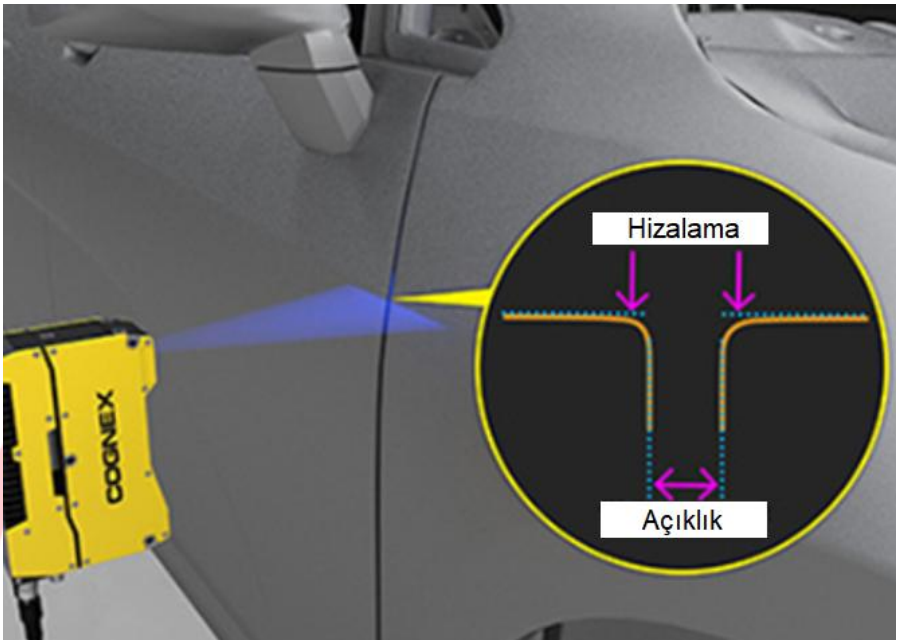
4.1 Gap ve Flush (Açıklık ve Yüzey Hizası) Gereksinimleri

Çamurluk tasarımında en önemli kalite kriterlerinden biri, komşu parçalar ile olan açıklık (gap) ve yüzey hizası (flush) değerleridir. Bu değerler özellikle kaput, kapı ve farlarla olan birleşim bölgelerinde kritik rol oynar.

Gap (açıklık): İki parça arasındaki mesafedir. Fazla olması kalite algısını düşürür, çok az olması montaj ve sürtünme sorunlarına yol açar.

Flush (hizalama): Yüzeylerin aynı düzlemde olup olmadığını ifade eder.

Literatürde, otomotiv dış yüzey kalitesinin büyük ölçüde bu iki parametreye bağlı olduğu ve kullanıcıların araç algısını doğrudan etkilediği belirtilmektedir (Söderberg & Lindkvist, 2002; Malan & Van der Walt, 2010). Araç üzerinde örnek bir açıklık ve hizalama ölçümü Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4 - *Örnek bir açıklık ve hizalama ölçümü ((Metrology News, n.d.).*

4.2 Bağlantı Noktalarının Dayanımı ve Rijitlik

Çamurluk, genellikle cıvata, klips veya puntalı bağlantılarla araç gövdesine bağlanır. Bu bağlantı noktaları; yeterli rijitliğe sahip olmalı, titreşim altında gevşememeli, uzun ömürlü dayanım göstermelidir.

Yetersiz bağlantı rijitliği durumunda; titreşim kaynaklı ses problemleri (NVH), parça gevşemesi, montaj tolerans kaymaları, yorulma çatlakları görülebilir.

BIW (Body-in-White) sistemlerinde dış panel bağlantılarının araç genel rijitliğine katkı sağladığı ve yapısal stabiliteyi etkilediği bilinmektedir (Lorenzo et al., 2000).

4.3 Darbe Dayanımı ve Güvenlik Gereksinimleri

Çamurluklar doğrudan bir darbe emici yapı olmasa da küçük çarpışmalarda enerji dağılımına katkı sağlar. Özellikle düşük hızlı darbe senaryolarında; yaya güvenliği, park hasarları, yan darbe etkileri dikkate alınmalıdır.

Bu nedenle malzeme seçimi ve geometrik form, darbe enerjisini absorbe edecek veya kontrollü şekilde dağıtacak biçimde tasarlanır. Plastik ve kompozit malzemeler bu açıdan metal yapılara göre daha esnek deformasyon davranışı gösterebilir (Swamy et al., 2018).

4.4 Aerodinamik Performans

Çamurluk bölgesi, tekerlek hareketi nedeniyle aracın en yüksek türbülans oluşan alanlarından biridir. Bu nedenle çamurluk geometrisi; hava akışını yönlendirmeli, türbülansı azaltmalı, sürükleme katsayısını (Cd) optimize etmelidir.

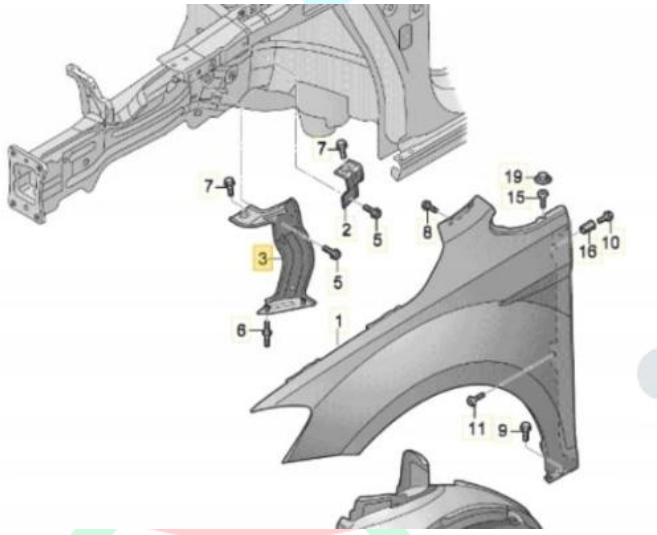
Özellikle yüksek hızda kullanılan araçlarda ve elektrikli araçlarda aerodinamik verimlilik doğrudan menzil ve yakıt tüketimi ile ilişkilidir. CFD analizleri çamurluk tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Üretilebilirlik

Çamurluk tasarımının seri üretime uygun olması temel gerekliliklerden biridir. Sac metal çamurluklarda özellikle; derin çekme kabiliyeti, kalıp çıkış açıları, büküm yarıçapları, springback (geri esneme), malzeme akış davranışı kritik parametrelerdir. Üretilemeyen veya zor üretilen geometriler maliyet artışına ve üretim hatalarına neden olur (Kalpakjian & Schmid, 2014).

Montaj ve Servis Kolaylığı

Çamurluklar üretim hattında hızlı ve doğru şekilde monte edilebilmelidir. Ayrıca servis süreçlerinde kolay sökülüp takılabilmesi önemlidir. Far değişimi, tampon sökme, davlumbaz erişimi gibi işlemler çamurluk tasarımını etkiler. Montaj sırası ve bağlantı erişilebilirliği tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır. Örnek bir çamurluğun montaj ve servis ile ilgili görseli Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5 - *Örnek bir çamurluğun montaj şeması (VAG247, n.d.).*

4.7 Malzeme Seçimi ve Ağırlık Optimizasyonu

Çamurluklarda kullanılan malzeme, aracın toplam ağırlığı ve performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Günümüzde yaygın malzemeler:

Çelik

Alüminyum

Plastik (PP, ABS vb.)

Kompozit malzemeler

Her malzeme farklı avantajlar sunar. Çelik yüksek dayanım, düşük maliyet. Alüminyum hafiflik, korozyon direnci. Plastik tasarım esnekliği, düşük ağırlık. Kompozit yüksek performans / ağırlık oranı.

Araştırmalar, hafif malzeme kullanımının araç yakıt tüketimi ve emisyon değerlerini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir (Davies, 2012; Swamy et al., 2018).

Estetik ve Tasarım Uyumu

Çamurluk, araç dış tasarım kimliğini doğrudan etkileyen bir yüzey elemanıdır. Bu nedenle; yüzey sürekliliği, karakter çizgileri, oran ve hacim dengesi, marka tasarım dili ile uyumlu olmalıdır.

Özellikle premium segment araçlarda çamurluk yüzey kalitesi, kullanıcı algısında doğrudan kalite göstergesi olarak kabul edilmektedir (Malan & Van der Walt, 2010).

4.9 Eş Zamanlı Mühendislik Yaklaşımı

Çamurluk tasarımında çoklu komponent etkileşimlerinin yüksek olması nedeniyle geleneksel ardışık tasarım yöntemleri yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle otomotiv sektöründe eş zamanlı mühendislik yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde; tasarım değişiklikleri erken aşamada entegre edilir, komponentler arası çakışmalar azaltılır, prototip maliyetleri düşer, geliştirme süresi kısalır.

Özellikle geliştirme süreçlerinde çamurluk gibi dış panel parçaları CAD ortamında tüm çevre komponentlerle birlikte optimize edilmektedir (Park et al., 2016).

4.10 Tasarım Değişikliklerinin Zincir Etkisi

Çamurluk üzerinde yapılan herhangi bir geometrik değişiklik, araç üzerindeki birçok sistemi zincirleme şekilde etkileyebilir. Örneğin:

Çamurluk genişliği değişirse → kapı geometrisi etkilenir,

Far boyutu değişirse → çamurluk üst formu revize edilir,

Tampon yükselirse → alt bağlantı noktaları yeniden tasarlanır.

,Bu nedenle modern araç geliştirme süreçlerinde parametrik CAD sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

5. SONUÇ

Çamurluklar, otomotiv gövde sistemlerinde yalnızca tekerlek çevresini kapatan basit dış panel elemanları değil; araç güvenliği, estetik görünüm, aerodinamik performans, yapısal dayanım ve sürüş konforu açısından kritik görevler üstlenen çok fonksiyonlu bileşenlerdir. Araç hareketi sırasında oluşan taş, çamur, su ve yol kalıntılarının araç gövdesine ulaşmasını engelleyerek hem araç bileşenlerinin korunmasına hem de sürüş güvenliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle kötü hava ve yol koşullarında çamurlukların etkin çalışması araç performansı açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışma kapsamında çamurlukların temel fonksiyonları, tasarım kriterleri, malzeme alternatifleri ve çevre komponentlerle olan etkileşimleri detaylı şekilde incelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda çamurluk tasarımının yalnızca tek bir parçanın geometrik olarak

modellenmesinden ibaret olmadığı, aksine çok disiplinli mühendislik yaklaşımı gerektiren karmaşık bir ürün geliştirme süreci olduğu görülmüştür.

Çamurluk tasarımında özellikle gap ve flush kontrolü, bağlantı noktalarının dayanımı, yüzey sürekliliği ve montaj toleransları araç kalite algısını doğrudan etkileyen temel kriterler arasında yer almaktadır. Kaput, tampon, far ve kapılar gibi çevre parçalar ile olan yüzey uyumu hem estetik kaliteyi hem de montaj performansını belirlemektedir. Çalışmada ayrıca çamurluk bağlantı noktalarının rijitliği ve yapısal dayanım gereksinimleri de değerlendirilmiştir. Malzeme seçimi açısından değerlendirildiğinde ise geleneksel çelik çamurlukların yüksek dayanım ve düşük maliyet avantajına sahip olduğu, ancak araç ağırlığını artırdığı görülmektedir. Buna karşılık alüminyum, plastik ve kompozit malzemeler özellikle hafif araç tasarımı açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Çoklu komponent etkileşimleri açısından incelendiğinde çamurlukların araç üzerindeki birçok sistem ile doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. Kaput, tampon, far, ön kapı, davlumbaz ve alt gövde sistemlerinde yapılan küçük bir geometrik değişiklik dahi çamurluk tasarımını etkileyebilmektedir. Bu durum otomotiv geliştirme süreçlerinde eş zamanlı mühendislik yaklaşımının önemini artırmaktadır. Günümüzde CAD tabanlı parametrik modelleme sistemleri, dijital doğrulama yöntemleri ve CAE analizleri sayesinde bu etkileşimler daha etkin şekilde yönetilebilmektedir.

Çamurluk tasarımı; estetik, dayanım, üretilebilirlik, maliyet, aerodinamik performans ve çoklu komponent entegrasyonunun aynı anda değerlendirilmesini gerektiren kompleks bir otomotiv mühendisliği problemidir. Modern otomotiv sektöründe araç geliştirme süreçlerinin giderek daha karmaşık hale gelmesi, çamurluk gibi dış panel elemanlarının önemini daha da artırmaktadır. Gelecekte özellikle hafif malzemeler, sürdürülebilir üretim yöntemleri, akıllı yüzey teknolojileri ve dijital mühendislik uygulamalarının çamurluk tasarımlarında daha yaygın şekilde kullanılacağı öngörülmektedir. Bu doğrultuda çamurluk tasarımı, otomotiv mühendisliğinde hem akademik hem de endüstriyel açıdan önemini koruyan kritik çalışma alanlarından biri olmaya devam edecektir.

KAYNAKÇA

Davies, G. (2012). *Materials for automobile bodies* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

Gao, Z. L., Kong, Q. H., Lin, J. P., Hu, Q. S., & Chen, Y. (2012). A new design method of body-in-white lightweight considering NVH performance. *Advanced Materials Research, 482–484*, 1979–1984. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.482-484.1979

Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). *Manufacturing engineering and technology* (7th ed.). Pearson Education.

Lorenzo, L., Sweet, D., Tao, D., & Tudor, J. (2000). Acoustic and structural treatment of body-in-white (SAE Technical Paper No. 2000-01-3167). SAE International. https://doi.org/10.4271/2000-01-3167

Ludwig, K. (1988). *Sheet metal forming handbook*. McGraw-Hill.

Malan, D., & Van der Walt, P. (2010). Automotive panel gap and flush optimization for perceived quality improvement. *International Journal of Industrial Ergonomics, 40*(6), 690–697. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2010.06.004

Mouritz, A. P. (2012). *Introduction to aerospace materials*. Woodhead Publishing.

Park, D., Jeong, S. H., Kim, C. W., Yang, H. W., Kim, D. S., & Choi, D. H. (2016). Material arrangement optimization for weight minimization of an automotive body in white using a bi-level design strategy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 230*(9), 1231–1245. https://doi.org/10.1177/0954407015586677

Pawlowski, J. (1969). *Vehicle body engineering*. Business Books Limited.

Rajasekaran, M., Hari Ram, V., & Subramanian, M. (2016). A new minimal part breakup body-in-white design approach and optimized material map strength assessment. *Jurnal Teknologi, 78*(6-9), 59–66. https://doi.org/10.11113/jt.v78.5597

Sapuan, S. M., Suddin, N., & Maleque, M. A. (2002). A critical review of polymer-based composite automotive bumper systems. *Polymers and Polymer Composites, 10*(8), 563–567. https://doi.org/10.1177/096739110201000806

Söderberg, R., & Lindkvist, L. (2002). Stability and seam variation analysis for automotive body design. *Journal of Engineering Design, 13*(2), 173–187. https://doi.org/10.1080/09544820210129788

Swamy, B. E. K., Kumar, G. B. V., Krishna, M., & Prasad, K. E. (2018). State of the art on automotive lightweight body-in-white design. *Materials Today: Proceedings, 5*(1), 171–178. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.060

Ulsab Team. (2002). *ULSAB-AVC: Advanced vehicle concepts report*. WorldAutoSteel.

Zhang, J., Wang, B., & Jin, F. (2017). Multi-scale design of three-dimensional woven composite automobile fender using modified particle swarm optimization algorithm. *Composite Structures, 182*, 81–89. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.090

Amazon.com.tr. (n.d.). *ENFILY araba tampon koruması çamurluk şekillendirme aksesuarı.* Retrieved from https://www.amazon.com.tr/

Bing. (n.d.). *Automobile fender area image.* Retrieved from https://www.bing.com/

Inland Empire Autobody & Paint. (n.d.). *Quarter panel vs fender: What is the difference?* Retrieved from https://ieabp.com/

Metrology News. (n.d.). *Measuring flush and gap during final vehicle assembly verification with advanced 3D laser profilers.* Retrieved from https://metrology.news/

VAG247. (n.d.). *Front fender left holder bracket VW Touran 2016–2025.* Retrieved from https://www.vag247.com/

6th International
Congress of Engineering and Natural
Sciences

Bell Type Industrial Furnace Retort Cooling: An Experimental and Numerical Study

Alper KELEŞOĞLU[1]

Abstract

Bell-type industrial furnaces are widely used in heat treatment processes due to their batch production capability, uniform temperature distribution, and operational flexibility. This study examines at the effect of cooling air flow rate on the cooling performance of a bell-type industrial furnace retort by comparing cooling time, pressure loss, and temperature homogeneity between upper and lower zones. Experimental data and numerical simulations done for the flow rate conditions (1000-2000 m³/h) were compared for cooling from 625°C to 150°C with minimum cooling ramp as 120°C/min. The findings show that raising the volumetric air flow rate greatly reduces cooling time in both zones thanks to improved convective heat transfer. However, this improvement comes with a significant rise in pressure loss, indicating a larger energy need for airflow generation. Despite the increased cooling rates, there was a persistent temperature differential between zones 1 and 2 where they are located longwise of the retort, indicating that increasing flow rate alone is insufficient to achieve thermal homogeneity. The experimental condition showed a lower temperature gradient, emphasizing the relevance of optimal operating parameters and flow distribution. As a result, the data demonstrate a key trade-off between cooling efficiency, energy consumption, and temperature uniformity, underlining the importance of balancing all three aspects for optimal system performance.

Keywords: Industrial furnace, Cooling, Bell type, Retort

[1] Dr., Sistem Teknik Industrial Furnaces, R&D Center, Orcıd: 0000-0001-7139-6653

INTRODUCTION

Bell-type industrial furnaces are commonly used in heat treatment operations because of their operating flexibility, homogeneous temperature distribution and suitability for batch production (Ko and Huang, 2022: 99). These furnaces are particularly useful for annealing and heat-treating metallic materials such as high-ductility or grain-oriented steel coils, where fine thermal control is required to achieve the necessary microstructural and mechanical qualities (Kirubakaran et al., 2013: 371). Among the several steps of the heat treatment cycle, the cooling phase is critical in defining the final material properties (Dou et al., 2020). The cooling process in bell-type furnace retorts is a complicated phenomenon governed by coupled heat transfer modes such as conduction, convection, and radiation. Furthermore, protective atmospheres and retort geometry have a substantial impact on cooling rate and temperature uniformity (Dou et al., 2020). Non-uniform cooling may result in undesired effects such as residual stresses, deformation, or heterogeneous microstructures, lowering product quality. In industrial applications, boosting cooling performance is critical not just for improving product quality, but also for increasing energy economy and lowering process time (Qi et al., 2013: 585). However, experimental investigations are frequently insufficient because to high operational expenses and limited access to detailed temperature fields within the retort. As a result, numerical modeling has become an essential tool for analyzing and enhancing furnace performance. In this study the cooling characteristic of the bell type annealing furnace retort was investigated for temperatures between 625°C to 150°C. For this reason, three different volume flow rates of cooling air (2000 m^3/h, 1500 m^3/h, 1000 m^3/h) were employed in the numerical study to identify the optimum working point to achieve at least 120°C/min cooling rare. Finally, the result was validated with experimental trial.

MATERIALS AND METHOD

Numerical Modelling

A three-dimensional steady fluid dynamics model and coupled transient heat transfer model formed to simulate the cooling process in a bell-type furnace retort as shown in Figure 1(a). The numerical model was built with a commercial CFD/FEM software package Comsol Multiphysics. The computational domain encompassed the retort, the surrounding air region, and the furnace walls. Appropriate boundary conditions were used, which included convective heat transfer coefficients at the external surfaces and radiative heat exchange between surfaces and relative fluid dynamic inlet and outlet values. The mesh structure (Figure 1(b)) was created utilizing a hybrid approach to assure accuracy in locations with large temperature gradients while remaining computationally efficient.

Experimental Setup

Experiments were conducted in the bell type furnace produced by Sistem Teknik Industrial Furnaces with serial no PF-EH-AC-1243. The retort had 1.5 m diameter and 4 m height. Thermocouples (Type-K) were put in various positions (Figure 1(c)) throughout the retort to detect temperature changes during the cooling process. Measurement points were chosen to capture temperature gradients. During the cooling process, the data collecting equipment recorded temperature measurements at regular intervals. The furnace was initially heated to a predefined temperature that is typical of industrial operations. After establishing

thermal equilibrium, the cooling phase began by activating the exterior cooling system, which uses forced convection with ambient or conditioned air. The cooling duration and airflow rates were monitored and recorded for future investigation.

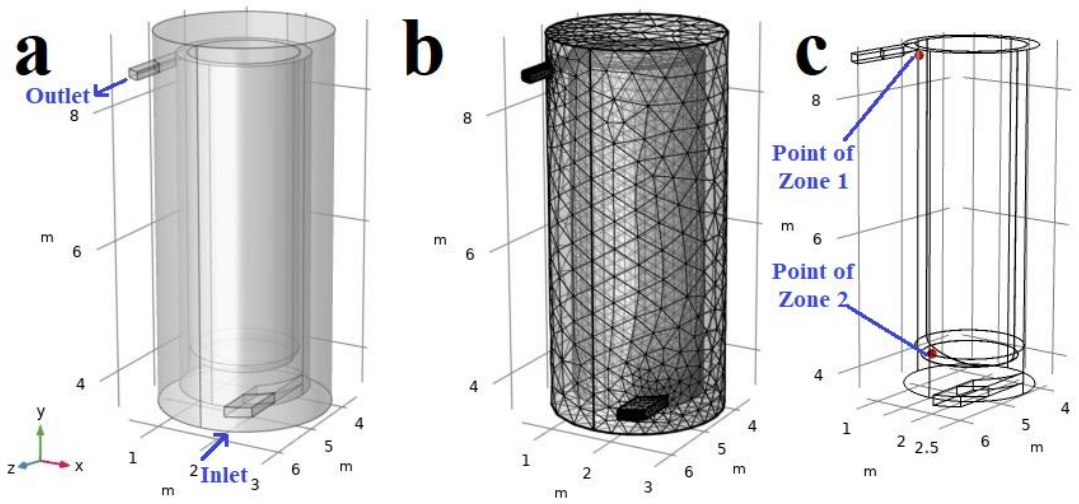


Figure 1. *a) Geometry, b) Mesh and c) Zone Points of the Simulation Study*

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 2 illustrates the temperature contour and velocity streamline at 140th minute of the cooling stage. At this time, it was observed that the temperature measurement point of zone 2 nearly reached to the ambient atmosphere temperature. Moreover, it was seen that the temperature distribution on the retort was changed longwise due to the severe heat transfer which caused high temperature difference between zone 1 and zone 2. Due to the heat treatment materials were inside the retort, it can be concluded that the cooling of the materials was slightly affected this non-homogenous temperature distribution on retort. Within this perspective, it is important to cool the retort within a short time to prevent uneven cooling from the material side. Apart from that, same velocity streamline was obtained without interruption of the flow.

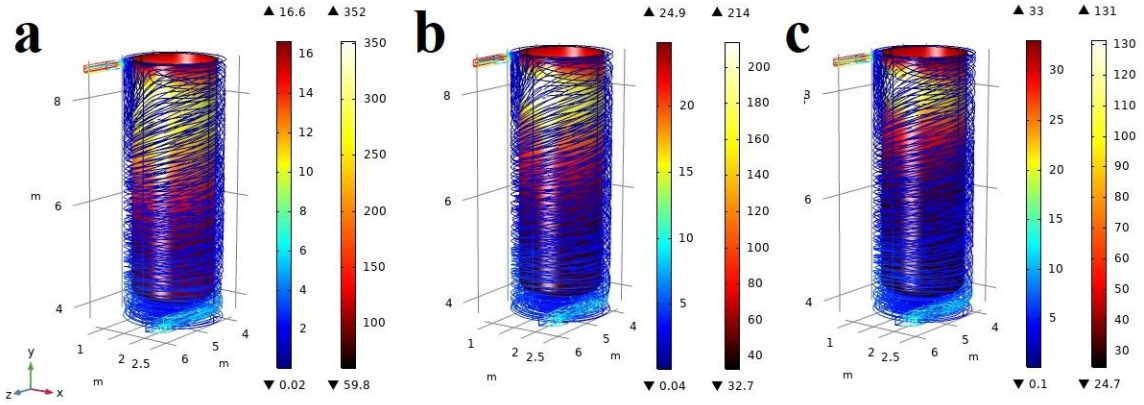


Figure 2. *Temperature Contour and Velocity Streamline for Cooling Air Volume Flowrate a) 1000 m^3/h, b) 1500 m^3/h, c) 2000 m^3/h*

Figure 3 demonstrates the comparison between the numerical and experimental temperature distribution on the insulation. Numerical results represented within Figure 3(a) and 3(b) are the same but the color range was arranged in order to get better view for comparison with experimental results. In Figure 3(a), the thermal image belong to the experimental study

is belonged to the gate of the furnace where the maximum temperature was observed for the nitrogen exhaust line as 155°C. The comparison was made with the average value obtained for the rectangular area where it is named AV1. The evaluated value was 72°C and it was found quite same with numerical result. In Figure 3(b), the average value represented as AV1 was measured as 30°C and it was found quite similar.

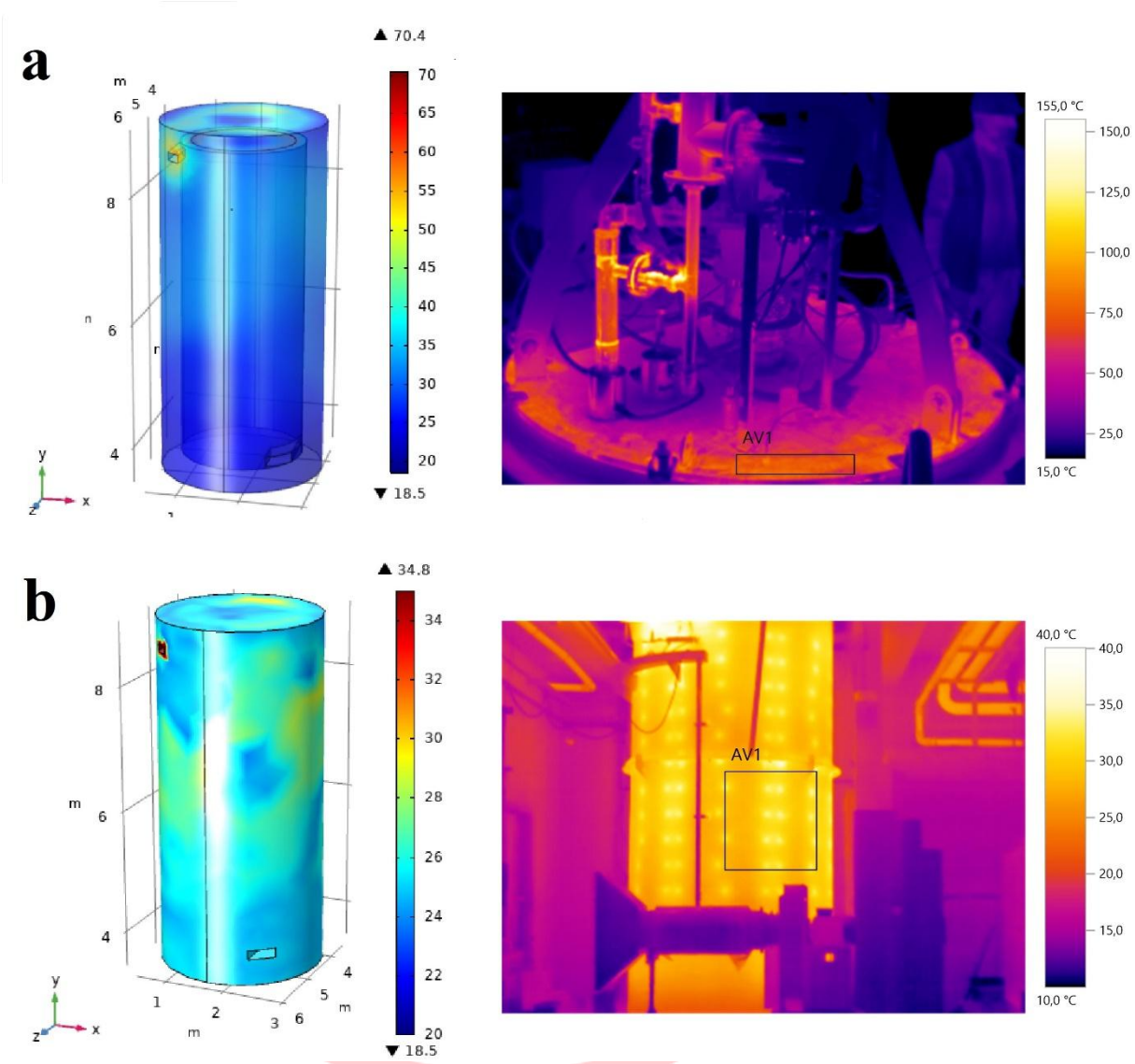


Figure 3. *Temperature Contour and Experimental Thermal Image of the Furnace Exterior Surface for 1500 m^3/h a) Full Temperature Range, b) Arranged Temperature Range*

Figure 4 shows the cooling trend of the point of zone 1 and zone 2 for experimental and numerical study. Naturally, it is seen that the cooling speed was enhanced with increasing volume flow rate. However, it was found that the cooling ramp did not have the linear relationship with the cooling air volume flowrate. The maximum cooling ramp for whole cases considered within this study was occurred in the first 20 min due to large temperature difference between the cooling air and retort. During the cooling, a continuous reduction is observed by means of cooling rate and it was thought that it is related with the dominant heat transfer mechanism: convection. From the graph, it was determined that numerical studies with different flow rates did not match fully with the experimental result.

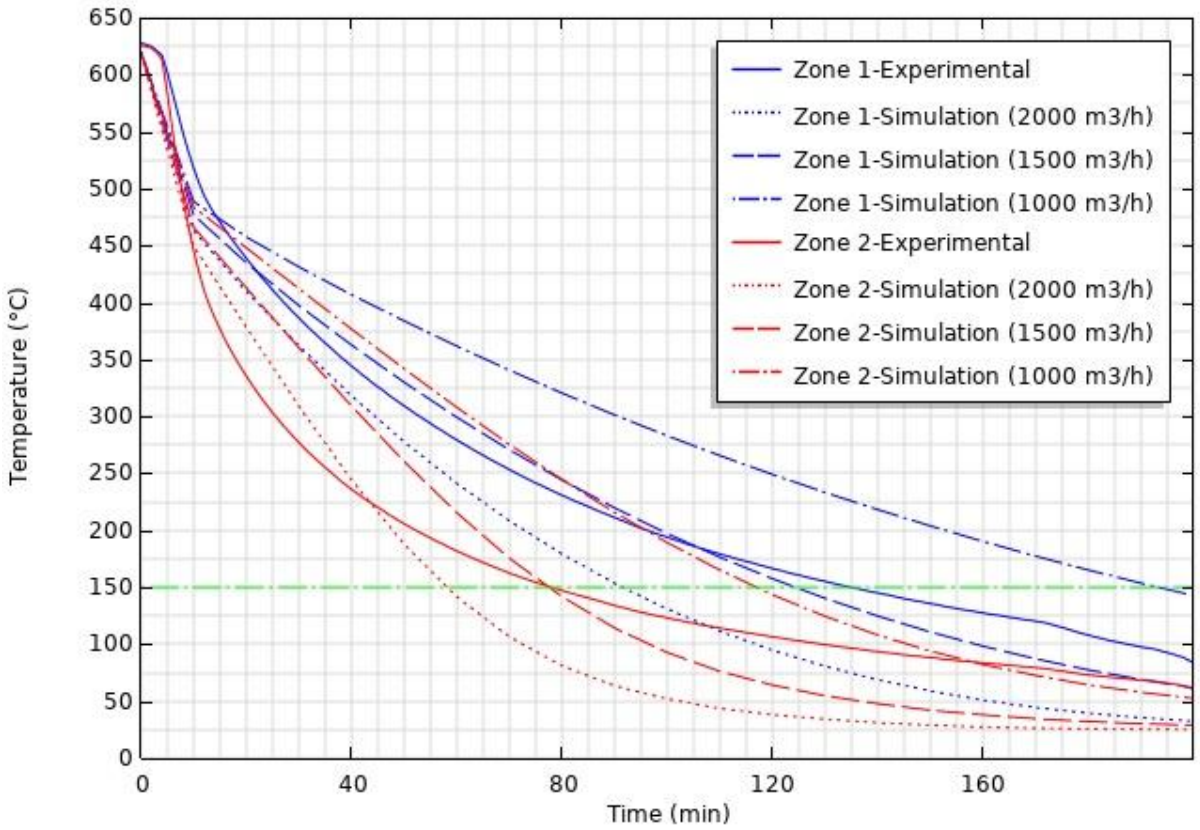


Figure 4. *Time Dependent Temperature Values Belong to Points of Zone 1 and Zone 2*

Table 1 provides a good illustration of how the cooling air flow rate affects the bell-type retort system's thermal performance. The cooling time needed to lower the temperature from 625°C to 150°C dramatically drops in both zones as the volumetric flow rate rises from 1000 to 2000 m³/h. In particular, the cooling time drops from 116 minutes to 44 minutes in Zone 2 and from 194 minutes to 91 minutes in Zone 1. Since higher velocities encourage more heat removal from the retort surface, this significant decrease can be explained by the improvement of convective heat transfer. The intensification of forced convection mechanisms is further supported by the outlet velocity, which consistently rises from 11.6 m/s to 23.3 m/s with increasing flow rate. Nevertheless, a significant increase in pressure loss rises from 1812 Pa to 7163 Pa accompanies this gain in cooling effectiveness. This pattern suggests that larger flow rate causes more turbulence and frictional losses inside the system, indicating a nonlinear relationship between flow rate and pressure drop. Consequently, a crucial trade-off between thermal performance and energy consumption is highlighted by the fact that while larger flow rates improve cooling efficiency, they also increase the need for fan operation. Overall, the findings show that while raising the cooling air flow rate greatly improves cooling, temperature non-uniformity is still a problem. Therefore, in order to guarantee effective and dependable system performance, an ideal operating state should be established based not only on minimum cooling time but also on pressure loss and temperature uniformity.

***Table 1** – Summary of the Numerical Study*

Volume Flow Rate of Cooling Air (m^3/h)	Cooling Time of Zone 1 from 625°C to 150°C (min)	Cooling Time of Zone 2 from 625°C to 150°C (min)	Pressure Loss (Pa)	Temperature Difference between Zone 1 and Zone 2 at 150°C Retort Temperature (°C)	Outlet Velocity (m/s)
Experimental	135	76	4530	75	16.5
2000	91	44	7163	100	23.3
1500	124	77	4051	100	17.4
1000	194	116	1812	100	11.6

CONCLUSION

The main findings of the study are summarized as follows:

Retort thermal performance is significantly influenced by the cooling air flow rate. Both Zone 1 and Zone 2 cooling times are significantly shortened by raising the flow rate from 1000 to 2000 m^3/h.

The rise in outlet velocity indicates that improved forced convection is the main cause of improved cooling performance at higher flow rates.

As flow rate increases, a nonlinear increase in pressure loss is seen, which raises the energy needed to run fans and lowers overall energy efficiency.

Under all flow rates, zone 2 continuously cools more quickly than zone 1, suggesting a non-uniform airflow cooling caused by geometrical constraint.

There is an obvious trade-off between energy usage and cooling rate, which highlights the necessity of carefully optimizing airflow settings.

Cooling time, pressure loss, and temperature uniformity must all be taken into account concurrently rather than separately for the best system performance.

REFERENCES

Dou, R., Zhao, H., Zhao, P., Wen, Z., Li, X., Zhou, L., & Zhang, R. (2020). Numerical model and optimization strategy for the annealing process of 3D coil cores. *Applied Thermal Engineering*, 178. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115517

Ko, C. Y., & Huang, K. L. (2022). Thermal stress analysis on the inner cover of bell-type annealing furnace of the wire rod spheroidization plant. *China Steel Technical Report*, 35, 99-105.

Kirubakaran, P., Sasikumar, S., Viswanathan, P., & Subramanian, R. (2013). Design of water cool jacket for recirculation fan in bell annealing furnace. *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research*, 5(3), 371-380.

Qi, W., Song, J., & Ren, G. (2013). Analysis on Gas Flow Field in Bell-type Annealing Furnace by Using FLUENT. *Applied Mechanics and Materials*, 345, 581-585. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.345.581

6th International
Congress of Engineering and Natural
Sciences

A Study on the Design and Evaluation of Shielding Structures for High-Voltage Component Protection in Electric Vehicle Frontal Crashes

İlkay SARITAŞ[1]
Fırat ARAS[2]

Abstract

The rapid increase in the number of vehicles on the road has raised concerns regarding traffic safety, particularly regarding frontal impact. Electric vehicles (EVs) introduce new safety challenges due to the presence of high-voltage battery systems and power electronics. In severe frontal impacts, structural deformation may threaten the integrity of the battery pack, high-voltage cables, and related components, potentially leading to short circuits, or loss of isolation. To address these risks, several passive and active safety measures are employed.

One approach to improving crash safety in EVs involves reinforcing the battery casing and high-voltage cable conduits using high-strength materials or multi-layer protective structures. These reinforcements help the system withstand impact forces and prevent critical component damage. Additionally, protective shields and energy-absorbing structures can be integrated to redirect or attenuate crash loads before they reach the high voltage cables. These components distribute energy more effectively throughout the vehicle's architecture.

The shielding structures, particularly those integrated into complex architectures with numerous components such as engine assemblies, may exhibit various design vulnerabilities. Insufficient bolted connection interfaces or localized regions with inadequate structural strength can negatively influence overall performance. Therefore, effectively managing deformation, folding behavior, and force distribution during impact events through appropriate engineering methodologies is of critical importance. This study examines the collision behavior of a shielding structure that fails to provide adequate connection strength despite its intended function of protecting electrical socket interfaces and evaluates various improvement strategies and solution approaches within the framework of load path management.

Through these measures, the overall crashworthiness of electric vehicles can be improved, mitigating the risk of electrical hazards. Enhancing the protection of high-voltage components contributes to safer EV operation and increases consumer confidence in electric mobility systems.

Keywords: Finite Element Analysis (FEA), Frontal Crash, Fuel Line Protection, Fuel Leakage, Collision

[1] Virtual Analysis Enginer,TOFAS, Orcıd: 0009-0009-7821-0677
[2] Senior Technical Specialist, TOFAS, Orcıd: 0009-0008-9116-7450

1.Introduction

Today, the rapid increase in the number of vehicles on the roads has led to a significant rise in the risk of traffic accidents. Accordingly, vehicle manufacturers are developing various passive and active safety measures to prevent accidents and to minimize the potentially fatal consequences that may occur after a crash.

Electric vehicles, however, involve additional safety risks due to high-voltage power transmission lines and battery systems. Damage that may occur in electrical cables and connection points (connectors), or damage to battery modules, can lead to serious consequences such as fire, explosion, short circuit, and loss of vehicle functionality. While side-impact collisions may cause deformation of the battery pack, frontal impacts may result in compression, cutting, or direct damage of high-voltage cables and connectors. To mitigate these risks, various protective structures are developed by manufacturers. Particularly when integrated into complex architectures containing numerous components such as powertrain systems, protective structures may exhibit certain design weaknesses. Insufficient bolted joint interfaces or local regions with inadequate structural strength may adversely affect overall performance. Therefore, it is of critical importance to effectively manage deformation, folding behavior, and force distribution during impact events through appropriate engineering methodologies.

Similarly, in internal combustion engine vehicles, damage occurring in fuel lines, especially during frontal collisions, may lead to the emergence of serious safety risks such as fire and explosion [1]. Various applications aimed at protecting fuel lines are available both in literature and in industry. These applications include covering fuel pipes with protective structures and the use of additional protective brackets [2]. However, in cases where protective structures are insufficient, rerouting of the fuel line may be considered as an alternative solution. Nevertheless, changing the routing of the fuel line is a highly complex and difficult process to implement, as it may affect the positioning of other fuel system components [3]. Structures considered for fuel line protection may serve as a reference for structures developed to prevent damage to high-voltage electrical cables.

2. Front Crash Tests

Vehicles may be exposed to a wide range of collision scenarios throughout their operational lifetime. In frontal impact scenarios, the high-voltage cables and connectors supplying the electric motor are particularly susceptible to severe damage. To simulate such conditions, standardized crash tests including the Full Rigid Wall (FRW)[4], Front Pole, and Underride tests are commonly conducted. The primary objective of these tests is to assess the level of protection provided to the passenger compartment and to evaluate occupant safety performance during frontal collisions.

For electric vehicles, these tests additionally encompass the evaluation of the safety integrity of electrical components that may pose risks of fire or explosion in the post-crash phase. After the completion of a crash test, it is essential that the high-voltage cables remain neither cut nor crushed, and that the connectors associated with these cables do not exhibit any structural or functional damage. Figure 1 illustrates the FRW test configuration, while Figure 2

presents representative examples of post-impact scenarios in which high-voltage cables are subjected to cutting or severe loading conditions.

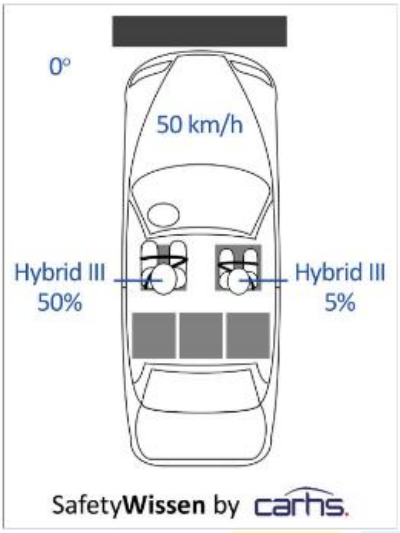


Figure 1

Figure 2

3. Existing Protective Methods

Electric vehicle manufacturers employ various methods to protect energy transmission lines and battery modules. To prevent damage to high-voltage cables and their connectors during collision events, protective sheathing is commonly applied to the cables. For this purpose, protective materials such as conductive polymers, metallic braids (e.g., copper, aluminum), copper tape wrappings, and metal foil coverings are widely used. The material properties of these protective sheaths play a critical role in ensuring resistance against mechanical damage. [5] These structures absorb impact-induced forces during a crash event, thereby preventing the cables from being crushed or cut by sharp surrounding components.

However, these protective sheaths are not capable of providing sufficient protection for the connectors located at the cable connection points. Consequently, connector regions remain exposed to a significant risk of damage, particularly during collision events. Figure 3 illustrates the protective sheaths applied over the cables.

Figure 3

Another approach involves rerouting electrical cables away from regions that are prone to collision-related damage. However, this approach entails several significant drawbacks. The requirement to design distinct electrical cable routings for different vehicle segments and

platforms complicates its implementation and can substantially increase production costs. Moreover, the availability of suitable space within the vehicle architecture for a new cable routing is often limited, which further increases the complexity of the design process.

Figure 4 illustrates the rerouted cable layout designed to minimize damage to the cables during a collision

Figure 4

Figure 5

Figure 6

Another protection method involves preventing damage to cables and connectors through the use of protective bracket structures. Within this scope, various structural solutions are employed, including nature-inspired honeycomb structures, bracket systems positioned along load paths, and cage-type structures. These structures absorb the energy generated during a collision and undergo controlled deformation, thereby preventing direct damage to the cables and connection regions. [6]**Figures 5 and 6** illustrate additional structures implemented to protect fuel lines in a vehicle equipped with an internal combustion engine. These structures are designed to surround the critical components in order to absorb the initial impact energy and prevent direct contact with surrounding components.

However, the implementation of this method involves several design constraints arising from the structural characteristics of the regions where the protective brackets are installed. Such structures may not always have sufficient installation space or adequate attachment capability to a primary load-bearing structure in the regions to which they are added. As a result, protective brackets may fail to provide the expected level of structural strength.

In this study, it is demonstrated how the loss of structural integrity resulting from insufficient attachment conditions of a structural protective component can be compensated through an alternative engineering approach.

4.Finite Element Method for Model Creation

The performance of the proposed approach was evaluated using the finite element method. In order to obtain results that closely represent physical test outcomes, a full-scale vehicle model was developed and crash simulations were performed. To achieve more realistic results, the analysis model was prepared to include various vehicle component groups as well as the necessary fastening elements associated with these components.

Within the scope of this study, a frontal impact scenario in which the vehicle collides with a rigid barrier at a speed of 50 km/h one of the scenarios with the highest potential to cause significant damage in physical tests—was simulated.

For the development of the finite element model and the evaluation of the simulation results, pre-processing and post-processing software tools commonly used in crash analysis were employed. The generated full-scale vehicle model consists of approximately 20 million elements.

During the crash event, the behavior of the high-voltage cables and their connectors was examined in detail, and potential damage scenarios were systematically evaluated.

5. Approach and Results

In this study, protective bracket structures developed to prevent adverse conditions such as separation and fracture—identified as a result of direct contact during high-speed impacts—at the connector regions of high-voltage cables located in the vehicle frontal crash zone were taken as the basis of the investigation.

It was observed that the aforementioned protective brackets were insufficient in protecting the connectors located at the high-voltage cable connection regions during a crash event, due to design constraints arising from the cable routing.

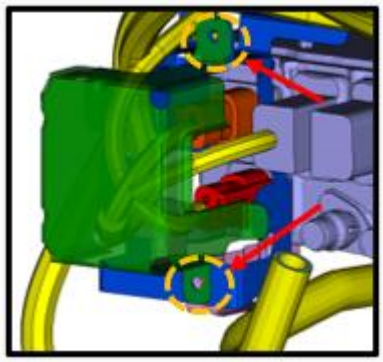


Figure 7

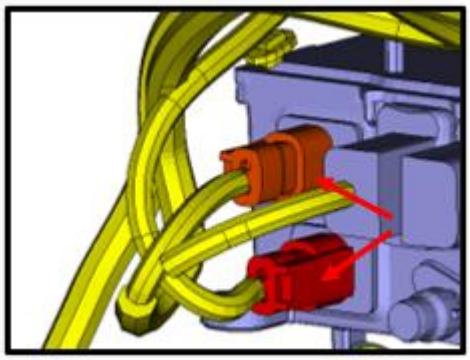


Figure 8

Figure 7 presents the existing protective bracket structure. Figure 8 illustrates the electrical cables protected by this bracket and the connectors that are linked to the inverter.

Due to design constraints, the protective bracket can be attached to the primary vehicle structure at only two connection points, as indicated in Figure 7. In addition, the routing of the cables connected to the connectors along different directions within the vehicle results in the presence of multiple openings on the bracket. This condition adversely affects the structural continuity and stiffness of the bracket.

As a consequence of the aforementioned factors, it was observed that folding behavior occurs readily in the lower region of the protective bracket during a collision event. As a result of this folding behavior, the bracket surface moves along two different axes and comes into contact with the connector, leading to damage. As shown in Figure 9, the indicated region of the bracket contacts the connector from the side surface, while in Figure 10 the protective bracket makes contact with the connector from the bottom surface.

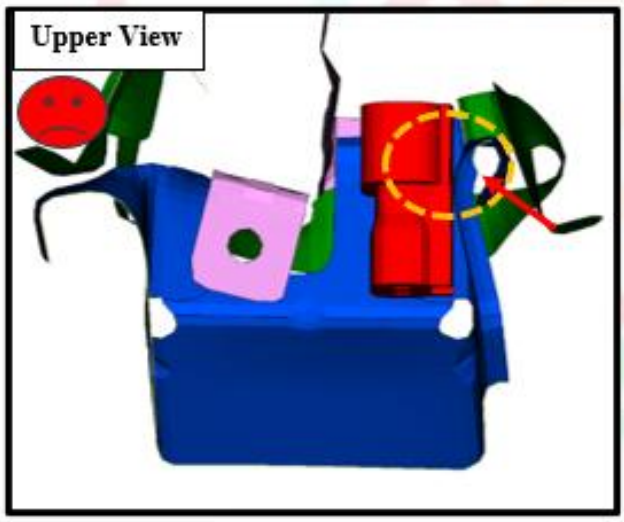


Figure 9

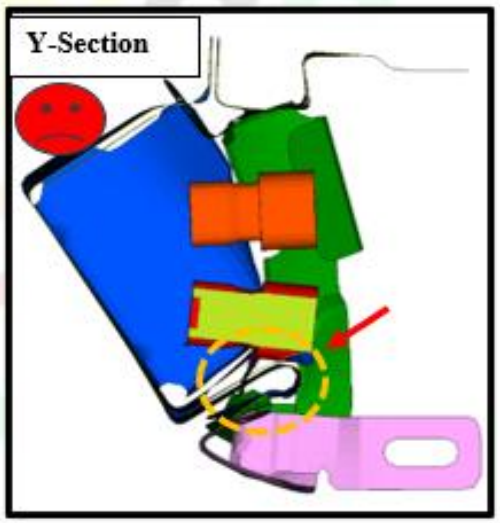


Figure 10

Studies were conducted to eliminate the contact between the protective bracket and the connector and thereby mitigate the associated risk. The first step focused on eliminating the lower region of the bracket that comes into contact with the connector. Figure 11 illustrates the modified design obtained by introducing a large clearance opening.

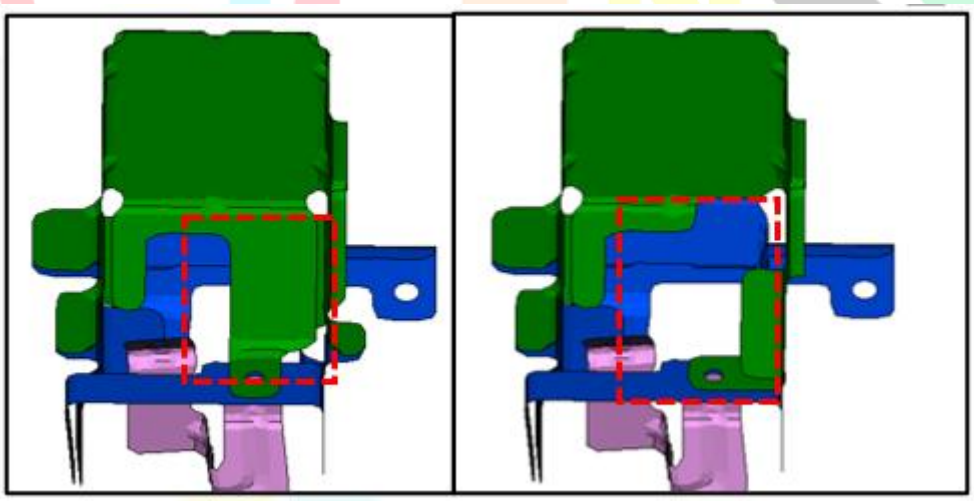


Figure 11

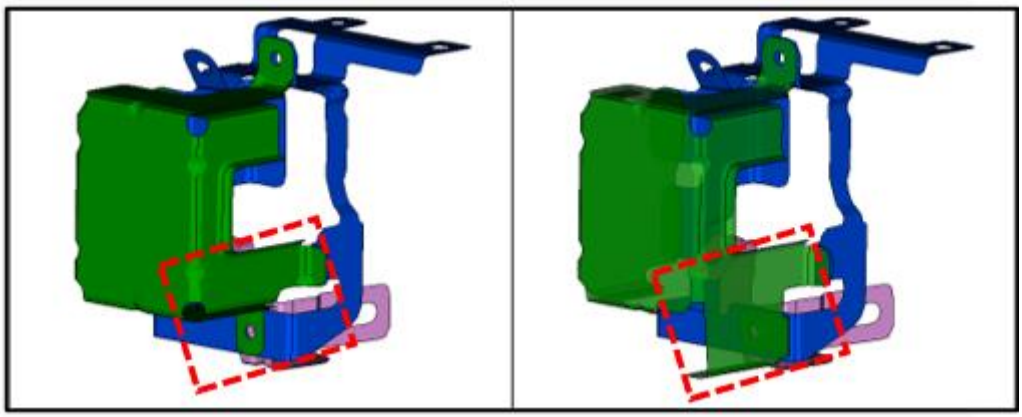


Figure 12

While eliminating this region, extensions were introduced in the areas connected to the lower surface in order to preserve the lower attachment point. The revisions applied to these regions are shown in Figure 12.

Post-test evaluations indicated that contact at the lower surface was successfully prevented. This outcome is illustrated in Figure 13

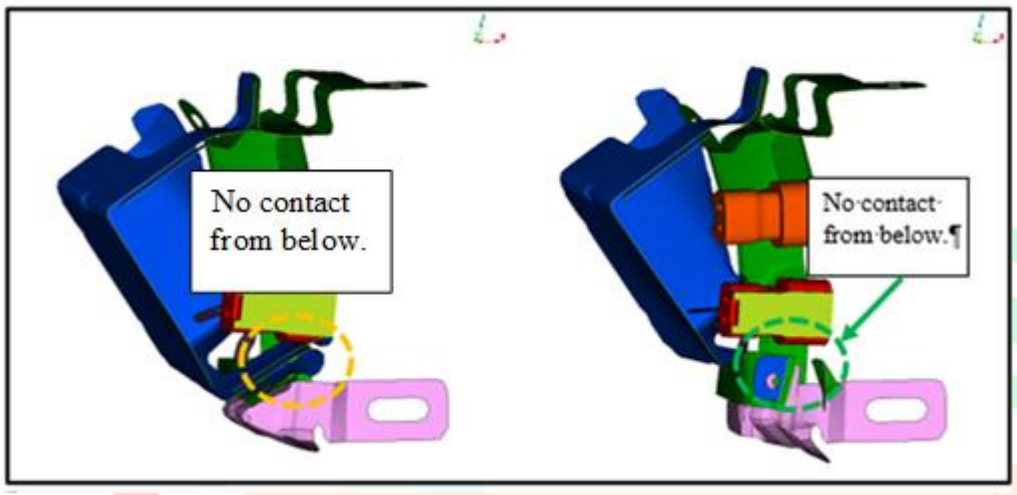


Figure 13

It was observed that although contact at the lower surface was eliminated, lateral contact between the bracket and the connector occurred in this design configuration. As shown in Figure 13, when viewed from the rear side, contact is still present at the indicated lateral surface.

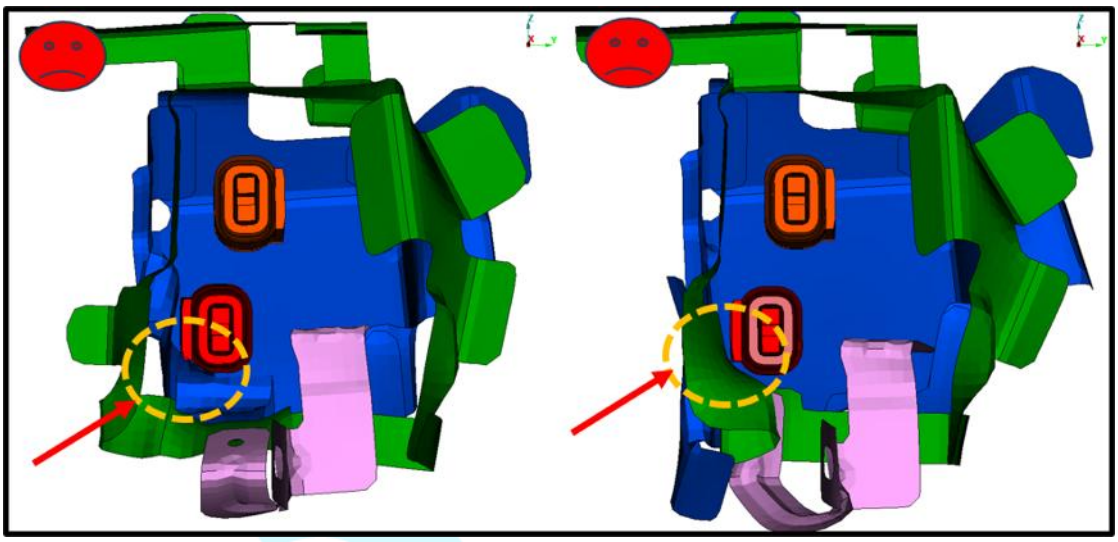


Figure 14

With the final design, the impact force was successfully redirected outward. As a result, both the connectors and the cables remained undamaged. Figure 16 demonstrates that no risk is observed in the simulation results achieved with this design.

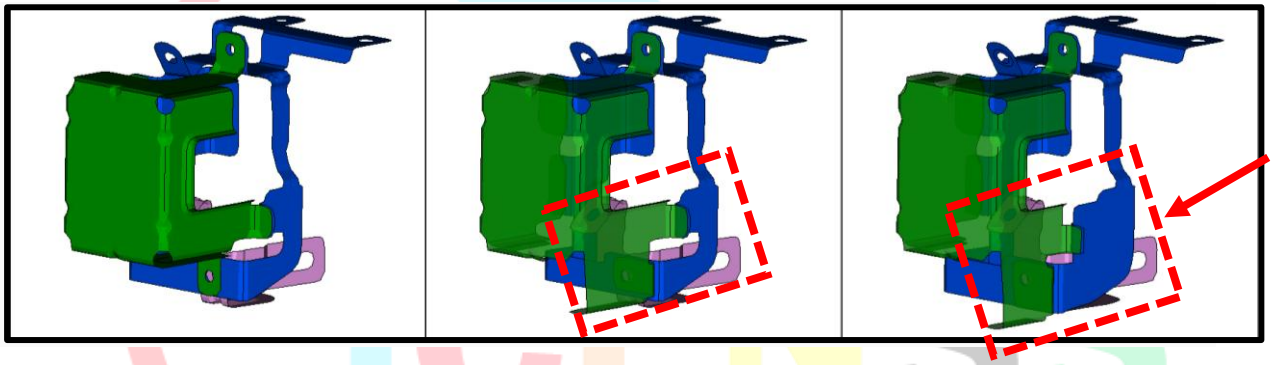


Figure 15

With the final design, the impact force was effectively redirected outward. As a result, no damage was observed to the connectors or the cables. Figure 16 illustrates the simulation results, demonstrating that no risk is present with this design configuration.

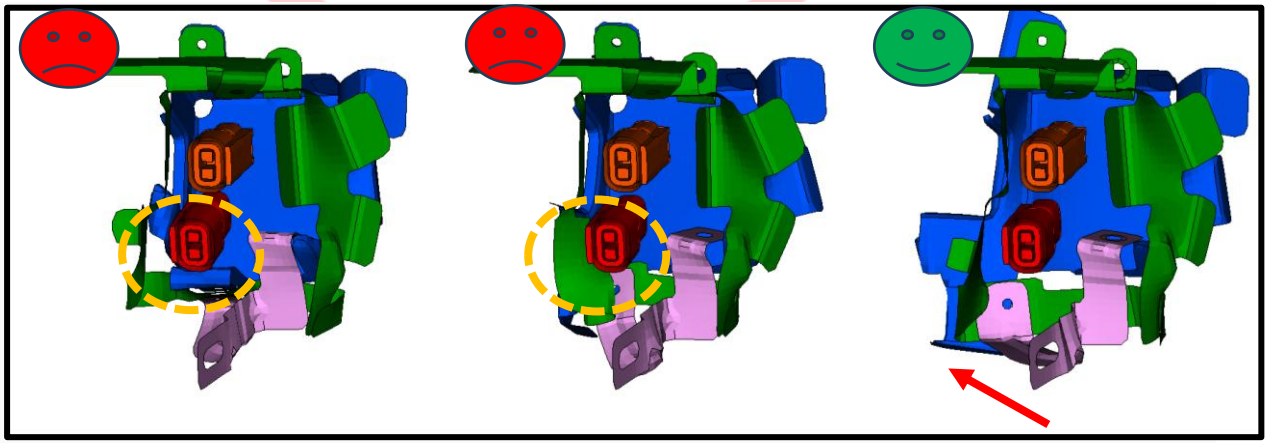
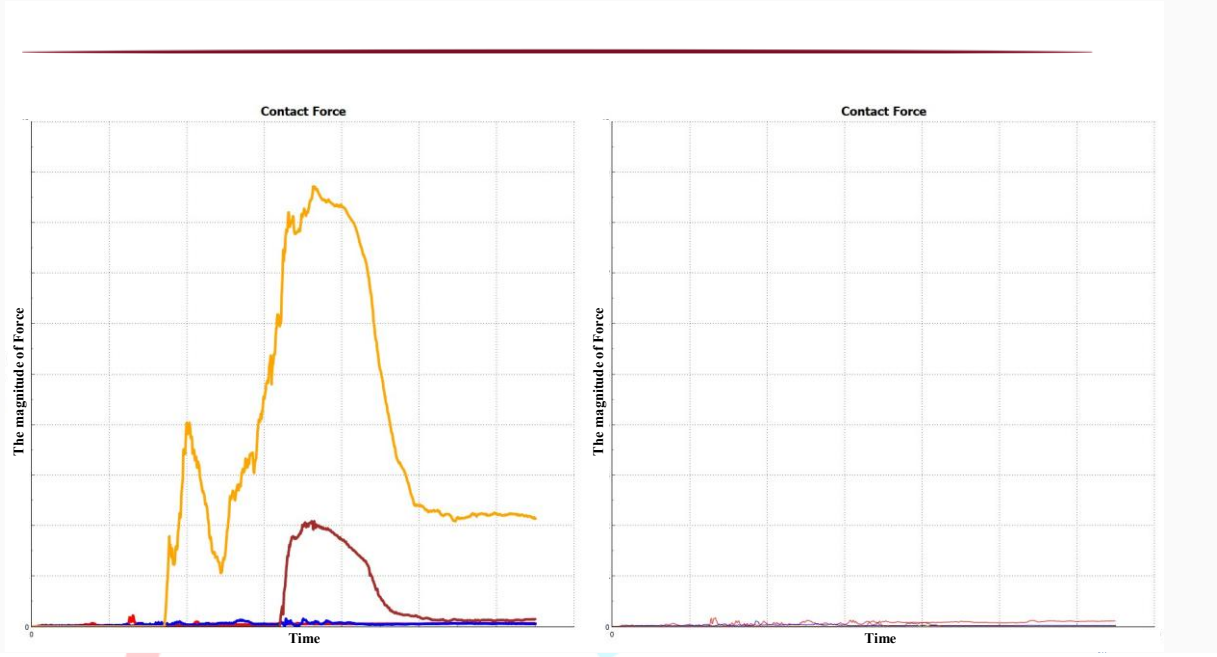


Figure 16

The elimination of contact risk was clearly demonstrated through the contact force data measured at the connector. Graph 1 presents the contact force–time history. In the graph, the contact force observed at the initial stage is shown on the left, while the force–time response obtained with the proposed engineering solution is shown on the right. The results clearly indicate that the contact forces were effectively minimized.



Graphic 1

6. Conclusion and Discussion

In electric vehicles, frontal collisions can adversely affect high-voltage (HV) systems particularly the battery pack, HV cables, and power electronics components—leading to an increased risk of electrical hazards, thermal runaway, and fire. To mitigate these risks, various protective solutions are employed. These include housing HV cables within reinforced protective conduits, integrating additional protective structures around the battery pack, or rerouting critical HV components away from potential impact zones. However, from the perspective of automotive manufacturers, the implementation of such protective structures may result in increased costs, added vehicle weight, and extended development timelines. Consequently, there is a continuous demand for simpler and more efficient design solutions.

This study demonstrates that a protective structure which fails to provide sufficient protection due to inherent design constraints can partially redirect high impact forces through simple design modifications, thereby significantly reducing the risks to high-voltage components. The proposed approach enhances electrical and thermal safety while offering manufacturers a cost-effective alternative, as it does not require extensive structural reinforcements. Through the implementation of this simple design modification, manufacturers can achieve a more balanced optimization between safety, weight, and cost efficiency, streamline project workflows, and reduce overall development costs. Furthermore, the proposed modification can be integrated into existing electric vehicle platforms with minimal architectural changes, providing a practical and scalable solution for improving electric vehicle safety without the need for comprehensive redesign efforts.

References

[1] The Dangers Of Defective Fuel Lines (October 03, 2022)

https://www.linestogo.com/blogs/news/the-dangers-of-defective-fuel-lines

[2] Wenting HU, Jingxi YAN,(2015), Design for Packaging and Crash Protection of Fuel Lines of Powertrain for Cars,(Master's Thesis) (pp. 7-27)

[3] Wayne Scraba,(2020), Fueling Around: Ideas for Routing Fuel Lines,

https://www.onallcylinders.com/2020/07/16/fueling-around-ideas-for-routing-fuel-lines/

[4] U.S. Department of Transportation National Highway Traffic Safety Administration Laboratory Test Prosedure For FMVSS 208, Occupant Crash Protection – TP208-14(April 16, 2008)(pp.2-59)

[5] High Voltage Wire Shielding Design for Electric Vehicles: Ensuring Safety and Performance (Part 1)(September11,2024)

https://shogovn.com/pressroom/high-voltage-wire-shielding-design-for-electric-vehicles-ensuring-safety-and-performance/

[6] Wenting HU, Jingxi YAN,(2015), Design for Packaging and Crash Protection of Fuel Lines of Powertrain for Cars,(Master's Thesis) (pp. 7-27)

6th International
Congress of Engineering and Natural
Sciences

Gear Design Mekanik Direksiyon Dişli Kutusu Tasarımında Üç Değişkenli Boyutsal Tasarım Çalışması

Murat GÜNEY[1]
Birtan GÜLER[2]

Abstract

Steering systems play a critical role in vehicle handling performance and driving safety. In the design of mechanical steering gearboxes, parameters such as gear geometry, steering ratio, and torque transmission must be carefully selected. In this study, a three-variable dimensional design analysis was conducted for a rack-and-pinion type mechanical steering gearbox. Steering ratio, gear module, and gear face width were selected as the design variables. The objective was defined as reducing driver input torque while increasing system efficiency. In the proposed model, engineering constraints such as gear strength and contact stress were taken into account. As a result of the calculations, optimal design parameters were determined, and an improvement in system performance was anticipated.

Keywords: Steering system, rack and pinion, gear design, sizing

[1] Engineering Specialist, murat.guney43398@tofas.com.tr, Orcıd: 0000-0002-6005-9595
[2] Researcher, birtan.guler@tofas.com.tr, Orcıd: 0000-0001-9328-4425

GİRİŞ

Direksiyon sistemleri, kara taşıtlarında sürüş güvenliği, yönlendirme doğruluğu ve sürüş konforu açısından kritik öneme sahip temel otomotiv alt sistemlerinden biridir. Bu sistemler, sürücünün direksiyon simidi üzerinden uyguladığı dönme hareketini mekanik iletim elemanları aracılığıyla tekerleklerin yönlendirme açısına dönüştürerek aracın istenilen doğrultuda hareket etmesini sağlamaktadır. Özellikle modern binek araçlarda yaygın olarak kullanılan kremayer-pinyon (rack and pinion) tipi direksiyon mekanizmaları; yüksek mekanik verim, düşük boşluk miktarı, kompakt yapı, hafiflik ve ekonomik üretim avantajları nedeniyle tercih edilmektedir. Bununla birlikte, artan araç performans gereksinimleri ve güvenlik standartları, direksiyon sistemlerinin yalnızca işlevsel açıdan değil, aynı zamanda dayanım, titreşim davranışı ve ergonomik performans bakımından da optimize edilmesini zorunlu hale getirmiştir.

Direksiyon kutusu tasarımında en kritik mühendislik aşamalarından biri boyutlandırma sürecidir. Boyutlandırma işlemi; sistemin maruz kalacağı statik ve dinamik yüklerin belirlenmesi, dişli geometrisinin seçimi, malzeme dayanım kriterlerinin değerlendirilmesi ve sürücü tork gereksinimlerinin optimize edilmesi gibi çok disiplinli parametrelerin birlikte ele alınmasını gerektirmektedir. Yetersiz veya hatalı boyutlandırılmış direksiyon sistemlerinde diş yüzeylerinde aşınma, diş kökü kırılması, yüksek temas gerilmeleri, aşırı deformasyon ve sürücü açısından kabul edilemez direksiyon torkları gibi problemler ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle direksiyon kutusu tasarımında güvenlik katsayıları, yorulma dayanımı ve mekanik verim kriterleri büyük önem taşımaktadır.

Literatürde kremayer-pinyon direksiyon sistemlerinin tasarımına yönelik gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, dişli geometrisi parametrelerinin sistem performansı üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmektedir. Dişli modülü, diş sayısı ve diş yüz genişliği gibi temel geometrik parametrelerin gerilme dağılımını ve sistem dayanımını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Çalışmada özellikle modül artışının diş kökü dayanımını artırdığı, ancak sistem hacmi ve ağırlığında artışa neden olduğu belirtilmiştir (Rathore ve Chawla, 2014: 3-5). Benzer şekilde değişken oranlı direksiyon mekanizmaları üzerine yaptıkları çalışmada dişli geometrisinin yalnızca dayanım açısından değil, aynı zamanda direksiyon hassasiyeti, geri besleme karakteristiği ve sürüş hissi üzerinde de belirleyici rol oynadığını ifade etmiştir (Niu vd., 2015: 158–160). Bu durum, direksiyon sistemlerinde mekanik tasarım ile sürüş dinamiği arasındaki güçlü ilişkiyi ortaya koymaktadır.

Mekanik direksiyon sistemlerinin ergonomik performansına yönelik yapılan çalışmalarda ise direksiyon oranı ile sürücünün uygulaması gereken tork arasında ters orantılı bir ilişki bulunduğu vurgulanmaktadır. Düşük direksiyon oranına sahip sistemlerde direksiyon hassasiyetinin arttığını ancak sürücü tork ihtiyacının yükseldiğini; yüksek direksiyon oranlarında ise sürüş konforunun iyileştiğini fakat manevra hassasiyetinin azaldığını belirtmiştir (Agrawal vd., 2016: 2–4). Bu nedenle direksiyon oranının belirlenmesi hem araç dinamiği hem de sürücü ergonomisi açısından kritik bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmektedir.

Direksiyon sistemlerinin dinamik davranışına yönelik araştırmalar da dişli boyutlandırmasının sistem titreşimleri, gürültü karakteristiği ve kararlılığı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Dişli temas rijitliği ve geometrik parametrelerin direksiyon sisteminin doğal frekanslarını etkilediğini ve uygun olmayan boyutlandırma durumunda

titreşim kaynaklı performans kayıplarının ortaya çıkabileceğini göstermiştir (Zhang ve Wang, 2005: 255–258). Özellikle yüksek hızlarda meydana gelen titreşimlerin sürüş güvenliği ve sürücü hissi üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğu ifade edilmektedir.

Bunun yanı sıra, Formula SAE araçları üzerine gerçekleştirilen çalışmalar, direksiyon geometrisi ve direksiyon sistemi boyutlandırmasının araç manevra kabiliyeti ve yol tutuş performansı üzerinde önemli etkileri bulunduğunu ortaya koymaktadır. Optimum direksiyon oranı ve Ackermann geometrisinin düşük hız manevralarında araç kontrolünü iyileştirdiğini belirtirken, direksiyon sisteminde gerçekleştirilen geometrik optimizasyonların sürücü geri bildirimi ve dönüş stabilitesi üzerinde belirgin iyileşmeler sağladığını ifade etmiştir (Patil vd., 2017: 2–3; Iniyavan, 2018: 1–3). Bu çalışmalar, direksiyon sistemi tasarımının yalnızca mekanik dayanım problemi olmadığını, aynı zamanda araç dinamiği ile doğrudan ilişkili çok disiplinli bir mühendislik problemi olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, kremayer-pinyon tip mekanik direksiyon kutusunun boyutlandırılması temel mühendislik hesaplamaları esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım sürecinde direksiyon oranı, dişli modülü, dişli yüz genişliği ve yük taşıma kapasitesi temel parametreler olarak ele alınmıştır. Ayrıca sistemin maruz kalacağı maksimum direksiyon kuvvetleri dikkate alınarak dişli geometrisinin dayanım kriterleri açısından uygunluğu değerlendirilmiştir. Çalışmanın amacı, teorik mühendislik hesaplamaları kullanılarak mekanik direksiyon kutularının boyutlandırılmasına yönelik sistematik bir yaklaşım ortaya koymak ve otomotiv direksiyon sistemleri tasarımına akademik düzeyde teknik bir kaynak sağlamaktır.

YÖNTEM

Bu çalışmada mekanik direksiyon kutusunun boyutlandırılması analitik mühendislik hesaplarına dayanmaktadır. Hesaplama süreci sırasıyla yük analizi, kuvvet iletimi, tork hesapları ve dişli boyutlandırma adımlarından oluşmaktadır.

Araç Parametreleri

Boyutlandırma hesaplarında referans olarak bir binek araç modeli alınmıştır:

$$m = 1356\,kg$$
$$W_f = 0.58$$

Ön aksa etkiyen yük:

$$F_f = 0.58\ x\ 1356\ x\ 9.81 = 7715\ N$$

Kremayer Kuvvetinin Belirlenmesi

Direksiyon sisteminde kremayere etkiyen kuvvet teorik olarak ön aks yükünün %25'i alınarak, (Bhardwaj vd. 2020:14427-14431)

$$F_{rack} = F_f x 0.25 = 1929\,N$$

Pinyon Torku Hesabı

Pinyon dişlisi üzerinden iletilen maksimum tork, kremayer kuvveti ve pinyon yarıçapı kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$T_p = F_{rack}\ x\ r_p$$

$$r_p = 0.02\,m$$

$$T_p = 38.58\,Nm$$

Direksiyon Oranı ve Sürücü Torku

Direksiyon oranı aşağıdaki gibi tanımlanır

$$i = \frac{\theta_s}{\theta_w}$$

Bu çalışmada i=16 olarak kabul edilip, sürücü tarafından uygulanması gereken tork aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$T_{driver} = \frac{T_p}{i} = 2.41\,Nm$$

Dişli Boyutlandırması

Dişli geometrisi aşağıdaki modüle ve diş sayısı parametreleri kullanılarak belirlenmiştir.

$$m = 2\,mm\ \&\ z = 18$$
$$d = m \cdot z = 36\,mm$$

Dişli Yüz Genişliği

Dişli genişliği, standart tasarım yaklaşımına göre modül ile orantılı seçilmiştir.

$$b = 20\,mm$$

Dayanım Analizi

Dişli eğilme gerilmesi Lewis yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_b = \frac{F_t}{b\ x\ m\ x\ Y}$$

$$\sigma_b = \frac{1929}{20 \cdot 2 \cdot 0.3} = 160.75\,MPa$$

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada mekanik kremayer-pinyon direksiyon sisteminin boyutlandırılması kapsamında gerçekleştirilen analitik hesaplamalar sonucunda sistemin kuvvet iletim karakteristikleri ve dişli dayanımı değerlendirilmiştir. Ön aksa etkiyen yük 7715 N olarak hesaplanmış ve kremayer kuvveti bu değerin %25'i olarak kabul edilerek 1929 N olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım, ön tasarım aşamasında sistem yüklerinin temsil edilmesine yönelik sadeleştirilmiş bir model sunmaktadır.

Elde edilen kremayer kuvvetine bağlı olarak pinyon dişlisi üzerinde oluşan tork 38.58 Nm olarak hesaplanmıştır. Direksiyon oranının 16 olarak alınması durumunda, sürücü tarafından uygulanması gereken tork 2.41 Nm olarak belirlenmiştir. Hesaplanan bu değer, mekanik direksiyon sistemleri için tipik çalışma aralıkları ile uyumlu olup sistemin kullanıcı girdisi açısından dengeli bir karakteristik sergilediğini göstermektedir.

Dişli boyutlandırması kapsamında modül 2 mm ve diş sayısı 18 olarak seçilmiş, buna bağlı olarak pinyon çapı 36 mm olarak elde edilmiştir. Dişli yüz genişliği ise 20 mm olarak belirlenmiştir. Bu parametreler, sistemin geometrik boyutları ile mekanik dayanım gereksinimleri arasında bir denge oluşturacak şekilde seçilmiştir.

Gerçekleştirilen dayanım analizinde, Lewis eğilme gerilmesi yaklaşımı kullanılarak dişli eğilme gerilmesi 160.75 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer, mühendislik uygulamalarında kullanılan tipik yapı çelikleri için kabul edilebilir gerilme sınırları içerisinde kalmaktadır. Dolayısıyla, seçilen dişli geometrisinin statik yükleme koşulları altında yeterli bir dayanım sağladığı söylenebilir.

Bununla birlikte, kullanılan yük modelinin basitleştirilmiş olduğu dikkate alınmalıdır. Gerçek çalışma koşullarında sistem; dinamik yükler, temas gerilmeleri, sürtünme etkileri ve yol koşullarına bağlı değişken yüklemeler altında çalışmaktadır. Bu nedenle elde edilen sonuçlar, ön boyutlandırma aşamasına yönelik bir değerlendirme sunmakta olup, detay tasarım sürecinde daha kapsamlı analizlerin gerçekleştirilmesi gereklidir.

SONUÇ

Bu çalışmada kremayer-pinyon tip mekanik direksiyon kutusunun boyutlandırılması analitik mühendislik hesaplarına dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Kremayer kuvveti, ön aks yükünün belirli bir oranı olarak kabul edilerek sistemin yükleme durumu basitleştirilmiş bir model ile temsil edilmiştir.

Gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda sistemin kuvvet iletim yapısı belirlenmiş ve dişli dayanımı değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, dişli eğilme gerilmesinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığını ve seçilen geometrik parametrelerin statik yükleme koşulları altında yeterli bir dayanım sağladığını göstermektedir

Direksiyon oranına bağlı olarak hesaplanan sürücü torkunun, mekanik direksiyon sistemleri için beklenen aralıkta olduğu belirlenmiştir. Bu durum, sistemin hem mekanik iletim hem de kullanıcı girdisi açısından dengeli bir tasarıma sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, sunulan boyutlandırma yaklaşımı mekanik direksiyon sistemlerinin ön tasarım sürecinde uygulanabilir bir yöntem sunmaktadır. Bununla birlikte, daha yüksek doğrulukta sonuçlar elde edebilmek için ileri çalışmalarda dinamik yük etkilerinin, temas gerilmelerinin ve sayısal analiz yöntemlerinin modele dahil edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKÇA

Agrawal, P. L., Patel, S. S., & Parmar, S. R. (2016). Design and simulation of manual rack and pinion steering system. *International Journal for Scientific and Advanced Research in Technology, 2*(7), 1–5.

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2020). *Shigley's mechanical engineering design* (11th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.

Iniyavan, P. (2018). Design of steering geometry for FSAE car. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 7*(3), 1–5.

Niu, Z., Zhang, Y., & Liu, H. (2015). Research on variable ratio gear modeling of rack and pinion steering gear. *Applied Mechanics and Materials, 721*, 157–162.

Norton, R. L. (2013). *Machine design: An integrated approach* (5th ed.). Boston, MA: Pearson Education.

Patil, A., Deshmukh, S., & Kulkarni, P. (2017). Design and manufacturing of steering system for FSAE vehicle. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 6*(5), 1–4.

Rathore, G., & Chawla, S. (2014). *Design and development of rack and pinion steering gear assembly for passenger car vehicle*. SAE International.

Zhang, N., & Wang, M. (2005). Dynamic modeling of hydraulic power steering system with variable ratio rack and pinion gear. *JSME International Journal Series C, 48*(2), 251–258.

Bhardwaj, A., Slavin, D., Walsh, J., Freudenberg, J., & Gillespie, R. B. (2009). Rack force estimation for driving on uneven road surfaces. *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Conference.*

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Thermoform Prosesinin Otomotiv Parça Geometrisi ve Tasarım Süreçlerine Etkisi

Fatma SİRKECİ[1]
Engin Can ASLANDERE[2]
Vahdet ÖZDEMİR[3]

Abstract

Thermoforming is a widely used forming method in the automotive industry for the production of large-surface thermoplastic parts. Due to its low tooling cost, short development time, and suitability for prototype manufacturing, it is especially preferred in automotive interior and exterior trim applications. This study investigates the effects of the thermoforming process on automotive part geometry and design processes. Within the scope of the study, the fundamental operating principle of the thermoforming process, production stages, and its application areas in the automotive industry are first examined. Subsequently, the materials used during the process, material selection criteria, and surface texture alternatives are evaluated. In addition, the effects of key design parameters such as draft angles, corner radii, draw depth, and material thickness distribution on part geometry are explained. Furthermore, common manufacturing defects encountered in vacuum thermoforming processes, including thinning, corner tearing, vacuum marks, and surface waviness, are analyzed in terms of their formation mechanisms and their effects on design. In the final section, injection molding and vacuum thermoforming methods are compared with respect to production capacity, tooling cost, dimensional accuracy, and design flexibility. This study aims to present the key design parameters that should be considered throughout the process by examining the effects of the thermoforming process on automotive part design from both manufacturing and design perspectives.

Keywords: Thermoforming Process, Vacuum Forming, Aesthetic Surface Design, Plastic Part Manufacturing, Low-Volume Production, Automotive Exterior Trim

[1] Development Lead, TOFAŞ, Dış Trim, Orcıd: 0000-0002-2768-6511
[2] Engineering Designer, TOFAŞ, Dış Trim, Orcıd: 0009-0003-3460-0258
[3] Engineering Designer, TOFAŞ, Dış Trim, Orcıd: 0009-0005-3789-9077

1. GİRİŞ

1. 1. Termoform Şekillendirme Tekniği

Thermoform prosesi, termoplastik levhaların belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılarak yumuşatılması ve ardından vakum, basınç veya mekanik kuvvet yardımıyla kalıp yüzeyine şekillendirilmesi esasına dayanan bir üretim yöntemidir (ScienceDirect, t.y.; PRI Plastics, t.y.). Otomotiv sektöründe özellikle geniş yüzeyli, düşük ağırlıklı ve estetik gereksinimi yüksek plastik parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük kalıp maliyeti, kısa üretim süresi ve düşük adetli üretimlere uygunluğu sayesinde thermoform yöntemi; tampon alt kaplamaları, bagaj iç trim parçaları, kapı panel kaplamaları, yükleme eşiği kaplamaları, tavan kaplamaları, çamurluk davlumbazları ve çeşitli dış trim bileşenlerinde tercih edilmektedir (Ankara Levha, t.y.). Ayrıca konsept araç geliştirme süreçlerinde ve prototip üretimlerinde sağladığı tasarım esnekliği nedeniyle önemli avantajlar sunmaktadır (Vakum Blister, t.y.). Bununla birlikte proses sırasında oluşan kalınlık değişimleri, geometrik deformasyonlar ve yüzey kalite problemleri, tasarım aşamasında dikkate alınması gereken kritik parametreler arasında yer almaktadır (Hongju Silicone, t.y.).

1.2. Thermoforlama

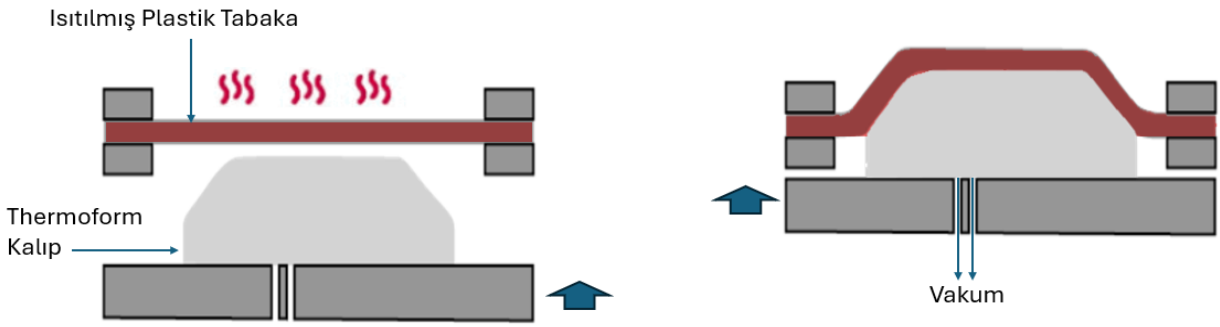
Termoformlama, plastik levhaların kabuk (shell) formunda bir yapıya dönüştürülmesi işlemidir. Enjeksiyon kalıplama veya şişirme kalıplamaya kıyasla düşük ilk kalıp ve ekipman maliyetleri sayesinde, plastik ambalaj üretiminde en hızlı büyüyen yöntemlerden biri olarak değerlendirilmektedir (PRI Plastics, t.y.). Bu süreçte plastik levha, kauçuk benzeri esnek bir duruma gelene kadar ısıtılır ve ardından mekanik kuvvetler, vakum, pnömatik sistemler veya harici hava basıncı kullanılarak yumuşamış levhanın bir kalıp yüzeyine şekil alması sağlanır (ScienceDirect, t.y.). Parça daha sonra soğutularak yapının katılaşması ve şeklini koruması sağlanır. Kalıptan çıkarıldıktan sonra fazla malzemeler kesilerek uzaklaştırılır (Vakum Blister, t.y.). Termoform ile üretilen parçalar; gıda, medikal, beyaz eşya, güvenlik, elektronik ve otomotiv gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Aşağıdaki görselde (Şekil 1) gıda endüstrisi için termoform ile üretilmiş bazı ambalaj örnekleri gösterilmektedir.

Şekil 1- *Thermoform Prosesi ile üretilmiş bazı gıda ambalaj / kap örnekleri*

1.3. Vakum Termoform Üretim Süreci ve Aşamaları

Vakum termoform, termoplastik levha malzemelerin ısı enerjisi ile şekillendirilebilir hale getirilerek vakum basıncı yardımıyla kalıp yüzeyine form verilmesi esasına dayanan bir üretim yöntemidir (ScienceDirect, t.y.). Süreç; malzeme davranışı, ısı transferi, vakum dinamiği ve soğuma kinetiği gibi çok sayıda parametrenin kontrolünü gerektirmektedir (PRI Plastics,

t.y.).



Şekil 2- *Termoform prosesi*

1.3.1. Hammadde ve Levha Hazırlığı

Üretim öncesinde kullanılacak termoplastik levha belirli kalite kriterlerine göre seçilmektedir. Levha kalınlık homojenliği, yüzey kusurları ve iç gerilmeler açısından kontrol edilmektedir (Hongju Silicone, t.y.). Bazı uygulamalarda malzemenin ön kurutma işlemine tabi tutulması özellikle nem hassas polimerlerde yüzey hatalarının önlenmesi açısından kritik önem taşımaktadır (ScienceDirect, t.y.).

1.3.2. Isıtma Prosesi (Thermal Conditioning)

Termoform sürecinin en kritik aşamalarından biri ısıtma işlemidir. Levha, radyant ısıtıcılar yardımıyla cam geçiş sıcaklığı ile erime sıcaklığı arasındaki visko-elastik bölgeye getirilmektedir (PRI Plastics, t.y.). Yetersiz veya dengesiz ısıtma; parçada incelme, yüzey dalgalanması ve form hatalarına neden olabilmektedir (Hongju Silicone, t.y.).

1.3.3. Formlama (Vacuum Forming / Shaping)

Isıtılan levha, kalıp yüzeyine transfer edilmekte ve vakum sistemi devreye alınmaktadır. Kalıp içerisindeki hava hızlı şekilde tahliye edilerek atmosfer basıncı etkisiyle levhanın kalıp yüzeyine yapışması sağlanmaktadır (Vakum Blister, t.y.). Özellikle derin çekme geometrilerinde köşe bölgelerinde incelme riski artmaktadır (ScienceDirect, t.y.).

1.3.4. Soğutma ve Şekil Stabilizasyonu

Form verme işlemi tamamlandıktan sonra parça kalıp üzerinde kontrollü şekilde soğutulmaktadır. Bu aşama, polimer zincirlerinin yeniden düzenlenmesi ve boyutsal stabilitenin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir (PRI Plastics, t.y.).

1.3.5. Kalıptan Ayırma (Demolding)

Soğutma işlemi tamamlandıktan sonra vakum hattı kesilmekte ve parça kalıptan ayrılmaktadır. Özellikle derin geometrili parçalarda kalıptan çıkış açısı tasarımı bu süreçte kritik rol oynamaktadır (Hongju Silicone, t.y.). Bu aşamada yüzey hasarlarını önlemek amacıyla kontrollü ayırma kuvveti uygulanması gerekir. Özellikle derin geometrili parçalarda kalıptan çıkış açısı (draft angle) tasarımı bu süreçte kritik rol oynar.

1.3.6. Trim ve Son İşlemler

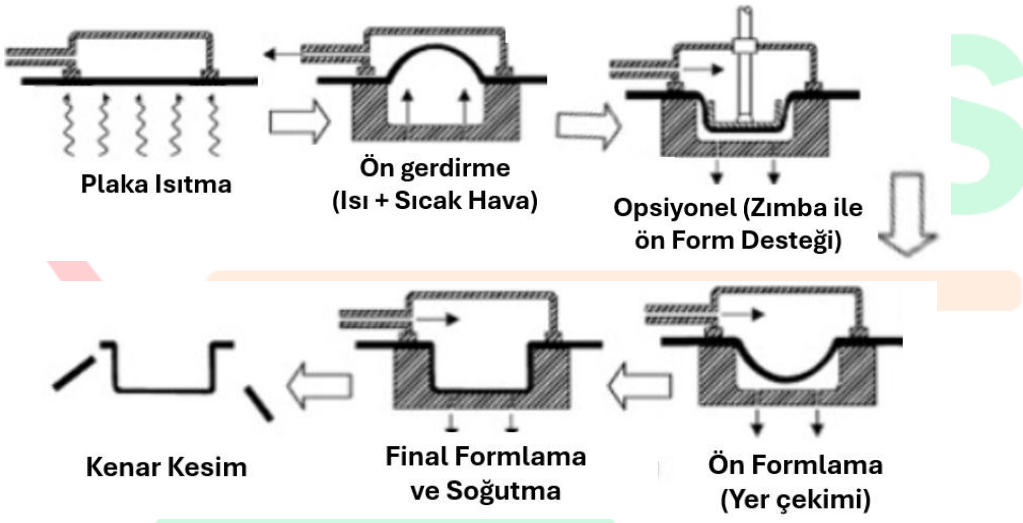
Kalıptan çıkan yarı mamul parça, tasarım sınırlarına uygun hale getirilmek üzere trim operasyonlarına tabi tutulmaktadır. CNC kesim, robotik bıçak sistemleri veya lazer kesim yöntemleri kullanılabilmektedir (Vakum Blister, t.y.). Ayrıca montaj delikleri, klips yuvaları ve bağlantı noktaları bu aşamada işlenir. Bu işlemler, parçanın nihai montaj kalitesini doğrudan etkiler.

1.3.7. Kalite Kontrol ve Ölçümleme

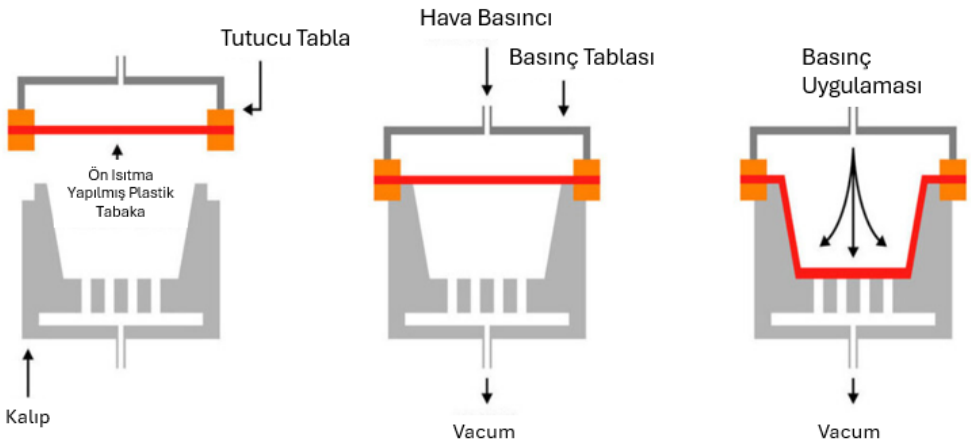
Son aşamada parçalar, geometrik doğruluk, yüzey kalitesi, kalınlık dağılımı ve görsel kusur kriterlerine göre kontrol edilir. Ölçüsel kontroller genellikle CMM cihazları veya lazer tarama sistemleri ile gerçekleştirilir (ScienceDirect, t.y.). Ayrıca üretim stabilitesini değerlendirmek amacıyla periyodik numune analizleri yapılır ve proses parametreleri geri besleme sistemi ile optimize edilir. Aşağıdaki görsellerde Termoform şekil verme yöntemlerinden ikisine ilişkin şematize görsel yer almaktadır (Şekil ve Şekil 4).

1.4. Kalıp Çıkış Açısı

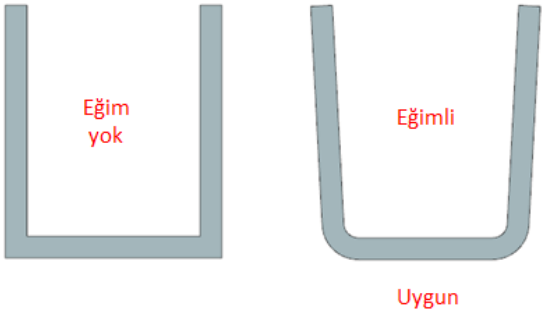
Minimum kalıp çıkış açısı 1-1,5^0 olmalıdır. Eğer termoform, desenli yüzey üzerinden yapılacaksa bu değer minimum 2^0 olmalıdır. Ayrıca derinlik arttıkça çıkış açısı da arttırılmalıdır. Bu, yaklaşık her 25 mm'de 1^0 olarak önerilmektedir. (Şekil 5). Minimum kalıp çıkış açısının belirli limitlerin üzerinde olması gerekmektedir. Derinlik arttıkça çıkış açısının da artırılması önerilmektedir (PRI Plastics, t.y.). Yetersiz çıkış açısı, parçanın kalıptan zarar görmeden çıkarılmasını zorlaştırabilmektedir (Hongju Silicone, t.y.).



Şekil 3- *Vakum yöntemi ile Termoform Yöntemi*

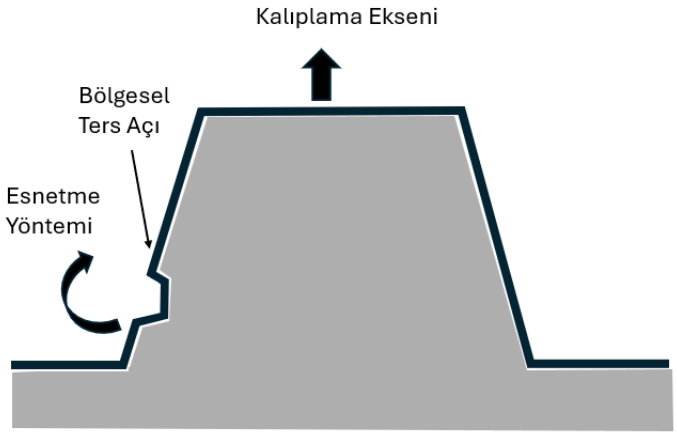


Şekil 4- *Basınç yöntemi ile Termoform Yöntemi*



Şekil 5- *Kalıp açısı gösterimi*

Bununla birlikte; düşük üretim adetleri, uygun parça geometrisi ve yeterli geometrik esneklik gibi belirli parametrelerin sağlanması durumunda, lokal nitelikte ve sınırlı derinliğe sahip bölgelerde ters açıda kalan bölgeleri de kalıptan esnetilerek çıkarıldığı durumlar mevcuttur. (Şekil 6)



Şekil 6- *Bölgesel Ters Açı (Şematik Gösterim)*

1.5. Radyüs ve Pah

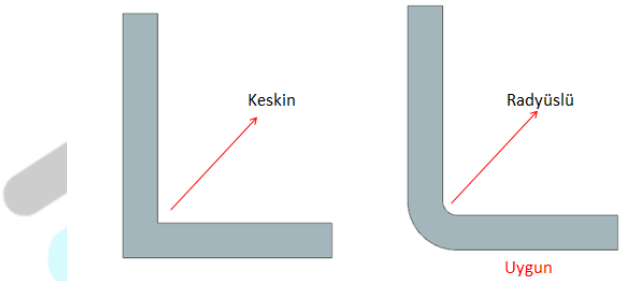
Termoform tasarım bir diğer önemli konu radyus ve pahtır. Parçanın dayanımını arttırdığı gibi estetik olarak da fayda sağlayacaktır. Parça derinliği arttıkça radyus veya pah da büyütülmelidir. (Şekil 7)

Derinlik / Radyus (pah);

0 mm – 50 mm / 1 mm – 3 mm

50 mm – 150 mm / 3 mm – 5 mm

150 mm üstü / minimum 5 mm



Şekil 7- *Radyus gösterimi*

2. VAKUM TERMOFORM PROSESİNDE KULLANILAN MALZEMELER VE MALZEME SEÇİMİ

Vakum termoform prosesinde malzeme seçimi, üretilecek parçanın kullanım amacı, mekanik özellik gereksinimleri, yüzey kalitesi beklentisi ve maliyet kriterleri dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Seçilen malzemenin şekillendirilebilirliğinin yüksek olması, ısıtma sırasında homojen davranış göstermesi ve proses sonrasında gerekli performans kriterlerini karşılayabilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe hafiflik, darbe dayanımı, boyutsal kararlılık ve yüzey kalitesi gibi özellikler malzeme seçiminde öncelikli kriterler arasında yer almaktadır.

Vakum termoform uygulamalarında yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), HIPS (Yüksek Darbe Dayanımlı Polistiren), PETG (Polietilen Tereftalat Glikol) ve PP (Polipropilen) bulunmaktadır. Bu malzemeler; mekanik dayanım, şekillendirilebilirlik, ağırlık ve maliyet açısından farklı avantajlar sunmaktadır. Özellikle ABS malzemesi, yüksek darbe dayanımı, iyi yüzey kalitesi ve işlenebilirlik özelliklerinden dolayı otomotiv iç ve dış trim parçalarında yaygın olarak tercih edilmektedir.

Malzeme seçiminin yanı sıra yüzey deseni de vakum termoform prosesinde önemli bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmektedir. Yüzey desenleri estetik görünüm sağlamanın yanında çizik görünürlüğünün azaltılması, ışık yansımalarının kontrol edilmesi ve yüzey hissiyatının iyileştirilmesi gibi işlevsel katkılar da sunmaktadır. Vakum termoform uygulamalarında düz, mat, parlak, deri dokulu ve çeşitli tekstürlü yüzey desenleri kullanılabilmektedir. Özellikle otomotiv uygulamalarında kullanıcı algısını ve ürün kalitesini artırmak amacıyla yüzey dokusu seçimleri önemli bir rol oynamaktadır.

3. VAKUM PROSESİ DESEN/RENK ALTERNATİFLERİ

Vakum termoform prosesinde yüzey deseni seçimi, ürünün estetik görünümünün yanı sıra fonksiyonel özellikleri üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Uygulanan yüzey desenleri; çizik görünürlüğünün azaltılması, ışık yansımalarının kontrol edilmesi, yüzey hissiyatının iyileştirilmesi ve ürünün algılanan kalite seviyesinin artırılması gibi çeşitli avantajlar

sağlamaktadır. Bu nedenle desen seçimi yalnızca görsel bir tercih olarak değil, aynı zamanda tasarım ve performans kriterlerini etkileyen önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir.

Vakum termoform uygulamalarında düz yüzey, mat yüzey, parlak yüzey, ince tekstürlü yüzey, deri dokulu yüzey ve çeşitli geometrik desen alternatifleri kullanılabilmektedir. Desen tipi seçiminde ürünün kullanım alanı, kullanıcı beklentileri ve çevresel koşullar dikkate alınmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe kullanılan iç ve dış trim parçalarında, daha kaliteli bir görünüm elde etmek ve kullanım sırasında oluşabilecek yüzey kusurlarını azaltmak amacıyla ince tekstürlü veya deri dokulu yüzeyler yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca uygulamaya bağlı olarak farklı renklerde plastik levhalar (plakalar) kullanılarak ürünün görsel çeşitliliği artırılabilmekte ve tasarım esnekliği sağlanabilmektedir.

Desen geometrisinin derinliği ve yapısı, yalnızca görsel özellikleri değil, üretim sürecini de etkileyebilmektedir. Özellikle derin veya karmaşık yüzey desenleri, şekillendirme sırasında malzeme akışı ve kalıptan ayrılma davranışı üzerinde etkili olabilmektedir. Bu nedenle desen seçimi aşamasında estetik beklentilerin yanında üretilebilirlik ve proses gereksinimleri de birlikte değerlendirilmelidir. (Görsel 8)

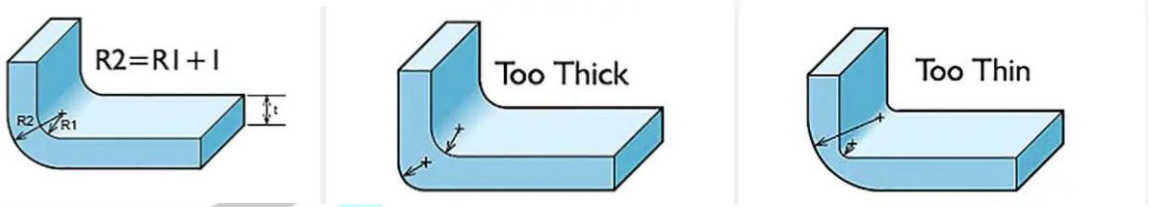
Şekil 8- *Vakum termoform prosesinde kullanılan farklı yüzey deseni alternatifleri ve uygulama örnekleri.*

4. ÜRETİM HATALARI VE PROBLEMLER

4.1 İncelme (Thin Spots)

Vakum termoform prosesinde incelme, levhanın kalıp yüzeyine doğru çekilmesi sırasında malzemenin homojen olmayan şekilde uzaması sonucu özellikle derin bölgelerde et kalınlığının azalması olarak tanımlanmaktadır. Bu durum genellikle köşe bölgeleri, yüksek

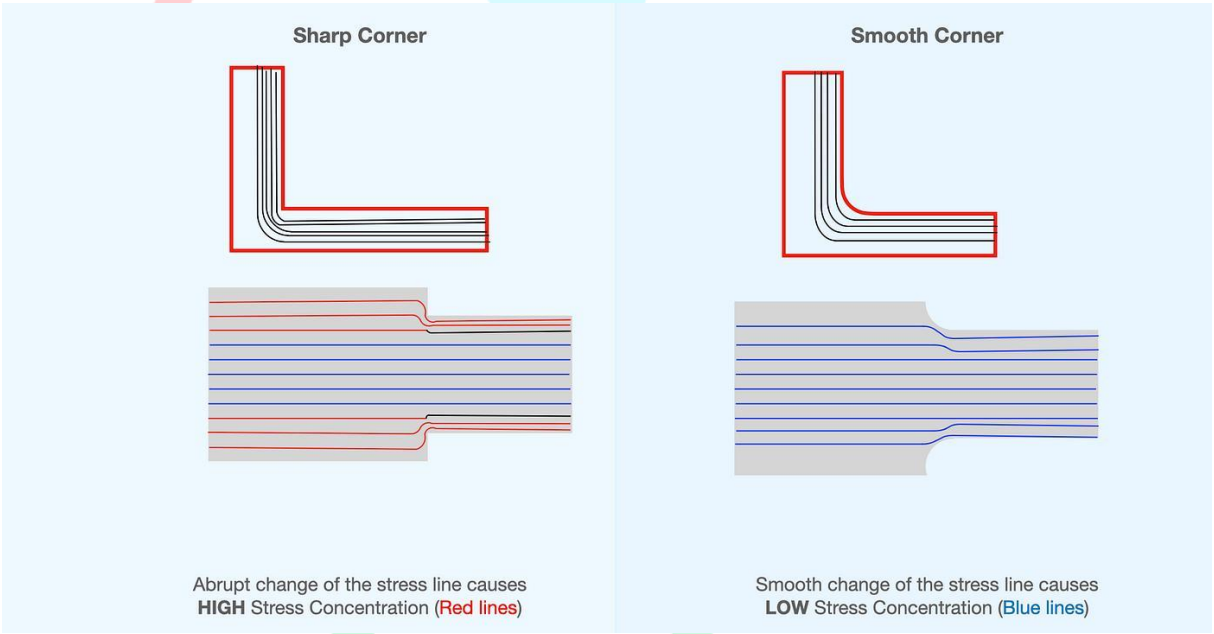
çekme oranına sahip yüzeyler ve keskin geçişlerde daha belirgin hale gelmektedir. İncelme, parçanın mekanik dayanımını düşürmekte ve lokal zayıf bölgelerin oluşmasına neden olmaktadır. (Şekil 9) İncelmenin temel nedeni, malzeme akışının kalıp yüzeyine eşit dağılmaması ve gerilmenin belirli bölgelerde yoğunlaşmasıdır. Bu nedenle tasarım aşamasında uygun radyüs kullanımı ve çekme derinliğinin optimize edilmesi kritik öneme sahiptir.



Şekil 9- *Vakum termoform prosesinde incelme problemi.*

4.2 Köşe Yırtılması

Vakum termoform prosesinde köşe yırtılması, özellikle keskin köşe geometrilerinde ve yüksek çekme oranlarında malzemenin uzama sınırının aşılması sonucu oluşan bir hatadır. Köşe bölgelerinde oluşan gerinim yoğunlaşması, lokal zayıflama ve yırtılmaya neden olmaktadır. Küçük radyüs kullanımı ve derin çekme geometrileri bu hatayı artırmaktadır. Daha büyük köşe radyüsü ve kontrollü çekme oranı ile risk azaltılabilir. (Şekil 10).



Görsel 10- *Vakum termoform prosesinde incelme problemi*

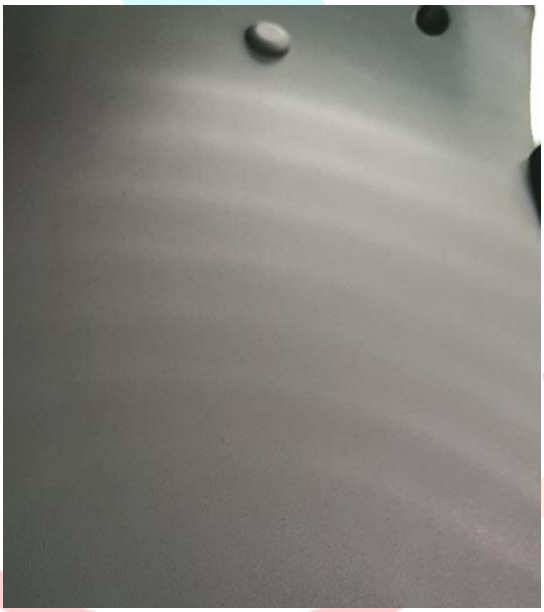
4.3 Vakum İzleri

Vakum izleri, vakum deliklerinden uygulanan emme etkisi nedeniyle parçanın yüzeyinde oluşan lokal çökme veya noktasal izlerdir. Özellikle ince levha malzemelerde ve yüksek vakum basıncında daha belirgin hale gelmektedir. (Şekil 11). Bu izler genellikle yüzey estetiğini olumsuz etkiler ve bazı durumlarda boyutsal algıyı bozabilir. Vakum deliği yerleşimi, delik çapı ve vakum şiddeti bu hatanın oluşumunda belirleyici parametrelerdir. Daha homojen vakum dağılımı ve uygun delik tasarımı ile bu izler minimize edilebilir.

Şekil 11- *Vakum izleri problemi*

4.4 Yüzey Dalgalanması

Yüzey dalgalanması, vakum termoform prosesinde ısıtma ve vakum uygulamasının homojen olmaması sonucunda geniş yüzeyli parçalarda meydana gelen şekil bozukluğudur. Malzemenin farklı bölgelerde farklı oranlarda uzaması, yüzeyde dalga benzeri bir görünüm oluşmasına neden olmaktadır. Bu hata özellikle büyük panellerde ve ince levha kalınlıklarında daha belirgin hale gelir. Düzgün olmayan ısı dağılımı, yetersiz vakum kontrolü ve dengesiz malzeme kalınlığı temel sebepler arasında yer almaktadır. Homojen ısıtma, kontrollü vakum uygulaması ve uygun kalıp tasarımı ile yüzey dalgalanması minimize edilebilmektedir.



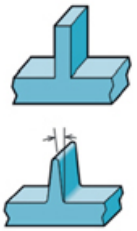
Şekil 12- *Vakum termoform parçalarda yüzey dalgalanması oluşumu*

5. TERMOFORM YAPILARDA GÜÇLENDİRME GEREKTİREN UYGULAMALAR İÇİN ÇÖZÜMLER

Enjeksiyon ile plastik parça üretiminde uygulanan standart “feder, rib” yapıları termoform uygulamasının teknolojisi sebebi ile uygulanabilmesi mümkün olamamaktadır. Bir enjeksiyon ile plastik parça üretiminde ergitilmiş malzemeyi bir boşluk içerisinde basınçla ilerlettiğimiz için güçlendirme yapıları feder şeklinde olup içleri doldurulabiliyor (Şekil 13-15)

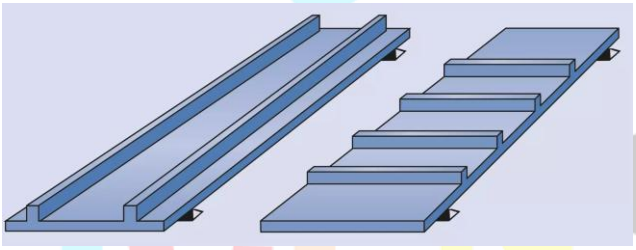
Fakat termoform üretim teknolojisinde ise istenilen geometri mevcut bir plakanın ilgili proseslerle bir kalıp yüzeyine çektirilmesi (saç kalıplarda uygulandığı gibi) ile elde edildiği için ince ve tek düze kalınlığa sahip olmayan geometrilerde bu geometrik yapılar kullanılamamaktadır.

Bunun yerine termoform uygulamasının prosesine uygun geometriye sahip güçlendirme yollarına başvurmak gerekir. Bunlardan ilki kalınlık ve germe miktarlarına uygun U şeklinde geometrik yapılar uygulamak, ikincisi ise parça kenarına açı gerekliliklerine uygun Z şeklinde kademeli çerçeve yapıları oluşturmaktır (Şekil 16-18).

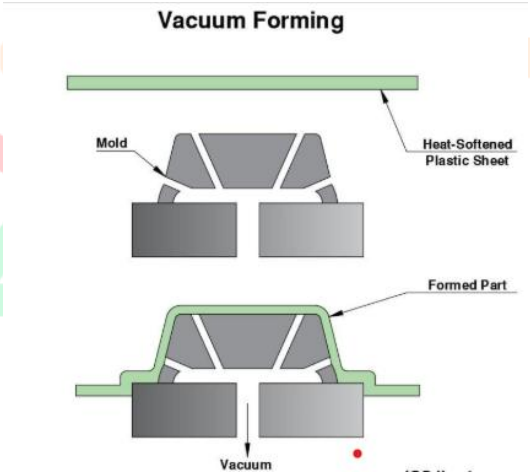


Şekil 13- . *İnce Güçlendirme Feder Yapısı*

Şekil 14-. *Enjeksiyon Parça ve İç Destek Feder Yapıları*

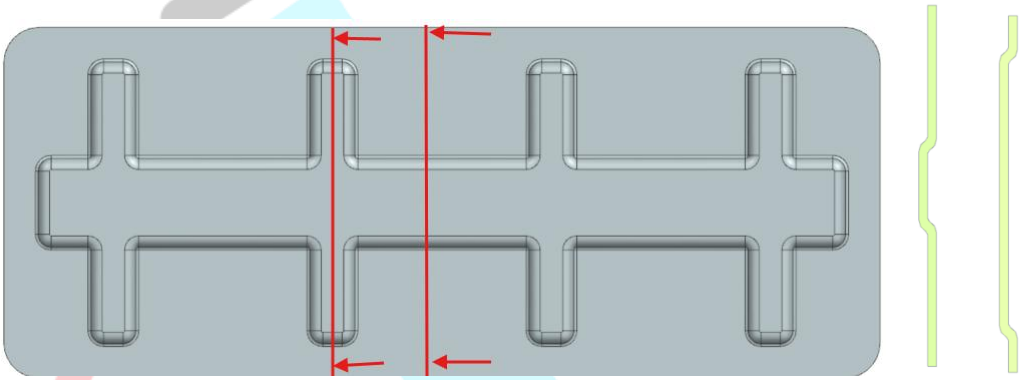


Şekil 15- *Tipik Feder Yapıları*



Şekil 16- *Z Yapısı ve Termoform Kalıp Örneği*

Şekil 17- *Z Yapısı ve U Şeklinde Homojen Kalınlıkta Güçlendirme Yapıları*



Şekil 18- *Otomotiv: Motor Alt Muhafaza Parçası Örneği ve Kesitleri*

6. ENJEKSIYON KALIPLAMA ve VAKUM TERMOFORM YÖNTEMLERİNİN AVANTAJ – DEZAVANTAJ KARŞILAŞTIRMASI

Plastik parça üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden enjeksiyon kalıplama ve vakum termoform yöntemleri; üretim kapasitesi, yatırım maliyeti, parça geometrisi, tasarım esnekliği ve geliştirme süresi açısından birbirinden farklı özellikler göstermektedir. Uygun üretim yönteminin seçimi; üretim adedi, ürün gereksinimleri ve maliyet kriterlerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Enjeksiyon kalıplama yöntemi, yüksek üretim adetleri için uygun bir üretim tekniğidir. Kısa çevrim süreleri sayesinde seri üretim süreçlerinde yüksek verimlilik sağlamaktadır. Ayrıca boyutsal hassasiyetinin yüksek olması, karmaşık geometrilerin ve detaylı tasarımların üretilebilmesine olanak tanımaktadır. Parça tekrarlanabilirliğinin yüksek olması nedeniyle ürünler arasında kalite farklılıkları minimum seviyede tutulabilmektedir. Bununla birlikte, enjeksiyon yönteminin önemli dezavantajlarından biri yüksek kalıp yatırım maliyetidir. Genellikle çelik veya alüminyum malzemeden üretilen kalıpların üretim süreci zaman almakta ve tasarım değişiklikleri durumunda revizyon maliyetleri önemli seviyelere ulaşabilmektedir. Bu nedenle düşük üretim adetlerinde ekonomik açıdan dezavantaj oluşturabilmektedir.

Vakum termoform yöntemi ise özellikle düşük ve orta ölçekli üretimlerde maliyet avantajı sağlayan bir üretim yöntemidir. Bu yöntemde kalıplar MDF, reçine veya alüminyum gibi farklı malzemelerden üretilebilmekte olup, özellikle MDF kalıplar kullanılarak kısa sürede prototip üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca tasarım değişikliklerinin daha hızlı uygulanabilmesi, ürün geliştirme süreçlerinde önemli bir avantaj sağlamaktadır. Büyük yüzey alanına sahip parçaların üretiminde de tercih edilen bir yöntemdir. Ancak vakum termoform

yönteminde boyutsal hassasiyet enjeksiyon kalıplamaya göre daha düşük olabilmektedir. Bunun yanında karmaşık geometrilerin ve ince detayların üretiminde çeşitli sınırlamalar oluşabilmekte, şekillendirme sırasında malzeme kalınlığının homojen dağılmaması nedeniyle bazı bölgelerde incelmeler görülebilmektedir. Çok yüksek üretim adetlerinde ise çevrim süresi ve ek operasyon gereksinimleri nedeniyle enjeksiyon yöntemi kadar verimli olmayabilmektedir.

Sonuç olarak, yüksek hacimli seri üretim uygulamalarında yüksek başlangıç yatırım maliyetine rağmen enjeksiyon kalıplama yöntemi daha avantajlı bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Buna karşılık ürün geliştirme süreçlerinde, prototip çalışmalarında ve düşük üretim adetlerinde vakum termoform yöntemi düşük kalıp maliyeti, hızlı devreye alma ve tasarım esnekliği avantajları sayesinde daha ekonomik bir çözüm sunmaktadır. (Tablo 1).

Tablo 1-*Enjeksiyon kalıplama – Vakum Termoform karşılaştırması.*

Karşılaştırma Kriteri	**Enjeksiyon Kalıplama**	**Vakum Termoform**
Üretim Adedi	Yüksek adetli seri üretim	Düşük–orta ölçekli üretim
Kalıp Maliyeti	Yüksek	Düşük
Kalıp Malzemesi	Çelik / Alüminyum	MDF / Reçine / Alüminyum
Prototip Üretimi	Daha uzun süreli	Hızlı prototip imkânı
Çevrim Süresi	Kısa	Görece daha uzun
Boyutsal Hassasiyet	Yüksek	Daha düşük
Geometrik Karmaşıklık	Karmaşık ve detaylı tasarımlar mümkün	Karmaşık geometrilerde sınırlı
Parça Tekrarlanabilirliği	Yüksek	Orta
Tasarım Revizyonu	Revizyon maliyeti yüksek	Daha hızlı uygulanabilir
Malzeme Kalınlık Dağılımı	Daha homojen	Bölgesel incelmeler oluşabilir

KAYNAKÇA

Ankara Levha. (t.y.). *Plastik vakum termoform*. Erişim tarihi 10 Mart 2026, adresinden erişildi: https://www.ankaralevha.com/plastik-vakum-termoform

Vakum Blister. (t.y.). *Termoform kalıp ile blister üretimi: Aşamalar, maliyetler ve avantajlar*. Erişim tarihi 8 Mayıs 2026, adresinden erişildi: https://www.vakumblister.com/detay/termoform-kalip-ile-blister-uretimi-asamalar-maliyetler-ve-avantajlar/

PRI Plastics. (t.y.). *Understanding thermoforming*. Erişim tarihi 15 Mayıs 2026, adresinden erişildi: https://pri-plastics.com/understanding-thermoforming/

Hongju Silicone. (t.y.). *Plastic thermoforming*. Erişim tarihi 4 Nisan 2026, adresinden erişildi: https://hongjusilicone.com/plastic-thermoforming/

ScienceDirect. (t.y.). *Thermoforming*. Erişim tarihi 2 Mayıs 2026, adresinden erişildi: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/thermoforming

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Mechanical Design and Operational Characteristics of Secondary Safety Hook Mechanisms in Automotive Hood Latch Systems

Abstract

In automotive hood systems, secondary safety hook mechanisms play a crucial role in preventing accidental hood opening during vehicle operation. These mechanisms function as a fail-safe element that maintains partial hood engagement when the primary latch is released, thereby ensuring driver safety and compliance with automotive safety regulations. In addition to preventing sudden hood lift-off, the secondary latch allows controlled user intervention for full hood opening, contributing to both safety and ergonomics. This paper investigates the design and functional behavior of secondary safety hook mechanisms used in passenger vehicles. The study examines the operating principles, mechanical configurations, and integration of safety hooks within hood latch systems, including their interaction with primary latch components and release cables. Different design approaches are evaluated in terms of kinematic behavior, load transfer mechanisms, and tolerance management. Key design parameters such as engagement geometry, user actuation accessibility, packaging constraints, material selection, and durability requirements are analyzed in detail. Special attention is given to environmental influences such as corrosion, contamination (dust, ice, and debris), and temperature variations, which may affect mechanism reliability over time. The study also considers manufacturing and assembly constraints, including stamping tolerances and alignment sensitivities. Furthermore, regulatory requirements and industry standards related to hood retention systems are reviewed, and potential failure modes, such as incomplete engagement, wear-induced malfunctions, and cable or lever failures, are discussed through a failure mode and effects perspective. Design validation methods, including physical testing and simulation approaches, are also briefly addressed.The results provide an engineering perspective on the development of reliable hood secondary latch systems and highlight important considerations for improving safety, robustness, and functional performance. This work aims to support design engineers in optimizing secondary safety mechanisms under real-world operating conditions while meeting stringent safety requirements.

Keywords: Automotive Closure Systems, Hood System, Safety Hook Design, Packaging Constraints, Ergonomic Criterias

INTRODUCTION

Automotive hood latch systems are among the most critical safety-related closure mechanisms in passenger vehicles. Their primary function is to securely retain the hood during vehicle operation while simultaneously allowing controlled opening access for maintenance and servicing activities. Modern hood latch systems generally utilize a dual-stage locking architecture composed of:

Primary latch mechanism

Secondary safety hook mechanism

The secondary safety hook serves as a fail-safe retention device in situations where the primary latch has not been fully engaged or has unintentionally released. Without this secondary mechanism, aerodynamic forces generated during vehicle operation could result in catastrophic hood opening events, severely obstructing driver visibility and potentially causing accidents (SAE International, 2019). The evolution of hood latch systems has accelerated due to:

Increasing pedestrian protection requirements

Lightweight hood structures

Larger hood dimensions in SUVs

Enhanced customer comfort expectations

Advanced closure system integration

Active safety requirements

The mechanical behavior of secondary safety hooks is therefore becoming increasingly important within modern automotive closure engineering (MDPI, 2024).

HOOD OPENING-CLOSING MECHANISMS

Functional Requirements of Secondary Safety Hook Mechanisms

Secondary safety hook systems must satisfy several engineering requirements simultaneously.

1.1. Safety Requirements

The primary objective is prevention of full hood opening during:

Incomplete hood closure

Mis-latching conditions

Primary latch failure

Excessive vibration conditions

Crash-related deformations

The system must maintain partial hood retention even under high aerodynamic loads.

1.2. Customer Operation Requirements

The mechanism should also provide:

Smooth release feel

Low operating effort

Minimal noise

Predictable release behavior

Ergonomic accessibility

Modern customer expectations increasingly demand premium tactile feedback and reduced operational effort (SAE International, 2005).

1.3. Durability Requirements

Secondary safety hooks must withstand:

Corrosion exposure

Thermal cycling

Water contamination

Dust and mud ingress

High-cycle operation fatigue

Vehicle lifetime vibration loading

Typical durability targets exceed 50,000 operational cycles depending on OEM standards (SAE International, 2024).

2. Hood Latch System Architecture

A conventional hood latch system generally consists of the following components:

Striker

Primary latch pawl

Secondary safety hook

Release lever

Return springs

Cable or electronic actuator

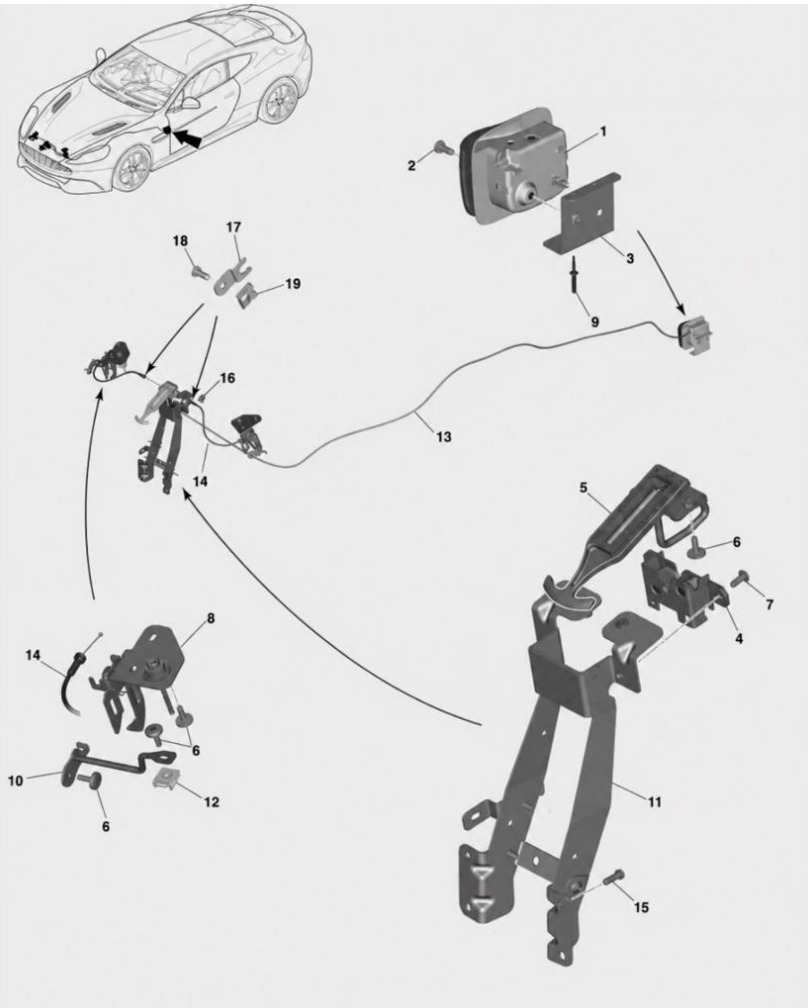


Figure 1- *Components of conventional hood latch opening system (Hood latch system parts for Aston Martin Vanquish)*

Component 5 shown in Figure 1 is striker that rigid metal loop attached to the hood that enters the latch assembly during closing and acts as the main interface between the hood and the latch system. Its primary role is to provide a secure engagement point for the latch mechanism while transferring operational loads such as vibration, aerodynamic forces, and hood inertia to the vehicle body structure.

Component 4 is primary latch pawl that the main locking element that captures and retains the striker when the hood is fully closed. It ensures that the hood remains securely locked during vehicle operation and releases only when the driver activates the hood release system from inside the vehicle. Component 8 is secondary safety hook that is backup retention mechanism designed to prevent the hood from opening completely if the primary latch is accidentally released or not fully engaged. After the primary latch is released, the safety hook temporarily holds the hood in a partially open position until it is manually disengaged by the user. Release lever is the component that converts the driver's input into mechanical movement to disengage the latch system. It operates either through a mechanical cable or an electronic actuator and enables controlled release of the primary latch mechanism during hood opening. The return springs inside the latch and safety hook are responsible for returning moving latch components such as the pawl and safety hook to their original positions after operation. They

maintain proper preload within the mechanism and ensure reliable engagement, smooth operation, and consistent latch functionality over repeated use cycles.

Component 13 and 14 are the cable transmits the driver's hood release command to the latch mechanism. Traditional systems use a mechanical cable connected to the interior release handle, while modern systems may use electronic actuators that enable remote operation, improved packaging flexibility, and integration with vehicle electronic systems .

3. Mechanical Design of Secondary Safety Hook Mechanisms

3.1 Basic Operating Principle

The secondary safety hook is activated after the primary latch releases but before complete hood opening occurs. This sequential operation ensures redundant safety retention.

Operational sequence:

Hood closed

Primary latch engaged

Interior release handle pulled

Primary latch disengages

Secondary safety hook retains hood partially

User manually releases safety hook

Hood fully opens

3.2 Kinematic Characteristics

The motion of the safety hook is generally rotational around a pivot point. Typical mechanisms include:

Single-arm hook

Dual-link hook

Cam-assisted hook

Over-center hook

Sliding hook

The geometry of the hook directly affects release force, engagement reliability, dynamic stability and NVH behavior.Kinematic analysis methods similar to other automotive latch systems are commonly applied (SAE International, 2005).

3.3 Hook Geometry Design

Critical design parameters include hook angle, engagement depth, pivot position, contact radius and overlap distance strongly related to retention capability, safety margin, release effort, wear charactheristics and mis-latch robustness respectively.

Improper geometry may lead to false latching, excessive wear, customer dissatisfaction and reduced safety performance (MDPI, 2024).

4. Striker Interaction and Load Transfer

The striker acts as the interface between the hood assembly and latch system. Recent studies indicate that striker geometry significantly influences latch system stiffness and operational behavior.

Important striker characteristics include:

Wire diameter

Bending angle

Surface finish

Material hardness

Weld quality

The interaction between striker and safety hook determines:

Load distribution

Dynamic retention stability

Wear behavior

Closing effort

5. Aerodynamic Loading Conditions

Aerodynamic loading represents one of the most severe operating conditions for hood retention systems.

At highway speeds, hood surfaces experience:

Pressure fluctuations

Lift forces

Structural vibration

Dynamic oscillation

Research by General Motors demonstrated that hood retention systems must tolerate substantial aerodynamic loads during incomplete latching conditions (SAE International, 2019).

Key aerodynamic considerations:

Hood flutter

Front-end pressure zones

Airflow separation

Hood panel flexibility

Secondary safety hooks must therefore maintain sufficient retention under transient dynamic loading.

6. Hood Closing Dynamics

Modern hood systems increasingly face challenges associated with:

Lightweight aluminum structures

Reduced panel stiffness

Pedestrian protection packaging

Backward latch positioning

Research has shown that reduced hood stiffness may negatively affect latch engagement quality. Two primary closing modes exist:

6.1 Dynamic Closing

The hood is dropped from a specified height, generating kinetic energy sufficient for primary latch engagement.

6.2 Quasi-Static Closing

The hood is manually pushed until latching occurs. In quasi-static conditions, insufficient force transfer may result in:

Secondary-only engagement

False latch conditions

Customer misuse

7. Dual Hood Latch Systems

Large SUVs and premium vehicles increasingly employ dual latch systems. These systems have some advantages such as:

Improved hood stiffness

Reduced flutter

Better panel alignment

Enhanced safety

However, synchronization between multiple safety hooks introduces additional engineering complexity. That complexity brings some challenges such as:

Simultaneous engagement

Cable balancing

Manufacturing tolerances

Hood over-travel behavior

Proper synchronization between both latch systems is essential to avoid uneven hood loading and incomplete engagement conditions (SAE International, 2024).

8. Material Selection

Secondary safety hooks are commonly manufactured using:

Table 1 *– Materials used in Safety Hook*

Material	Advantages	Disadvantages
Low carbon steel	Low cost, good strength	Corrosion risk
Stainless steel	Corrosion resistance	Higher cost
Powder metal	Complex geometry capability	Brittleness risk
High-strength steel	Excellent durability	Manufacturing difficulty

Surface treatments include:

Zinc coating

Electroplating

E-coating

Phosphate coating

Material selection strongly influences wear resistance, corrosion durability, fatigue life and manufacturing cost (MDPI, 2024).

9. Failure Modes

For the safety hooks some common failure modes exist such as:

9.1 Corrosion-Induced Sticking

Environmental contamination may prevent proper hook return motion.

9.2 Spring Fatigue

Loss of spring preload can reduce engagement reliability.

9.3 Wear at Contact Surfaces

Repeated striker interaction may reduce hook effectiveness.

9.4 Misalignment

Manufacturing tolerances or crash deformation may prevent proper engagement.

9.5 Customer Misuse

Improper hood closing practices may result in incomplete latching conditions. Real-world discussions among technicians often emphasize the importance of maintaining purely mechanical secondary retention systems rather than relying solely on electronic warnings.

10. Regulatory and Safety Considerations

Automotive hood latch systems must comply with various safety regulations including:

FMVSS requirements

ECE regulations

OEM internal standards

Pedestrian protection standards

Key validation requirements include:

Hood retention force

Dynamic durability

Corrosion resistance

Mis-latch detection

Abuse load testing

11. Validation and Testing Methods

11.1 Static Load Testing

Retention force is measured under controlled loading conditions.

11.2 Slam Testing

Repeated hood closing cycles evaluate durability.

11.3 Environmental Testing

Salt spray

Dust exposure

Thermal cycling

Humidity aging

11.4 Vehicle Road Testing

Real-world driving conditions validate system robustness.

12. Modern Trends and Innovations

12.1 Electronic Hood Release Systems

Electronic actuation systems eliminate traditional mechanical cables. However, it has both advantages and disadvantages:

Packaging flexibility

Smart diagnostics

Remote operation

Increased complexity

Electrical dependency

Sensor reliability concerns

12.2 Active Hood Systems

Pedestrian protection systems may actively lift the hood during collision events. This creates additional integration challenges for latch and safety hook mechanisms.

12.3 Lightweighting

Aluminum and composite hoods reduce mass but alter dynamic behavior and stiffness characteristics.

13. Design Optimization Approaches

Modern optimization techniques include:

Multi-body dynamics simulation

Finite element analysis

Topology optimization

DOE-based parameter studies

Sensitivity analysis

Optimization targets generally include:

Reduced release effort

Improved durability

Lower mass

Reduced noise

Enhanced safety margin

Advanced simulation tools now allow engineers to predict latch performance under highly dynamic operating conditions before physical prototyping (SAE International, 2005).

DISCUSSION

Secondary safety hook mechanisms represent a deceptively simple but highly critical automotive safety subsystem. Increasing vehicle complexity continues to challenge traditional latch designs.

Table 2- *Key Engineering Challenges*

Requirement	Conflict
Low operating effort	High retention force
Lightweight design	Structural stiffness
Pedestrian safety	Hood rigidity
Reduced cost	Durability
Electronic integration	Mechanical redundancy

Future designs will likely combine:

Smart sensing systems

Advanced materials

Enhanced corrosion protection

Improved kinematic optimization

Mechatronic integration

However, purely mechanical redundancy will likely remain essential due to its inherent reliability.

CONCLUSION

Secondary safety hook mechanisms play a fundamental role in ensuring hood retention safety in automotive applications. Despite their relatively compact size and simple appearance, these mechanisms involve highly complex interactions between kinematics, structural mechanics, aerodynamics, ergonomics, and durability engineering.

Modern automotive trends such as lightweight structures, dual-latch systems, pedestrian safety requirements, and electronic integration continue to increase the engineering complexity of hood latch systems.

A robust secondary safety hook mechanism must provide:

Reliable engagement

Adequate aerodynamic retention

Long-term durability

Low operational effort

Corrosion resistance

Customer satisfaction

Future research should focus on:

Intelligent latch diagnostics

Mechatronic safety redundancy

Lightweight high-strength materials

Advanced simulation techniques

Improved failure prediction methods

The secondary safety hook will continue to remain a critical passive safety component within automotive closure systems.

REFERENCES

Automotive closure system engineering practices and OEM validation methodologies. (n.d.). Unpublished industrial engineering practices.

MDPI. (n.d.). *Investigation of the impact of a vehicle front hood striker geometry on static stiffness performance*. MDPI

SAE International. (2005). *Construction and kinematics of automotive side door latch mechanisms* (SAE Technical Paper No. 2005-01-0881). SAE International

SAE International. (2019). *Aerodynamically induced loads on hood latch and hood retention systems* (SAE Technical Paper No. 2019-01-0657). SAE International

SAE International. (2019). *Novel technique to simulate hood closing effort under quasi-static condition and its strategic correlation* (SAE Journal Paper No. 2019-26-0342). SAE International

SAE International. (2024). *Hood closing characteristics in a dual hood latch system* (SAE Technical Paper No. 2024-01-2228). SAE International

Scuderia Car Parts. (n.d.). *Aston Martin Vanquish parts catalog*. Retrieved May 20, 2026, from Scuderia Car Parts

6th International
Congress of Engineering and Natural
Sciences

Deneme Üretimi Saç Jantlardan Kaynaklı Prototip Üretim Araçlarda ve Titreşimin Araç Konforuna Etkisi

Barış ULUÇAY [1]
Büşra GÜLEÇ [2]

Abstract

The wheel and tire assembly is one of the most critical systems affecting vehicle ride comfort, handling, and perceived safety. In this study, vibration issues observed within specific speed ranges on light commercial vehicles platform were investigated by analyzing the effects of wheel rims, hubs, tires, and fastening components on balance and vibration performance along the activation of protype product on development phases. Comparative evaluations were conducted between steel wheels manufactured in global plant and localized products produced with using transferred molds, as well as different aluminum wheel brands used on the same vehicle. Test results showed that even when the general production process is similar, variations in tooling, center bore tolerances, and process control parameters can significantly affect vehicle vibration behavior. Based on the findings, improvements in manufacturing processes, tooling revisions, and the addition of new control criteria that were proposed in order to prevent quality issues and improve customer satisfaction.

Keywords: Wheel vibration, wheel rim manufacturing, vehicle dynamics, NVH, wheel balancing, steel wheel, aluminum wheel, process control, tolerance analysis, quality, ride comfort, wheel localization, tire and wheel system, vehicle vibration performance.

[1] Senior Engineer, Gazi Univercity, Chemical Engineering, Orcid : 0009-0009-8295-9103
[2] Senior Engineer, Uludağ Univercity, Material Engineering, Orcid: 0000-0001-9160-8377

GİRİŞ

Otomotiv sektöründe müşteri beklentilerinin artmasıyla birlikte sürüş konforu, direksiyon hissi ve algılanan kalite kavramları araç geliştirme süreçlerinde kritik mühendislik parametreleri haline gelmiştir. Özellikle araç içi titreşim ve gürültü performansı olarak tanımlanan NVH (Noise, Vibration, Harshness) karakteristikleri, kullanıcı memnuniyetini doğrudan etkileyen en önemli kriterlerden biri olarak değerlendirilmektedir (Gillespie, 1992). Modern otomotiv mühendisliğinde NVH performansı yalnızca konfor kriteri olarak değil, aynı zamanda aracın üretim kalitesi ve yapısal doğruluğunun göstergesi olarak da kabul edilmektedir (Heisler, 2002).

Araçta oluşan titreşimlerin önemli bir bölümü tekerlek sistemi üzerinden araç gövdesine iletilmektedir. Tekerlek ve lastik sistemi, araç ile yol arasındaki tek temas noktası olduğundan dolayı bu bölgede meydana gelen geometrik düzensizlikler, balans veya montaj tolerans sapmaları doğrudan direksiyon sistemi ve süspansiyon üzerinden sürücüye aktarılmaktadır (Milliken & Milliken, 1995). Özellikle yüksek hızlarda oluşan düşük genlikli titreşimler dahi sürücü tarafından algılanabilmekte ve araç kalite hissini ciddi şekilde olumsuz etkileyebilmektedir.

Literatürde tekerlek kaynaklı titreşim problemleri çoğunlukla lastik uniformite hataları, radial force variation (RFV), balans problemleri ve lastik geometrisi üzerinden değerlendirilmektedir (SAE International). Ancak son yıllarda yapılan çalışmalar, jant geometrisinin, merkezleme hassasiyetinin, bağlantı yüzeylerinin ve üretim proses varyasyonlarının da araç titreşim performansı üzerinde kritik etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Reimpell, Stoll, & Betzler, 2001).

Özellikle sac jant üretim prosesleri; presleme, derin çekme, kaynak, şekillendirme, genişletme ve boyama gibi çok sayıda ardışık operasyon içermektedir. Bu proseslerin her biri geometrik varyasyon oluşturma potansiyeline sahiptir. Prosesler sırasında oluşabilecek merkez kaçıklıkları, step height sapmaları, bijon delik geometrisi uygunsuzlukları ve porya temas yüzeyi düzgünsüzlükleri, jantın araç üzerindeki dönme eksenini etkileyerek yüksek hızlarda titreşim oluşumuna neden olabilmektedir (ISO 3006).

Benzer şekilde alüminyum jantlarda da işleme toleransları, merkez delik hassasiyeti ve montaj yüzeyi doğruluğu kritik öneme sahiptir. Özellikle merkez delik çap toleransındaki küçük sapmalar bile jantın poryaya tam merkezlenememesine neden olarak direksiyon titreşimlerine yol açabilmektedir. Bu nedenle jant-porya merkezleme ilişkisi, NVH performansı açısından en kritik temas bölgelerinden biri olarak kabul edilmektedir (Rao, 2011).

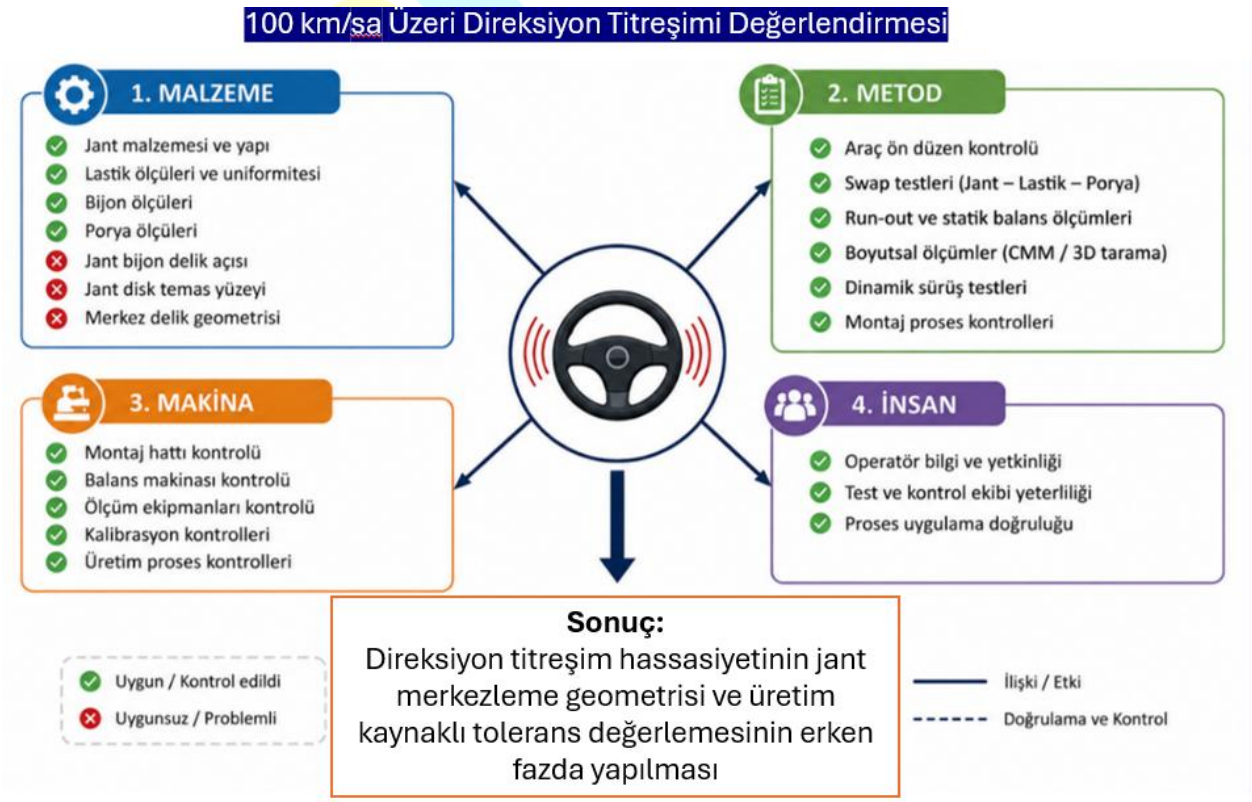
Otomotiv üreticileri açısından jant sistemleri yalnızca yapısal dayanım açısından değil, aynı zamanda NVH performansı açısından da sıkı kontrol altında tutulması gereken güvenlik ve kalite bileşenleridir. Bu nedenle yeni araç devreye alımı teknik şartnamelerinde radial run-out, lateral run-out, merkez delik toleransı, balans limitleri ve montaj yüzeyi geometrileri için detaylı kabul kriterleri tanımlanmaktadır (ISO 1940-1). Farklılıkla son yıllarda artan yerelleştirme faaliyetleri kapsamında farklı üreticiler tarafından üretilen jantların aynı kalite seviyesinde üretilebilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, geliştirme fazı araçlarında belirli hız aralıklarında hissedilen direksiyon titreşimlerinin kök nedenleri araştırılmıştır. Ölçümler kapsamında farklı üretim proseslerine

sahip sac ve alüminyum jant sistemleri karşılaştırmalı olarak incelenmiş; araç üzeri NVH testleri, geometrik ölçümler, üretim proses analizleri ve doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda titreşim hissinin temel nedenleri belirlenmiş ve üretim proseslerinin iyileştirilmesine yönelik mühendislik çözümleri geliştirilmiştir.

YÖNTEM

Çalışmaya, araçta belirli hız aralıklarında hissedilen direksiyon titreşimlerinin kök nedenlerinin belirlenmesine yönelik detaylı analiz çalışmaları ile başlanmıştır. Geliştirme fazı sırasında değerlendirilen konu ilişkili olabilecek tüm olası ana nedenler ve alt nedenler sistematik olarak değerlendirilmiş; gerekli görülen durumlarda ölçümler, araç testleri, geometrik analizler ve proses incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda titreşime neden olan temel hata kaynakları belirlenmiş ve doğrulama çalışmaları ile desteklenmiştir.



Şekil 1- *Direksiyon Titreşimi Hissiyatı İçin Gerçekleştirilen Kök Neden Analizi*

Şekil 1'de, yüksek hızlarda direksiyonda hissedilen titreşim hissinin sebebinin belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen kök neden analizi gösterilmektedir. Analiz kapsamında; malzeme, metod, makina ve insan olmak üzere dört ana kategori altında sistematik olarak değerlendirilmiştir. Yapılan incelemelerde lastik, balans, montaj hattı, ölçüm ekipmanları ve operatör uygulamalarının uygun olduğu doğrulanmıştır. Buna karşılık özellikle jant bijon delik açısı, disk temas yüzeyi ve merkez delik geometrisinde tolerans dışı durumlar tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, titreşimin temel nedeninin jant merkezleme geometrisi ve üretim proseslerinden kaynaklanan tolerans sapmaları olduğunu göstermiştir.

Titreşim hissiyatının kaynağını belirleyebilmek amacıyla toplam 14 farklı jant seti ile karşılaştırmalı SWAP testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar kapsamında araç, jant, lastik,

bijon, porya ve ilgili temas yüzeyleri detaylı olarak incelenmiş; titreşimin hangi komponentten kaynaklandığını netleştirmeye yönelik sistematik analizler yapılmıştır.

Gerçekleştirilen testler ve doğrulama çalışmaları sonucunda, titreşim hissiyatının sebebinin temel olarak tekerlek sistemi ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Özellikle jant, lastik, porya, bijon bağlantıları ve tekerlek duruş geometrisinin birlikte oluşturduğu dönme sistemi içerisinde meydana gelen non-uniform santrifüj kuvvetlerin yüksek hızlarda direksiyon titreşimine yol açtığı değerlendirilmiştir. Yapılan incelemelerde özellikle jant üretim proseslerinden kaynaklanan geometrik sapmaların, merkezleme hatalarının ve temas yüzeyi toleranslarının titreşim oluşumunda kritik etkiye sahip olduğu görülmüştür. Sac jant üretiminde kullanılan çok adımlı proses yapısının (presleme, şekillendirme, kaynak ve boyama operasyonları gibi) proses varyasyon riskini artırdığı değerlendirilmiştir.

Titreşimin temel kaynağının jant sistemi olduğu belirlendikten sonra çalışma kapsamında aşağıdaki doğrulama ve analiz yöntemleri uygulanmıştır:

Lastik uniformite kontrolleri gerçekleştirilmiş ve lastik-jant kombinasyonlarının OEM lastik teknik şartnamesi ile jant-lastik montaj standardı limitleri içerisinde olduğu doğrulanmıştır.

Jant geometrik tolerans ölçümleri gerçekleştirilmiş; radial run-out ve lateral run-out değerlerinin teknik tolerans limitleri içerisinde olduğu görülmüştür.

Porya, bijon bağlantıları ve temas yüzeyleri üzerinde hizalama ve yüzey düzgünlüğü kontrolleri yapılmış, titreşime neden olabilecek uygunsuz bir durum tespit edilmemiştir.

Montaj hattı prosesleri, balans operasyonları ve ekipman kalibrasyonları detaylı olarak incelenmiştir. Montaj hattı bakım ve kalibrasyon kontrolleri öncesi ve sonrası ölçümler karşılaştırılmış, ayrıca farklı harici balans ekipmanlarında ek doğrulama ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda montaj hattı ve balans proseslerinden kaynaklanmadığı doğrulanmıştır.

Araç üzeri doğrulama testleri kapsamında farklı hız aralıklarında titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında direksiyon sistemi üzerinden hissedilen titreşim seviyeleri değerlendirilmiş ve farklı lastik-jant kombinasyonları ile karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Gerçekleştirilen SWAP çalışmaları sonucunda titreşim kaynağının lastikten ziyade jant kaynaklı olduğu belirlenmiştir.

Testler sırasında kritik hız bölgeleri tanımlanmıştır. Araçların sıcak ve soğuk asfalt koşullarında 100 km/sa üzerindeki hızlarda ilerlemesi sırasında direksiyonda belirgin titreşim oluştuğu gözlemlenmiştir. Özellikle 120 km/sa, 148 km/sa, 168 km/sa ve 178 km/sa hız seviyelerinde titreşim şiddetinin arttığı ve sürücü tarafından net şekilde hissedildiği tespit edilmiştir. Titreşim seviyelerinin araç hızı arttıkça yükseldiği ve müşteri konforunu olumsuz etkilediği değerlendirilmiştir.

Titreşim kaynağı olduğu düşünülen jantlar üzerinde detaylı boyutsal analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında farklı üretim kaynaklarına ait 16” ve 17” sac jantlar incelenmiş hem üç boyutlu tarama yöntemleri hem de fiziksel numune ölçümleri kullanılarak geometrik doğrulamalar yapılmıştır. Ölçüm sonuçları teknik resim toleransları ile karşılaştırılarak kritik sapmalar analiz edilmiştir.

Bununla birlikte alüminyum jantlar ile aynı tasarıma sahip farklı üretim kaynaklarından elde edilen sac jantlar arasında karşılaştırmalı incelemeler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda özellikle merkezleme geometrisi, temas yüzeyi toleransları ve üretim proseslerinden kaynaklanan varyasyonların titreşim performansı üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

Üretim sürecinin değerlendirilmesi amacıyla ilgili üretim tesislerinde proses incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Kritik proses adımları detaylı olarak analiz edilmiş ve kök nedeni belirleyebilmek amacıyla toplam 27 farklı mühendislik denemesi planlanmıştır. Denemeler aşamalı şekilde uygulanmış; proses parametreleri, kalıp geometrileri ve üretim ayarları üzerinde optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür.

Gerçekleştirilen iyileştirme çalışmaları sonrasında deneme jantları üretilmiş ve araç üzerinde doğrulama testleri yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda titreşimin temel olarak komponent kaynaklı olduğu doğrulanmış ve 16" sac jant varyasyonlarında titreşim davranışının daha belirgin olduğu tespit edilmiştir.

Bulgular Etkileri ve Çözümleri:

Belirli hız aralıklarında oluşan titreşimlerin ana kaynağı jant olarak belirlenmiştir ve saç jantlarda üretim kaynaklı geometrik sapmalar tespit edilmiştir.

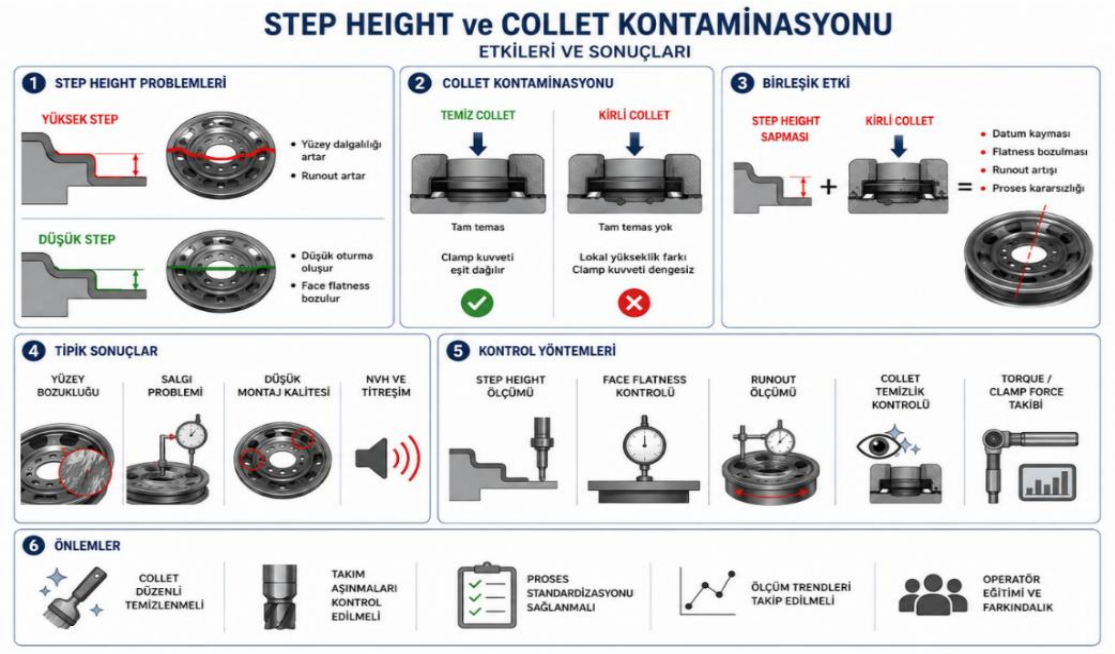
Bijon delik açılarının limit dışı olması.

Disk ön-şekillendirme prosesinde pens ayarları uygunsuz olduğunda limit dışı değerlerde bijon delik açıları ile karşılaşabilir. Böyle bir durumda bijonlar sıkım (torklama) sonrası bijon deliklerine tam oturamadığı için jantlar araçta titreşime yol açabilir.

Şekil 2-*Jant Bijon Deliği Eğim Farklılıkları*

Jantların merkez disk baskı yüzeyi (face flatness ve step height) yükseklik ve toplam temas alan değerlerinin limit dışı olması.

Uygunsuz baskı yükseklik değeri ile ürün üretilmesi.(Step Height).



Şekil 3- *Step Height ve Collet Kontaminasyanu*

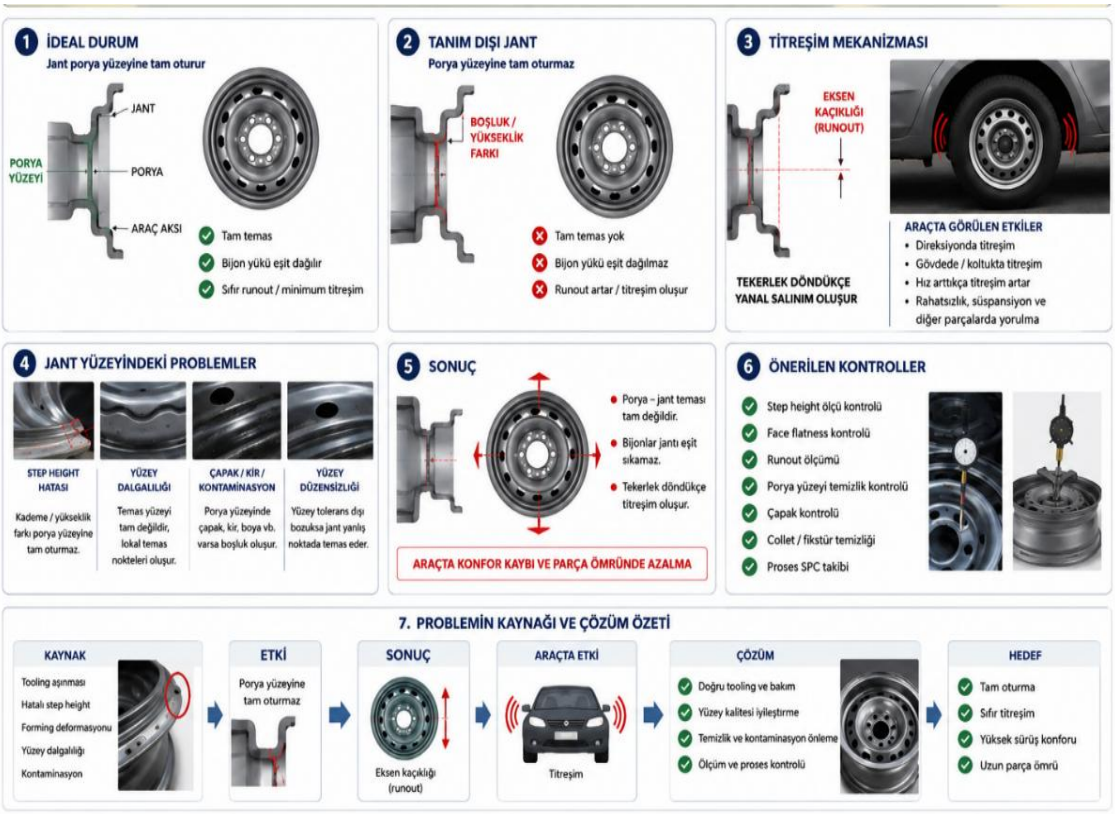
Jantın porya yüzeyine dokunan kısımdaki (collet contaimenet) parçasının "mevcut ölçüleri ve üretim parametreleri ile kalıp ile uyumsuz çalışarak tanımdışı ölçülerde ürün üretilmesi" ve "bu üretilen tanım dışı jantların araca takılmasıyla" poryo yüzeyine tam oturamayıp tekerlek döndükçe araçta titreşime yol açması ortaya çıkmaktadır.

Merkez delik çap bölgesi limit dışı ölçülere sahip olması ise;

Uygunsuz Baskı yükseklik değeri (Step Height) ve uygunsuz üst plaka tasarımı ile ürün üretilmesi.

Jantın porya yüzeyine dokunan kısımdaki (collet contaimenet) parçanın mevcut ölçüleri ve üretim parametreleri ile kalıp ile uyumsuz çalışarak tanım dışı ölçülerde ürün üretmesi.

Tanım dışı üretilen ürünlerin araca takılmasıyla sürücü belirli hızlarda tekerlek merkezinden yayılan ve direksiyonda bariz hissedilen bir titreşimle karşılaşmaktadır.



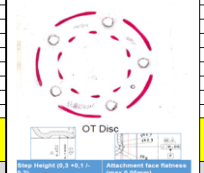
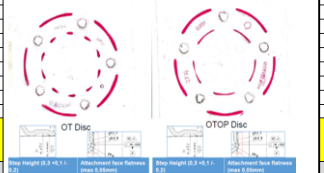
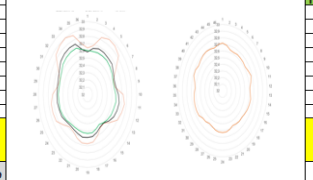
Şekil 4- *Merkez delik farklılıkları ve Tanım Dışı Jantların Araçta Titreşim Oluşturma Mekanizması*

- Merkez delik üretimi kontrol altında tutulması gerektiği görüldü.

Jant üretim prosesinde kontrol eksiklikleri bulunduğu belirlendi.

Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı ön-seri/deneme jant üretiminde daha sıkı kalite kontrol mekanizmalarının uygulanması gerektiği düşünülmektedir.

DIAGNOSE AND SUBJECTIVE EVALUATION WITH X0-X1-X2 VEHICLE

1	1st.Trial OT part	2	2nd.Trial OT part	3	3rd.Trial OTOP part	4
1		NOT OK		NOT OK		OK
2		NOT OK		OK		TO BE INVESTIGATED-->OK
3		NOT OK		NOT OK		OK
4		NOT OK		OK		OK
5		NOT OK		NOT OK		OK
6		NOT OK		OK		OK
7		NOT OK		NOT OK		OK
8		NOT OK		OK		OK
9		NOT OK		OK		OK
10		NOT OK		NOT OK		OK
NOK RATE (%)		100%		50%		10%-->%0
CONCLUSION		PRODUCT NEED TO REVISION		PRODUCT NEED TO REVISION		SHOULD BE RELEASE

Şekil 5: *Diagnoz Sonuçları*

Deneme jantları ile bulguların iyileştirilmesi sonrasında ise direksiyonda algılanan titreşim tamamen giderilmiş ve ispati ise takip altına alınarak yapılmıştır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma sonucunda aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır.

Jant üretimi için kalıpların transferi sonrasında üretim yapan firmanın özellikle proses akış şeması boyunca kullanılan parametrelere ve bu parametreler ile ilişkili çıktı ürünlerin ölçülüp gerektiği ortaya çıkmıştır.

Prototip fazda üretilecek olan araçlar için yapılan geliştirme fazındaki ürünlerin olası eksik kontroller ve hatalı/uygunsuz üretimler araçta titreşime yol açmaktadır.

Özellikle jantın göbek bölgesi, “hareketin iletiminin başladığı ve etkilendiği” en önemli noktalardandır.

Jant, titreşim performansında lastikten sonra en kritik bileşendir ve üretim prosesindeki küçük sapmalar dahi araç konforunu ciddi şekilde etkilemektedir.

Bu çalışma sonucunda hataların kök nedenlerine inildiğinde, Kalıp -Parça değişimi, kalıp revizyonu ve proses parametresi değişimi gibi metotlarla iyileştirilmeler yapılmaktadır.

Ancak hatanın kontrol altına alınması tekrarının önlenmesi ve bu hatalar ile diğer projelerde de karşılaşılmaması adına 2D /PFMEA(Proses hata türü etki analizi) KONTROL_PLANI süreçlerine yeni kontrol parametrelerinin eklenmesi gerekmektedir.

Geliştirme fazında prototip parçalar için de özellikle jant merkez çap bölgesi geometrik toleranslar istatistiksel proses kontrol yöntemleri uygulanarak değerlendirilmelidir.

Jant üretiminde proses içi ölçüm sistemleri artırılmalıdır. Co-Design firma yönetimi oldukça etkin olup NVH testleri araç geliştirme sürecinin erken aşamalarına entegre edilmelidir.

KAYNAKLAR

Gillespie, T. D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE International.

Heisler, H. *Advanced Vehicle Technology*. Butterworth-Heinemann.

ISO 1940-1. *Mechanical vibration — Balance quality requirements for rotors in a constant state*. International Organization for Standardization.

ISO 3006. *Road vehicles — Passenger car wheels for road use — Test methods*. International Organization for Standardization.

Milliken, W. F., & Milliken, D. L. *Race Car Vehicle Dynamics*. SAE International.

Rao, S. S. *Mechanical Vibrations*. Pearson Education.

Reimpell, J., Stoll, H., & Betzler, J. *The Automotive Chassis: Engineering Principles*. SAE International.

SAE International. *Wheel Dynamics and NVH Performance in Passenger Vehicles*. SAE Technical Papers.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Overview of Vehicle Occupants Architectural Performance

Muhammed Ali VURAL[1]

Abstract

The architectural performance evaluations of vehicle occupants are based on human-machine compatibility studies. Studies in this field have been conducted to enable humans to use machines more efficiently. They aim to increase this efficiency through parameters such as standardizing human-machine processes, correct work share and an ideal work rhythm. With the development of vehicle technology, studies on the vehicle occupants architectural performance have been carried out using information obtained from human-machine compatibility. The architectural performance of occupants has been evaluated by considering parameters such as interior roominess, external visibility, and ingress/engress values.

In addition to the information found in the literature, the dimensions of the vehicle's trunk are also a parameter that can affect the occupant's comfort. To demonstrate the impact of this parameter on the occupant's comfort, this study was conducted considering different trunk carpet heights. The height of the trunk carpet affects the user's comfort, and this parameter was correlated with the user's back and elbow angles.

When evaluating the vehicle occupants architectural performance, parameters such as roominess, visibility, ingress/egress, trunk dimensions, etc., need to be considered. The aim is to evaluate the relationship between the vehicle as a whole and its occupants. This study provides an overview of vehicle occupants architectural performance.

Keywords: Vehicle Architecture, Roominess, Visibility, Ingress/Egress, Trunk

[1] Vehicle Architecture Performance Engineer, TOFAS, R&D

1.Introduction

The foundations of vehicle architectural performance are based on research into human-machine compatibility. Studies on human-machine compatibility began in the early 1900s with the work of Frederick Winslow Taylor. In his studies, Frederick identified different parameters for increasing human-machine compatibility. He defined these parameters as, respectively, human movement efficiency, standardization of processes independent of individuals, matching the right person with the right job, separating mental and physical workloads, and the ideal work rhythm (Taylor et al., 1911). From the beginning of vehicle technology, information gained during the human-machine compatibility has been used to improve human-vehicle compatibility. Historically, the first studies on human-vehicle compatibility focused on measurable physical performance such as drivers' physical limitations, control element placement, visibility, and seating position. Today, with the advancement of vehicle technology, information and entertainment systems have been incorporated into vehicles. Because these systems are integrated into the vehicle, they are also considered when evaluating human-vehicle compatibility. In the future, with the development of autonomous driving technologies, vehicles will not only be used for transportation but should also be considered as spaces where drivers spend time while traveling (Akamatsu et al., 2013).

Sang-Don Lee et al. conducted a study on vehicle interior roominess. In their study, they considered 15 different interior roominess measurements across 76 different vehicles. Their findings revealed three main variations affecting interior roominess. These variations, in order of impact on user satisfaction, can be ranked as follows: interior plan view > vehicle height > greenhouse shape. The study also indicated that the perception of interior roominess is influenced not only by physical dimensions but also by psychological factors. It was found that domestic brands, despite being similar across all 15 dimensions, received lower satisfaction rates compared to foreign brands (Lee et al.,2019).

Wonil Hwang et al. demonstrated that the roominess of vehicles is related not only to the dimensions of the interior but also to psychological perceptions. In the study, 15 participants evaluated the roominess of 7 different vehicles. Although roominess measurements of the vehicles were similar, the participants' perceptions of roominess differed. They explained this difference with three most influential factors: 'space completeness', 'narrowness', and 'dullness' (Hwang et al.,2011).

Francesco Saverio Capaldo et al. conducted a study on the effect of A-pillars on drivers' vision. They evaluated the changes in the effect of A-pillars on driver vision over the years in 500 vehicles manufactured in Italy between 2007 and 2016. Their analysis showed a decrease in blind spot angles on the driver's left side and an increase in blind spot angles on the driver's right side. This is due to the thicker and more inclined geometry of the pillar on the driver's right side (Capaldo et al., 2019).

Kajaks et al. conducted a study examining the ingress/egress performance of elderly occupants to vehicles. The study was carried out using adjustable mock-up based on four different vehicle models. The results showed no significant differences in the ingress performance of elderly occupants. However, differences were observed in their egress performance. These differences were correlated with parameters such as seat height, door sill height and interior geometry (Kajaks et al., 2015).

Maria Pia Cavatorta et al. conducted studies on the evaluation criteria for vehicle ergonomics. They stated that 5 different parameters should be considered in the evaluation of vehicle ergonomics. These can be defined as habitability, accessibility, reachability, visibility and sitting comfort (Cavatorta et al., 2013).

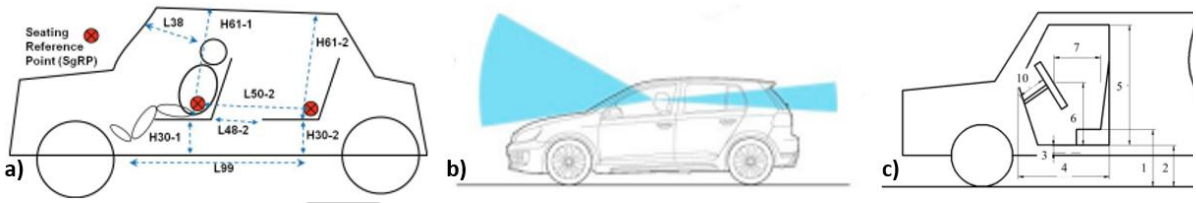


Figure 1: Vehicle Architecture Performances a) Interior Roominess b) Visibility c) Ingress/Egress

In the literature, the foundations of vehicle ergonomics began with human-machine compatibility, and this knowledge has been integrated into human-vehicle compatibility. In subsequent studies, parameters such as interior roominess, visibility, and ingress/egress were used on human-vehicle compatibility studies. In this study, the human-vehicle compatibility will be evaluated using a different parameter. The height of trunk carpet will be considered as a parameter when developing vehicle architecture, and its effect on the human-vehicle compatibility will be examined.

2.Method

This study will investigate the effect of trunk carpet heights to user comfort. The aim is to demonstrate that trunk design is an important parameter in the development of vehicle architecture. The study will be conducted using software that utilizes digital human models. The human models will be standard digital models provided by the software, consisting of 5% female, 50% male, and 95% male. The height and weight information of the digital human models used in the study are given in Table 1.

Table 1- Digital Human Models Height and Weight Data

	Height (mm)	Weight (kg)
5% Female	153	51
50% Male	175	79
95% Male	187	101

During the study, trunk carpets height from the ground was adjusted to 600 mm and 750 mm, respectively. The back and elbow angles of the digital human models will be considered when picking up objects positioned at different heights. Comfort levels will be determined by evaluating these angles of the digital human models. The reason for using digital human models of different sizes is to represent most of the population. The trunk carpets where the study will be conducted are shown in Figure 2.

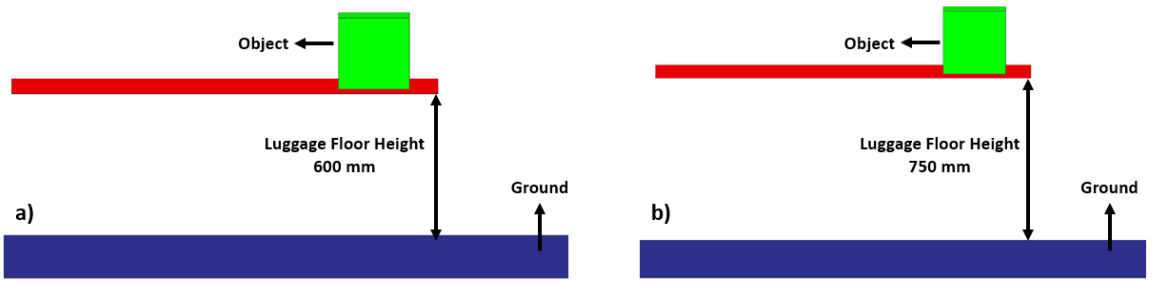


Figure 2: Trunk Carpet Heights a) 600 mm b) 750 mm

3.Result and Discussion

In this study, the initial evaluation was carried out using a representative trunk carpet which is has 600 mm height. While picking object from the trunk, the comfort level of digital human models was evaluated (5% female, 50% male, and 95% male). The comfort levels of the digital human models were divided into three categories: comfortable, acceptable, and uncomfortable. When evaluating the comfort level of the 5% female, it was observed that the back angle was acceptable and the elbow angle was comfortable. When evaluating the comfort level of the 50% male, it was observed that the back angle was uncomfortable and the elbow angle was comfortable. When evaluating the comfort level of the 95% male, it was observed that the back angle was uncomfortable and the elbow angle was comfortable. The reason for the different comfort levels of the digital human models is due to the differences in their height and weight.

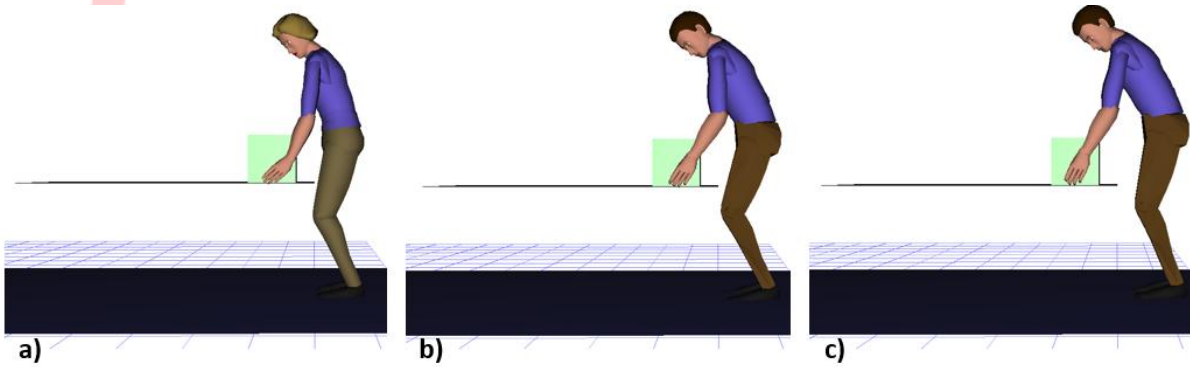


Figure 3: 600 mm - Trunk Carpet a) %5 Female b) %50 Male c) %95 Male

The study conducted with the trunk carpet which is has 600 mm height is shown in Figure 3. Comfort analysis results of 600 mm – trunk carpet given in Table 2.

Table 2- 600 mm – Trunk Carpet Analysis Results

	Back	Elbow
5% Female	Acceptable	Comfortable
50% Male	Uncomfortable	Comfortable
95% Male	Uncomfortable	Comfortable

The second evaluation was conducted using a representative trunk carpet which is has 750 mm height. The comfort level of digital human models (5% female, 50% male, and 95% male) were evaluated same methodology with first case. When evaluating the comfort level of the 5% female, it was observed that the back and elbow angles were comfortable. Similarly,

when evaluating the comfort level of the 50% male, it was observed that the back and elbow angles were comfortable. Finally, when evaluating the comfort level of the 95% male, it was observed that the back and elbow angles were comfortable. The results of the comfort level evaluations conducted at a height of 750 mm trunk carpet are better than conducted at a height of 600 mm trunk carpet. Digital human models were able to pick the higher-positioned representative objects more comfortably.

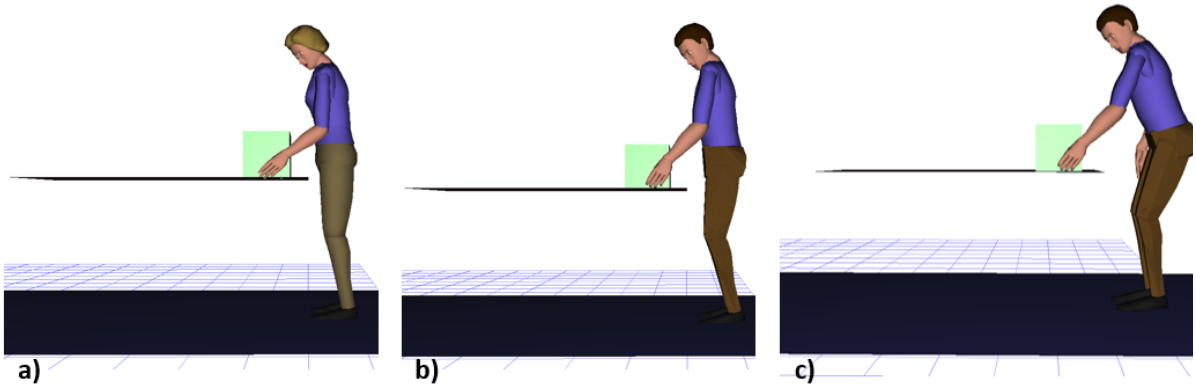


Figure 4: 750 mm - Trunk Carpet a) %5 Female b) %50 Male c) %95 Male

The study conducted with the trunk carpet which is has 750 mm height is shown in Figure 4. Comfort analysis results of 750 mm – trunk carpet given in Table 3.

Table 3- 750 mm – Trunk Carpet Analysis Results

	Back	Elbow
5% Female	Comfortable	Comfortable
50% Male	Comfortable	Comfortable
95% Male	Comfortable	Comfortable

4. Conclusion

This study provides a overview of vehicle occupants architectural performance. The literature shows that parameters such as roominess, visibility, and ingress/egress are considered when examining vehicle occupants architectural performance. In addition to these parameters, a study was conducted to demonstrate that trunk area is also a parameter affecting vehicle occupants architectural performance. In this study, two different trunk carpet heights (600 mm, 750 mm) were evaluated using digital human models (5% female, 50% male, and 95% male). The aim is to show the effect of trunk carpet heights to user comfort.

The evaluations show that 5% female, 50% male, and 95% male digital human models comfort levels were better when the trunk carpet height was 750 mm. On trunk carpet height 600 mm condition, digital human models comfort level are worst than trunk carpet height 750 mm condition because user' s back angles is greater. Therefore, when evaluating the vehicle occupants architectural performance we should not focus on a single parameter, we should consider multiple parameters. It is more accurate to consider the vehicle as a whole and evaluate vehicle-human compatibility from this perspective.

REFERENCES

Taylor, F. W. (1911). *The principles of scientific management*. Harper & Brothers. https://archive.org/details/principlesofsci00taylrich

Akamatsu, M., Green, P., & Bengler, K. (2013). *Automotive technology and human factors research: Past, present, and future*. *International Journal of Vehicular Technology*, 2013, Article 526180, 1–27. https://doi.org/10.1155/2013/526180

Lee, S.-D., & Kim, S.-L. (2019). *Variation modes of vehicle interior roominess*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 233(8), 1–16. https://doi.org/10.1177/0954407019844394

Hwang, W., Kim, N.-H., Ahn, H.-J., & Jung, H.-S. (2011). *Factors for representing in-vehicle roominess*. In J. A. Jacko (Ed.), *Human-computer interaction: Users and applications* (LNCS Vol. 6763, pp. 386–390). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21619-0_44

Capaldo, F. S., Guzzo, F., & Nasti, G. (2020). *Some analysis on visibility from driver seat*. *Transportation Research Procedia*, 45, 87–94. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.066

Kajaks, T., Crizzle, A., Gish, J., Fleisig, R., & Vrkljan, B. (2015). *Older adults and vehicle design: Evidence-based approach to examining vehicle ingress & egress*. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 59(1), 1656–1660. https://doi.org/10.1177/1541931215591358

Cavatorta, M. P. (2013). *Ergonomic analysis of motor vehicles*. *Mechanics, Transport, Communications*, 39(4), 39–54. https://oaji.net/articles/2014/766-1420109631.pdf

6thInternational
Congress of Engineering and Natural Sciences

Elektrikli Araçlarla Birlikte Tampon Tasarımındaki Değişimler

Görkem ÖZTAŞ[1]
Berkan KÖKSALAR[2]

Abstract

Electric vehicles (EVs) are driving a significant transformation in the automotive industry, offering environmental sustainability, energy efficiency, and zero-emission capabilities. This shift not only affects the vehicle powertrain but also necessitates changes in various design elements, particularly bumper systems. The structural characteristics of EVs, such as their compact electric motor configuration and the placement of batteries, have a direct impact on bumper design, influencing factors such as geometry, material selection, and integration with other vehicle components. This study examines the changes in bumper designs in electric vehicles and discusses the key factors driving these changes. It demonstrates how electric vehicle bumpers are adapting to meet safety, performance, and environmental objectives. The transition to electric vehicles (EVs) has necessitated a fundamental redesign of vehicle exterior components, particularly bumper systems. This study examines how EV-specific structural requirements, such as aerodynamic efficiency and the integration of new technological components, drive these design changes. Key factors including modified grille structures, pedestrian safety acoustic systems, and the strategic placement of charging ports are discussed. The paper concludes by demonstrating how bumpers have evolved from simple protective parts into multifunctional modules in the era of electric mobility.

Keywords: Electric Vehicles (EV), Internal Combustion Engine (ICE), Bumper Design, Aerodynamic Efficiency, Functional Integration, Pedestrian Safety (AVAS), ADAS (Advanced Driver Assistance Systems), Charging Port Placement, Automotive Exterior Trim.

[1] Engineering Designer, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş AR-GE Merkezi, Bursa,Türkiye, Orcıd: 0009-0005-1601-783X
[2] Engineering Designer, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş AR-GE Merkezi, Bursa,Türkiye, Orcıd: 0009-0005-1677-0426

GİRİŞ

Dünya genelinde çevre dostu mobilite çözümlerine olan yönelim, otomotiv endüstrisinde elektrifikasyonu temel bir zorunluluk haline getirmiştir. Günümüzde fosil yakıtların çevresel deformasyonu, karbon salınımı ve enerji verimliliği gibi kritik sorunlara karşı geliştirilen en güçlü stratejik yanıt, sıfır emisyonlu sürüş teknolojileridir.

İçten yanmalı motorlu (ICE) araçlarla kıyaslandığında; EV platformları düşük işletme maliyeti, akustik konfor ve yüksek enerji geri kazanımı (rejenerasyon) gibi yapısal üstünlükler sunmaktadır (Ehsani vd., 2018). Batarya yoğunluğundaki artış ve şarj istasyonu ağının optimize edilmesiyle beraber, elektrikli mobilite bireysel ve ticari kullanıcılar için artık daha sürdürülebilir bir alternatife dönüşmüştür.

Bu teknolojik geçişin en belirgin etkisi, araç mimarisinin ve güvenlik parametrelerinin kökten değişmesidir. Özellikle motorun ve şanzımanın ortadan kalkmasıyla boşalan ön hacim, tampon modülleri ve enerji sönümleme yapıları için yeni tasarım fırsatları doğurmuştur. Bu çalışma; EV dönüşümünün araç komponentleri üzerindeki etkisini, tampon tasarımı ve entegre güvenlik sistemleri özelinde irdeleyerek, geleceğin otomotiv mühendisliği standartlarına ışık tutmayı amaçlamaktadır.

YÖNTEM

Bu çalışmada, elektrikli araç dönüşümünün dış trim elemanlarından ön ve arka tampon sistemleri üzerindeki yapısal ve fonksiyonel etkileri analitik bir yaklaşımla incelenmiştir. Mevcut literatür, uluslararası otomotiv regülasyonları (Euro NCAP; UN Regulation No. 138, 2026) ve endüstriyel tasarım parametreleri taranarak; aerodinamik performans, yaya güvenliği (AVAS), ADAS sensör entegrasyonu ve şarj portu yerleşimi gibi değişkenlerin tampon geometrisi ve malzeme seçimi üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

1. Elektrikli Araçların Yapısal Özelliklerinin Tampon Tasarımına Etkisi

Elektrikli araçlarla birlikte tamponlardaki bazı temel yapıların rolleri değişiklik göstermeye başlamıştır. İçten yanmalı motorlardaki bazı sistemler yerlerini farklı komponent ve yapılara bırakmıştır. Bu durum elektrikli araçlardaki sistemsel karmaşıklığın azalmasını sağlamıştır ve tampon gibi motor bölgesini kapatan en büyük parçanın tasarımını ve gerekliliklerini doğrudan etkilemiştir.

Yaya Güvenliği ve AVAS Gereklilikleri

Elektrikli araçlar, genellikle daha güçlü bir torka sahip olup, anında hızlanma kapasitesine sahiptir. Bu özellik, çarpışma durumlarında tamponların, yüksek hızda çarpışmalara karşı daha dayanıklı ve enerji emme kapasitesine sahip olmasını gerektirir. Elektrikli araçlarda, tamponlar sadece yolcu kabinini korumakla kalmaz, aynı zamanda bataryaların zarar görmesini engellemeyi hedefler. Geleneksel içten yanmalı motorlu araçlarda, tamponların öncelikli işlevi motor ve radyatör gibi bileşenleri korumak iken, elektrikli araçlarda bataryaların korunması daha büyük önem taşır. Bu sebeple, elektrikli araç tamponları, daha sofistike enerji emme sistemlerine sahip olabilir ve çarpışma sırasında güvenliği artırmak amacıyla farklı malzemeler ve yapılar kullanılabilir (Simpson, 2005: 112)..

Bunlardan en önemlisi AVAS gereklilikleri kapsamında eklenen komponent ve yapılardır. Elektrikli araçların (EV) düşük hızlarda neredeyse tamamen sessiz olması, özellikle görme engelliler ve yayalar için ciddi bir güvenlik riski oluşturmaktadır. Bu riski azaltmak amacıyla geliştirilen AVAS (Acoustic Vehicle Alerting System - Akustik Araç İkaz Sistemi), uluslararası regülasyonlarla belirlenmiştir (UN Regulation No. 138, 2026: par. 2). AVAS, araç ilk hareket ettiği andan itibaren 20 km/sa hıza ulaşana kadar çalışmak zorundadır. Araç 20 km/sa hızı geçtiğinde sistem otomatik olarak kapanabilir; çünkü bu hızdan sonra lastik sesi ve rüzgâr direnci (aerodinamik gürültü), aracın fark edilmesi için yeterli desibel seviyesine ulaşır. Araç geri vitesteyken, hız ne olursa olsun sistemin aktif olması ve yayılan sesin aracın geri yönde hareket ettiğini belli edecek bir karakterde olması istenir (Şekil 1).

***Şekil 1** – Yaya Güvenliği ve AVAS Gereklilikleri (UN Regulation No. 138 (2026)).*

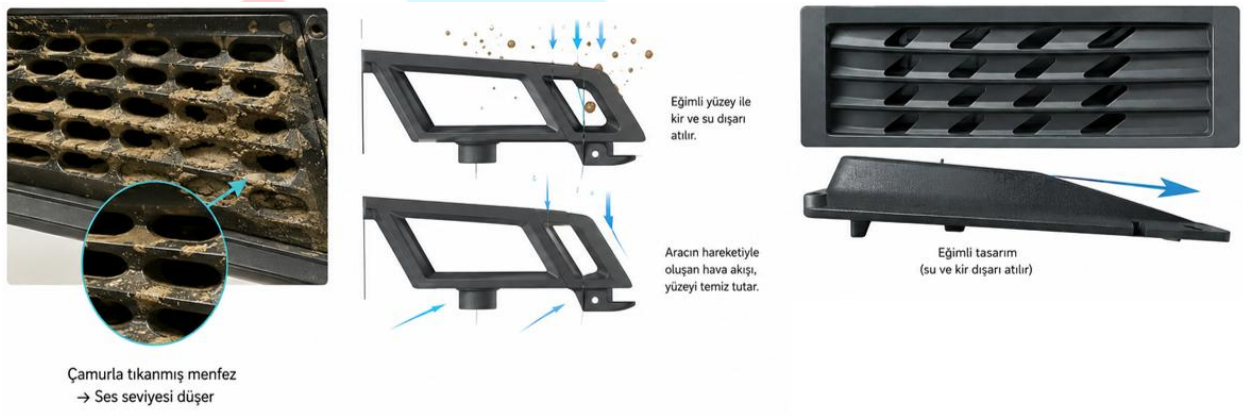
AVAS isterleri doğrultusunda hoparlörün tampona eklenmesi durumunda hoparlörün önüne estetiği bozmayan ama ses dalgalarının geçişine izin veren mikro delikli yüzeyler veya alt bölgeye gizlenmiş menfezler eklemek zorundadır (Şekil 2).

Tampon plastiği (genellikle PP veya ABS), hoparlörün yarattığı titreşimle istenmeyen cızırtılar üretebilir. Bu, tamponun hoparlör bağlantı noktalarında lokal kalınlık artışlarını veya destek braketlerini zorunlu kılar. Tamponun en alt kısımları suya, çamura, karda kullanılan yollardaki tuza ve yüksek basınçlı yıkama sularına en çok maruz kalan bölgelerdir. Hoparlörün tampona bağlandığı noktada kullanılan contalar (gasket), hem sızdırmazlığı sağlamalı hem de hoparlörün titreşiminin tampon paneline geçmesini (damping) engellemelidir (Şekil 3).

***Şekil 2** – Ses dalgalarının tampon üzerindeki geçişine izin veren tasarımlar*

***Şekil 3** – AVAS komponenti ve yardımcı elemanlar (UN Regulation No. 138 (2026)).*

Sesi ileten menfezlerin çamurla tıkanması durumunda sesin dB seviyesi düşebilir. Tasarım, bu deliklerin kendi kendini temizleyebilecek veya tıkanmayacak eğimde olmasını gerektirir (Şekil 4).



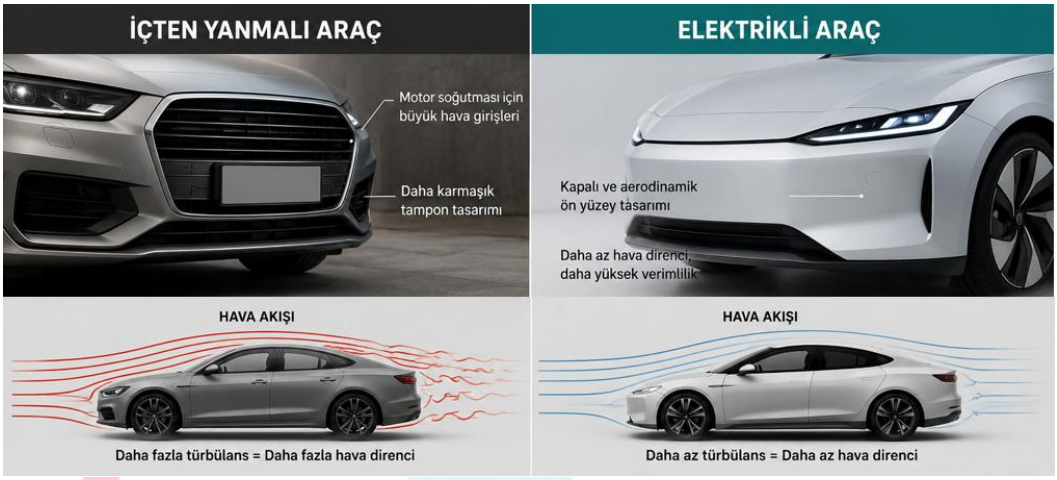
***Şekil 4** – Kendi Kendini Temizleyen Akustik Menfez Tasarımı*

1.2. Aerodinamik ve Estetik Faktörlerin Önemi

Mevcut durumda elektrikli araçlar henüz yüksek menziller sağlayamadıklarından araç tasarımlarında aerodinamik verimlilik de önemli bir rol oynamaktadır. İçten yanmalı motorlu araçların tamponları genellikle motor soğutması gibi ihtiyaçlara göre tasarlanırken, elektrikli araçlar bu tür ihtiyaçları daha az barındırır. Bu nedenle, elektrikli araç tamponları aerodinamik performansı artırmak amacıyla daha farklı biçimlerde tasarlanabilmektedir. Bu durum, aracın sürtünme direncini azaltarak enerji verimliliğini artırabilir. Estetik açıdan da, elektrikli araçların daha modern ve futuristik tasarımlarına uyum sağlamak için tamponların şekli, boyutu ve kullanılan malzemeler farklılık gösterebilir. Bu tasarım değişiklikleri, araçların görünümünü iyileştirmek ve daha verimli hale getirmek amacıyla yapılan aerodinamik iyileştirmelerdir.

Bu sebeple elektrikli araçlarda (EV), içten yanmalı motorlu araçlardaki gibi devasa ve sürekli açık tampon ızgaralarına (grille) teknik olarak ihtiyaç yoktur. Ancak bu, havalandırmanın tamamen ortadan kalktığı anlamına gelmez. İçten yanmalı motorlarda, enerjinin büyük bir kısmı ısıya dönüşür ve bu ısının tahliyesi için radyatörden sürekli hava geçmesi gerekir. Elektrikli motorlar ve bataryalar ise çok daha yüksek verimlilikle çalıştığı için ürettikleri atık ısı miktarı düşüktür. Bu nedenle, EV'lerin ön yüzü genellikle kapalı bir panel

şeklindedir (Crolla, 2009: 88). Elektrikli araç tasarımında en büyük hedef hava direncinin düşürülmesidir. Açık bir ızgara, hava akışını aracın içine alarak türbülans yaratır ve sürtünme katsayısını (Cd) artırır. EV tamponları, havayı tekerleklere veya araç altına yönlendiren daha aerodinamik ve pürüzsüz formlara sahiptir. Bazı markalar modellerinde aktif panjur sistemleri kullanmaya başlamıştır. Bu sistem ile batarya çok ısındığında veya klima sisteminin (ısı pompası) soğutulması gerektiğinde bu panjurlar otomatik olarak açılır. Soğutma gerekmediğinde panjurlar kapanarak sürtünmeyi minimize eder.

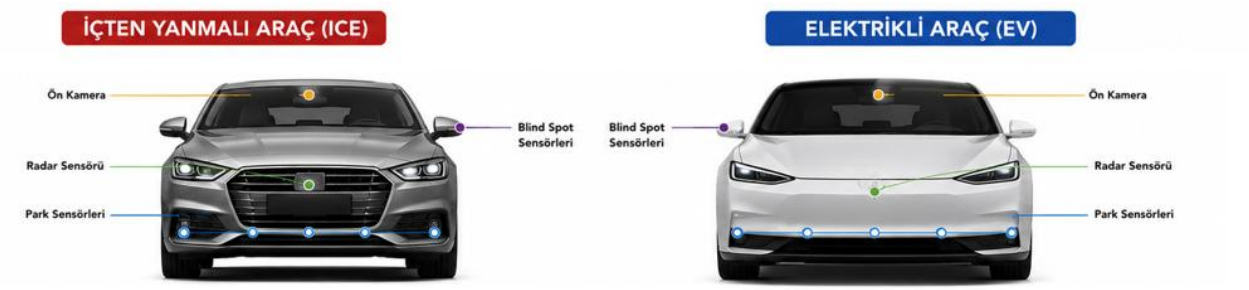


***Şekil 5** – ICE ve EV araçların aerodinamik açıdan karşılaştırması (Crolla (2009)).*

ADAS ve Sensör Sistemlerinin Tampon Entegrasyonu

İçten yanmalı motorlu araçlardan elektrikli araçlara geçiş sürecinde tampon sistemlerinin üstlendiği görevler önemli ölçüde değişmiştir. Geleneksel ICE araçlarda tamponlar ağırlıklı olarak düşük hızlı çarpışma dayanımı, yaya koruması ve estetik görünüm gibi pasif görevleri yerine getirirken; yeni nesil elektrikli araçlarda tampon sistemleri aynı zamanda gelişmiş sürüş destek sistemlerinin ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) taşıyıcısı ve koruyucu platformu haline gelmiştir.

ICE araçlarda yüksek motor soğutma ihtiyacı nedeniyle kullanılan geniş hava girişleri ve çok parçalı ön ızgara yapıları, radar ve sensör sistemlerinin yerleşimini sınırlandıran geometrik kısıtlar oluşturmaktaydı. Elektrikli araçlarda, ön yüzde tercih edilen kapalı panel sistemiyle birlikte, radar sensörlerinin ön tampon arkasına veya logo bölgesine görünmez şekilde entegre edilmesini mümkün hale getirmiştir. Böylece tampon yüzeyi, estetik tasarım ile elektromanyetik geçirgenliği aynı anda sağlayan fonksiyonel bir arayüze dönüşmüştür.



***Şekil 6** – ICE ve EV araçlarda ADAS yerleşimi karşılaştırması (NHTSA (2026)).*

Özellikle orta menzilli ve uzun menzilli radar sistemlerinin tampon arkasına konumlandırılması, tamponun ilgili bölgelerinde "radome" işlevi oluşturulmasını gerektirmektedir. Radome bölgeleri, radar sinyallerinin minimum kayıpla geçişine izin verirken aynı zamanda sensörleri taş, su, çamur, UV ışınımı ve mekanik darbelere karşı korumaktadır. Bu nedenle tampon malzemesinin elektromanyetik geçirgenliği kritik hale gelmiştir (NHTSA, 2026).

Bu gereksinimler doğrultusunda, tampon ve logo bölgelerinde çoğunlukla PC, PC+ABS veya radar geçirgenliği yüksek özel termoplastik malzemeler tercih edilmektedir. Geleneksel metalik boya uygulamalarında bulunan alüminyum partikülleri radar sinyallerini yansıtabildiğinden, boya prosesleri de yeniden şekillenmiştir. Özellikle "radome badge" olarak adlandırılan radar geçirgen logolar, modern EV tasarımlarının karakteristik unsurlarından biri haline gelmiştir.

***Şekil 7** – Radome (Radar Geçirgen) Tasarım (NHTSA (2026)).*

Elektrikli araçlarda karşılaşılan bir diğer önemli problem ise düşük atık ısı nedeniyle sensör bölgelerinde oluşan buzlanma ve yoğuşma riskidir. ICE araçlarda motor bölmesinden yayılan sıcaklık, ön tampon ve sensör çevresinin doğal olarak ısınmasını sağlarken; EV platformlarında bu avantaj büyük ölçüde ortadan kalkmıştır. Bu nedenle yeni nesil tampon sistemlerinde sensörlerin önüne görünmez rezistif ısıtıcı filmler, PTC tabanlı ısıtıcı elemanlar veya mikro termal yönetim modülleri entegre edilmektedir. Bu sistemler özellikle kar, buz ve yoğun yağmur koşullarında radar performansının sürekliliğini sağlamak açısından kritik rol oynamaktadır.

1.4 Fonksiyonel Entegrasyon: Tampon üzerindeki şarj portu yapısı

Elektrikli araç mimarisinde şarj portunun tampon bölgesine konumlandırılması, bu bileşeni basit bir koruma panelinden karmaşık bir elektromekanik modüle dönüştürür. Geleneksel tasarımlarda tamponun birincil görevi darbe sönümlemekken, port entegrasyonuyla birlikte parça üzerinde yapısal bir boşluk (cut-out) açılması zorunlu hale gelir; bu durum, mekanik mukavemeti korumak adına tamponun iç yüzeyinde lokal takviye braketlerinin ve destekleyici polimer geometrilerin kullanımını gerektirir (Şekil 8).

***Şekil 8** – Tampon üzerindeki şarj portu yerleşimi ve alt komponentleri*

Ayrıca, portun sızdırmazlık gereksinimleri ve yüksek voltaj kablo yollarının tamponun içinden geçmesi, üretim hattındaki tolerans yönetimini çok daha kritik bir boyuta taşır. Özellikle aerodinamik sürtünmeyi minimize etmek için tampon yüzeyiyle kusursuz bir uyum sergilemesi gereken şarj kapakları hem kinematik bir hassasiyet hem de su tahliye kanalları gibi ikincil mühendislik çözümlerini beraberinde getirir. Sonuç olarak, şarj ünitesini barındıran bir tampon tasarımı; estetik formun, yüksek voltaj güvenliğinin ve fonksiyonel ergonominin iç içe geçtiği çok disiplinli bir paketleme sürecinin ürünüdür.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Elektrikli araç teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte otomotiv sektöründe yalnızca güç aktarma sistemleri değil, araç mimarisinin birçok temel bileşeni de yeniden şekillenmektedir. Bu dönüşümden en fazla etkilenen dış trim parçalarından biri tampon sistemleridir. Geleneksel içten yanmalı motorlu araçlarda tamponlar ağırlıklı olarak düşük hızlı çarpışma dayanımı, estetik görünüm ve motor bölmesinin korunması gibi görevler üstlenirken; elektrikli araçlarda tampon sistemleri çok daha kompleks ve çok fonksiyonlu bir yapıya dönüşmüştür.

Elektrikli araçlarda batarya paketlerinin korunması, aerodinamik verimlilik, yaya güvenliği, AVAS sistemleri, radar ve sensör entegrasyonları ile şarj portu paketleme gereksinimleri tampon tasarım süreçlerini doğrudan etkilemektedir. Özellikle kapalı ön yüz tasarımları, aktif hava yönlendirme sistemleri ve radar geçirgen yüzeyler, tamponların artık yalnızca koruyucu bir plastik panel değil, aynı zamanda aerodinamik ve elektronik bir entegrasyon modülü haline geldiğini göstermektedir. Bunun yanında ADAS sensörlerinin tampon içerisine entegre edilmesi; elektromanyetik geçirgenlik, buzlanma yönetimi, titreşim dayanımı ve yüzey kalitesi gibi yeni mühendislik kriterlerini de beraberinde getirmiştir.

AVAS sistemleri kapsamında tampon içerisine yerleştirilen hoparlör ve akustik menfez yapıları ise elektrikli araçlarda yaya güvenliğinin yeni bir tasarım parametresi haline geldiğini ortaya koymaktadır. Özellikle düşük hızlarda sessiz çalışan EV platformlarında, tampon geometrisi artık yalnızca mekanik dayanım açısından değil, akustik performans açısından da optimize edilmektedir. Bununla birlikte şarj portlarının tampon bölgesine entegre edilmesi;

yüksek voltaj güvenliği, su sızdırmazlığı, tolerans yönetimi ve servis erişilebilirliği gibi çok disiplinli mühendislik gereksinimlerini ön plana çıkarmaktadır.

Gelecekte elektrikli araç tamponlarının; daha hafif kompozit malzemeler, geri dönüştürülebilir termoplastikler, akıllı yüzey teknolojileri ve entegre sensör altyapıları ile daha gelişmiş hale gelmesi beklenmektedir. Özellikle otonom sürüş teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte tampon sistemlerinin radar, lidar, kamera ve iletişim altyapılarının ana taşıyıcı yüzeylerinden biri haline geleceği öngörülmektedir. Bu nedenle tampon tasarımı, geleceğin otomotiv mühendisliğinde yalnızca estetik bir dış trim konusu değil; güvenlik, enerji verimliliği, sürdürülebilirlik ve dijital entegrasyonun birleştiği stratejik bir mühendislik alanı olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

Crolla, D. A. (2009). Automotive engineering: light and heavy vehicle systems. London: Elsevier Science.

Ehsani, M., Gao, Y., & Miller, J. M. (2018). Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. Boca Raton: CRC Press.

Euro NCAP. (2026). Pedestrian safety protocols and ratings. Erişim tarihi: 17 Mayıs 2026, https://www.euroncap.com

NHTSA. (2026). Federal motor vehicle safety standards for bumper systems. Erişim tarihi: 17 Mayıs 2026, https://www.nhtsa.gov

Simpson, W. R. (2005). Vehicle crashworthiness and occupant protection. Washington: American Iron and Steel Institute.

UN Regulation No. 138. (2026). Quiet road transport vehicles (QRTV)- acoustic vehicle alerting system (AVAS) requirements. Erişim tarihi: 17 Mayıs 2026, https://unece.org

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

The Impact of Drag Area (C_dA) on Cabin Wind Noise at 140 km/h: A Comparative Analysis across Diverse Vehicle Segments

Muhammed Taha SIRMA[1]

Abstract

In modern automotive engineering, aerodynamic efficiency is traditionally quantified by the drag coefficient (C_d). However, as vehicle speeds reach the aeroacoustic threshold, typically above 100 km/h, the sound pressure level (SPL) within the cabin is increasingly influenced by the overall aerodynamic loading associated with vehicle geometry. This study investigates the correlation between drag area ($C_d \times A$) and interior wind noise characteristics at a cruising speed of 140 km/h. To provide a comprehensive analysis, six distinct vehicle geometries were selected for comparison: an A-segment city car, a B-segment sedan, a C-segment SUV, a D-segment sedan, an M-segment medium commercial vehicle, and an N-segment large commercial vehicle. The methodology utilizes a full taping approach to isolate shape-induced noise from leakage noise. All body shutlines, door seals, and external cavities were sealed with acoustic tape, ensuring that the measured noise reflects only the pressure fluctuations generated by the global vehicle geometry. Measurements were conducted at a steady-state speed of 140 km/h with high-precision microphones positioned at the driver's ear level to record the cabin acoustic signature. The findings demonstrate a strong linear correlation between drag area and interior SPL. The results show that drag area provides a more meaningful explanation of high-speed cabin acoustic comfort than drag coefficient alone. For instance, despite having a competitive drag coefficient, the N-segment large commercial vehicle exhibits significantly higher noise levels due to its large frontal area and the resulting increase in aerodynamic excitation. Conversely, the streamlined geometry of the D-segment sedan provides the most favorable acoustic signature. This study concludes that drag area ($C_d \times A$) is a more reliable predictor of high-speed aeroacoustic performance than drag coefficient alone and therefore can provide useful guidance during the early design phases of development.

Keywords: Aeroacoustics, Drag Area, NVH, Vehicle Aerodynamics, Wind Noise

[1] Tofas Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., NVH Test Engineer, muhammed.tahasirma@tofas.com.tr Orcıd: 0009-0002-6184-7267

1. INTRODUCTION

Interior acoustic comfort is an important performance attribute in vehicle development, since it directly affects customer perception of vehicle quality, refinement, and long-distance comfort. At low and medium speeds, powertrain, road, and tire noise can significantly contribute to the total interior noise level. However, at higher vehicle speeds, wind noise becomes increasingly dominant. Especially above 100 km/h, flow structures around the vehicle body, side mirror region, A-pillar, window-seal interfaces, roofline, underbody region, and rear body area can strongly influence the interior wind noise level.

Vehicle aerodynamic performance is commonly expressed by the drag coefficient, Cd. However, Cd alone is not sufficient to represent the total aerodynamic loading of a vehicle at high speed. Aerodynamic drag is related not only to the drag coefficient, but also to the vehicle frontal area and the square of vehicle speed. Therefore, two vehicles with similar Cd values may generate different aerodynamic drag levels if their frontal areas are different. For this reason, road vehicle aerodynamics should be evaluated by considering both drag coefficient and frontal areas together (Hucho, 1998).

In this study, the drag area, defined as the product of drag coefficient and frontal area, CdA, is used as the main aerodynamic parameter for comparing different vehicle segments. CdA allows the aerodynamic efficiency of the vehicle body and the physical size effect of the vehicle to be considered together. This is especially important when comparing different body types such as sedans, SUVs, city cars, and commercial vehicles, because these vehicles may have different frontal areas even when their Cd values are relatively close.

From an aeroacoustic point of view, CdA is also meaningful because larger aerodynamic loading can be associated with stronger external flow structures, larger wake regions, and higher potential for turbulence-induced pressure fluctuations. These external pressure fluctuations may contribute to interior wind noise through airborne transmission paths, seal regions, glazing areas, and local body discontinuities. Therefore, CdA can be considered not only as an aerodynamic efficiency parameter, but also as a useful indicator for high-speed wind noise tendency.

The aim of this study is to investigate the relationship between CdA and interior wind noise performance for different vehicle segments. Six vehicle types are considered: A-segment City Car, B-segment Sedan, C-segment SUV, D-segment Sedan, M-segment Medium Commercial Vehicle, and N-segment Large Commercial Vehicle. The evaluation is performed at a constant vehicle speed of 140 km/h using an overall A-weighted sound pressure level, Articulation Index, and 1/3 octave band spectra.

In this context, the study aims to show that CdA should be considered not only as a parameter related to aerodynamic drag or energy consumption, but also as an important indicator for high-speed interior wind noise and acoustic comfort. In addition, the study discusses the limitations of using CdA alone and highlights the need to consider local aeroacoustic source regions during detailed vehicle development.

2. RESEARCH METHOD AND MATERIAL

In this study, drag area values were calculated using geometric and aerodynamic parameters for different vehicle segments. The selected vehicle segments represent different body types, frontal area levels, and aerodynamic characteristics. The evaluated vehicle segments are listed below:

A-segment City Car

B-segment Sedan

C-segment SUV

D-segment Sedan

M-segment Medium Commercial Vehicle

N-segment Large Commercial Vehicle

For each vehicle segment, width, height, frontal area, drag coefficient, and drag area values were defined. The Cd values used in this study were not considered as exact homologation data of specific production vehicles. Instead, they were selected as representative values suitable for segment-based comparison. Therefore, the study does not aim to compare the absolute aerodynamic performance of individual vehicle models, but to investigate the general relationship between CdA and interior wind noise across different vehicle segments.

The methodology consists of five main steps. First, the aerodynamic parameters were defined for each vehicle segment. Second, a full taping methodology was introduced to reduce leakage-related wind noise and to focus more clearly on the global aerodynamic shape effect. Third, frontal area values were calculated using a simplified Hucho-based approach. Fourth, representative drag coefficient values were selected based on typical body-form trends in literature. Finally, CdA values were calculated and compared with interior acoustic indicators.

In order to keep the comparison transparent, the study uses a fixed calculation logic for all vehicle segments. The same frontal area estimation method, the same CdA calculation, and the same acoustic reference strategy were applied to each segment. Therefore, the comparison is based on relative differences between segments rather than on the absolute performance claim of any single production vehicle. This is important because the main purpose of the study is to investigate whether the aerodynamic size parameter, CdA, follows the same direction as the measured interior acoustic response.

2.1. Determination of Aerodynamic Parameters

In vehicle aerodynamics, the drag force is generally expressed by the following equation (Hucho, 1998):

$$D = \frac{1}{2}\rho V^2 C_d A$$

where:

D: aerodynamic drag force [N]

ρ: air density [kg/m³]

V: vehicle speed [m/s]

Cd: drag coefficient [-]

A: projected frontal area of the vehicle [m²]

As shown in the equation, aerodynamic drag force does not depend only on Cd. Vehicle speed, air density, and especially frontal areas have a direct effect on the total aerodynamic drag. Therefore, using only Cd may not be sufficient when comparing vehicles from different segments. For example, a larger vehicle with a lower Cd value may still generate a higher total aerodynamic drag than a smaller vehicle with a higher Cd value.

For this reason, CdA was used as the main comparison parameter in this study:

$$CdA = C_d \times A$$

CdA allows the aerodynamic efficiency of the vehicle body and the physical size effect of the vehicle to be evaluated within a single parameter. This approach is especially meaningful when comparing different body types such as sedans, SUVs, city cars, and commercial vehicles. Since the acoustic excitation generated by external airflow is related to flow structures around the vehicle, a parameter that includes both body shape and vehicle size provides a more representative basis for segment comparison.

2.2. Full Taping Methodology

In order to reduce the influence of leakage-related wind noise and to focus more clearly on shape-induced aerodynamic noise, a full taping methodology was considered in the test approach. In this method, major exterior leakage paths and discontinuities are sealed using acoustic tape. The aim is to minimize the effect of local leakage noise from body gaps and seal interfaces, so that the measured interior noise becomes more representative of the global aerodynamic shape effect.

The main taped regions include door shutlines, window seal perimeters, windshield-side interfaces, mirror base and sail area, hood-to-fender gaps, front and rear lamp-body interfaces, tailgate or trunk perimeter, and other relevant external cavities. These regions are important because local gaps and discontinuities can generate leakage noise, whistle noise, or localized turbulence that may affect the interior wind noise measurement.

The full taping approach is illustrated schematically in Figure 1. The figure is intended as a representative schematic to show the main exterior regions considered in the taping methodology.

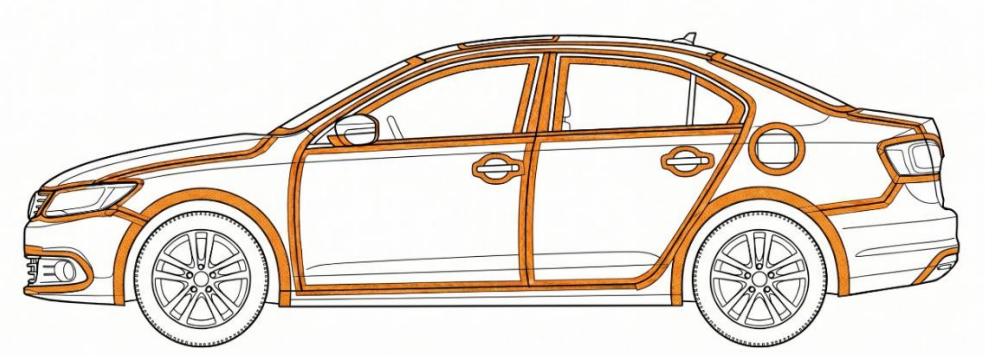


Figure 1 *- Schematic representation of the exterior regions sealed in the full taping methodology*

2.3. Frontal Area Calculation and Hucho Approach

The frontal area values of the vehicles were calculated using an approximate projected frontal area approach based on vehicle width and height. The real projected frontal area represents the effective area occupied by the vehicle when viewed from the front. It is not equal to the direct multiplication of width and height, because a vehicle body is not a perfect rectangle. Roof curvature, windshield inclination, rounded body corners, ground clearance, and side body geometry reduce the effective projected area compared with the rectangular outer boundary.

Therefore, a Hucho-based body form coefficient was used in this study. The approximate frontal area was calculated using the following equation:

$$A = k \cdot W \cdot H$$

where:

A: approximate frontal area [m²]
W: vehicle width [m]
H: vehicle height [m]
k: body form coefficient [-]

In this study, the body form coefficient was accepted as k = 0.84. Therefore, the frontal area was not calculated as a simple rectangular width-height area, but as an approximate projected area considering the general body form. This approach is consistent with the use of a form factor to estimate projected frontal area in comparative aerodynamic calculations (Hucho, 1998).

This method is suitable for comparative studies because the same calculation approach is applied to all vehicle segments. However, it should be noted that this is an approximate method. For a more detailed study, the actual projected frontal area of each vehicle could be determined using CAD-based area calculation, image processing, or laser contour measurement methods. In the present study, the same simplified method was intentionally applied to all segments to maintain consistency in the comparison.

2.4. Selection of Drag Coefficient Values

The drag coefficient values used in this study were selected as representative values for each vehicle segment, not as exact homologation values of individual production vehicles. In the literature, Cd values can vary depending on body type, model year, aerodynamic optimization level, ground clearance, rear body form, underbody treatment, and test conditions. Therefore, the purpose of this study is not to define the exact Cd value of a specific vehicle, but to examine the interior wind noise trend using comparable CdA values representing different segments.

The Cd values used in the study were selected considering typical body-type trends reported in the literature. Sedan body types generally have lower Cd values due to their smoother roofline, lower body height, and more controlled rear wake region. Therefore, Cd = 0.250 was used for the D-segment Sedan, while Cd = 0.290 was used for the B-segment Sedan. These values represent aerodynamically efficient sedan-type body forms rather than specific production of vehicle homologation data.

For the A-segment City Car, Cd = 0.340 was selected. This value is consistent with the expectation that hatchback or city-car type vehicles with shorter rear body geometry can have higher Cd values than sedans due to more pronounced rear flow separation. Sivaraj et al. reported a Cd value of 0.338 for a hatchback vehicle model without basebleed modification, while the modified configuration reduced Cd to 0.313. This supports the use of 0.340 as a representative Cd value for the A-segment City Car in this study (Sivaraj et al., 2023: 1813).

For the C-segment SUV, Cd = 0.310 was used. SUV body types generally have higher Cd values than sedans due to greater body height, more vertical rear surfaces, and larger flow separation regions. However, modern and aerodynamically optimized SUV designs can achieve lower Cd levels. Al-Saadi et al. investigated aerodynamic modifications on an SUV and reported that the drag coefficient can be reduced through exterior design changes and aerodynamic devices (Al-Saadi et al., 2022). In this study, the C-segment SUV value was selected as a representative value for a modern and relatively optimized SUV form.

For the M-segment Medium Commercial Vehicle, Cd = 0.350 was selected, while Cd = 0.380 was used for the N-segment Large Commercial Vehicle. These values represent the expected increase in drag coefficient for commercial vehicle bodies due to larger body height, larger frontal area, and more vertical rear body geometry.

Overall, these values should be interpreted as representative coefficients consistent with typical body-form trends in literature. The study therefore focuses on the general relationship between drag area and interior wind noise rather than the exact aerodynamic performance of individual vehicle models.

2.5. Drag Area Calculation

After the frontal area and drag coefficient values were defined, the drag area was calculated for each vehicle segment using the following equation:

$$CdA = C_d \times A$$

This value was used to compare the aerodynamic loading of vehicles at high speed. Under the same speed and air density assumptions, an increase in CdA corresponds to an increase in aerodynamic drag force. Therefore, CdA is meaningful not only for energy consumption and aerodynamic efficiency, but also for the strength of external flow structures and potential aeroacoustic source regions around the vehicle.

The calculated CdA values were then compared with the measured overall A-weighted sound pressure level and Articulation Index values. Since the absolute acoustic values are not disclosed in this study, the D-segment Sedan was selected as the reference condition, and the acoustic results of the other segments were expressed as relative differences. This approach protects the absolute measurement data while still allowing the segment-based acoustic hierarchy to be evaluated. Therefore, the comparison focuses on the direction and magnitude of the differences between segments rather than on confidential absolute values.

3. TEST CONDITIONS AND ACOUSTIC EVALUATION APPROACH

The wind noise evaluation was performed at a constant vehicle speed of 140 km/h, representing a high-speed driving condition where aerodynamic noise becomes a significant

contributor to the total interior noise level. The acoustic evaluation included overall A-weighted sound pressure level, Articulation Index, and 1/3 octave band spectra.

The overall A-weight sound pressure level was used to evaluate the total perceived interior noise level. A-weighting is commonly used in vehicle interior noise studies because it considers the frequency-dependent sensitivity of the human ear. SAE J1477 defines the measurement of interior sound levels of light vehicles and provides a framework for comparative sound level evaluation (SAE International, 2024). The evaluation approach used in this study is consistent with these general principles for comparative interior sound level assessment.

Articulation Index is a metric related to speech intelligibility inside the cabin. A higher AI value indicates that speech is less masked by interior noise and that the acoustic comfort is better. In contrast, a lower AI value may indicate that noise, especially in the mid- and high-frequency regions, has a stronger masking effect on speech frequencies. Therefore, AI is useful not only for evaluating total noise levels, but also for understanding the user-perceived effect of noise inside the vehicle.

The 1/3 octave band spectra were used to examine which frequency regions contribute to the total noise level. This analysis allows different vehicle segments to be compared not only by their overall SPL values, but also by their frequency-based acoustic characteristics. The performance requirements for octave-band and fractional-octave-band filters are defined in IEC 61260-1 (International Electrotechnical Commission, 2014). Therefore, 1/3 octave band analysis is an appropriate method for frequency-based vehicle interior noise evaluation.

Using SPL, AI, and 1/3 octave band spectra together provides a broader interpretation of the interior acoustic performance. Overall SPL gives a single-number level comparison; AI provides an indication related to speech intelligibility and masking, and the 1/3 octave spectra shows the frequency regions where segment differences occur. This combined approach is useful because vehicles with similar overall noise levels may still have different spectral characteristics and different subjective impressions.

4. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, the relationship between drag area and interior wind noise performance was investigated for different vehicle segments. The width, height, frontal area, drag coefficient, and drag area values are presented in Table 1. The frontal area values in Table 1 were not calculated as the direct multiplication of width and height. Instead, they were calculated using approach $A = 0.84 \times W \times H$. Therefore, these values represent the approximate projected frontal area, which is lower than the rectangular outer boundary area of each vehicle.

Table 1- *Segment-based aerodynamic data*

Vehicle Segment	**Width W [m]**	**Height H [m]**	**Frontal Area A [m²]**	**Drag Coefficient Cd**	**Drag Area CdA [m²]**
A-segment City Car	1.672	1.551	2.178	0.340	0.741
B-segment Sedan	1.792	1.497	2.253	0.290	0.653
C-segment SUV	1.818	1.63	2.489	0.310	0.772
D-segment Sedan	1.827	1.44	2.210	0.250	0.552
M-segment Medium Commercial Vehicle	1.925	1.892	3.059	0.350	1.071
N-segment Large Commercial Vehicle	2.05	2.524	4.346	0.380	1.652

Table 1 provides the aerodynamic basis of comparison. The D-segment Sedan has the lowest drag area value, with CdA = 0.552 m², mainly due to its low drag coefficient and relatively limited frontal area. Although the B-segment Sedan and A-segment City Car have very similar frontal area values, their drag areas are different because of the difference in Cd. This shows that the frontal area alone is not sufficient to explain the aerodynamic loading of a vehicle. The C-segment SUV has the highest CdA value among the passenger car group, with CdA = 0.772 m². Although its Cd value is lower than the A-segment City Car, its larger height and frontal area increase the final CdA value. The A-segment City Car has CdA = 0.741 m², which is close to the C-segment SUV but slightly lower. This comparison shows that both Cd and frontal areas must be evaluated together when interpreting aerodynamic loading.

The commercial vehicle segments show a clear increase in frontal areas and drag areas. The M-segment Medium Commercial Vehicle has a CdA value of 1.071 m², while the N-segment Large Commercial Vehicle reaches 1.652 m². This difference is mainly related to their higher body height and larger projected frontal area. Even though the Cd values of these commercial vehicles are not extremely high, their large frontal areas strongly increase the final CdA value. This demonstrates why CdA is more representative than Cd alone when comparing passenger cars with larger commercial vehicles.

The CdA, relative overall noise level, and relative Articulation Index values for each vehicle segment are presented in Table 2. In this table, the D-segment Sedan is used as the reference vehicle. Therefore, its overall noise level and Articulation Index values are represented as X. The acoustic results of the other vehicle segments are expressed as relative differences with respect to this reference condition. This approach allows the acoustic

performance hierarchy between the segments to be discussed without disclosing absolute sound pressure level or Articulation Index values.

Table 2- *Segment-based CdA, overall noise level, and Articulation Index results*

Vehicle Segment	**Drag Area CdA (m²)**	**Overall Noise Level dB(A)**	**Articulation Index AI(%)**
A-segment City Car	0.741	X + 4.5	X - 16.6
B-segment Sedan	0.653	X + 3.2	X - 13.9
C-segment SUV	0.772	X + 3.3	X - 14.6
D-segment Sedan	0.552	X	X
M-segment Medium Commercial Vehicle	1.071	X + 5.2	X - 19.1
N-segment Large Commercial Vehicle	1.652	X + 8.1	X - 30.3

Table 2 shows a clear segment-based tendency between drag area and interior acoustic performance. The D-segment Sedan has the lowest CdA value, 0.552 m², and represents the reference acoustic condition. Since this vehicle has the lowest aerodynamic loading among the evaluated segments, it is used as the baseline for comparing the relative increase in overall noise level and the relative decrease in Articulation Index.

The B-segment Sedan has a CdA value of 0.653 m², which is 0.101 m² higher than the D-segment Sedan. This aerodynamic increase corresponds to a relative overall noise increase of 3.2 dBA and an AI reduction of 13.9 points compared with the reference vehicle. Although both vehicles are sedan-type bodies, this result shows that the acoustic response does not depend only on the body's category. The difference in CdA and the specific geometric characteristics of each segment still affect the final high-speed wind noise result.

The A-segment City Car has a CdA value of 0.741 m², which is close to the C-segment SUV and higher than both sedan segments. Its overall noise level is 4.5 dBA higher than the D-segment Sedan reference, while its Articulation Index is 16.6 points lower. This result supports the interpretation that vehicles with close CdA values may still show different acoustic responses due to local aeroacoustic effects, body proportions, and frequency distribution.

The C-segment SUV has a CdA value of 0.772 m², which is the highest value among the passenger car segments. Its overall noise level is 3.3 dBA higher than the D-segment Sedan reference, while its Articulation Index is 14.6 points lower. Although the C-segment SUV has a slightly higher CdA than the A-segment City Car, its relative SPL is lower. This shows that CdA explains the general segment trend, but local aeroacoustic effects, body proportions, and spectral distribution can still affect the final acoustic response when the CdA values are close.

The M-segment Medium Commercial Vehicle shows a more significant increase in CdA, reaching 1.071 m². This is reflected in a 5.2 dBA increase in overall noise level and a 19.1-point decrease in Articulation Index compared with the D-segment Sedan. This result shows the acoustic penalty of increased frontal area and more upright commercial vehicle body geometry. The increase in noise level is not only a comfort issue, but also affects speech intelligibility inside the cabin, as shown by the decrease in AI.

The N-segment Large Commercial Vehicle represents the most critical case in Table 2. It has the highest CdA value, 1.652 m², and also shows the largest acoustic degradation compared with the reference vehicle. Its overall noise level is 8.1 dBA higher than the D-segment Sedan, while its Articulation Index is 30.3 points lower. This result clearly demonstrates that large frontal areas and high drag areas can have a strong negative effect on high-speed interior wind noise performance and speech intelligibility.

Overall, Table 2 provides the first numerical evidence for the relationship between drag area and acoustic performance. As CdA increases, the overall noise level generally increases, while the Articulation Index decreases. The use of relative values also shows the acoustic performance hierarchy clearly: the D-segment Sedan gives the best reference condition, the B-segment Sedan and C-segment SUV remain relatively close, the A-segment City Car shows a moderate increase, and the commercial vehicle segments show the highest acoustic penalty. This trend supports the use of CdA as an important comparative indicator for high-speed wind noise performance.

Figure 2 shows the relationship between drag area and relative overall interior noise level. The results indicate that the overall noise level tends to increase as CdA increases. The regression equation was obtained as $y = 6.0007x + 64.818$, with $R^2 = 0.8289$. This value indicates a strong relationship between drag area and interior wind noise level.

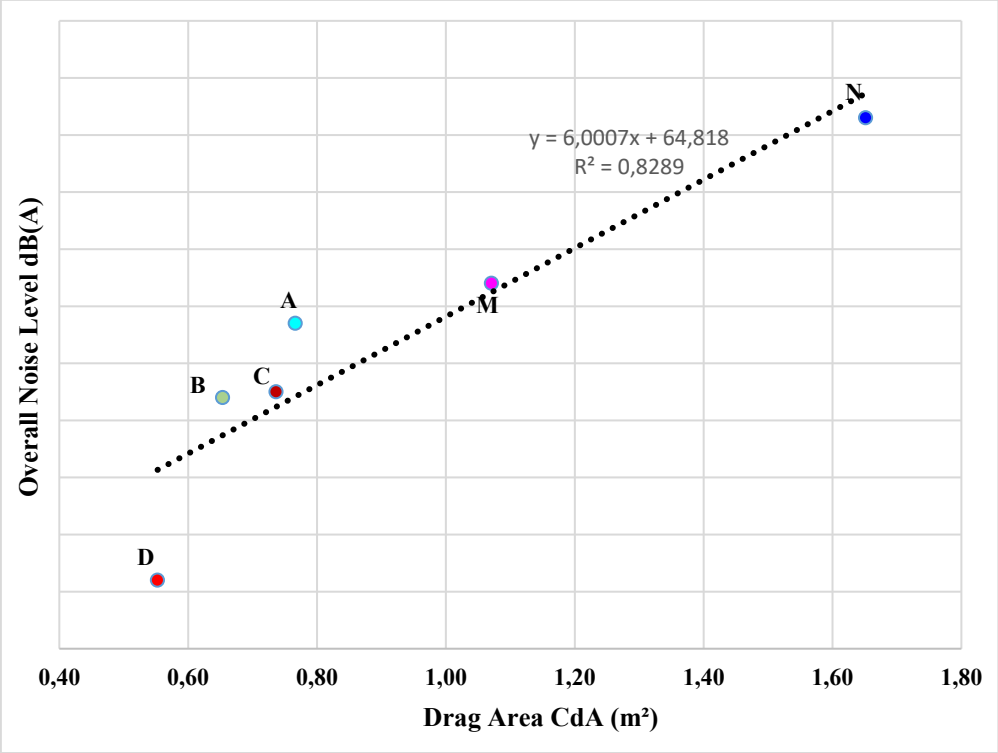


Figure 2- *Relationship between Drag Area CdA and Overall Noise Level*

Figure 2 confirms the general trend observed in Table 2. The data points are distributed in a way that shows increasing interior noise levels with increasing drag area. The D-segment Sedan is located in the lower-left region of the graph, representing both low CdA and the reference overall noise condition. In contrast, the N-segment Large Commercial Vehicle is positioned in the upper-right region, representing the highest CdA and the highest relative overall noise level. This distribution supports the main assumption of the study: vehicles with higher aerodynamic loading tend to generate higher interior wind noise at high speed.

It is also important to note that the regression is based on relative acoustic values. The reference vehicle is represented as **X**, and the remaining points are positioned according to their measured differences from this reference. Therefore, the trend line should be interpreted as a comparative relationship between CdA and relative interior noise level, not as a universal equation for predicting absolute SPL values. This distinction is important because the objective of the study is to compare segment behavior under the same evaluation logic.

The passenger car segments are clustered in the lower CdA range, while the commercial vehicle segments extend the trend toward higher CdA and higher SPL. This separation is important because it shows the effect of vehicle size and body type on acoustic performance. The sedan vehicles remain in the lower noise region, while the commercial vehicles are shifted upward due to their larger frontal area and more bluff body geometry. This result is physically reasonable because larger vehicle bodies can generate stronger external flow structures and larger wake regions, which may increase the acoustic excitation acting on the body.

At the same time, the scatter around the regression line shows that overall SPL cannot be explained by CdA alone. Local aeroacoustic sources, such as mirror base flow, A-pillar turbulence, windshield angle, window-seal geometry, roofline behavior, rear separation, and body gap details, may also affect the measured interior noise. Therefore, regression should be interpreted as a strong general relationship rather than a complete prediction model.

Figure 3 shows the relationship between the drag area and relative Articulation Index. The regression equation was obtained as $y = -25.463x + 84.156$, with $R^2 = 0.7741$. This result indicates that AI tends to decrease as CdA increases. A decrease in AI represents a less favorable condition for speech intelligibility inside the cabin. Therefore, vehicles with higher CdA values not only show higher total noise levels but also tend to have reduced acoustic comfort and speech intelligibility.

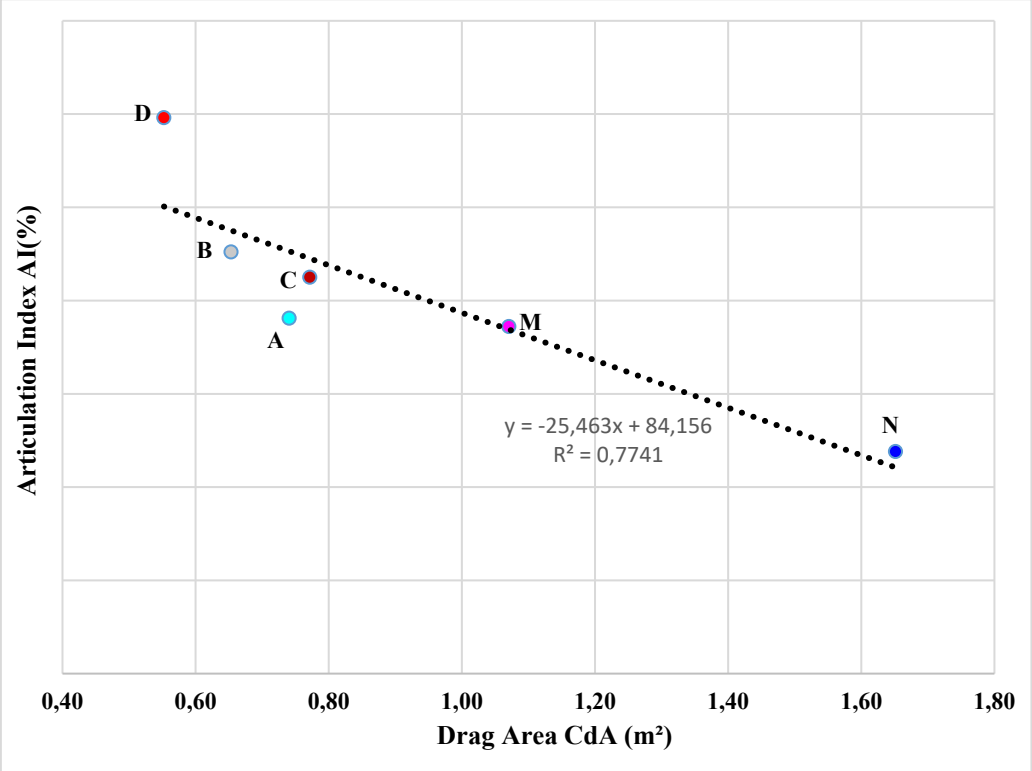


Figure 3- *Relationship between Drag Area CdA and Articulation Index*

Figure 3 provides the second important acoustic interpretation of the dataset. While Figure 2 shows that overall SPL increases with CdA, Figure 3 shows that Articulation Index decreases with CdA. This means that the aerodynamic loading does not only affect the total sound level, but also the quality of the acoustic environment from the perspective of speech intelligibility. In other words, higher CdA is associated with both louder interior wind noise and lower communication comfort inside the cabin.

The D-segment Sedan is located near the highest AI region due to its low drag area and reference acoustic condition. This result is consistent with the expectation that a more aerodynamically efficient body shape can contribute to a quieter cabin and better speech intelligibility. The B-segment Sedan also remains in a relatively favorable AI region, supporting the acoustic advantage of sedan-type body forms under high-speed conditions.

The A-segment City Car and C-segment SUV also remain close in the AI comparison. Although the C-segment SUV has a slightly higher CdA value, the A-segment City Car shows a slightly lower AI value. This supports the interpretation that AI is affected not only by total aerodynamic loading, but also by the spectral distribution of interior noise.

The commercial vehicle segments show the most significant reduction in AI. The N-segment Large Commercial Vehicle has the highest CdA value and the lowest AI value. This indicates that the increased aerodynamic loading of large van-type vehicles can have a negative effect on cabin communication comfort. The M-segment Medium Commercial Vehicle is positioned between the passenger car group and the N-segment Large Commercial Vehicle, which is also consistent with its intermediate CdA value.

Similar to the SPL evaluation, the AI values are presented relative to the D-segment Sedan reference. For this reason, the regression should be interpreted as the relationship

between CdA and relative AI change. The negative slope shows that increasing CdA is associated with a reduction in speech-intelligibility-related acoustic performance. However, the equation should not be used as an absolute AI prediction model, because the actual AI values are intentionally represented relative to the reference vehicle.

Figure 4 shows the 1/3 octave band noise spectra for the evaluated vehicle segments. The general trend indicates that the N-segment Large Commercial Vehicle has higher sound pressure levels over a wide frequency range. The D-segment Sedan shows lower levels, especially in the mid- and high-frequency regions. This behavior is consistent with the overall noise level and AI results.

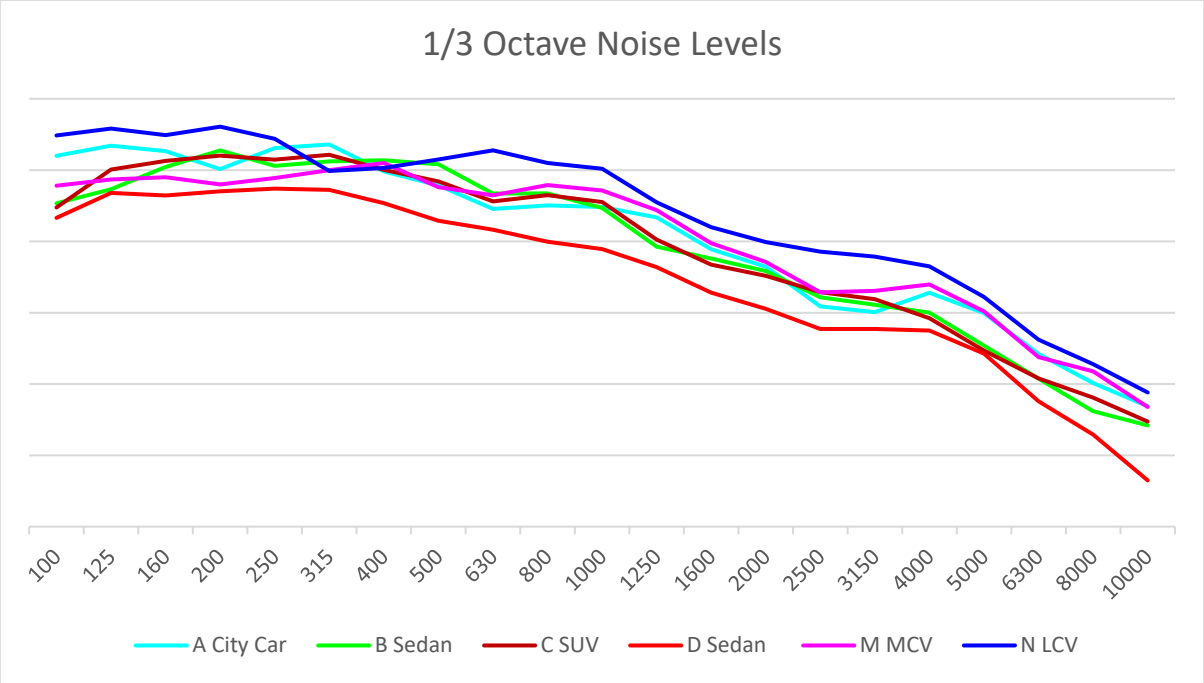


Figure 4- *1/3 octave band noise levels by vehicle segment*

Figure 4 provides a more detailed view of the acoustic differences between the vehicle segments. Unlike overall SPL, which gives a single-number result, the 1/3 octave band spectra show how the noise energy is distributed across frequency bands. This is important because wind noise perception and speech masking are strongly influenced by the frequency content of the noise, not only by the overall level.

The N-segment Large Commercial Vehicle shows higher sound pressure levels over a broad frequency range compared with the other segments. This indicates that its high overall SPL is not dominated by a single narrow frequency band but is mainly associated with a generally higher broadband noise contribution. This behavior is consistent with the large frontal area and high CdA value of the vehicle. A larger and more upright body form can create stronger flow of separation and broader turbulent structures, which may increase broadband aerodynamic noise.

The M-segment Medium Commercial Vehicle generally remains below the N-segment Large Commercial Vehicle, but it shows levels close to the passenger car group in several frequency bands. In some mid-frequency regions, its response is comparable to the A-, B-, and C-segment vehicles. This shows that the commercial vehicle penalty is clear in the overall

metrics, but the frequency-based behavior can still vary depending on local flow structures and acoustic transfer characteristics.

The D-segment Sedan generally shows the most favorable spectral behavior. Its lower levels in many frequency bands, particularly from the mid-frequency region toward the high-frequency range, are consistent with its low CdA value and its favorable overall SPL and AI results. This indicates that the D-segment Sedan does not only have a lower single-number noise level, but also a more favorable frequency distribution. The B-segment Sedan follows a similar overall tendency, although its spectral levels are higher than the D-segment Sedan in some bands.

The A-segment City Car, B-segment Sedan, and C-segment SUV show close spectral behavior in several frequency regions. This is consistent with their relatively close CdA values and compact/passenger-car body categories. However, the order between these vehicles changes across some bands, showing that CdA alone cannot fully define the spectral character of wind noise. Local body features such as the mirror area, A-pillar shape, windshield inclination, side glass geometry, roofline, and rear body separation can influence the frequency distribution of the measured noise.

Figure 4 also helps explain why AI and 1/3 octave spectra must be evaluated together with overall SPL. Speech intelligibility is more sensitive to certain frequency regions, and therefore two vehicles with close overall SPL values may still have different AI results depending on where the acoustic energy is concentrated. If a vehicle has higher noise content in speech-related frequency bands, its AI value may decrease even if the overall SPL difference is not very large. For this reason, the 1/3 octave spectra provide an important bridge between the overall noise level and the AI results.

When the tables and figures are evaluated together, a consistent picture is obtained. Table 1 defines the aerodynamic input parameters, Table 2 combines these aerodynamic parameters with relative acoustic results, Figure 2 shows the positive relationship between CdA and relative overall SPL, Figure 3 shows the negative relationship between CdA and relative AI, and Figure 4 explains the frequency-based behavior behind these single-number indicators. Therefore, the results are internally consistent and support the use of CdA as an important comparative indicator for high-speed wind noise performance.

However, the results also show that CdA should not be used as the only design or troubleshooting parameter. Although CdA gives a strong global trend, detailed aeroacoustic development requires local source identification. For example, mirror base turbulence, A-pillar vortex structures, glazing and seal interfaces, roof ditch geometry, rear body separation, and tailgate or trunk perimeter details can create local noise sources that may change the spectral content and interior transfer characteristics. Therefore, CdA is useful for early-stage comparison and trend analysis, while detailed wind noise improvement still requires local flow and acoustic source investigation.

Overall, the results demonstrate that drag area is an important indicator for evaluating high-speed interior wind noise. As CdA increases, relative overall noise level increases, while relative Articulation Index decreases. The commercial vehicle segments clearly show the acoustic penalty of larger frontal area and higher drag area, while the sedan segments show the

benefit of lower aerodynamic loading. At the same time, the spectral results show that local geometry and frequency content must be considered for a complete acoustic interpretation.

5. CONCLUSION

In this study, the relationship between drag area and interior wind noise performance was investigated comparatively for six different vehicle segments using a reference-based acoustic presentation. The D-segment Sedan was selected as the reference condition, and the other segments were evaluated through relative SPL and AI differences. This method made it possible to discuss the acoustic hierarchy between segments while avoiding the disclosure of absolute measurement values. The results show that CdA has a clear influence on both relative overall noise level and relative Articulation Index at high vehicle speed. A positive relationship was obtained between CdA and SPL in the overall noise level graph, with a regression value of $R^2 = 0.8692$. This indicates that the overall interior noise level increases as drag area increases. In the Articulation Index graph, a negative relationship was obtained between CdA and AI, with $R^2 = 0.7741$. This result shows that acoustic comfort in terms of speech intelligibility tends to decrease as drag area increases.

The D-segment Sedan showed the best acoustic performance with the lowest CdA value, while the N-segment Large Commercial Vehicle showed the least favorable results with the highest CdA value. The A-segment City Car and C-segment SUV showed close CdA values, but their acoustic results were not identical. This indicates that CdA is a useful global indicator for segment comparison, while local aeroacoustic characteristics and spectral content should also be considered for detailed interpretation.

As a result, CdA should be considered during vehicle development not only in terms of aerodynamic drag or energy consumption, but also in terms of interior wind noise and acoustic comfort. However, CdA alone is not sufficient for detailed aeroacoustic evaluation. Vehicle body form, local turbulence sources, mirror and A-pillar regions, window-seal areas, and flow separation characteristics should also be analyzed. In this way, both aerodynamic efficiency and interior acoustic comfort can be optimized together during the early design phase.

This study can be considered as a preliminary comparative evaluation of the CdA–wind noise relationship across different vehicle segments. In future studies, the relationship can be examined in more detail using a larger number of vehicle samples, CAD-based frontal area calculations, different yaw angles, different speed levels, and local source analysis. In addition, evaluating local aeroacoustic sources such as the mirror region, A-pillar, roofline, window-seal areas, and rear body separation together with CdA may support more targeted improvement actions in the vehicle development process.

6. REFERENCES

Al-Saadi, M. T., Al-Farhany, K., Al-Chlaihawi, K. K. I., Jamshed, W. and Eid, M. R. (2022). Improvement of the aerodynamic behavior of a sport utility vehicle numerically by using some modifications and aerodynamic devices. *Scientific Reports, 12*, 20272. doi: 10.1038/s41598-022-24328-w

Hucho, W.-H. (1998). *Aerodynamics of road vehicles: From fluid mechanics to vehicle engineering*. Warrendale, PA: SAE International.

International Electrotechnical Commission. (2014). *IEC 61260-1:2014 electroacoustics — Octave-band and fractional-octave-band filters — Part 1: Specifications*. Geneva: IEC.

SAE International. (2024). *SAE J1477: Measurement of interior sound levels of light vehicles*. Warrendale, PA: SAE International.

Sivaraj, G., Parammasivam, K. M. M. and Prasath, S. (2023). Numerical simulation of hatchback car with modified vehicle design for the improvement of fuel consumption. *Journal of Applied Fluid Mechanics, 16*(9), 1806–1817.

6th International
Congress of Engineering and Natural
Sciences

Otomotiv BIW Yapılarında Direnç Nokta Kaynağı Uygulamalarında Karşılaşılan Hatalar ve Proses Zorlukları

Elif KOCAOĞLU[1]

Abstract

Resistance Spot Welding (RSW) is a joining method based on clamping two or more sheet metals between copper electrodes under mechanical pressure and generating a localized weld at the interface through resistance heat produced by the electrical current passing through the sheets. Due to its short cycle time and strong compatibility with automated production systems, resistance spot welding is widely preferred in automotive Body-in-White (BIW) sheet metal assemblies. The presence of thousands of spot welds in a typical vehicle body clearly demonstrates the critical role of this method in automotive manufacturing processes. However, the complex geometries of automotive body structures, together with variations in sheet thickness and material combinations, make it difficult to maintain consistent weld quality in resistance spot welding applications. These factors may lead to various weld defects and process-related challenges during production. This study presents a general evaluation of the most common weld defects encountered in resistance spot welding applications in automotive body structures, along with their root causes and the process-related challenges observed during production. By highlighting the limitations of resistance spot welding applications, this study aims to raise awareness of weld defects encountered in automotive body manufacturing and to provide a general engineering perspective on the subject.

Keywords: Resistance Spot Welding (RSW), Automotive Body-in-White (BIW), Weld Defects, Process Challenges, Welding Quality Consistency

[1] Engineering Designer, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş, Ar-Ge Merkezi, Bursa, Türkiye, 0009-0009-4069-2404.

GİRİŞ

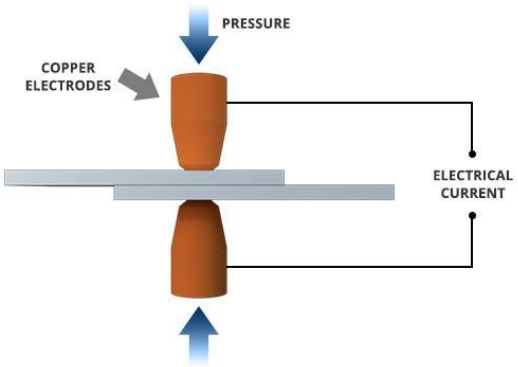
Günümüzde otomotiv sektöründe kullanılan birleştirme yöntemleri, artan üretim adetleri, maliyet kısıtları ve kalite gereksinimleri doğrultusunda sürekli gelişmektedir. Otomotiv üreticilerinin temel hedefleri arasında, gelişen teknolojileri takip etmenin yanı sıra, daha düşük maliyetli ama aynı zamanda kaliteli araçlar üretebilmek yer almaktadır. Bu kapsamda otomotiv endüstrisinde kullanılan kaynak yöntemleri ergitme kaynakları ve basınç kaynakları olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Direnç nokta kaynağı ise, basınç kaynağı yöntemleri içerisinde yer almakta olup otomotiv sektöründe yaygın kullanım alanına sahip olan kaynak türüdür. Aynı zamanda direnç nokta kaynağı uzun yıllardır kullanılan en eski kaynaklama metotlarından biri olarak kabul edilmektedir. (Eşme et al., 2005)

Direnç nokta kaynağı literatürde 'punta kaynak' olarak da bilinmekte olup iki veya daha fazla metal sacın bakır elektrotlar arasında sıkıştırılıp üzerinden yüksek akım geçirilerek temas noktasında oluşan ısı ile lokal bir kaynak noktası oluşturulması yöntemidir. Direnç nokta kaynağı hızlı bir kaynak yöntemi olması sebebiyle seri üretim hatlarında kullanım için oldukça uygun bir yöntemdir. Otomasyona elverişli olup, robotik sistemlere kolayca entegre olabilmektedir. Günümüz otomotiv fabrikalarının araç gövde üretim bantlarında, direnç nokta kaynağı genellikle robotik nokta kaynağı şeklinde uygulanmaktadır. Otomasyona elveriş düzeyi, üretim süreçlerinde işçilik maliyetlerinin azaltılmasına ve proses tekrarlanabilirliğinin artırılmasına fayda sağlamaktadır. (Akyol, n.d.)

Direnç nokta kaynağı uygulanırken açık alev kullanılmaması, yöntemin diğer bazı kaynak tekniklerine kıyasla daha güvenli ve çevreci olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Ayrıca dolgu malzemesi gereksiniminin olmaması ve nokta bazlı bir birleştirme yöntemi olması sayesinde çevrim süreleri kısadır. Bu avantajı sayesinde yüksek hacimli üretim hatları için ideal bir çözüm sunmakta olup direnç uzun yıllardır otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan temel birleştirme yöntemlerinden biri olmuştur.

Günümüzde üretilen tipik bir sedan araç gövdesinde, tasarım özelliklerine bağlı olarak ortalama 4.000 ile 6.000 arasında direnç nokta kaynağı bulunmaktadır. (Doruk et al., n.d.)

Günümüzde otomotiv sektöründe direnç nokta kaynağı uygulamaları büyük ölçüde robotik sistemler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Seri üretim hatlarında kullanılan robotik kaynak sistemleri, yüksek üretim hızı ve proses tekrarlanabilirliği sağlaması açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Şekil 1'de otomotiv BIW üretiminde kullanılan robotik direnç nokta kaynağı uygulamasına ait örnek bir görünüm ile direnç nokta kaynağının temel çalışma prensibini gösteren şematik yapı birlikte sunulmuştur.



Şekil 1 *– Otomotiv BIW üretiminde robotik direnç nokta kaynağı uygulaması ve direnç nokta kaynağının temel prensibini gösteren şematik görünüm (TWI Global, n.d.)*

YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında literatür taraması yöntemi kullanılmıştır. Direnç nokta kaynağı prosesine ilişkin akademik yayınlar, tez çalışmaları, teknik kaynaklar ve otomotiv sektöründe kullanılan endüstriyel uygulamalar incelenmiştir. Özellikle otomotiv Body-in-White (BIW) yapılarında karşılaşılan kaynak hataları, hata oluşum mekanizmaları ve proses parametrelerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada; metal sıçraması (expulsion), yetersiz kaynak çekirdeği oluşumu, büzülme boşlukları ve katılaşma çatlakları gibi yaygın direnç nokta kaynağı hataları ele alınmış, bu hataların oluşum nedenleri ve üretim süreçlerine etkileri mühendislik bakış açısıyla analiz edilmiştir. Ayrıca sac dizilimleri, malzeme özellikleri, elektrot koşulları ve seri üretim parametrelerinin proses kararlılığı üzerindeki etkileri genel hatlarıyla değerlendirilmiştir.

1. BIW Yapılarının Geometrik Karmaşıklığı

Otomotiv gövde yapıları, farklı fonksiyonlara sahip çok sayıda sac parçanın bir araya gelmesiyle oluşan karmaşık geometrilere sahiptir. Gövde yapısı içerisinde yer alan kapalı kesitler, çoklu sac birleşim noktaları ve dar alanlar, kaynak uygulamaları açısından sınırlı erişim koşulları oluşturmaktadır. Bu durum, özellikle gövde imalatında kullanılan kaynak yöntemlerinin uygulanabilirliğini ve kaynak kalitesinin sürekliliğini doğrudan etkileyen bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Otomotiv gövde yapılarında kullanılan kaynak bağlantılarından; yapısal dayanım, yorulma dayanımı, eğilme ve burulma rijitliği gibi mekanik özelliklerin sağlanmasının yanı sıra korozyon dayanımı, sızdırmazlık ve estetik gereksinimleri de karşılaması beklenmektedir. Bu gereksinimler, BIW yapılarında kaynak kalitesinin yalnızca lokal bir birleşim problemi olmadığını, aynı zamanda aracın genel yapısal performansını etkileyen kritik bir unsur olduğunu göstermektedir. (Doruk et al., n.d.)

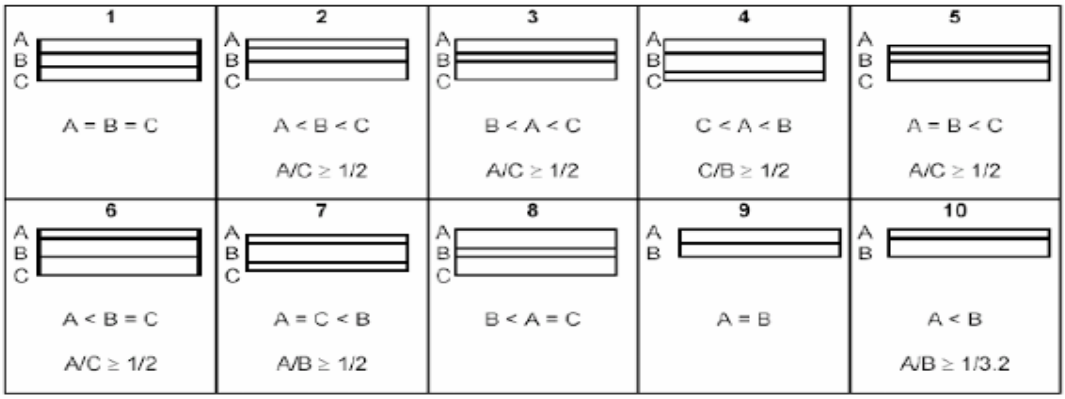
Direnç nokta kaynağı uygulamalarında kaynak kalitesinin sürekliliği, özellikle aracın rijitliği ve uzun dönemli dayanımı açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak gövde yapılarında karşılaşılan geometrik kısıtlar ve gövde yapısının karmaşık yapısı nedeniyle, elektrotların her birleşim noktasına ideal koşullarda erişmesi her zaman mümkün olamamaktadır. Bu durum, direnç nokta kaynağının bazı birleşim bölgelerinde uygulama

sınırlarına ulaşmasına ve buna bağlı olarak çeşitli proses zorluklarının ortaya çıkmasına ve kaynak hatalarının oluşumuna neden olabilmektedir.

Sac Dizilimleri ve Malzeme Çeşitliliğinin Etkisi

Otomotiv gövde yapılarında, yapısal ve fonksiyonel gereksinimleri gereği farklı kalınlık ve malzeme özelliklerine sahip saclar bir arada kullanılmaktadır. Birden fazla sacın üst üste gelmesi, direnç nokta kaynağı uygulamalarında sac dizilimlerini ve toplam kalınlığı önemli bir parametre hâline getirmekte olup, kaynak sırasında oluşan ısının dağılımını ve kaynak çekirdeğinin oluşumunu doğrudan etkilemektedir. Direnç nokta kaynağı uygulamalarının kararlı bir şekilde uygulanabilmesi amacıyla sac kalınlıkları ve toplam sac dizilimleri için uygulama aralıkları tanımlanmıştır. Standart uygulamaların dışına çıkılabilse de daha uzun çevrim sürelerine ve karmaşık proses koşullarına ihtiyaç duyulabileceği gözden kaçırılmamalıdır. (Doruk et al., n.d.; Ünlükal, n.d.)

Direnç nokta kaynağı uygulamalarında sac kalınlık oranları ve toplam sac dizilimleri, kaynak kalitesinin sürdürülebilirliği açısından kritik parametreler arasında yer almaktadır. Farklı sac kombinasyonları için önerilen standart kalınlık oranları ve uygulanabilir sac dizilimlerine ait genel yaklaşım Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2- *Direnç Nokta Kaynağı Standart Kalınlık Oranları (Doruk et al., n.d.)*

Sac kalınlıkları ve dizilimlerinin yanı sıra, kullanılan malzemenin elektriksel ve ısıl özellikleri de direnç nokta kaynağı prosesinin davranışını doğrudan etkilemektedir. Direnç nokta kaynağında ısı oluşumu, saclar arasındaki elektriksel dirence bağlı olup uygulanan akım, direnç ve süre ile ilişkilidir. Bu nedenle düşük karbonlu çelikler uygun elektriksel direnç ve ısıl davranışları sayesinde kaynaklanabilirlik açısından avantaj sağlarken, yüksek karbon içeriğine sahip çeliklerde kırılgan yapı oluşumu ve çatlak eğilimi artabilmektedir. Galvaniz kaplı çeliklerde ise kaplama tabakasının etkisiyle daha yüksek akım ihtiyacı ve artan elektrot aşınması görülürken, alüminyum malzemelerde düşük elektriksel direnç ve yüksek ısı iletkenliği nedeniyle yeterli ısının kaynak bölgesinde tutulması zorlaşmaktadır. (Ünlükal, n.d.)

Direnç nokta kaynağında kullanılan elektrot malzemesi ve uç geometrisi, oluşan ısının doğru bölgede yoğunlaşması ve kaynak kalitesinin sağlanması açısından çok önemli bir role sahiptir. Yüksek ısı iletkenliği ve düşük elektriksel dirence sahip bakır alaşımlı elektrotlar, ısının elektrot üzerinde değil sac ara yüzeyinde oluşmasını sağlayarak kaynak çekirdeğinin kararlı biçimde gelişmesine katkıda bulunmaktadır. Ancak elektrot aşınması, temas koşullarındaki değişimler ve üretim sürecindeki tekrarlı yükler, proses kararlılığını zamanla

sınırlayabilmektedir. Bu durum, direnç nokta kaynağı uygulamalarında çeşitli kalite problemlerinin ve proses zorluklarının ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır. (Zhang & Senkara, 2011)

1.2. Elektrot Erişimi ve Seri Üretim Koşullarının Proses Üzerindeki Etkisi

Otomotiv gövde yapılarındaki direnç nokta kaynağı uygulamalarının kalitesi, malzeme ve sac dizilimlerine ek olarak elektrotların kaynak bölgesine erişim koşullarına da bağlıdır. Araç gövde geometrisinin karmaşık yapısı nedeniyle bazı sac birleşim noktalarında elektrotları ideal açı ve basınçla konumlandırmak zorlaşabilir. Elektrot hizalamasındaki küçük hatalar, temas direncini, ısı oluşumunu ve dolayısıyla kaynak kalitesini doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir. Direnç nokta kaynağı, seri üretim hatlarında sık tekrar ve kısa çevrim süreleri içeren bir süreçtir.

Aynı işlemin defalarca tekrarı, elektrot uçlarında aşınma, temas koşullarında değişim ve proses parametrelerinde sapma gibi sorunların birikmesine yol açabilir. Bu durum, kaynak kalitesinin sürekli olmasını sağlamayı zorlaştıran en önemli faktörlerden biridir. (Ünlükal, n.d.)

Bu nedenle günümüzde elektrot ömrünü artırmak için kaplama ve ısıl işlem gibi farklı iyileştirme yöntemleri kullanılmakta, bu çalışmalar özellikle rekabetin yüksek olduğu otomotiv sektöründe önemli yararlar sağlamaktadır. Araç gövdesinde bulunan binlerce direnç nokta kaynağı göz önüne alındığında, elektrot uç ömrünü uzatma çalışmaları üretim maliyetleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu yüzden direnç nokta kaynağı uygulamalarında uygun şekilde yönetilmeyen proses koşulları, çeşitli kaynak hatalarına ve kalite sorunlarına yol açabilmektedir. (Doruk et al., n.d.)

Direnç nokta kaynağı uygulamalarında kullanılan elektrot malzemeleri; sertlik, elektrik iletkenliği, mekanik dayanım ve kullanım alanı gibi özellikler açısından farklılık göstermektedir. Elektrot sınıfları ve bu sınıflara ait temel özellikler ile tipik uygulama alanlarına ilişkin genel bilgiler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1- *Elektrot Ucu Malzemesi ve Özellikleri (Ünlükal, n.d.)*

Grup	Klas	Bileşenler	Mekanik Özellikler			Uygulama
			HRB	Elektrik İletkenliği (%IACS)	Mukavemet (ksi)	
A	1	% 1 Cd	50-65	80	(+) 40-60	Düşük karbon çelikleri
	2	% 0,8 Cr	65-75	70-75	(+) 45-65	Düşük karbon çelikleri
	3	% 0,5 Be % 1 Ni	90	45	(+) 85-100	Düşük karbon çeliklerinin kalın kesimleri
B	10	Cu-W refraktör metalleri	72	35	(-) 135	Yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve düşük soğutma proseslerinde kullanılır.
	11		94	28	(-) 160	
	12		98	27	(-) 170	
	13	Alaşımsız W	69 HRA	30	(-) 200	
	14	Alaşımsız Mo	85	30	-	
C	20	% 0,5 - 1,1 Al2O3	-	78	-	Galvanizli çelik saç

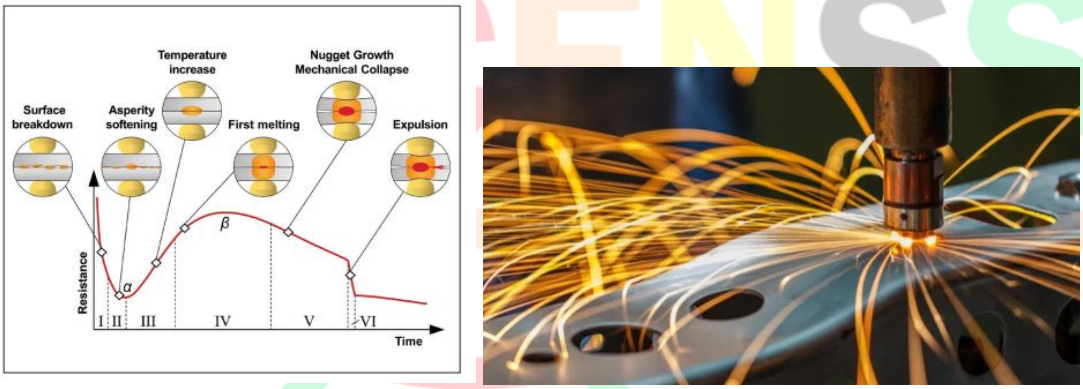
2. Direnç Nokta Kaynağında Karşılaşılan Hatalar

Otomobil gövdesinin yapımında temel bir birleştirme yöntemi olan direnç nokta kaynağı, gövde şeklinin doğru olması ve yapısal bütünlüğün sağlanması açısından büyük önem taşır. Ancak süreç koşullarına, malzeme özelliklerine ve üretim parametrelerine bağlı olarak direnç nokta kaynağı uygulamalarında farklı hatalar ortaya çıkabilir. Bu hatalar, kaynak kalitesini doğrudan etkileyebilmektedir. (Ünlükal, n.d.) Bu bölümde, otomotiv sektöründe araç gövde yapılarında direnç nokta kaynağı uygulamaları sırasında sıklıkla karşılaşılan dört temel kaynak hatası ele alınmıştır.

2.1. Metal Sıçraması (Expulsion)

Direnç nokta kaynağında expulsion, kaynak sırasında oluşan erimiş metalin saclar arasındaki birleşme bölgesinden kontrolsüz biçimde dışarı atılmasıdır. Bu durum genellikle aşırı akım uygulanması, yetersiz elektrot kuvveti, uzun kaynak süresi veya galvaniz kaplama gibi faktörlerin sonucunda erimiş metalin elektrotlar arasında yeterince tutulamamasıyla ortaya çıkar.

Expulsion oluştuğunda kaynak çekirdeğinin bütünlüğü bozulabilir. İç boşluklar meydana gelebilir ve bağlantının mekanik dayanımı düşebilir. Bu nedenle direnç nokta kaynağı uygulamalarında akım, zaman ve kuvvet dengesinin doğru şekilde ayarlanması, elektrot kondisyonunun korunması ve özellikle kaplamalı saclarda uygun proses parametrelerinin seçilmesi büyük önem taşır. Temel olarak expulsion, oluşan ısının birleşme arayüzünde kontrol altında tutulamamasının bir göstergesi olarak değerlendirilir. Expulsion oluşumuna ait örnek bir görünüm ile hata oluşum mekanizmasının şematik gösterimi Şekil 3'te sunulmuştur. (T. J. Snow Company, n.d.; Xia et al., n.d.)

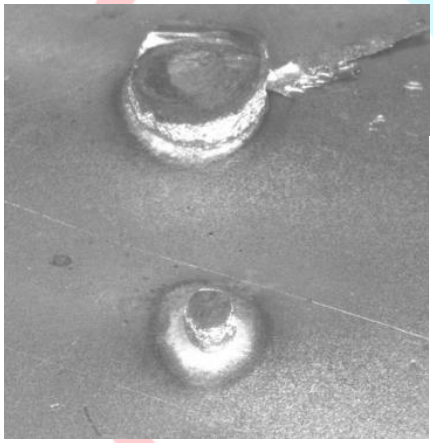


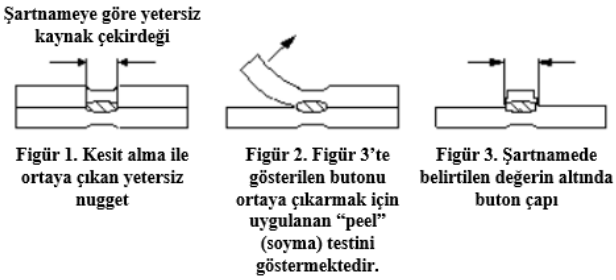
Şekil 3- *Direnç nokta kaynağında metal sıçraması (expulsion) oluşumuna ait örnek görünüm ve oluşum mekanizmasının şematik gösterimi (T. J. Snow Company, n.d.; Xia et al., n.d.)*

2.2. Yetersiz Kaynak Çekirdeği Oluşumu (Small Nugget)

Direnç nokta kaynağı sırasında, elektrotlar arasında sıkıştırılan saclar üzerinden geçen elektrik akımının oluşturduğu direnç ısısı nedeniyle temas bölgesinde erime olur. Bu erimiş hacmin katılaşmasıyla kaynak çekirdeği (nugget) oluşur. Oluşan çekirdeğin boyutu ve sürekliliği, uygulanan ısı ile elektrot kuvvetinin dengeli olmasına doğrudan bağlıdır. Isı girdisinin yetersiz kalması durumunda veya proses parametrelerinin uygunsuzluğunda, kaynak çekirdeği istenen boyuta ulaşamamaktadır ve bu durum, yetersiz çekirdek oluşumu hatasına yol açmaktadır. (Akyol, n.d.)

Yetersiz çekirdek oluşumu, düşük kaynak akımı, kısa süre, hatalı elektrot seçimi, elektrot aşınması, yetersiz soğutma, kirli veya uyumsuz parça yüzeyleri, zayıf elektriksel ya da mekanik bağlantılar ve hatalı parça hizalaması gibi birçok proses ve ekipman kaynaklı faktörden kaynaklanabilir. Bu hatanın önlenmesi için malzeme kalınlığı ve kaplama özelliklerine uygun parametrelerin seçilmesi, elektrot temas koşullarının korunması ve proses kararlılığının düzenli olarak izlenmesi gerekir. Sonuç olarak, yetersiz kaynak çekirdeği oluşumu direnç nokta kaynağında yetersiz ısı girdisinin en belirgin göstergelerinden biri olarak kabul edilmektedir. (Akyol, n.d.; ResistanceWeldSupplies.com, n.d.) Yetersiz çekirdek oluşumu durumunda, yüzeyde birleşme varmış gibi görünmesine rağmen gerçek bağlantı alanı sınırlı kalmaktadır. Buna bağlı olarak kesme ve çekme dayanımı düşmekte ve özellikle yapısal yük taşıyan araç gövde birleşimlerinde erken kopma riski artmaktadır. Kaynak çekirdeğinin çapı, üretim hatlarında nokta kaynak kalitesini belirlemede en önemli ölçütlerden biridir. Genellikle tahribatlı testler sonrasında buton çapı veya kesit incelemesi ile değerlendirilir. Bu nedenle, çekirdek çapının yetersiz olması yalnızca kalite sorunlarına yol açmaz, aynı zamanda üretim duraklamalarına, bakım ihtiyaçlarının artmasına ve çevrim süresinin olumsuz etkilenmesine neden olabilir. Yetersiz kaynak çekirdeği oluşumuna ait örnek buton görünümü ve peel (soyma) testi sonrasında gerçekleştirilen çap ölçümüne ilişkin şematik gösterim Şekil 4'te verilmiştir. (ResistanceWeldSupplies.com, n.d.)





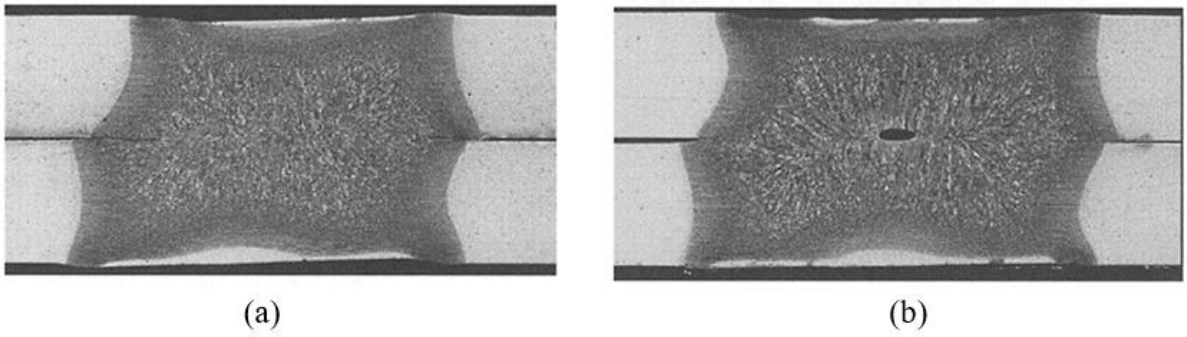
Şekil 4- *Yetersiz nugget oluşumuna ait buton görünümü ve peel (soyma) testi ile belirlenen çap ölçüm şeması (ResistanceWeldSupplies.com, n.d.)*

2.3. Büzülme Boşlukları (Shrinkage Voids)

Kaynak çekirdeğinde içerisinde oluşan büzülme boşlukları, direnç nokta kaynağı uygulamalarında karşılaşılan önemli iç hatalardan biri olarak tanımlanmaktadır. Bu kusurlar çoğunlukla dış yüzeyden fark edilemese de kesit incelemelerinde çekirdek içinde boşluklar şeklinde görülür. Bu boşluklar özellikle yorulma yükleri altında erken kırılmalara neden olabilmektedir. Kaynak çekirdeği hacmi boyunca meydana gelen hacimsel çekme ve katılaşma sırasında yeterli beslemenin sağlanamaması, bu boşlukların oluşumunun temel nedenidir (Akyol, n.d.; Zhang & Senkara, 2011)

Bu hatanın oluşma eğilimi, malzemenin termal ve mikroyapısal özellikleri ile yakından ilişkilidir. Yüksek karbon eşdeğerine sahip gelişmiş yüksek dayanımlı çelikler bu kusura daha duyarlı davranabilmektedir. Büzülme boşluklarının azaltılabilmesi için ısı girdisi ve soğuma davranışının dengelenmesi, elektrot temas koşullarının korunması ve malzemeye uygun proses

parametrelerinin seçilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla bu hata, direnç nokta kaynağında katılaşma ve soğuma sürecinin yeterince kontrol edilememesi ile ilişkili bir kalite problemi olarak tanımlanmaktadır. Direnç nokta kaynağında oluşan iç boşluklara ait kesit görüntüleri ve büzülme boşluğu oluşumuna ilişkin örnek nugget yapıları Şekil 5'te gösterilmiştir. (Akyol, n.d.; Zhang & Senkara, 2011).



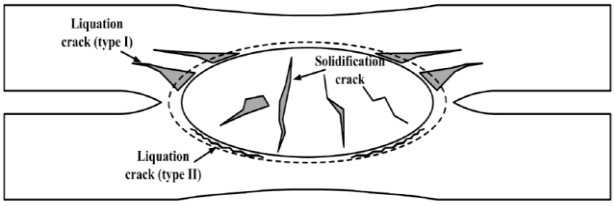
Şekil 5- *Direnç nokta kaynağında iç boşluk oluşumuna ait kesit görüntüleri: (a) boşluksuz nugget, (b) büzülme boşluğu içeren çekirdek (Zhang & Senkara, 2011)*

2.4. Katılaşma Çatlakları (Solidification Cracks)

Direnç nokta kaynağında katılaşma çatlakları, soğuma sürecinin son aşamasında kaynak çekirdeği ve çevresinde oluşan çekme gerilmeleri sonucunda meydana gelmektedir. Bu çatlaklar çoğunlukla yüzeyden fark edilememekte ve genellikle temas düzlemine dik doğrultuda ilerlemektedir. Kükürt, fosfor veya karbon içeriği yüksek malzemelerde çatlak oluşma eğilimi artarken, düzensiz termal gradyanlar ve yönlü büzülme davranışı tane sınırlarında ayrılmaya yol açabilmektedir. (Zhang & Senkara, 2011; Li et al., 2022)

Katılaşma çatlakları, kaynaklı birleşimin yapısal bütünlüğünü zayıflatan önemli hasar mekanizmalarından biri olup çoğu zaman ancak mekanik testler sırasında veya servis koşullarında ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle ısı girdisinin kontrol edilmesi, soğuma davranışının dengelenmesi ve malzeme özelliklerine uygun proses parametrelerinin seçilmesi çatlak oluşumunun önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Direnç nokta kaynağında soğuma davranışının dengelenmesi; uygun ısı girdisinin sağlanması, elektrot soğutma koşullarının simetrik tutulması ve akım kesildikten sonra yeterli bekleme süresinin uygulanması ile mümkün olmaktadır.

Bu parametrelerin kontrolü, katılaşma sırasında oluşabilecek iç gerilmeleri ve çatlak oluşumunu azaltmada kritik rol oynamaktadır. Direnç nokta kaynağında oluşan katılaşma çatlaklarına ait örnek çekirdek görünümü Şekil 6'da sunulmuştur. (Zhang & Senkara, 2011; Li et al., 2022)



Şekil 6- Direnç nokta kaynağında katılaşma çatlakları içeren çekirdek görünümü (Li et al., 2022)

2.5. Yüzey ve Proses Kaynaklı Diğer Hatalar

Direnç nokta kaynağı uygulamalarında, yapısal bütünlüğü doğrudan etkilemeyen fakat yüzey kalitesi, korozyon direnci ve proses sürekliliği açısından önemli olan çeşitli yüzey ve proses kaynaklı hatalar da bulunmaktadır.

Bu hatalar elektrot çöküntüsü, yüzey sıçrantıları, lokal yanık izleri, elektrot yapışması ve hizalama kaynaklı izler gibi benzer yüzey kusurları da direnç nokta kaynağı uygulamalarında gözlemlenmektedir.

Bu tür hata oluşumları çoğunlukla kaynak dayanımını doğrudan düşürmemekle birlikte, yüzey görünümü, kaplama bütünlüğü ve korozyon performansı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Bu nedenle yüzey hazırlığının sağlanması, elektrot geometrisinin korunması ve proses parametrelerinin sürekliliğinin izlenmesi, direnç nokta kaynağı uygulamalarında kalite sürdürülebilirliği açısından önemli bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir. (Akyol, n.d.; Zhang & Senkara, 2011)

3. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Direnç nokta kaynağı, yüksek üretim hızı, otomasyona uygunluğu ve maliyet etkinliği nedeniyle otomotiv gövde yapılarında en yaygın kullanılan temel birleştirme yöntemidir. Bununla birlikte malzeme özellikleri, sac dizilimleri, elektrot koşulları ve proses parametrelerindeki değişkenlik, kaynak kalitesinin sürekliliğini zorlaştırarak çeşitli hataların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.

Bu çalışmada otomotiv gövde yapılarında direnç nokta kaynağı sırasında karşılaşılan başlıca hatalar ve bunların oluşum mekanizmaları genel hatlarıyla değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, kaynak kalitesinin büyük ölçüde ısı girdisi, soğuma davranışı ve elektrot koşullarının kontrolüne bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle uygun proses parametrelerinin seçilmesi ve proses kararlılığının sağlanması, otomotiv gövde yapılarında güvenilir ve sürdürülebilir kaynak kalitesi açısından kritik önem taşımaktadır.

KAYNAKÇA

Akyol, M. (n.d.). Otomotiv sanayiinde kullanılan direnç nokta kaynak uygulamaları ve karşılaşılan sorunlar.

Aras, S. (2016). Nokta direnç kaynağı uygulanan farklı çeliklerin mekanik özelliklerinin incelenmesi (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). T.C. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Doruk, E., Pakdil, M., Çam, G., Durgun, İ., & Kumru, U. C. (n.d.). Otomotiv sektöründe direnç nokta kaynağı: Tofaş uygulamaları.

Eşme, U., Bayramoğlu, M., Geren, N., & Kökangül, A. (2005). Direnç nokta kaynağında elektrot baskı kuvveti ve uç geometrisinin temas direncine etkileri. III. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, TMMOB MMO Konya Şubesi, Konya, Türkiye.

Li, H., Yan, W., Li, Z., Mariusz, B., Senkara, J., & Zhang, Y. (2022). Numerical and experimental study of the hot cracking phenomena in 6061/7075 dissimilar aluminum alloy resistance spot welding. Journal of Manufacturing Processes, 77, 794–808. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.010

ResistanceWeldSupplies.com. (n.d.). Resistance welding problems: Undersized weld. Retrieved February 2026, from https://resistanceweldsupplies.com/weld-help/resistance-welding-problems/undersized-weld/

T. J. Snow Company. (n.d.). Is welding expulsion a sign of a quality weld? Retrieved February 2026, from https://tjsnow.com/is-welding-expulsion-sign-of-a-quality-weld/

TWI Global. (n.d.). What is spot welding? Retrieved February 2026, from https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-spot-welding

Ünlükal, E. (n.d.). Otomotiv sanayinde kullanılan direnç nokta kaynak kalitesinin artırılması (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Xia, Y. J., Lv, T. L., Ghassemi-Armaki, H., Li, Y. B., & Carlson, B. E. (n.d.). Quantitative interpretation of dynamic resistance signal in resistance spot welding. Welding Journal.

Zhang, H., & Senkara, J. (2011). Resistance welding: Fundamentals and applications (2nd ed.). CRC Press.of the hot cracking phenomena in 6061/7075 dissimilar aluminum alloy resistance spot welding. Journal of Manufacturing Processes, 77, 794–808. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.010

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Applications of Roll Forming Technology in Automotive

Çiğdem BİLGE[1]

Abstract

Roll forming technology has become an important manufacturing method in the automotive industry due to its capability to provide high dimensional accuracy, continuous production, and the manufacturing of lightweight structural components. The increasing demand for lightweight vehicle design enhanced crash safety requirements, and the widespread adoption of electric vehicle architectures have significantly increased the use of roll-formed components in modern automotive structures. This study presents a literature-based review of the applications of roll forming technology in automotive manufacturing. In particular, the use of advanced high-strength steels (AHSS), the application of roll forming technology in electric vehicle battery pack frame structures, and comparisons with conventional sheet metal forming processes are discussed. Previous studies indicate that roll forming technology provides high dimensional accuracy, reduced production defects, and more efficient material utilization in the manufacturing of automotive structural components such as bumper beams, door reinforcements, seat rails, and battery frames. These findings demonstrate that roll forming technology is an important manufacturing method for next-generation automotive production and electric vehicle structural designs.

Keywords: Roll forming, Automotive manufacturing, Advanced high strength steel, Electric vehicle structures Battery frame, Lightweight automotive design

[1] Researcher, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa, Türkiye, Orcıd: 0000-0002-9245-5568

INTRODUCTION

The automotive industry is continuously seeking advanced manufacturing technologies capable of providing lightweight vehicle structures, improved safety performance, and highly efficient mass production. One of the metals forming technologies widely used in modern automotive manufacturing is roll forming.

Roll forming is a continuous sheet metal forming process in which metal strips pass through a series of roll stations to gradually obtain the desired cross-sectional geometry (Figure 1).

The roll forming process is based on the principle of progressively shaping metal strips through successive roll stations. Compared with conventional sheet metal forming methods, this process offers significant advantages such as high dimensional accuracy, low material waste, and high production efficiency (Groche et al., 2019).

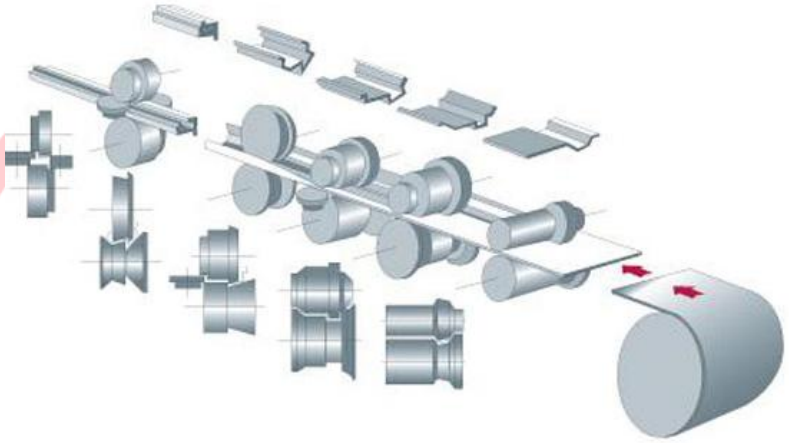


Figure 1- *Roll forming process*

In automotive manufacturing, roll forming is widely used in the production of structural components such as bumper beams, door reinforcement members, seat rails, and roof rails (Lindgren, 2017). These components are critical for vehicle safety and structural strength.

The increasing use of advanced high-strength steels (AHSS) in the automotive sector has further increased the importance of roll forming technology. Although AHSS materials provide a high strength-to-weight ratio, they may cause manufacturing problems such as cracking and spring back in conventional forming processes (Huh et al., 2020).

With the rapid development of electric vehicles, new application areas such as battery pack protection structures have emerged, and roll forming technology has begun to be used in these structures as well (Zhu et al., 2025a).

2. ROLL FORMING APPLICATIONS IN AUTOMOTIVE COMPONENTS

Roll forming technology is particularly suitable for the production of long structural components with constant cross-sections. Many components used in automotive body structures (Body-in-White) can be manufactured using roll forming (Figure 2).

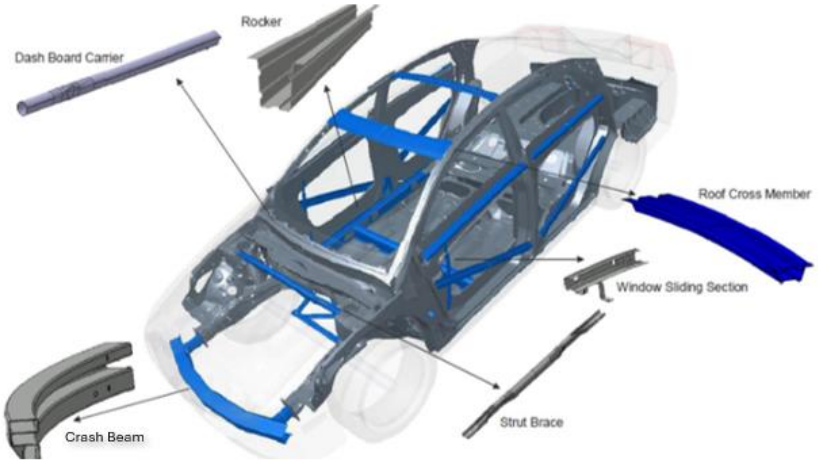


Figure 1- BIW Roll forming components

These components include:

Crash beam

Door reinforcement beams

Seat rails

Roof rails

Side impact reinforcement components

These structural elements play a critical role in vehicle crash performance. Studies show that steel profiles produced by roll forming exhibit high energy absorption capacity (Brunet, 2018).

In addition, modern roll forming lines can integrate operations such as punching, cutting, and welding into the production line, which significantly improves production efficiency (Lee et al., 2021).

3. ROLL FORMING OF ADVANCED HIGH-STRENGTH STEELS

Advanced high-strength steels are widely used in the automotive industry to reduce vehicle weight and improve safety performance. However, forming these materials using conventional stamping processes may lead to high forming forces and springback problems (Huh et al., 2020).

Roll forming technology provides significant advantages in forming such materials because deformation occurs gradually across multiple roll stations rather than in a single forming step (Mendiguren et al., 2020) (Figure 3).

This progressive deformation reduces stress concentrations in the material, lowering the risk of cracking and enabling a more stable manufacturing process. Furthermore, the optimization of parameters such as roll geometry and forming sequence has a significant influence on the final dimensional accuracy of the component (Wang et al., 2014).

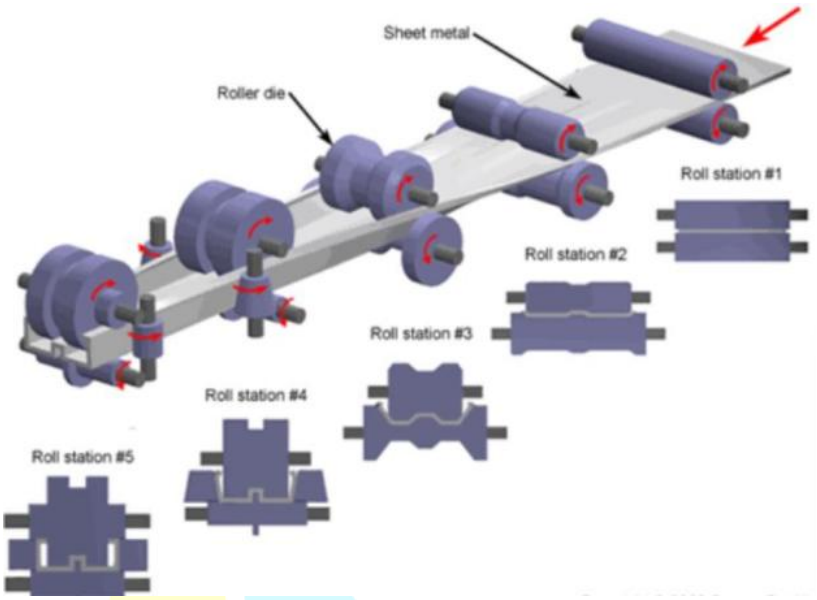


Figure 2- *Multiple steps with roll stations*

4. ROLL FORMING IN ELECTRIC VEHICLE BATTERY PACK FRAMES

In electric vehicles, the battery pack is one of the heaviest and most critical components of the vehicle. The frame and tray structures protecting the battery modules must provide high structural stiffness, impact resistance, and vibration performance. Therefore, both lightweight design and high strength are key engineering requirements in the design of battery enclosure systems (Figure 4).

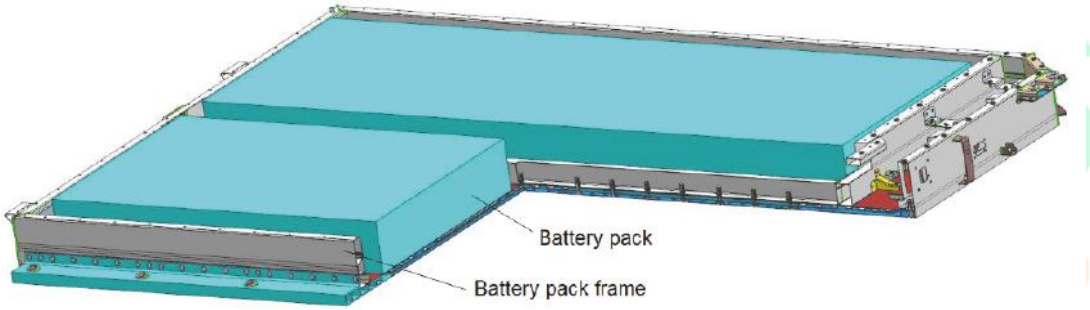


Figure 3*-Frame structure of the battery pack*

Recent studies have shown that advanced high-strength steels (AHSS) can be used in battery frame structures manufactured by roll forming. Roll forming technology offers an important manufacturing alternative for electric vehicle structures by enabling the production of thin-walled and high-strength profiles (Li et al., 2023a).

Compared with casting or extrusion processes, roll forming allows the production of thinner and stronger wall geometries. Battery trays manufactured using roll forming contribute to the reduction of overall vehicle weight, thereby directly improving the driving range of electric vehicles (Zhu et al., 2025a).

In addition, the use of AHSS materials in battery pack frame manufacturing has been investigated through finite element simulations and experimental studies. These studies demonstrate that structures designed for roll forming can reduce manufacturing costs and

increase production efficiency. Battery pack frames produced using DP1180 AHSS provide a lightweight and high-strength solution (Li et al., 2023b). The results indicate that AHSS roll forming technology can be a more efficient alternative to aluminum alloys in certain applications. Therefore, roll forming technology is considered an important manufacturing method for electric vehicle battery structures (Zhu et al., 2025b).

5. COMPARISON WITH CONVENTIONAL MANUFACTURING METHODS

Traditionally, automotive structural components are manufactured using stamping and press forming processes. In these methods, sheet metal is shaped in high-tonnage presses in one or several forming steps. However, with the increasing use of high-strength steels, several manufacturing challenges may arise. These challenges include high forming forces, springback effects, and the risk of material cracking (Mayyas et al., 2020; Jiang et al., 2018).

In contrast, the roll forming process gradually deforms the material through multiple roll stations, thereby reducing stress concentrations in the material. This provides a more stable manufacturing process, particularly when forming advanced high-strength steels (Neugebauer et al., 2019a).

Furthermore, roll forming technology enables the continuous production of long components with constant cross-sections, providing significant advantages in high-volume automotive manufacturing (Essa et al., 2024). Due to its continuous production principle, high production speeds can be achieved, and production cycle times can be significantly reduced (Neugebauer et al., 2019b).

Another important advantage of roll forming is its high material utilization efficiency. In this process, raw material is typically fed into the production line in coil form and gradually transformed into the final profile geometry through successive forming stations. As a result, material losses remain very low, and material utilization efficiency can reach up to 95% (Custom Metal Pro, 2022) (Figure 5).

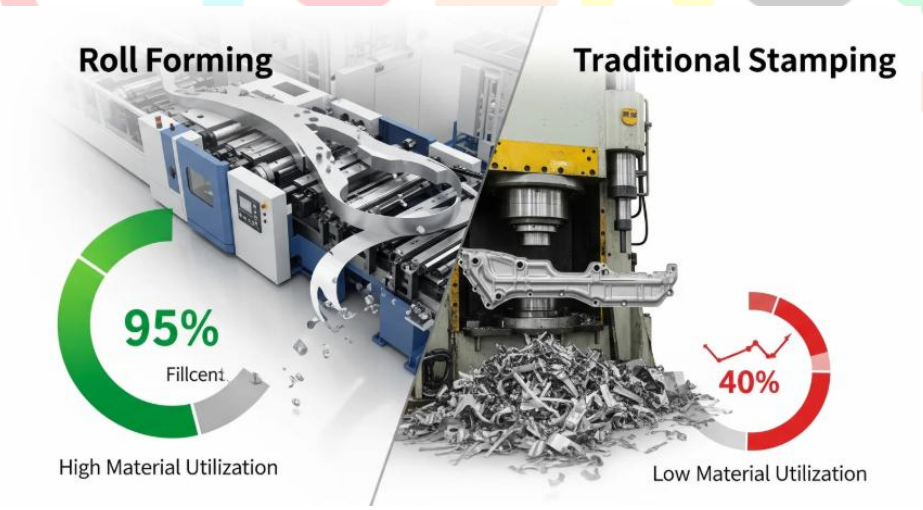


Figure 4- *Roll Forming & Conventional Method*

6. LIGHTWEIGHT ADVANTAGES of ROLL FORMING IN AUTOMOTIVE

Lightweight design has become a key objective in modern automotive engineering in order to improve fuel efficiency and extend the driving range of electric vehicles. Reducing vehicle mass directly decreases energy consumption (Davies, 2021).

Roll forming technology plays an important role in lightweight vehicle design by enabling the production of structural profiles with high strength-to-weight ratios. Studies show that roll-formed profiles manufactured from advanced high-strength steels can achieve significant weight reduction compared with conventional steel structures (Park et al., 2022).

Moreover, roll forming allows the integration of functional elements such as stiffening ribs and reinforcement flanges within the profile geometry. These design optimizations can increase structural stiffness without increasing material thickness (Song et al., 2023).

Lightweight design is particularly important for electric vehicles because vehicle weight directly affects battery range. Roll-formed high-strength battery frame structures have been shown to reduce vehicle weight while maintaining structural safety (Chen et al., 2024; Zhu et al., 2025c).

7. RESULTS

The literature review conducted in this study reveals several important findings regarding the application of roll forming technology in automotive manufacturing.

Roll forming enables the production of structural components with high dimensional accuracy and consistent quality due to its progressive deformation mechanism.

Technology provides significant advantages in forming advanced high-strength steels (AHSS), reducing common forming defects such as cracking and excessive springback compared with conventional stamping processes.

Roll forming has become increasingly important in the production of electric vehicle structural components, particularly battery pack frames and trays.

Compared with conventional manufacturing processes, roll forming allows the production of thinner yet stronger structural profiles, contributing to lightweight vehicle design.

The continuous production capability of roll forming lines enables high production speeds and improved material utilization efficiency, which can reach up to 95%.

These findings demonstrate that roll forming technology offers both manufacturing and structural advantages for modern automotive applications.

8. CONCLUSION

Roll forming technology has become an important manufacturing method for producing lightweight and high-strength automotive structural components.

The literature review conducted in this study shows that roll forming offers significant advantages over conventional manufacturing methods, particularly in the forming of advanced high-strength steels.

With the rapid development of electric vehicles and the increasing demand for lightweight vehicle structures, the importance of roll forming technology in automotive manufacturing is expected to increase further.

REFERENCES

Brunet, M. (2018). Structural applications of roll-formed profiles. *Steel Research International, 89*(6).

Chen, L., et al. (2024). Structural design of battery pack frames for electric vehicles. *Materials, 17*(3).

Custom Metal Pro. (2022). *Material efficiency in automotive roll forming processes*. Retrieved May 22, 2026, from Custom Metal Pro.

Davies, G. (2021). Lightweight design in automotive engineering. *Materials & Design, 205*.

Essa, et al. (2024). Roll forming processes in automotive structures. *Journal of Manufacturing Processes, 86*, 225–236.

Groche, P., et al. (2019). Roll forming of advanced high-strength steels. *CIRP Annals, 68*(2), 639–662.

Huh, H., et al. (2020). Formability issues in advanced high-strength steels. *International Journal of Mechanical Sciences, 176*.

Jiang, Z., et al. (2018). Springback in sheet metal forming processes. *Journal of Materials Processing Technology, 255*, 1–11.

Lee, J., et al. (2021). Integration of forming and secondary operations in roll forming lines. *Journal of Manufacturing Processes, 64*, 125–134.

Li, X., et al. (2023a). Lightweight structural design for EV battery systems. *Energy Reports, 9*, 1521–1531.

Li, X., et al. (2023b). Structural optimization for electric vehicle frames. *Energy Reports, 9*, 1985–1995.

Lindgren, L. (2017). Sheet metal forming processes in automotive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology, 249*, 1–13.

Mayyas, et al. (2020). Lightweight materials in automotive structures. *Journal of Cleaner Production, 264*.

Mendiguren, J., et al. (2020). Numerical analysis of roll forming processes. *Journal of Materials Processing Technology, 278*, 116–128.

Neugebauer, R., et al. (2019a). Advances in roll forming technology. *Production Engineering, 13*, 321–330.

Neugebauer, R., et al. (2019b). Functional design of roll-formed structures. *Production Engineering, 13*, 331–340.

Park, J., et al. (2022). Roll forming behaviour of high-strength steels. *Materials & Design, 217*.

Song, J., et al. (2023). Dimensional stability of roll-formed automotive structures. *Materials, 16*(8).

Wang, Y., et al. (2014). Process parameter effects in roll forming. *Advanced Materials Research, 1025–1026*, 213–218.

Zhu, B., et al. (2025a). Automotive manufacturing technologies for EV battery trays. *Journal of Physics: Conference Series, 2500*.

Zhu, B., et al. (2025b). Structural design of EV battery trays using roll forming. *Journal of Physics: Conference Series, 2500*.

Zhu, B., et al. (2025c). Structural performance of roll-formed EV battery frames. *Journal of Physics: Conference Series, 2500*.

6th International
Congress of Engineering and Natural
Sciences

DEVELOPMENT OF SIDE ARM-DAMPER ATTACHMENT CONNECTIONS WITH FORMING OPTIMIZATION IN REAR TWIST BEAM

İbrahim İNAN[1]
Murat SÜMER[2]
Önder YILMAZ[3]
Zafer GÜLER[4]

Abstract

This study focuses on the design and assembly process of side arm and damper attachment components used in a rear twist beam suspension system. The side arm is manufactured from 4 mm thick S420MC sheet steel with a stamped hole of approximately 17 mm diameter, while the damper attachment component is a cold-drawn sleeve with an outer diameter of 32 mm. The components are joined through a press-fit operation using upper and lower fixtures. During assembly, sheet deformation and flange formation occur, followed by a machining operation to improve surface quality and reduce notch effects. The resulting final hole and tooling diameters are considered a critical process parameters.These hole diameters directly affects assembly performance. Smaller diameters increase crack risk due to high contact pressure, whereas larger diameters reduce retention force due to spring back. In addition, the bottom radius influences stress concentration, fatigue behavior, and crash performance. Cracks formed during assembly further reduce fatigue strength because of notch effects.

In this study, key process parameters including final hole diameter, tooling hole diameters bottom radius, flange length, and fixture geometry were systematically investigated. Numerical analyses were performed using AutoForm and experimentally validated using ZwickRoell equipment. The results enabled determination of the optimum hole diameter and process parameters for robust and reliable rear twist beam assembly.

Keywords: Automotive Industry, Autoform Simulation, Chassis Parts, Durability, Finite Element Analysis, Process Development

[1] Master of Science, Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., R&D Department, Orcıd: 0009-0007-5750-5690
[2] Bachelor of Science, Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., R&D Department, Orcid:0009-0004-9237-0726
[3] Bachelor of Science, Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., R&D Department Orcid: 0009-0008-8556-4206:
[4] Doctor of Science, Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., R&D Department, Orcid: 0009-0006-9812-5259

1.GİRİŞ

Otomotiv endüstrisi son yıllarda tarihinin en büyük dönüşüm süreçlerinden birini yaşamaktadır. Elektrifikasyon, karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik regülasyonlar, araç güvenliği gereksinimlerinin artması ve müşteri beklentilerindeki değişim; araç mimarilerinin, şasi sistemlerinin ve süspansiyon teknolojilerinin yeniden şekillenmesine neden olmaktadır. Özellikle elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte araç ağırlıklarının artması, enerji verimliliğinin kritik hale gelmesi ve sürüş konforuna yönelik beklentilerin yükselmesi; süspansiyon sistemlerinin yalnızca yol tutuşu sağlayan mekanik yapılar olmaktan çıkıp, araç karakteristiğini doğrudan belirleyen temel mühendislik sistemleri haline gelmesine yol açmıştır. Bunun yanında üretim maliyetlerinin azaltılması, platform ortaklığı stratejileri ve yüksek adetli üretim ihtiyaçları da otomotiv üreticilerini optimum maliyet-performans dengesi sunan süspansiyon çözümlerine yönlendirmektedir. (Milliken & Milliken, 1995).

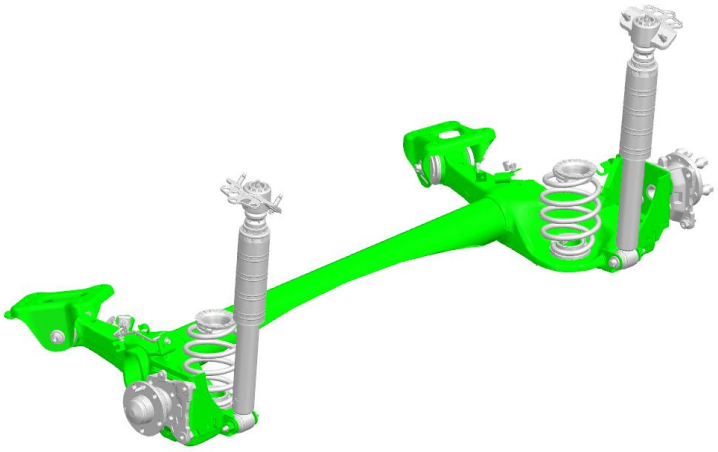
Şasi sistemleri içerisinde süspansiyon mekanizması; yol düzensizliklerinden kaynaklanan yükleri absorbe etmek, tekerleklerin yol ile temasını korumak, sürüş stabilitesini sağlamak ve araç dinamiğini kontrol etmek açısından kritik bir role sahiptir. Süspansiyon sistemleri temel olarak bağımsız ve yarı bağımsız mimariler olarak sınıflandırılmaktadır. Bağımsız süspansiyon sistemleri yüksek sürüş performansı ve gelişmiş yol tutuş avantajı sunarken; daha yüksek maliyet, paketleme zorlukları ve artan ağırlık gibi dezavantajlara sahiptir. Buna karşılık yarı bağımsız süspansiyon sistemleri, özellikle kompakt ve C segment araçlarda maliyet, ağırlık ve üretilebilirlik açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu noktada Rear Twist Beam (RTB) veya torsiyon çubuklu arka aks sistemi, günümüz otomotiv endüstrisinde en yaygın kullanılan yarı bağımsız arka süspansiyon çözümlerinden biri haline gelmiştir. (Milliken & Milliken, 1995).

Şekil 5: Arka Süspansiyon sistemi

RTB sistemleri temel olarak iki trailing arm yapısının enine bir torsiyon kirişi ile birbirine bağlanması prensibine dayanır. Sistem geometrisi sayesinde belirli bir torsiyonel esneklik elde edilmekte ve bu yapı viraj sırasında tekerlekler arasında kontrollü bir göreceli hareket sağlayarak araç dinamiğine katkıda bulunmaktadır. (Leal et al., 2007). Torsiyon kirişi, bir yandan yapısal rijitlik sağlarken diğer yandan yarı bağımsız davranış karakteristiği

oluşturarak maliyet ve performans arasında optimum denge sunmaktadır. RTB sistemlerinin en önemli avantajları arasında düşük parça sayısı, yüksek paketleme verimliliği, düşük üretim maliyeti, hafif yapı ve yüksek dayanıklılık yer almaktadır. Ayrıca elektrikli araç platformlarında batarya yerleşimi açısından sunduğu kompakt mimari avantajı da RTB kullanımını yeniden ön plana çıkarmaktadır.

Literatürde RTB sistemleri üzerine gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde araştırmaların temel olarak dört ana başlık altında yoğunlaştığı görülmektedir: yapısal dayanım ve yorulma ömrü, araç dinamiği performansı, NVH (Noise, Vibration and Harshness) karakteristiği ve üretim optimizasyonu. (Gillespie, 1992; Leal et al., 2007). Özellikle beam geometrisinin torsiyonel rijitlik üzerindeki etkisi birçok akademik çalışmada araştırılmıştır. Kiriş kesit geometrisi, kaynak bölgeleri, lokal rijitlik dağılımı ve malzeme kalınlıklarının; toe compliance, camber davranışı ve roll steer karakteristikleri üzerinde doğrudan etkili olduğu gösterilmiştir. Modern RTB tasarımlarında hedef yalnızca yeterli dayanım elde etmek değil, aynı zamanda istenen elastokinematik davranışı kontrollü şekilde sağlayabilmektir.



***Şekil 2**: Rear Twist Beam parçası*

Araç dinamiği açısından değerlendirildiğinde RTB sistemlerinin en kritik tasarım parametrelerinden biri torsiyonel rijitliktir. Düşük torsiyon rijitliği sürüş konforunu artırırken yüksek rijitlik yol tutuş performansını iyileştirebilmektedir. (Milliken & Milliken, 1995). Bu nedenle tasarım sürecinde konfor ve dinamik performans arasında optimum denge kurulması gerekmektedir. Literatürde sonlu elemanlar yöntemi (FEA) kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde, beam kesit formunun ve bağlantı bölgelerinin sistem davranışını önemli ölçüde değiştirdiği ortaya konmuştur. Özellikle U kesit, kapalı kutu kesit ve hibrit geometrilerin farklı yükleme koşulları altında farklı dinamik karakteristikler sergilediği belirtilmektedir.

Bunun yanında hafifletme çalışmaları da günümüzde RTB geliştirme süreçlerinin temel araştırma alanlarından biridir. Küresel emisyon hedefleri doğrultusunda araç ağırlığının azaltılması büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler (HSLA), gelişmiş yüksek dayanımlı çelikler (AHSS) ve sıcak şekillendirilmiş malzemeler RTB uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. (Callister & Rethwisch, 2018). Özellikle dual phase (DP) ve complex phase (CP) çeliklerin kullanımı sayesinde daha düşük sac kalınlıklarıyla eşdeğer dayanım performansı elde edilebilmektedir. Bununla birlikte malzeme dayanımının artması; form verme limitleri, kaynak kabiliyeti ve yorulma davranışı açısından yeni mühendislik zorluklarını beraberinde getirmektedir.

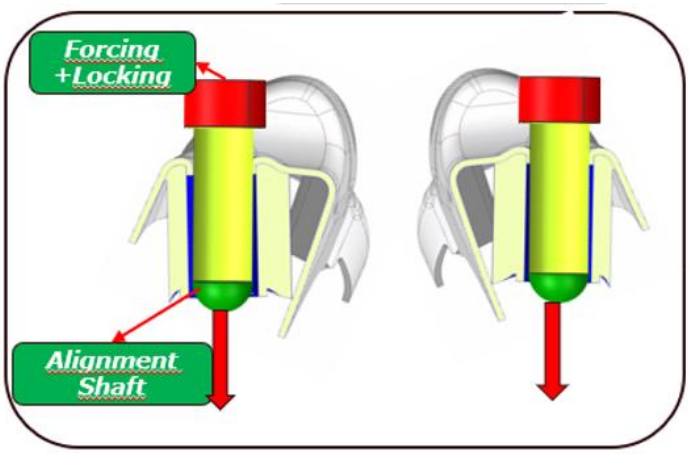
RTB sistemlerinin geliştirilmesinde üretim prosesleri de kritik öneme sahiptir. Damgalama, roll forming, hidroform, lazer kaynak ve robotik MIG kaynak prosesleri beam performansını doğrudan etkileyebilmektedir. (Gillespie, 1992) Özellikle kaynak bölgelerinde oluşan artık gerilmeler ve lokal sertlik değişimleri yorulma ömrü açısından kritik hale gelmektedir. Bu nedenle modern OEM geliştirme süreçlerinde CAE destekli dayanım analizleri ile fiziksel test doğrulamaları birlikte yürütülmektedir. Günümüzde durability bench testleri, yol yükü verileri ve çok eksenli yorulma analizleri RTB validasyon süreçlerinin temel bileşenleri haline gelmiştir.

Elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte RTB mimarileri yeni gereksinimlere uyarlanmaktadır. Artan araç kütlesi nedeniyle daha yüksek dayanım ihtiyacı oluşurken, sessiz çalışan elektrik motorları nedeniyle NVH performansı da daha kritik hale gelmiştir. (Milliken & Milliken, 1995) Bu durum beam bağlantı burçlarının karakteristiklerinden kaynak geometrilerine kadar birçok parametrenin yeniden optimize edilmesini gerektirmektedir. Ayrıca ADAS sistemleri ve gelişmiş araç stabilite algoritmaları, süspansiyon elastokinematiğinin daha hassas kontrol edilmesini zorunlu hale getirmiştir.

Sonuç olarak Rear Twist Beam sistemleri, düşük maliyet, yüksek üretilebilirlik ve kabul edilebilir araç dinamiği performansını bir araya getirmesi nedeniyle modern otomotiv endüstrisinde önemini korumaktadır. Özellikle kompakt araç platformları ve elektrikli araç mimarilerinde RTB kullanımının artarak devam edeceği öngörülmektedir. Bu nedenle RTB tasarımında yapısal optimizasyon, hafifletme, dayanım geliştirme ve elastokinematik performans iyileştirmeleri üzerine yapılan çalışmalar hem akademik hem de endüstriyel açıdan kritik önem taşımaktadır. Bununla birlikte RTB sistemleri büyük ölçüde kaynaklı sac yapılardan oluştuğu için üretim prosesleri sistem performansı üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır. Özellikle MIG/MAG, lazer kaynak ve pres geçme gibi farklı birleştirme proseslerinde oluşabilecek kaynak nüfuziyet problemleri, lokal sertlik değişimleri, artık gerilmeler, geometrik sapmalar ve kaynak hataları; sistemin yorulma dayanımı açısından kritik zafiyetler oluşturabilmektedir. Bu tür lokal zayıflıklar, özellikle durability testleri ve gerçek yol yükleri altında çatlak başlangıcı ve ilerlemesi açısından yüksek risk oluşturmaktadır. Bu nedenle modern RTB geliştirme süreçlerinde yalnızca geometrik ve yapısal optimizasyon değil, aynı zamanda kaynak prosesi kontrolü, pres geçme operasyonundaki kuvvet-mesafe kontrolü çalışmaları da kritik mühendislik faaliyetleri haline gelmiştir.

2.YÖNTEM

Bu çalışmada incelenen temel komponentler, Rear Twist Beam (RTB) süspansiyon sistemine ait yan kol ve amortisör bağlantı burcu bileşenleridir. Amortisör bağlantı burcu, yan kol sacına pres geçme (sıkı geçme) yöntemi ile monte edilmekte olup, interferans miktarı ve montaj kuvveti gibi proses parametrelerine bağlıdır. Yan kol sacı üzerindeki delik çapı burcun çapından daha düşük bir değere sahiptir. Bu şekilde burç kuvvet ile yan kola presle sıkı geçerken burcu geri yaylanma etkisiyle delik içerisinde tutmaya yarayacak bir etek de oluşturmaktadır. Bu montajın kalitesi, RTB sisteminin yapısal bütünlüğü, yük transferi ve güvenlik performansını doğrudan etkilemektedir. Ayrıca bağlantı bölgesindeki gerilme dağılımı ve artık gerilmeler yorulma dayanımını, temas rijitliği ise NVH performansını belirleyen temel faktörlerdir. Bu nedenle pres geçme montaj parametrelerinin doğru tanımlanması ve kontrolü kritik öneme sahiptir.

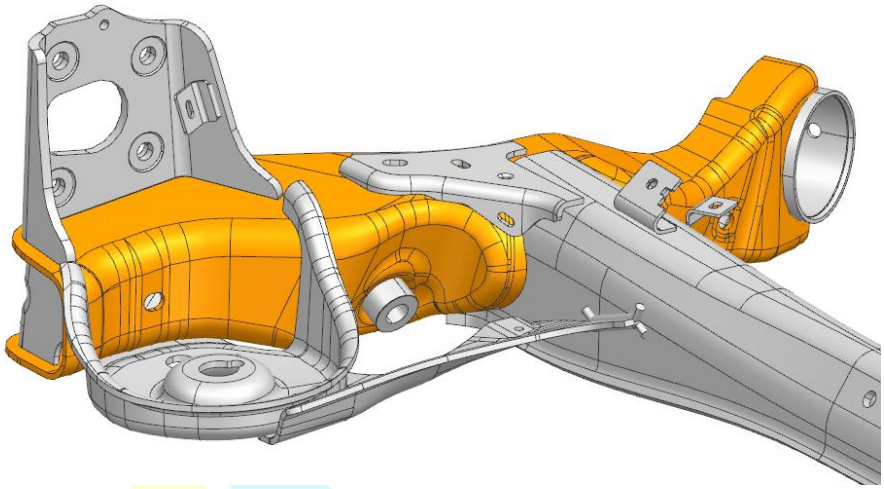


Şekil 3: *Yan kol sacı ve Amortisör burcu prosesi şematik gösterimi*

RTB sisteminin araç üzerindeki temel fonksiyonlarının yerine getirilmesinde yan kol parçası yapısal açıdan kritik bir görev üstlenmektedir. Bu yapı; tekerlek taşıyıcı grubu, amortisör bağlantısı, torsiyon kirişi bağlantısı ve gövde bağlantı burçları gibi birçok alt sistem ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle yan kol üzerinde gerçekleştirilen tasarım ve proses optimizasyonları, RTB sisteminin genel performansını doğrudan etkilemektedir.

Mevcut çalışma kapsamında tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirilen yan kol parçası, S420MC malzemeden imal edilen ve 4 mm sac kalınlığına sahip olup stamping prosesi ile üretilmektedir. Stamping prosesinin doğası gereği kesme kenarlarında oluşan yüzey bozuklukları ve düzensizlikler, lokal mikro çatlak başlangıçlarına zemin hazırlayabilmekte; bu durum dinamik yükler altında çatlak ilerlemesi ile RTB parçasının yorulma ömrünü olumsuz etkileyebilmektedir.

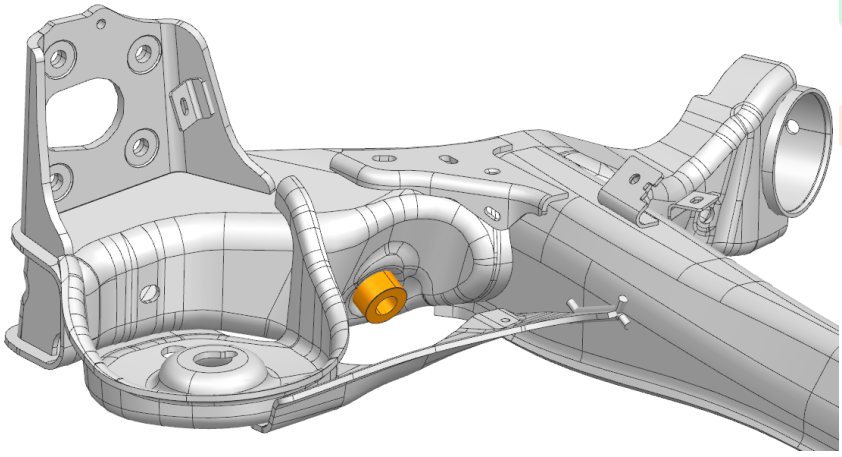
Bu nedenle, amortisör bağlantı burcunun sıkı geçme ile monte edileceği yüzeylerde oluşabilecek mikro çatlak riskini azaltmak amacıyla ilgili bölgelerde talaşlı imalat operasyonu uygulanmaktadır. Talaşlı imalat sonrası elde edilen nihai delik çapı, pres geçme sırasında gerekli montaj kuvvetini ve çalışma koşullarında burcun yerinden çıkmasını engelleyen minimum tutma kuvvetini sağlayacak şekilde belirlenmektedir. Bu kapsamda seri üretim koşulları dikkate alındığında, işleme operasyonlarına bağlı maliyet ve çevrim süresini minimize etmek amacıyla stamping prosesi ile elde edilen ham delik çapı değeri kritik bir tasarım parametresi olarak öne çıkmaktadır.



***Şekil 4**: Yan kol parçası*

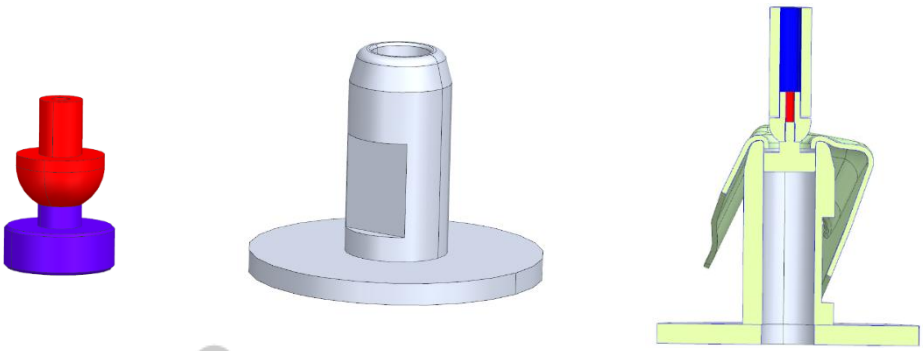
Amortisör bağlantı burcu, amortisör sistemini Rear Twist Beam (RTB) yapısına bağlayan kritik bir bağlantı elemanıdır. Amortisör, araç yaylanan kütlesinin kontrol edilmesi, titreşimlerin sönümlenmesi ve sürüş konforunun sağlanması açısından süspansiyon sisteminin temel bileşenlerinden biridir. Bu nedenle amortisör bağlantı bölgesi, araç yol tutuşu ve konfor performansı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir.

Amortisör bağlantı burcu; dikey yükler ve çok eksenli dinamik kuvvetler altında çalışan, yüksek yorulma dayanımı gerektiren kritik bir yapıdır. Ayrıca bağlantı bölgesindeki rijitlik karakteristiği, süspansiyon sisteminin genel dayanım ve dinamik davranışını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle burcun çapı, yüzey pürüzlülüğü ve sertliği, malzeme özellikleri RTB performansı açısından büyük önem taşımaktadır.



***Şekil 5:** Amortisör burcu parçası*

Burç sıkı geçme operasyonunda, aparat tasarımları da proses ve montajlı ürün üzerindeki etkisi oldukça yüksektir. Özellikle alt ve üst aparat delik çapları, radyus değerleri prosesi presleme kuvvetini etkilemekte olup ayrıca yan kol sacında presleme sonrası oluşacak dip radyus değerini belirlemektedir. Bu radyus değeri de RTB parçasının yorulma ömrünü etkileyebilmektedir.

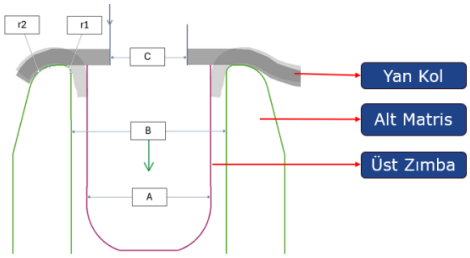


a) b) c)

***Şekil 6**: Montaj prosesi aparatları a)Üst zımba b)Alt Matrisi c)Montaj prosesi kesiti*

Yapılan çalışma kapsamında, fiziksel deneme süreçlerinde oluşabilecek zaman ve maliyet kayıplarını minimize etmek ve malzeme davranışını öngörebilmek amacıyla öncelikle AutoForm kullanılarak ön analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Analizlerde alt radyus değeri ve yan kol sacına ait stamping prosesi ön delik çapı sabit kabul edilmiştir. Farklı üst zımba dış çapı ve alt matris iç çapı kombinasyonları için gerçekleştirilen analizlerde; Contact Distance (temas miktarı), Edge Cracks (kenar çatlakları) ve Thinning (incelme) kriterleri detaylı olarak incelenmiştir.

Kombinasyon	Üst Zımba Dış Çap (A) (mm)	Alt Matris İç Çap (B) (mm)	Ön Delik Çapı (C) (mm)	Alt Matris Ön radiüs(r1)	Alt Matris Arka radiüs(r2)
1	31	38	20	5	6
2	31	38,5	20	5	6
3	31	39	20	5	6
4	30,8	38	20	5	6
5	30,8	38,5	20	5	6
6	30,8	39	20	5	6



Tablo 1: Zımba ve Matris çap kombinasyonları

AutoForm analiz sonuçlarına göre belirlenen iki farklı delik çapı değeri için, ZwickRoell test makinesinde pres geçme denemeleri gerçekleştirilmiştir. Denemeler sonrasında yan kol sacına ait delik yüzey pürüzlülüğü, etek radyus değeri, montaj kuvveti ve nihai çap değerleri değerlendirilmiş; optimum kuvvet-sehim davranışı ile seri üretim gereksinimlerini karşılayan parametreler uygun proses kriterleri olarak kabul edilmiştir.

3.BULGULAR

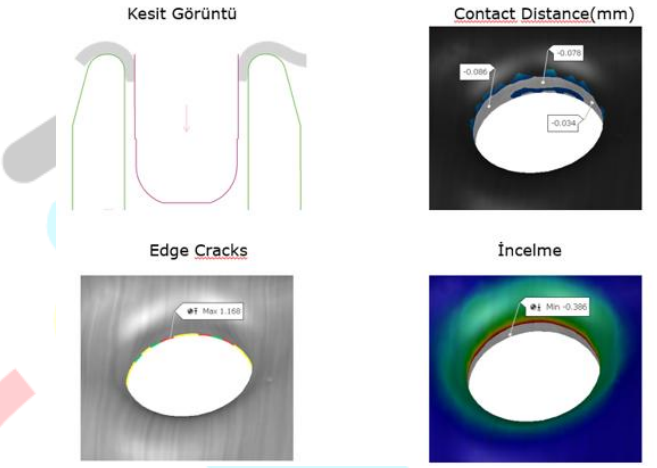
Çalışma kapsamında, amortisör bağlantı burcunun yan kol sacına pres geçme montaj prosesi kapsamında gerçekleştirilen sayısal analiz ve fiziksel doğrulama çalışmaları değerlendirilmiştir.

Autoform analizinde, İki farklı üst zımba dış çapı için 3 farklı alt matris iç çapı için analiz gerçekleştirilmiştir. Ön delik çapı 20mm olarak, alt matris radyüs 5mm ve alt matris arka radyüs değeri 6mm olarak göz önünde bulundurulmuştur. Bu kapsamda;

Kombinasyon

Analiz sonucu, Contact Distance değeri -0,09mm, Edge crack maksimum değeri 1,168mm İncelme minimum değeri de -0,386 olarak elde edilmiştir.

Kombinasyon	Üst Zımba Dış Çap (A) (mm)	Alt Matris İç Çap (B) (mm)	Ön Delik Çapı (C) (mm)	Alt Matris Ön radiüs(r1)	Alt Matris Arka radiüs(r2)
1	31	38	20	5	6

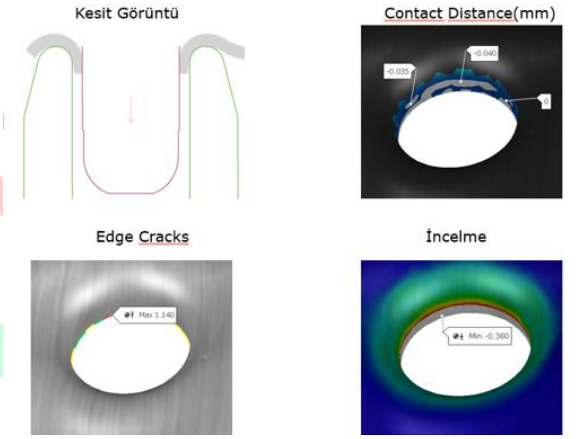


***Şekil 7**: 31mm Zımba çapı, 38mm Matris çapı için Autoform analizi sonucu*

2.Kombinasyon

Analiz sonucu, Contact Distance değeri -0,04mm, Edge crack maksimum değeri 1,14mm İncelme minimum değeri de -0,38 olarak elde edilmiştir.

Kombinasyon	Üst Zımba Dış Çap (A) (mm)	Alt Matris İç Çap (B) (mm)	Ön Delik Çapı (C) (mm)	Alt Matris Ön radiüs(r1)	Alt Matris Arka radiüs(r2)
2	31	38,5	20	5	6

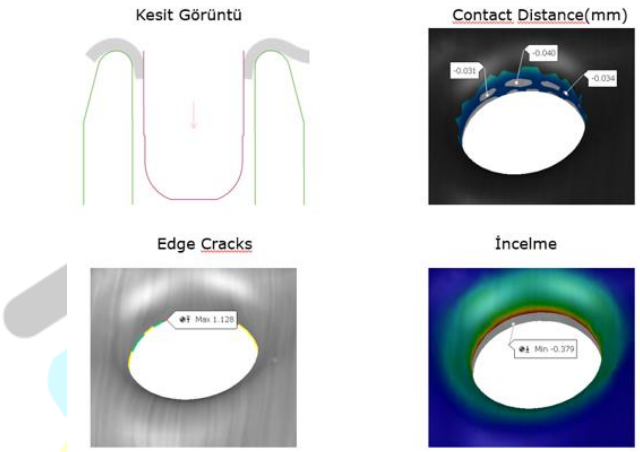


***Şekil 8**: 31mm Zımba çapı, 38.5mm Matris çapı için Autoform analizi sonucu*

3.Kombinasyon

Analiz sonucu, Contact Distance değeri -0,04mm, Edge crack maksimum değeri 1,128mm İncelme minimum değeri de -0,379 olarak elde edilmiştir.

Kombinasyon	Üst Zımba Dış Çap (A) (mm)	Alt Matris İç Çap (B) (mm)	Ön Delik Çapı (C) (mm)	Alt Matris Ön radiüs(r1)	Alt Matris Arka radiüs(r2)
3	31	39	20	5	6

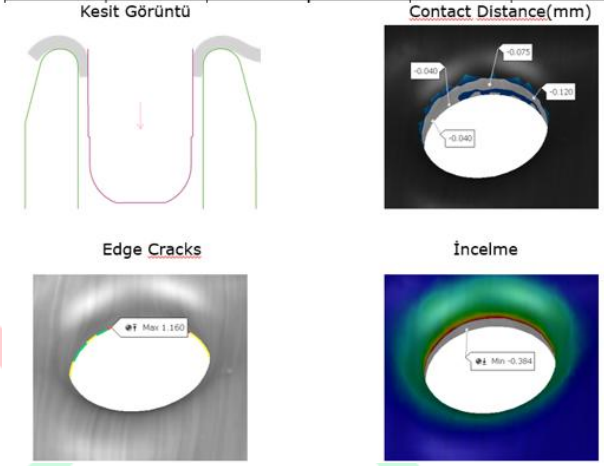


***Şekil 9**: 31mm Zımba çapı, 39mm Matris çapı için Autoform analizi sonucu*

4.Kombinasyon

Analiz sonucu, Contact Distance değeri -0,12mm, Edge crack maksimum değeri 1,16mm İncelme minimum değeri de -0,384 olarak elde edilmiştir.

Kombinasyon	Üst Zımba Dış Çap (A) (mm)	Alt Matris İç Çap (B) (mm)	Ön Delik Çapı (C) (mm)	Alt Matris Ön radiüs(r1)	Alt Matris Arka radiüs(r2)
4	30,8	38	20	5	6

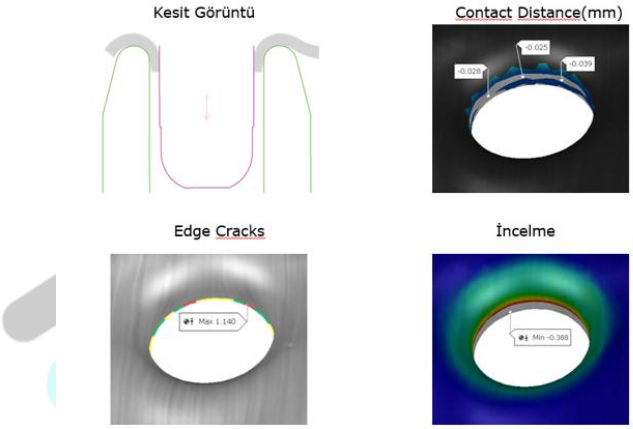


***Şekil 10**: 30.8mm Zımba çapı, 38mm Matris çapı için Autoform analizi sonucu*

5.Kombinasyon

Analiz sonucu, Contact Distance değeri -0,04mm, Edge crack maksimum değeri 1,14mm İncelme minimum değeri de -0,388 olarak elde edilmiştir.

Kombinasyon	Üst Zımba Dış Çap (A) (mm)	Alt Matris İç Çap (B) (mm)	Ön Delik Çapı (C) (mm)	Alt Matris Ön radiüs(r1)	Alt Matris Arka radiüs(r2)
5	30,8	38,5	20	5	6

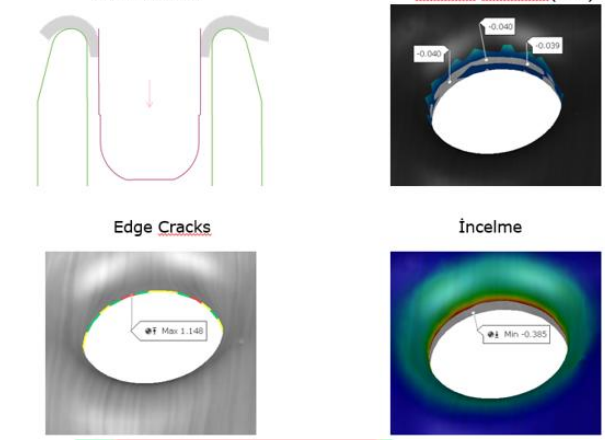


***Şekil 11**: 30.8mm Zımba çapı, 38.5mm Matris çapı için Autoform analizi sonucu*

6.Kombinasyon

Analiz sonucu, Contact Distance değeri -0,04mm, Edge crack maksimum değeri 1,148mm İncelme minimum değeri de -0,385 olarak elde edilmiştir.

Kombinasyon	Üst Zımba Dış Çap (A) (mm)	Alt Matris İç Çap (B) (mm)	Ön Delik Çapı (C) (mm)	Alt Matris Ön radiüs(r1)	Alt Matris Arka radiüs(r2)
6	30,8	39	20	5	6



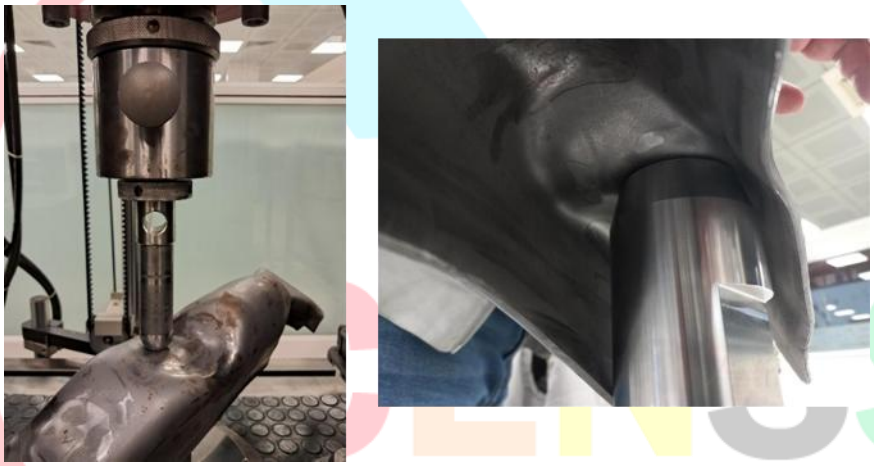
***Şekil 12**: 30.8mm Zımba çapı, 39mm Matris çapı için Autoform analizi sonucu*

AutoForm analiz sonuçları incelendiğinde Contact Distance değerinin çoğunlukla değişiklik göstermediği tespit edilmiştir. Edge Crack ve Thinning değerleri göz önüne alındığında Kombinasyon 2 ve Kombinasyon 3 fiziksel test için değerlendirilmiştir.

Kombinasyon	Üst Zımba Dış Çap (A) (mm)	Alt Matris İç Çap (B) (mm)	Contact Distance	Edge Cracks	Thinning
1	31	38	-0.09	1.17	-0.39
2	31	38.5	-0.04	1.14	-0.38
3	31	39	-0.04	1.13	-0.38
4	30.8	38	-0.12	1.16	-0.38
5	30.8	38.5	-0.04	1.14	-0.39
6	30.8	39	-0.04	1.5	-0.38

Tablo 2: *AutoForm analizi sonuçları*

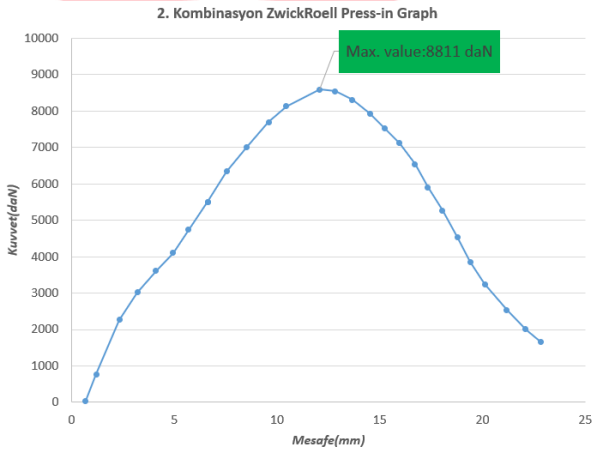
Fiziksel doğrulama çalışmaları kapsamında, AutoForm analizlerinde kullanılan aparat geometrilerine uygun test ekipmanları üretilmiştir. Çalışmada 31 mm dış çapa sahip üst zımba kullanılmış olup, alt matris için ise 38,5 mm ve 39 mm iç çapa sahip iki farklı aparat tasarımı değerlendirilmiştir. Fiziksel pres geçme testleri, ZwickRoell pres test makinesinde belirlenen sabit hız koşullarında gerçekleştirilmiş ve proses boyunca oluşan kuvvet-sehim davranışı grafiksel olarak kayıt altına alınarak analiz edilmiştir.



Şekil 13*: ZwickRoell ile montaj denemesi*

2.Kombinasyon

Pres operasyonu sonucu maksimum çakma yükü 8811 daN olarak elde edilmiştir.



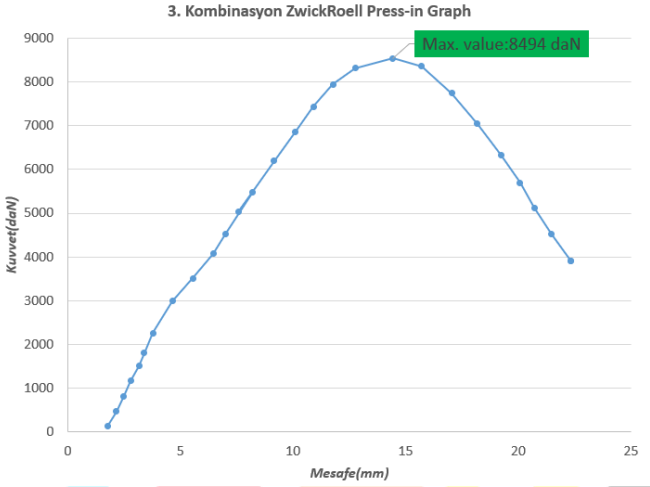
Şekil 14*: 2.Kombinasyon için ZwickRoell ile montaj denemesi yük grafiği*

Etek uç kısımlarının radyüsleri oldukça küçük olup yüzey durumu incelendiğinde ise gözle görülür şekilde çatlaklar gözlemlenmiştir.

***Şekil 15**: 2.Kombinasyon için ZwickRoell ile montaj denemesi sonrası delik yüzeyi*

3.Kombinasyon

Pres operasyonu sonucu maksimum çakma yükü 8494 daN olarak elde edilmiştir



***Şekil 16**: 3.Kombinasyon için ZwickRoell ile montaj denemesi yük grafiği*

Etek uç kısımları yüzey durumu ve kenar radyüsleri incelediğinde herhangi bir olumsuzluk gözlemlenmemiştir.

***Şekil 17**: 3.Kombinasyon için ZwickRoell ile montaj denemesi sonrası delik yüzeyi*

4.SONUÇ VE TARTIŞMA

Sonuç olarak bu çalışma kapsamında, RTB yan kol parçası ile amortisör bağlantı burcu arasındaki sıkı geçme pres operasyonuna ait kritik proses parametreleri belirlenmiş ve bu parametrelerin montaj prosesi ile montajlı ürün performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle zaman ve maliyet kayıplarını minimize etmek amacıyla farklı çap kombinasyonlarına sahip aparat tasarımları oluşturulmuş ve bu tasarımlar için AutoForm analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sırasında burç presleme prosesi boyunca ve sonrasında yan kol deliği çevresinde oluşan Thinning (incelme), Edge Crack (kenar çatlakları) ve Contact Distance (temas miktarı) davranışları değerlendirilmiştir.

Altı farklı çap kombinasyonu için gerçekleştirilen analizler sonucunda, incelme ve kenar çatlağı değerlerinin daha düşük olması nedeniyle Kombinasyon 2 ve Kombinasyon 3 aparat geometrileri fiziksel doğrulama çalışmaları için uygun bulunmuştur. Belirlenen aparat geometrileri üretilmiş ve ZwickRoell pres test sistemi kullanılarak sabit hız koşullarında presleme operasyonları gerçekleştirilmiştir. Presleme süreci boyunca kuvvet-sehim grafikleri takip edilmiş ve maksimum presleme kuvvetleri kayıt altına alınmıştır.

Presleme operasyonu sonrasında gerçekleştirilen yüzey incelemeleri, çatlak oluşumları ve etek bölgelerinde meydana gelen radyüs geometrileri birlikte değerlendirildiğinde, Kombinasyon 3 aparat ölçülerinin hem proses kararlılığı hem de montajlı ürün kalitesi açısından optimum sonuç verdiği belirlenmiştir. Bu doğrultuda ilgili aparat geometrisinin seri üretim koşulları için uygun proses parametresi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

5.KAYNAKÇA

Leal, V., Landre, J., & Bitencourt, R. (2007). *Twist beam rear suspension: Influences of the cross section member geometry in the elastokinematics behavior*. SAE Technical Paper 2007-01-2860. SAE International. https://doi.org/10.4271/2007-01-2860

Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of vehicle dynamics*. SAE International.

Milliken, W. F., & Milliken, D. L. (1995). *Race car vehicle dynamics*. SAE International.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). Wiley.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Impact Analysis of Euro 7 Emission Regulations on Vehicle System Architecture & Integration

Mert DONMEZ[1]
Burak BEKTAS [2]
Erhan YAMAN [3]

Abstract

The number of motor vehicles and the associated environmental pollution continue to increase worldwide. In order to reduce the harmful effects of vehicle emissions on both the environment and human health, emission regulations introduced with Euro 1 in 1992 have gradually become more stringent through subsequent standards such as Euro 5 and Euro 6.

The Euro 7 regulation establishes a new framework for the type approval of road vehicle emissions within the European Union. Unlike previous regulations that mainly focused on tailpipe emissions, Euro 7 introduces a broader technical scope that includes brake particle emissions, tire wear emissions, stricter durability requirements, and lifetime emission monitoring. With the publication of Regulation (EU) 2024/1257 on 8 May 2024, Euro 7 brings light-duty and heavy-duty vehicles under a unified regulatory framework while emphasizing the on-board monitoring (OBM) concept to ensure vehicles remain environmentally compliant throughout their operational life. According to the European Commission, the regulation introduces new requirements covering exhaust emissions, brake emissions, and battery durability, while also requiring that emissions be monitored through onboard sensors over the vehicle lifecycle.

In this study, the impacts of Euro 7 requirements on vehicle architectural integration are investigated by analyzing the changes introduced in vehicle components and subsystems. The analysis focuses on subsystems that directly affect vehicle architecture under Euro 7, including engine control architecture, exhaust and aftertreatment layout, evaporative emission systems.

[1] Makine Mühendisi, Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0003-9346-6888
[2] Makine Mühendisi, Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0001-9983-8828
[3] Mühendislik Uzmanı :Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0001-5219-9205

1.Introduction

Road transportation has become one of the most critical transformation areas of the automotive sector in terms of air quality and sustainability goals. The increase in the number of vehicles, urbanization, the widespread use of different powertrain systems, and the growing importance of environmental impacts throughout the entire service life of vehicles have also expanded the scope of emissions legislation. Within this framework, Euro 7 goes beyond being a regulation that merely limits tailpipe emissions and introduces a new approach that also covers different technical areas such as brake particle emissions, tire wear-related emissions, and battery durability. In addition, the treatment of light-duty and heavy-duty vehicles within a single legal framework shows that the regulation has gained a structure that creates not only environmental but also system-level engineering impacts. In fact, the impact of emissions legislation on vehicle architecture is not a new phenomenon. Previously, in diesel passenger cars, EGR (Exhaust Gas Recirculation) systems first began to be widely used in order to achieve the nitrogen oxide limits defined by the environmental committees of the European Union. However, since the EGR system alone was not sufficient to meet Euro 6 limits, manufacturers were also forced to implement the SCR (Selective Catalytic Reduction) system, which was a more costly but more effective solution. With the implementation of SCR, new electronic components such as the SCR sensor, NOx inlet and outlet sensors, particle sensor, temperature sensors, and AdBlue level sensor were added to vehicles; in addition, new auxiliary system elements such as the urea coolant pump and urea coolant pipes were also incorporated into the vehicle architecture. In addition, extra parts such as the urea filler pipe, urea fluid tank, and urea transfer pipes directly affected the fuel system architecture in particular. Although, within the scope of Euro 6, more functional changes within the catalyst came to the forefront with SCR and no major transformation occurred in the geometry of the exhaust system, the effects such as increased cost, the need for an additional tank, and the extra package volume occupied on the vehicle clearly demonstrated how decisive emissions regulations can be on vehicle architecture. (Council of the European Union, 2026)

The expanding scope of Euro 7 reveals that, in vehicle development processes, the issue of emissions can no longer be considered merely as a subsystem problem belonging only to the engine and exhaust line. The regulation directly affects vehicle architecture through its requirements for emission monitoring systems, sensor infrastructure, data tracking, control of brake- and tire-related emissions, and the preservation of battery performance over a certain lifetime. This situation creates new engineering needs in areas such as packaging decisions, electrical-electronic architecture, thermal management, wiring harness layout, and integration between subsystems. In particular, the technical approach that strengthens the logic of monitoring and verification throughout the vehicle lifetime transforms Euro 7 from a conventional limit-value regulation into a multidisciplinary framework that guides the vehicle design process. (European Parliament and Council, 2024)

This study aims to examine the possible effects of Euro 7 regulations on vehicle architecture and system integration directly based on the content of the legislation itself. Thus, it attempts to reveal how Euro 7 creates a transformation not only in terms of environmental compliance but also in terms of the design logic of future vehicle platforms. In this context, the

study evaluates the relationship between the technical scope of the regulation and engineering practices from a holistic perspective. (European Commission, 2025)

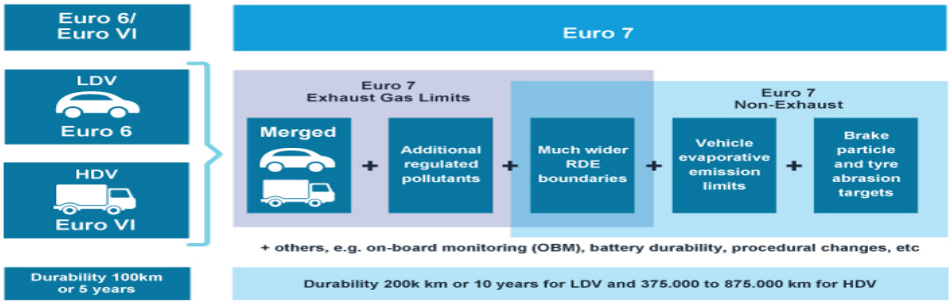


Figure 1. Main scope of the Euro 7 regulation

(Infineum. (2023, July 18). Euro 7 emission standards. Infineum Insight.)

2.Method

2.1. Effects of Euro 7 Requirements on Vehicle Systems and Packaging

Unlike previous emission standards, the Euro 7 regulation presents a holistic approach that covers not only tailpipe emissions but also brake particle emissions, evaporative emissions, durability requirements, and the monitoring of emissions throughout the vehicle lifetime (European Commission, 2023) (ICCT, 2023). These comprehensive requirements make it necessary both to add new components to vehicle subsystems and to redesign existing systems. In particular, the goal of ensuring emission control under real driving conditions and over a long service life creates direct impacts on vehicle architecture and packaging. In this section, the engineering effects of the Euro 7 regulation on major vehicle systems and the packaging-related consequences of these effects are examined.

2.1 Exhaust and Aftertreatment System

With the Euro 7 regulation, lower emission limits are targeted under a wider range of operating conditions. This makes it necessary for exhaust gas aftertreatment systems to activate more quickly and operate with higher efficiency. In particular, the reduction of emissions under cold-start conditions requires aftertreatment systems to be positioned closer to the engine outlet. In addition, ensuring emission control under real driving conditions (RDE) makes both the thermal and functional performance of these systems critical (European Commission, 2023) (ICCT, 2023).

Within this scope, the following technological solutions come to the forefront:

- Close-coupled catalysts positioned closer to the engine
- Additional SCR (Selective Catalytic Reduction) systems
- GPF (Gasoline Particulate Filter) and advanced DPF solutions

These changes create significant effects in terms of vehicle packaging. While an increase in volume and mass occurs in the exhaust line, layout density in the underbody region increases and high-temperature zones expand. Accordingly, the need for heat shields increases and thermal management becomes more critical. In addition, positioning aftertreatment systems closer to the engine creates new integration challenges in the engine compartment packaging

area (Grigoratos & Martini , 2015). This situation shows that exhaust and aftertreatment systems are no longer merely emission control components, but have become critical design elements that determine vehicle architecture and packaging strategies.

2.2 NOx Sensors and the OBM (On-Board Monitoring) System

With the Euro 7 regulation, the monitoring of emissions throughout the vehicle lifetime has become mandatory. This approach aims to control not only instantaneous emission values but also system performance throughout the entire service life. For this reason, the following solutions emerge, such as the use of more sensors along the exhaust line and the requirement for an advanced diagnostic infrastructure (JRC, 2023).

- NOx sensors positioned upstream and downstream
- Additional temperature and pressure sensors

These changes create significant effects in terms of vehicle packaging. The increasing number of sensors increases wiring harness complexity and makes sensor placement more difficult, especially in high-temperature regions. Additional engineering solutions are required to protect the sensors from environmental effects such as thermal load, vibration, and contamination. In addition, the increasing data requirement creates a need for higher processing capacity in the electrical/electronic architecture (Bosteels et al., 2021).

According to studies by the International Council on Clean Transportation (ICCT, 2023), OBM requirements significantly increase vehicle system integration and create new design challenges, especially in sensor placement and data management.

This situation shows that emission monitoring systems are no longer merely a control function, but have become a critical integration element that directly affects vehicle architecture.

2.3 Evaporative Emission System (Canister and Fuel Lines)

With the Euro 7 regulation, evaporative emission limits have been further tightened, and more effective control of fuel vapor emissions has become mandatory. This situation requires the redesign of fuel system components, especially in terms of sealing performance and vapor storage capacity (Weiss et al., 2022).

Within this scope, the following technological solutions come to the forefront:

- Larger-volume activated carbon canisters and improved fuel tank ventilation systems
- Fuel pipes and connection elements with lower permeability

These changes create significant effects in terms of vehicle packaging, especially in the rear underbody region. The increase in canister volume creates a need for additional package space in existing layout areas, while also potentially causing layout conflicts with the fuel tank and suspension components. In addition, the more complex routing required for fuel pipes creates additional challenges in terms of both assembly and service. These effects become more pronounced especially in compact vehicle platforms (Weiss et al., 2022).

According to SAE International literature, the tightening of evaporative emission requirements significantly increases packaging constraints, especially in small-segment vehicles, and makes system integration more critical (SAE, 2020).

This situation shows that evaporative emission systems are no longer merely an auxiliary system, but have become one of the fundamental packaging parameters that define the rear vehicle architecture.

2.4 Cooling System (Radiator and Thermal Management)

Although the Euro 7 regulation does not directly define a cooling system limit, it makes the thermal management performance of vehicles critical due to increased aftertreatment temperatures, stricter emission control requirements, and extended durability targets (Grigoratos & Martini, 2015). In particular, the operation of exhaust gas aftertreatment systems at higher temperatures and for longer durations causes an increase in thermal loads on the engine and surrounding components.

Within this scope, the following technological solutions come to the forefront:

•Higher-performance or larger-volume radiators

•Advanced cooling module designs

•Active air management systems (Active Grille Shutter – AGS)

• Improved air duct / air guide solutions

These changes create significant effects in terms of vehicle packaging, especially in the Front End Module (FEM) region. The increased radiator volume and airflow requirement may lead to conflicts with aerodynamic performance and pedestrian safety requirements. In addition, rising thermal loads require additional heat shields and insulation solutions, which further increase system density.

In the literature, especially in studies related to Euro 7 and similar regulations, it is emphasized that thermal management has taken on a central role in vehicle architecture and that cooling systems have become not only supportive but also determining design elements (Bosteels et al., 2021).

This situation shows that cooling systems are no longer only performance-oriented, but have also become one of the main determinants of emission compliance and packaging optimization.

2.5 Brake System and Particulate Emissions

One of the most important innovations of the Euro 7 regulation is that brake-related particulate emissions are included within the scope of the regulation for the first time. This approach reveals that the environmental effects of non-exhaust emissions must also be taken into account and makes radical engineering changes in brake systems necessary (SAE International, 2020). Within this scope, the following technological solutions come to the forefront:

• Low-wear brake pad materials (Non-Asbestos Organic – NAO)

• Coated brake discs (for example, tungsten carbide or TiC coating)

• Pad retraction systems (AST – Active Pad Release)

• Low-friction and optimized caliper designs

These changes directly affect mechanical system layout in terms of vehicle packaging. While coated discs and new pad materials change the thermal behavior of the system, pad retraction mechanisms increase caliper volume and require the integration of additional components. In addition, in some concepts, the integration of brake dust collection systems is also coming to the agenda, creating new constraints in the in-wheel and wheel-surrounding packaging area.

According to studies published by the Joint Research Centre (JRC, 2023), the control of brake particulate emissions creates a new engineering parameter in vehicle design and requires optimization at the system level.

This situation shows that brake systems are no longer merely safety-oriented components, but have become multifunctional systems that directly affect emission performance and vehicle architecture.

2.6 Diesel Systems and Additional Aftertreatment Requirements

The Euro 7 regulation defines NOx emission limits for diesel vehicles in particular at stricter levels and under a wider range of operating conditions. This situation causes exhaust gas aftertreatment systems to become more complex and leads to the integration of additional components into the system (JRC, 2023).

Within this scope, the following technological solutions come to the forefront:

• Advanced and multi-stage SCR systems

• Additional Ammonia Slip Catalyst (ASC) integration

• More precise NOx control strategies

These changes create serious effects in terms of vehicle packaging, especially in the underbody region. The increase in the number and volume of systems raises layout density along the exhaust line and causes integration challenges on existing platforms. In addition, the placement of the AdBlue tank and related components creates a need for additional package volume in vehicle architecture.

According to ICCT (2023) reports, with Euro 7, emission control systems in diesel vehicles are becoming more complex, and this situation creates serious packaging constraints, especially on compact vehicle platforms.

This situation shows that emission compliance in diesel vehicles is possible not only by adding systems, but also by re-optimizing vehicle architecture.

2.7 Electrical/Electronic (E/E) Architecture

With the Euro 7 regulation, the increasing number of sensors and the requirement for continuous data monitoring bring significant changes to the electrical/electronic architecture of vehicles. In particular, OBM requirements make it necessary to increase data collection, processing, and storage capacity (Bosteels et al., 2021).

Within this scope, the following technological solutions come to the forefront:

• ECU systems with higher processing capacity

• Advanced diagnostic and software infrastructures

• Increased sensor-data integration

These changes cause an increase in wiring harness length and complexity in terms of vehicle packaging. In addition, new constraints arise in ECU placement, and more optimized architectures are required for data communication between systems.

According to the studies of Weiss et al. (2022), future emission regulations directly affect the E/E architecture of vehicles and make more integrated and data-driven system designs necessary.

This situation shows that the E/E architecture is no longer merely a supporting system, but has become a structure located at the center of vehicle architecture and in direct interaction with all other systems.

3.Result and Discussion

With the Euro 7 regulation, vehicle integration activities have become a critical engineering activity not only in terms of component placement but also in terms of system integration, thermal management, and emission compliance. The Euro 7 regulation creates significant constraints on vehicle architecture due to increased system complexity, thermal loads, and continuous emission monitoring requirements. For this reason, integration activities should be addressed in the earlier phases of the vehicle development process and be considered as a fundamental design and integration input. The main changes in systems and their effects on vehicle architecture during the transition from Euro 6 to Euro 7 are compared in detail below.

Area on the Vehicle	€7 Effect	Result
Engine Bay	Close Coupled Catalist	Thermal Risk Increase
Underbody	SCR & Sensor count	İnstallation Density
Underbody Rear Zone	Big Canister	Integration Difficulty
Wheel Envelope Area	Brake Emmision	Wheel Envelope Changing
FEM	Cooling Necessity	Air Flow Optimization

Table-1– Euro 7 Critical Architecture Effect

Parameter	Euro 6	Euro 7
Catalyst volume	High	High
Sensor count	Low	High
Exhaust temperature	Medium	High
Heat shield need	Medium	High
Underbody diversity	Medium	Very High
Wiring complexity	Medium	High
Integration difficulty	Medium	Very High

Table 2- Euro 6 vs Euro 7 Packaging Effect Analysis

System	Euro 6 approach	Euro 7 requirement	Architectural impact
Aftertreatment	Standard catalyst + DPF/GPF	Close-coupled catalyst + additional SCR + ASC	Increased density in engine bay and underbody
NOx monitoring	Limited sensors	Lifetime emission monitoring	Wiring complexity and sensor integration constraints
Evaporative system	Standard canister	Larger capacity canister	Additional rear packaging volume requirement
Cooling system	Performance oriented	Emission durability oriented	Higher density in FEM and cooling stack
Brake system	Safety oriented	Brake particle emission control	Wheel envelope constraints
Diesel aftertreatment	Single SCR	Multi-stage SCR + ASC	Increased underbody packaging demand
E/E architecture	Conventional ECU structure	Continuous monitoring	Wiring and ECU installation necessity

Table 3- Euro 6 vs Euro requirement and Effect on Vehicle Architecture

4. Conclusion

Within the scope of this study, the effects of the Euro 7 emission regulation on vehicle systems and vehicle architecture have been evaluated. The analyses carried out showed that Euro 7 directly affects not only emission performance in vehicle development processes but also system integration, thermal management, and vehicle architecture decisions. The main findings obtained are as follows• Euro 7 increases vehicle system complexity. This situation creates difficulties for automobile manufacturers, especially in the adaptation of Euro 7 to existing vehicle architecture.

It requires the adoption of new approaches for emission requirements in new vehicle architectures and platforms.

• Integration density increases significantly. In this case, integration engineering and benchmark studies play an important role.

• Thermal management has become a critical design input. In this case, the need to minimize the difficulties arising in design and integration through new and durable materials has emerged.

• It has been observed that integration engineering needs to be considered as one of the most important parts of architectural decisions.

REFERENCES

Council of the European Union. (2026). Road transport. Consilium.

European Parliament and Council of the European Union. (2024, Nisan). Regulation (EU) 2024/1257 on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units with respect to emissions and battery durability (Euro 7). Official Journal of the European Union.

European Commission. (2025). Commission Implementing Regulation (EU) 2025/1707 laying down rules for the application of Regulation (EU) 2024/1257. EUR-Lex.

European Commission. (2023). Euro 7 emission standards for cars, vans, lorries and buses. Brussels.

International Council on Clean Transportation (ICCT). (2023). Overview and analysis of the Euro 7 proposal for light-duty vehicles. Washington, DC.

Joint Research Centre (JRC), European Commission. (2023). Non-exhaust emissions from road transport: brake and tyre wear. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

SAE International. (2020). Evaporative emissions control systems: design and testing. SAE Technical Paper Series.

Weiss, R., Bonnel, A., & Hagemann, M. (2022). On-board monitoring systems for future emission regulations. SAE Technical Paper 2022-01-XXXX.

Bosteels, T., May, A., & Favre, J. (2021). Real driving emissions and future regulatory challenges. SAE International Journal of Engines, 14(3).

Grigoratos, M., & Martini, G. (2015). Brake wear particle emissions: a review. Environmental Science and Pollution Research, 22, 2491–2504.

6th International
Congress of Engineering and Natural
Sciences

Otomotiv Sızdırmazlık Elemanlarında Geri Dönüştürülebilir ve Biyo-Bazlı Malzeme Alternatiflerinin Çevresel Sürdürülebilirlik Açısından İncelenmesi

Eyüp KURTULUŞ

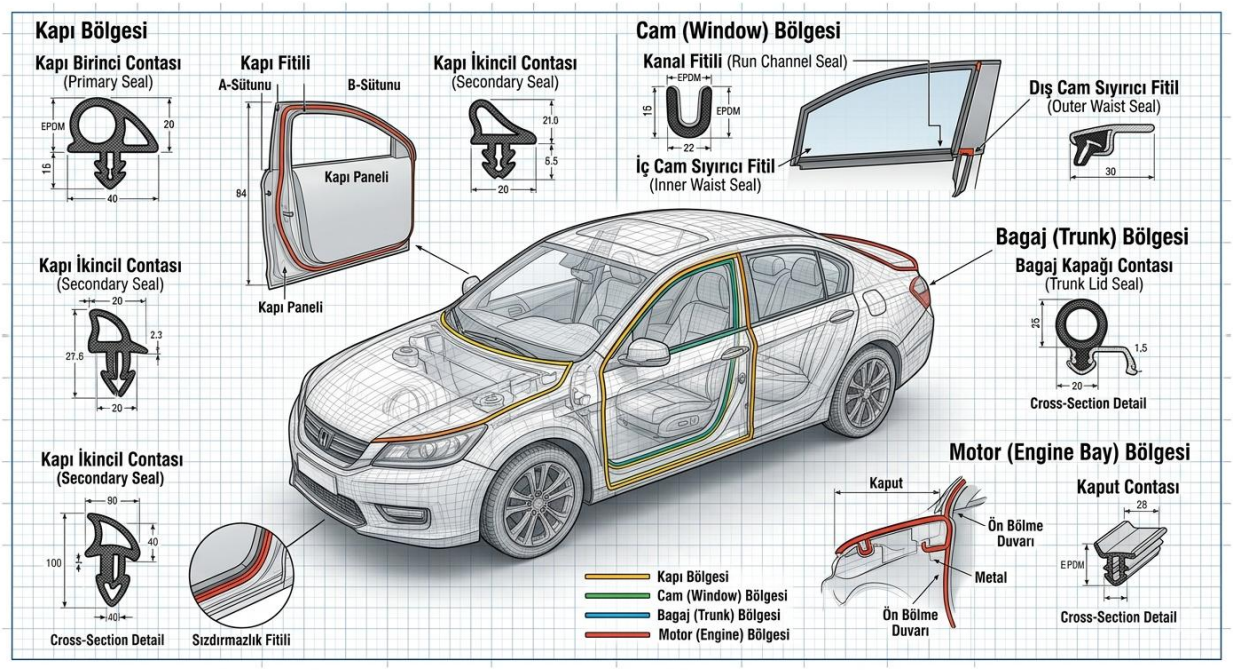
Abstract

Within the scope of combating the global climate crisis, the automotive industry is radically transforming its material supply chains in line with decarbonization policies. Weatherstrips, which provide sealing, noise, vibration, and harshness (NVH) insulation, and aerodynamic efficiency in vehicle bodies, are traditionally manufactured from petroleum-based thermoset EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) rubber, whose recyclability is highly limited. This study compares the technical, economic, and ecological aspects of utilizing alternative materials to conventional EPDM, including Thermoplastic Elastomers (TPE/TPV), recycled polymer-matrix composites, and bio-EPDM derived from agricultural biomass. Literature reviews conducted using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology reveal that the integration of bio-based monomers and thermoplastic phase transitions reduce raw material-induced greenhouse gas emissions by 30% to 50% and ensure circularity in end-of-life waste management.

Keywords: Automotive Weatherstrips, Bio-EPDM, Thermoplastic Elastomer, Circular Economy, Life Cycle Assessment (LCA).

1. GİRİŞ

Avrupa Birliği Ömrünü Tamamlamış Araçlar (ELV) direktifleri ve küresel net-sıfır emisyon hedefleri, modern taşıt imalatında kullanılan polimerik malzemelerin ekolojik ayak izinin düşürülmesini yasal bir zorunluluk haline getirmiştir (European Commission, 2000). Bir binek araçta konfor ve izolasyon parametrelerini optimize etmek amacıyla ortalama 15 kg sızdırmazlık profili (kapı, cam, bagaj ve motor bölgesi fitilleri) yer almaktadır (Williams & Zhao, 2018). Bu sızdırmazlık elemanlarının araç gövdesindeki stratejik dağılımı Şekil 1 üzerinde gösterilmektedir.



***Şekil 1** – Otomotiv Fitil Ürün Grubu Şematik Gösterimi*

Sektörde uzun yıllardır hâkim hammadde konumunda olan fosil kökenli EPDM kauçuk; üstün ozon, UV ve termal direnç karakteristiklerine tezat olarak, ömür sonu (End-of-Life) yönetimi en problemli mühendislik malzemelerinden biridir (Thomas & Schmidt, 2017). EPDM'in moleküler yapısında yer alan kalıcı kimyasal çapraz bağlar, malzemenin termal yöntemlerle yeniden eritilmesini ve işlenmesini engellemektedir; bu durum imalat firesi ve ömür sonu fitil atıklarının çok büyük bir kısmının katı atık depolama sahalarına gönderilmesine veya yakılmasına sebebiyet vermektedir (Kumar & Han, 2020).

Bu araştırma, söz konusu ekolojik bariyeri aşmak amacıyla geliştirilen döngüsel TPE dönüşümünü ve fosil kaynak bağımlılığını minimize eden modern biyo-kütle tabanlı biyo-EPDM teknolojilerini sürdürülebilirlik ekseninde incelemektedir.

2. GELENEKSEL EPDM MALZEMENİN YAPISAL VE ÇEVRESEL SINIRLARI

Termoset EPDM üretimi, doğrusal polimer zincirlerinin kükürt veya peroksit bazlı aracı maddeler eşliğinde, yüksek sıcaklık ve basınç altında vulkanize edilmesi prensibine dayanır (Akıncı & Yılmaz, 2019). Vulkanizasyon mekanizması, malzemeye otomotiv standartlarının temel şartı olan yüksek kalıcı deformasyon direncini (elastik toparlanma) kazandırırken, moleküler ağı geri dönüşümsüz olarak kilitler (Datta & Włoch, 2017).

Endüstriyel imalat aşamasında ortaya çıkan veya kullanım ömrünü tamamlayan EPDM hurdaları mekanik kırma yöntemleriyle toz haline getirildiğinde, en fazla asfalt katkısı veya zemin dolgusu gibi düşük katma değerli (down-cycling) alanlarda değerlendirilebilmektedir (Layer & Ostad-Ahmad-Ghorabi, 2018). Malzemenin yeniden orijinal teknik spesifikasyonlarda bir birincil otomotiv sızdırmazlık elemanına dönüştürülmesi mevcut teknolojilerle ekonomik ve teknik açıdan yapılabilir değildir (Kumar & Han, 2020). Ayrıca, tamamen ham petrol türevlerine dayalı hammadde sentezi, yüksek miktarda gömülü karbon emisyonunu beraberinde getirmektedir (Thomas & Schmidt, 2017). Tablo 1'de, standart EPDM malzemeler için tipik özellikler belirtilmiştir.

Tablo 1- *Otomotiv Sızdırmazlık Profillerinde Kullanılan Standart EPDM Bileşiklerinin Tipik Özellikleri*

Özellik	**Ölçüm Yöntemi / Birim**	**Tipik Değer Aralığı**	**Sızdırmazlık Açısından Önemi**
Sertlik (Hardness)	Shore A	50 – 80	Hava sızdırmazlığı ve kapanma kuvveti dengesi
Çekme Dayanımı	MPa (ISO 37)	8 – 15	Montaj ve kullanım esnasındaki yırtılma direnci
Kalıcı Deformasyon	%, 22sa @ 70°C	15 – 30	Uzun yıllar sonra bile ilk formuna dönüp sızdırmazlığı koruma yeteneği
Ozon Direnci	50 pphm, 40°C, 72sa	Çatlak Görülmez	Atmosferik yaşlanmaya karşı maksimum ömür
Yoğunluk (Sünger / Kompakt)	g/cm³	0.45 – 0.85 / 1.10 – 1.30	Araç hafifletme ve akustik yalıtım performansı

Sızdırmazlık profilleri genellikle iki ana kısımdan oluşur: Metal iskelet içeren ve gövdeye tutunmayı sağlayan "kompakt (yoğun) kısım" ve kapının kapanmasıyla esneyerek yalıtımı sağlayan "sünger (gözenekli) kısım". Sünger EPDM üretimi, formülasyona eklenen kimyasal şişirme aracı maddelerin (örneğin azodikarbonamid) ekstrüzyon hattı esnasında gaz açığa çıkarmasıyla sağlanır. Bu gözenekli yapı, malzemenin kalıcı deformasyon (compression set) performansına doğrudan bağlıdır. Eğer malzeme bası altında kaldıktan sonra eski formunu geri kazanamazsa, zamanla araç içerisine rüzgâr sesi (akustik sızıntı) ve su alımı gerçekleşir. Bu nedenle, sürdürülebilir alternatif malzemelerin de bu kalıcı deformasyon kriterini eksiksiz karşılaması gerekmektedir (Taylor ve ark.,2022).

3. SÜRDÜRÜLEBİLİR MALZEME ALTERNATİFLERİ

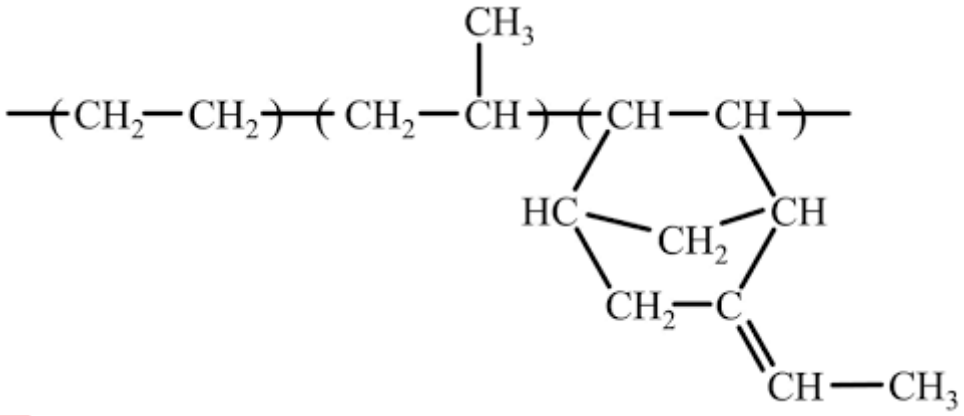
3.1. Termoplastik Elastomerler (TPE) ve Vulkanizatlar (TPV)

Termoplastik Vulkanizatlar (TPV), sürekli bir termoplastik faz (genellikle polipropilen) içerisine homojen olarak dağıtılmış mikron altı boyuttaki çapraz bağlı EPDM parçacıklarından oluşur (Rader, 2016). Bu hibrit yapı, kauçuğun esneklik avantajları ile termoplastiklerin enjeksiyon ve ekstrüzyon kolaylığını tek bir potada eritmektedir. Yapılarında kalıcı kimyasal

makro-bağlar bulunmadığı için, üretim esnasında oluşan tüm proses hurdaları kırılıp herhangi bir performans kaybı yaşanmaksızın %100 oranında ana imalat hattına geri beslenebilmektedir (Walker & Davis, 2021).

3.2. Biyo-Bazlı EPDM (Bio-EPDM) Teknolojisi

Sızdırmazlık performansından ödün vermeden karbon ayak izini düşürmeyi hedefleyen yeni nesil polimerizasyon teknolojileri, biyo-bazlı monomerlerin sentezini mümkün kılmıştır (Morschhaeuser & Jenkins, 2018). Konvansiyonel EPDM formülasyonunda hacimsel olarak en büyük paya sahip olan etilen bileşeni, ham petrol yerine şeker kamışı veya tarımsal yan ürünlerin fermantasyonu ile elde edilen biyo-etanol üzerinden üretilmektedir (de Oliveira & Silva, 2019).



Şekil 2- Biyo-etanol moleküllerinden türetilebilen EPDM kopolimer zincir yapısı (Naskar & Noordermeer, 2020)

Şekil 2'de temel kopolimer iskeleti gösterilen bu yeşil polimer, petrokimyasal muadilleri ile birebir aynı moleküler dizilime, ozon direncine ve mekanik mukavemete sahiptir (Naskar & Noordermeer, 2020).

4. ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE YAŞAM DÖNGÜSÜ BULGULARI

Geliştirilen sızdırmazlık teknolojilerinin hammadde eldesinden ömür sonuna kadar olan tüm aşamaları, Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) metodolojisine göre değerlendirilmiştir.

4.1. Üretim Enerjisi ve Karbon Emisyonları

Termoset EPDM profiller, ekstrüzyon hattından çıktıktan sonra moleküler çapraz bağlanmanın tamamlanması için yüksek enerji tüketen tuz banyoları, sıcak hava veya mikrodalga tünelleri gibi sürekli vulkanizasyon proseslerine tabi tutulur (Akıncı & Yılmaz, 2019). TPE ve TPV türevlerinde ise vulkanizasyon aşaması tamamen elimine edildiği için, üretim aşamasındaki toplam proses enerji gereksinimi %30 mertebesinde azalmaktadır (Walker & Davis, 2021).

Biyo-EPDM teknolojisinde ise ekolojik kazanım, hammadde tedarik (beşik) evresinde ortaya çıkar. Tarımsal kaynaklar büyüme evreleri boyunca atmosferdeki karbondioksiti (CO_2) fotosentez mekanizmasıyla bünyelerine sabitlediğinden, biyo-etilen bazlı EPDM üretimi fosil muadillerine kıyasla sera gazı emisyon yükünü %40'ın üzerinde düşürmektedir (Carboni & Garcia, 2021; de Oliveira & Silva, 2019).

4.2. Araç Hafifletme ve Kullanım Evresi Katkısı

TPE ve TPV malzemelerin özgül ağırlığı (0.95 g/cm³), yoğun dolgulu geleneksel EPDM kauçuklara (1.25 g/cm³) kıyasla belirgin şekilde düşüktür (Rader, 2016). Sızdırmazlık grubu genelinde sağlanan bu yaklaşık %25'lik kütlesel hafifleme, taşıtların yürüyen aksam ve ivmelenme yüklerini hafifleterek kullanım ömrü boyunca yakıt tüketimini azaltır (Kroll & Wagner, 2022). Bu ağırlık avantajı, özellikle batarya ağırlığı nedeniyle menzil optimizasyonuna ihtiyaç duyan elektrikli araç (EV) mimarilerinde TPE/TPV kullanımını öncelikli hale getirmektedir (Zhao & Schilling, 2023). Metodolojik veriler ve malzeme parametrelerinin genel karşılaştırması Tablo 2'de özetlenmiştir.

***Tablo 2**- Sızdırmazlık Malzemelerinin Sürdürülebilirlik ve Proses Kriterleri Karşılaştırması*

Değerlendirme Kriteri	**Geleneksel Termoset EPDM**	**Geri Dönüştürülebilir TPE / TPV**	**Biyo-Bazlı EPDM (Bio-EPDM)**
Hammadde Kökeni	%100 Fosil Yakıt	Fosil + Geri Dönüşümlü Faz	%50-70 Bitkisel Biyo-Kütle
İmalat Firesi Yönetimi	Geri kazanılamaz (%0)	Tamamen dönüştürülebilir (%100)	Geri kazanılamaz (%0)
Vulkanizasyon Enerjisi	Çok Yüksek (Gerekli)	Yok (Gerekli Değil)	Çok Yüksek (Gerekli)
Yoğunluk [g/cm³]	~1.25	~0.95	~1.25
Ömür Sonu Potansiyeli	Düzenli Depolama / Yakma	Mekanik Geri Dönüşüm	Düzenli Depolama / Yakma

5. ENDÜSTRİYEL ENTEGRASYON VE TEKNİK ENGELLER

Sürdürülebilir alternatiflerin otomotiv pazarında tamamen dominant hale gelmesinin önünde bazı teknik kısıtlar mevcuttur. TPE esaslı malzemeler, yüksek sıcaklıklar altında (özellikle >80°C) konvansiyonel EPDM kadar kararlı bir kalıcı deformasyon performansı sergileyememektedir (Chang & Choi, 2020). Bu durum, motor bölgesi gibi sürekli termal ve mekanik gerilime maruz kalan alanlarda sızdırmazlık zafiyetlerine yol açabilmektedir (Rader, 2016).

Buna karşın biyo-EPDM, termoset moleküler ağını muhafaza ettiği için yüksek sıcaklık mukavemetinden ödün vermeksizin fosil kaynak bağımlılığını azaltan en stabil çözüm olarak öne çıkmaktadır (Naskar & Noordermeer, 2020).

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Otomotiv sızdırmazlık elemanlarında sürdürülebilir malzeme mimarisine geçiş, tek bir malzeme grubu ile değil, fonksiyonel gereksinimlere göre optimize edilmiş hibrit bir yaklaşımla mümkündür.

Dinamik ısıl yüklerin görece düşük olduğu kapı, bagaj ve iç mekân cam sızdırmazlıklarında %100 döngüsellik sunan TPE/TPV sistemlerinin entegrasyonu hızlandırılmalıdır. Yüksek sıcaklık direnci ve kalıcı esneklik gerektiren motor komponentleri

ve dış gövde birleşim noktalarında ise, gömülü karbonu bünyesinde hapseden biyo-EPDM kullanımı yeşil mutabakat hedefleriyle tam uyum sağlamaktadır. Biyoteknoloji alanındaki gelişmeler sayesinde şekerkamışı veya bitkisel yağ atıklarından sentezlenen %100 biyo-tabanlı EPDM polimerlerinin ticari erişilebilirliğinin artması, sızdırmazlık profillerinde fosil hammadde bağımlılığını tamamen bitirme potansiyeline sahiptir. Sonuç olarak; optimize edilmiş mekanik özellikler, gelişmiş yaşlanma direnci ve akıllı formülasyon tasarımları ile üretilen yeşil kompozit fitiller, sürdürülebilir otomotiv endüstrisinin ve döngüsel ekonominin geleceğinde vazgeçilmez bir yapı taşı olacaktır. Gelecek çalışmalarda, biyo-bazlı termoplastik elastomerlerin (bio-TPE) ozon ve yaşlanma dirençlerinin artırılması üzerine odaklanılmalıdır.

KAYNAKÇA

Akıncı, İ., & Yılmaz, T. (2019). Kauçuk teknolojisi ve otomotiv sızdırmazlık elemanları imalat süreçleri. Polimer Bilimi Dergisi, 12(2), 85-94.

Taylor, W., Thomas, L., & Davies, M. (2022). Sponge EPDM formulations and chemical blowing agents in weatherstripping applications. Cellular Polymers, 41(4), 185-199.

Carboni, M., & Garcia, R. (2021). Carbon footprint analysis of bio-based polymers in automotive component design. Environmental Science & Technology, 55(11), 7201-7210.

Chang, Y., & Choi, J. (2020). Long-term compression set behavior of thermoplastic vulcanizates (TPVs) at elevated temperatures. Journal of Applied Polymer Science, 137(14), 48512.

Datta, J., & Włoch, M. (2017). Progress in devulcanization of thermochemically crosslinked EPDM rubber wastes. Polymer Degradation and Stability, 145, 22-37.

de Oliveira, L., & Silva, F. (2019). Bio-ethanol from sugarcane as a precursor for green ethylene and eco-friendly EPDM production. Biomass and Bioenergy, 122, 65-74.

European Commission. (2000). Directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles (ELV). Official Journal of the European Communities, L 269, 34-42.

Kroll, J., & Wagner, M. (2022). Weight reduction trends in EV sealing profiles using lightweight TPV material concepts. SAE Technical Paper, No. 2022-01-0342.

Kumar, A., & Han, S. (2020). Recycling challenges of vulcanized EPDM waste in automotive applications. Resources, Conservation and Recycling, 156, 104-115.

Layer, M., & Ostad-Ahmad-Ghorabi, H. (2018). Environmental evaluation of rubber recycling methods in automotive supply chains. Journal of Cleaner Production, 189, 340-352.

Morschhaeuser, R., & Jenkins, S. (2018). Synthesis and performance of bio-based monomers for synthetic rubbers. Biomacromolecules, 19(5), 1430-1442.

Naskar, K., & Noordermeer, J. W. (2020). Sustainable EPDM elastomers: Properties and automotive weatherstrip aging trials. Polymer Engineering & Science, 60(8), 1812-1823.

Rader, C. P. (2016). Thermoplastic elastomers: Sealing the future of automotive weatherstripping. Rubber Chemistry and Technology, 89(1), 12-28.

Thomas, G., & Schmidt, N. (2017). Life cycle assessment of petrochemical rubbers vs. thermoplastic alternatives. International Journal of Life Cycle Assessment, 22(4), 512-526.

Walker, R., & Davis, T. (2021). Energy reduction and waste minimization through TPE integration in vehicle manufacturing. Review of Sustainability in Engineering, 8(3), 204-215.

Williams, J., & Zhao, Q. (2018). Elastomeric polymers in automotive sealing systems: A review. Journal of Cellular Plastics, 54(3), 411-429.

Zhao, X., & Schilling, M. (2023). Material selection framework for electric vehicle weatherstrips based on NVH and sustainability matrix. Automotive Engineering International, 31(2), 114-125.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

A COMPARATIVE REVIEW OF FRONTAL IMPACT SAFETY REQUIREMENTS IN EMEA AND NAFTA

Müzeyyen Nur KAPLAN

Abstract

This paper presents a comparative review of frontal impact regulatory requirements in EMEA and NAFTA, focusing on differences in regulatory philosophy, test configurations, dummy selection, occupant condition coverage, airbag deployment strategies, injury assessment criteria, and related frontal safety requirements. In the NAFTA framework, frontal occupant protection is mainly governed by the Federal Motor Vehicle Safety Standards, particularly FMVSS 208, together with associated frontal-related requirements such as FMVSS 204, FMVSS 212, and FMVSS 219. One notable divergence is the NAFTA framework's explicit consideration of unbelted occupant protection under FMVSS 208, which involves broader occupant condition coverage, including small-stature occupants represented by the 5th percentile female dummy and out-of-position (OOP) cases. Meanwhile, the mandatory EMEA framework, primarily represented by UNECE Regulation No. 94 and UNECE Regulation No. 137, follows a more targeted frontal impact approach centered on belted occupant protection and restraint-system performance. The study compares the principal frontal test configurations, restraint-related considerations, and injury assessment criteria applied in the two regions, including differences in occupant coverage and frontal evaluation scope. It also considers how these differing regulatory approaches shape airbag-related design logic and frontal safety development priorities. Overall, the findings provide a structured basis for understanding how regional regulatory philosophies influence vehicle platform development, calibration complexity, and global compliance activities.

Keywords: Frontal impact regulation, FMVSS 208, UNECE R94, UNECE R137, occupant protection

1. Introduction

Road traffic crashes remain a major public safety issue in both North America and Europe despite long-term advances in vehicle design, restraint systems, and road safety policies. In the United States, 40,901 people were killed in motor vehicle traffic crashes in 2023, while preliminary European Commission data indicate that approximately 19,800 people were killed on EU roads in 2024 [1, 2]. These figures show that crash injury prevention continues to be a central concern for vehicle development and regulatory oversight.

Occupant restraint use remains one of the most important factors affecting crash outcome. According to NHTSA, 49% of passenger vehicle occupants killed in the United States in 2023 were unrestrained [1]. In Europe, ERSO data show that in countries with reliable information, 28% of all car occupant fatalities in 2022 were not wearing a seat belt, while broader estimates place the share of unbelted car occupant fatalities between approximately 25% and 50% [3]. These findings reinforce the continuing importance of restraint-system performance and occupant protection requirements in frontal crash regulation.

Frontal crashes are especially important in this context because they remain a dominant source of severe occupant injury. European road safety studies indicate that frontal crashes account for about 55% of passenger car fatalities and serious injuries [4]. Although a directly comparable recent official percentage was not identified in the U.S. sources reviewed, U.S. regulatory and consumer-testing practice continues to treat frontal crashes as one of the principal crash modes for occupant protection assessment [5].

To reduce injury risk in such crashes, different regulatory systems have been established in different regions. In the NAFTA framework considered in this study, frontal occupant protection is primarily governed by the Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS), particularly FMVSS 208, together with associated frontal-related requirements such as FMVSS 204, FMVSS 212, and FMVSS 219 [6]. In the EMEA framework, frontal impact regulation is mainly represented by UNECE Regulation No. 94 and UNECE Regulation No. 137 [7, 8]. These frameworks address the same broad objective of reducing occupant injury risk in frontal crashes, but they do so through different combinations of test configurations, occupant conditions, and assessment approaches.

It is also important to clarify the role of regulatory crash tests. FMVSS and UNECE frontal crash requirements are not intended to reproduce every possible real-world crash exactly. Instead, they define representative, repeatable, and enforceable crash conditions derived from accident research and dominant injury-producing mechanisms. NHTSA has explicitly stated that frontal crash test conditions should be representative of the frontal crash environment to which passenger vehicles are exposed and sufficiently severe to evaluate protection in crashes where serious injury or fatality may occur [5]. Similarly, European work supporting UNECE R94 explained that the offset deformable barrier approach was developed to provide a more realistic simulation of a typical car-to-car frontal collision than a rigid-faced barrier test [9]. Thus, regulatory frontal tests should be understood as controlled engineering approximations of the real-world crash environment rather than full reconstructions of crash diversity.

For original equipment manufacturers (OEMs), compliance with these regulations is not merely a technical target but a prerequisite for market access. However, the compliance mechanisms differ significantly between the two regions. In the United States, the regulatory system is based on self-certification. NHTSA explicitly states that it does not pre-approve new motor vehicles before sale; instead, manufacturers certify that their products meet applicable FMVSS requirements, and the agency later verifies compliance through compliance testing, investigations, recalls, and other enforcement actions [10]. This does not mean that OEMs are free to disregard requirements. On the contrary, the self-certification model places the responsibility for compliance directly on the manufacturer and exposes it to substantial legal and commercial risk if non-compliance is later identified [10].

In EMEA, the compliance logic is different. The European Whole Vehicle Type-Approval system is based on approval by a competent public authority rather than unilateral manufacturer declaration. According to the European Commission, certification is issued by a type-approval authority, while the required tests are performed by designated technical services. The decision to approve a new vehicle type is based on compliance tests and technical documentation assessed through recognized bodies and laboratories [11, 12]. In addition, UNECE type-approval procedures are linked with conformity-of-production obligations, meaning that compliance must be maintained consistently after approval is granted [11].

Alongside these mandatory frameworks, voluntary and consumer-oriented evaluation programs such as NCAP and IIHS also influence vehicle safety development. These organizations often introduce additional performance demands and public rating systems beyond minimum legal compliance. However, their purpose differs from that of mandatory regulations. Consumer programs are intended to inform the market and encourage performance beyond the legal minimum, whereas regulatory systems define the minimum requirements that must be satisfied before a vehicle can be placed on the market. For this reason, the present study focuses only on mandatory frontal impact regulatory requirements and does not include voluntary consumer test frameworks in the main comparison [4, 5].

Within this scope, the comparison between EMEA and NAFTA is particularly relevant because the two frameworks reflect different regulatory philosophies. The NAFTA framework, especially through FMVSS 208, explicitly includes a broader matrix of occupant conditions, including unbelted occupants, small-stature occupants represented by the 5th percentile female dummy, and out-of-position scenarios [6]. By contrast, the mandatory EMEA framework is centered more narrowly on frontal restraint-system and vehicle-performance requirements under UNECE R94 and UNECE R137 [7, 8]. This does not necessarily mean that one framework is categorically more demanding than the other in every aspect; rather, it indicates that the two systems distribute regulatory emphasis differently across frontal crash configurations, occupant conditions, and related safety requirements.

From an engineering perspective, these differences matter because vehicle platforms developed for multiple markets may need to satisfy distinct frontal crash expectations under different legal frameworks. Differences in barrier configuration, dummy selection, occupant condition coverage, injury criteria, and adjacent frontal-related requirements can influence restraint-system development, structural design priorities, airbag strategy, and overall compliance planning. A structured comparison of frontal impact regulations is therefore useful

not only for legislative understanding but also for clarifying how regional regulatory philosophies shape vehicle development activities in global OEM programs. Against this background, this paper presents a comparative review of frontal impact regulatory requirements in EMEA and NAFTA, with particular emphasis on regulatory philosophy, test configurations, dummy selection, occupant condition coverage, airbag deployment strategies, injury assessment criteria, and related frontal safety requirements.

2. Method

This study was conducted as a comparative regulatory review based on publicly available frontal impact regulations, official compliance documents, technical reports, and related regulatory publications from the NAFTA and EMEA frameworks. The review focused on the principal mandatory frontal impact regulations discussed in this paper, namely FMVSS 208 in the NAFTA framework and UNECE Regulation No. 94 together with UNECE Regulation No. 137 in the EMEA framework.

The comparison was structured around the main variables that influence frontal occupant protection assessment, including test configuration, barrier type, impact speed, dummy selection, occupant condition coverage, airbag-related provisions, and injury assessment criteria. Related subsystem requirements were considered only to the extent necessary to interpret the main frontal regulations, since a full subsystem-by-subsystem mapping of all adjacent regulations was beyond the scope of the present study.

In addition to descriptive comparison, the analysis also considered the engineering implications of the regulatory differences for global vehicle development, particularly in relation to restraint-system design, compliance planning, and platform adaptation across multiple markets.

3. Frontal Impact Regulatory Frameworks and Test Configurations

3.1 Overview of Regulatory Scope

Although the present review is centered on FMVSS 208, UNECE Regulation No. 94, and UNECE Regulation No. 137 as the principal mandatory frontal impact regulations, occupant protection in both regions is supported by a broader regulatory structure extending beyond these main crash standards. In both NAFTA and EMEA, additional component-level and subsystem-level requirements exist for restraint systems, seats, steering systems, glazing, and child restraint systems, all of which may influence frontal crash performance. Since a complete comparison of all related regulatory provisions would substantially broaden the scope of the study, the present paper limits its detailed assessment to the principal frontal impact regulations and refers to related subsystem requirements only where necessary for interpretation.

3.2 EMEA Test Configurations

3.2.1 UNECE Regulation No. 94 (Offset Deformable Barrier)

UNECE R94 prescribes a full-scale crash test in which the vehicle is propelled into an offset deformable barrier (ODB) at 56 km/h. The barrier face overlaps 40% of the vehicle width on the driver side. The deformable barrier element is designed to replicate the front-end stiffness

characteristics of a typical passenger car, making the test representative of a car-to-car frontal collision at approximately 50 km/h per vehicle [9]. The test is conducted exclusively with belted occupants. Two Hybrid III 50th percentile male dummies are positioned in the front outboard seats [7].

Vehicle performance requirements assessed within the same test include residual steering wheel displacement, door integrity, fuel system leakage, and post-crash egress capability. Dummy instrumentation covers the head, neck, chest, femurs, knees, and tibias [7].

3.2.2 UNECE Regulation No. 137 (Full-Width Frontal)

UNECE R137, introduced to complement R94 by addressing full-width frontal crash scenarios, prescribes a 50 km/h impact into a full-width deformable barrier. Unlike R94, R137 requires two dummy sizes: the Hybrid III 50th percentile male in the driver seat and the Hybrid III 5th percentile female in the front passenger seat, thereby introducing small-stature occupant coverage into the mandatory EMEA framework [8]. The test is conducted with belted occupants only.

3.3 NAFTA Test Configurations - FMVSS 208

FMVSS 208 is considerably broader in its test matrix than either EMEA standard considered individually. Rather than defining a single representative scenario, it specifies a matrix of test conditions that vary in speed, barrier configuration, impact angle, occupant restraint status, and dummy type. Table 1 summarises the principal test conditions.

Table 1. FMVSS 208 principal test conditions for passenger cars

Test condition	Barrier type	Speed	Angle	Dummy	Restraint
Full-width rigid	Rigid	56 km/h	0°	H-III 50th% ♂	Belted
Full-width rigid	Rigid	56 km/h	0° ±5°	H-III 5th% ♀	Belted
Full-width rigid	Rigid	32-40 km/h	0° ±5°	H-III 5th% ♀	Unbelted
Full-width rigid	Rigid	32-40 km/h	0° ±30°	H-III 50th% ♂	Unbelted
Offset deformable	Deformable (ODB 40%)	40 km/h	0°	H-III 5th% ♀	Belted

The unbelted test conditions are particularly significant from an engineering standpoint. They require the restraint system - primarily the airbag - to provide adequate protection without seat belt pre-tensioning or load-limiting contributions. This fundamentally alters the airbag deployment strategy required, since the occupant kinematics in an unbelted condition differ substantially from the belted case in terms of forward excursion timing, velocity at airbag contact, and loading rate [6]. EMEA mandatory regulations contain no equivalent unbelted occupant test requirement.

The oblique test conditions (±5° and ±30°) introduce lateral loading components absent from the EMEA full-width and offset tests, which are both conducted at 0° [6, 7, 8].

3.3.1 Out-of-Position and Suppression Requirements

FMVSS 208 also mandates out-of-position (OOP) airbag performance assessments. These tests evaluate the risk posed to occupants - particularly children and small-stature adults - who are seated in close proximity to the airbag module at the moment of deployment. OOP testing requires demonstration that the airbag system does not generate injurious loading to a 3-year-old child dummy (P3), a 6-year-old child dummy (P6), or a 5th percentile female dummy positioned in defined out-of-position locations [6].

These requirements are directly linked to the Occupant Classification and Monitoring System (OCM) mandate within FMVSS 208. An OCM system must detect occupant size and position and suppress or de-power airbag deployment when an out-of-position or small-stature occupant is detected. This creates a system-level integration requirement between the airbag ECU, seat sensors, and classification logic that has no direct mandatory equivalent in the EMEA framework [6].

3.3.2 Adjacent NAFTA Standards

FMVSS 204 - Steering Control Rearward Displacement. This standard limits the rearward displacement of the steering control (measured at the center of the steering wheel hub) to a maximum of 127 mm (5 inches) in a 48 km/h full-width rigid barrier test. Critically, this test is conducted without occupant dummies and is assessed independently of the FMVSS 208 crash test [13]. In EMEA, the equivalent limit (80 mm vertical, 100 mm rearward) is embedded within the R94 test itself and is therefore assessed under the same 56 km/h ODB condition.

FMVSS 212 - Windshield Mounting. This standard requires that the windshield remain substantially intact and retain a defined minimum area of attachment to the vehicle body following a 48 km/h full-width rigid barrier impact. The rationale is to ensure that the windshield continues to serve as a backstop for airbag deployment and does not separate in a manner that creates additional occupant hazard [14]. There is no directly equivalent mandatory standalone windshield mounting standard in the EMEA framework, though windshield integrity is implicitly assessed through the broader type-approval requirements.

FMVSS 219 - Windshield Zone Intrusion. This standard limits the intrusion of vehicle components into defined zones of the windshield area during a frontal crash, protecting against occupant head contact with intruding structures. The test is conducted at 48 km/h into a full-width rigid barrier [15]. Again, no direct EMEA standalone equivalent exists, though structural integrity requirements in R94 and R137 address footwell and occupant cell intrusion more broadly.

FMVSS 301 - Fuel System Integrity. In the U.S. framework, fuel system performance in crash conditions is regulated separately under FMVSS 301. By contrast, in the EMEA framework, fuel leakage is directly assessed within UNECE R94 as part of the frontal crash test itself. This difference illustrates a broader structural contrast between the two systems: some vehicle-level safety checks are embedded within the main frontal regulation in EMEA, whereas in the U.S. framework they may be distributed across separate standards.

Taken together, these adjacent standards show that frontal crash safety in the U.S. framework is not defined by FMVSS 208 alone, but by a set of interrelated requirements addressing specific vehicle systems and crash consequences.

3.4 Comparative Summary of Test Configurations

Table 2 provides a side-by-side comparison of the primary test parameters across EMEA and NAFTA frameworks.

Table 2. Comparative summary of primary frontal test configurations

Parameter	**UNECE R94**	**UNECE R137**	**FMVSS 208 (matrix)**
Barrier type	Deformable (ODB)	Deformable (FWDB)	Rigid + Deformable (ODB)
Barrier width	40% offset	Full-width	Full-width + 40% offset
Test speed	56 km/h	50 km/h	32-56 km/h (condition-dependent)
Impact angle	0°	0°	0°, ±5°, ±30°
Restraint condition	Belted only	Belted only	Belted + Unbelted
Driver dummy	H-III 50th% ♂	H-III 50th% ♂	H-III 50th% ♂ / 5th% ♀
Passenger dummy	H-III 50th% ♂	H-III 5th% ♀	H-III 50th% ♂ / 5th% ♀
OOP assessment	Not required	Not required	Required
OCM requirement	Not required	Not required	Required
Steering displacement	In-test (R94)	Not specified separately	FMVSS 204 (separate test)
Windshield retention	Not standalone	Not standalone	FMVSS 212, FMVSS 219 (separate tests)

The most consequential difference from an engineering standpoint is the presence of unbelted occupant conditions and OOP requirements exclusively in NAFTA. These conditions are not simply additional test points - they represent fundamentally different occupant interaction scenarios that require distinct airbag deployment logic, potentially different inflator output characteristics, and active occupant sensing and suppression capability. A restraint system optimised exclusively for the belted, single-scenario structure of UNECE R94 cannot be assumed to satisfy FMVSS 208 unbelted or OOP conditions without dedicated calibration and, in many cases, system-level redesign.

3.4.1 The Rationale for Unbelted Testing in NAFTA and Its Absence in EMEA

The inclusion of unbelted occupant conditions in FMVSS 208 reflects a deliberate and long-standing regulatory position rooted in real-world crash data. NHTSA promulgated FMVSS 208 in 1972 to improve frontal crash protection and has since maintained dynamic

performance requirements that include frontal rigid barrier crash tests at angles between perpendicular and ±30 degrees with both belted and unbelted dummies. The persistence of unbelted conditions in the standard is directly tied to occupant behaviour data: unbelted occupants continue to be overrepresented in fatal crashes, representing 51% of fatalities despite the fact that front seat belt use is approximately 90%.

The EMEA framework, by contrast, proceeds from a different assumption. Wearing seat belts has been compulsory in all vehicles throughout the EU since 2006. The regulatory logic embedded in UNECE R94 and R137 is therefore that the relevant occupant population to protect is, by law, a belted one. The crashworthiness test is calibrated accordingly: the ODB scenario in R94 was specifically developed to evaluate the performance of the vehicle structure and restraint system under belted conditions representative of a typical car-to-car collision [9]. This does not mean EMEA regulators are indifferent to unbelted occupants; rather, the regulatory strategy relies on enforcement of belt-use law rather than on vehicle design to address that exposure. The consequence for engineering, however, is substantial. A restraint system developed and calibrated exclusively to the EMEA mandatory framework will not have been subjected - under any mandatory test - to the scenario in which an unbelted occupant is in contact with a deploying airbag. NHTSA testing has found that in unbelted rigid barrier crash tests at 40 km/h, seven out of sixteen vehicles exceeded provisional injury criteria for lower leg instrumentation, illustrating that unbelted conditions expose failure modes not captured by belted tests alone. The airbag deployment logic, inflator output, and vent strategy required to pass unbelted FMVSS 208 tests are therefore engineering requirements that do not emerge from the EMEA regulatory process and must be addressed separately when developing for NAFTA compliance.

4. Injury Assessment Criteria and Dummy Performance Limits

4.1 Head Injury Criteria

Both frameworks employ the Head Injury Criterion (HIC) as the primary metric for head protection assessment, but they differ in the time window over which the criterion is calculated. UNECE R94 and R137 use HIC with a 36 ms integration window (HIC_{36}), with a limit of 1000. FMVSS 208 uses a 15 ms window (HIC_{15}), with a limit of 700. The shorter integration window in FMVSS 208 reflects a focus on the peak intensity of head acceleration over a briefer interval, consistent with the higher deceleration pulse generated by the rigid full-width barrier configuration. Table 4 summarises head and neck injury criteria across both frameworks.

Table 3. Head and neck injury criteria - EMEA vs NAFTA

Criterion	**UNECE R94 / R137**	**FMVSS 208 (H-III 50th%)**	**FMVSS 208 (H-III 5th%)**
----------	----------	----------	----------
HIC window	$HIC_{36} \leq 1000$	$HIC_{15} \leq 700$	$HIC_{15} \leq 700$
Head resultant acceleration (3 ms)	≤ 80 g	Not specified	Not specified
Neck tensile force	3.3 kN @ 0 ms / 2.9 kN @ 35 ms / 1.1 kN @ ≥80 ms	≤ 4,170 N	≤ 2,620 N
Neck compressive force	Not specified	≤ 4,000 N	≤ 2,520 N
Neck shear force	3.1 kN @ 0 ms / 1.5 kN @ 25-35 ms / 1.1 kN @ ≥45 ms	Not specified	Not specified
Neck extension moment	≤ 57 Nm	Not specified	Not specified
Nij (combined neck index)	Not specified	≤ 1.0	≤ 1.0

The neck assessment approach reflects a fundamentally different philosophy. EMEA specifies independent limits for tensile force, shear force, and extension moment, assessed as time-dependent curves. FMVSS 208 instead employs the Nij combined neck injury index, which integrates axial force and flexion/extension moment into a single normalised score. Neither approach is demonstrably superior; they capture different aspects of neck loading and are calibrated to the respective test configurations in which they were validated [6, 7].

4.2 Thorax and Chest Injury Criteria

Chest compression limits differ between the two frameworks in both threshold value and applicable dummy:

Table 4. Thorax injury criteria - EMEA vs NAFTA

Criterion	**UNECE R94 / R137**	**FMVSS 208 (H-III 50th%)**	**FMVSS 208 (H-III 5th%)**
----------	----------	----------	----------
Thorax compression	≤ 50 mm	≤ 63 mm	≤ 52 mm
Thorax resultant acceleration (3 ms)	Not specified	≤ 60 g	Not specified
Viscous criterion (VC)	≤ 1.0 m/s	Not specified	Not specified

The Viscous Criterion (VC), which captures the rate-dependent component of chest loading and is particularly relevant for soft-tissue injury risk, is specified in UNECE R94 but absent from FMVSS 208. The VC limit of 1.0 m/s in R94 constitutes a distinct design constraint for restraint systems that has no direct equivalent in the NAFTA mandatory framework.

Conversely, the 3 ms chest acceleration limit of 60 g in FMVSS 208 addresses peak deceleration loading without an equivalent in R94 or R137.

4.3 Lower Extremity Criteria

This is perhaps the most notable asymmetry between the two frameworks:

Table 5. Lower extremity injury criteria - EMEA vs NAFTA

Criterion	UNECE R94 / R137	FMVSS 208
----------	----------	----------
Femur axial force	9.07 kN @ 0 ms / 7.58 kN @ ≥10 ms	≤ 10 kN (50th%) / ≤ 6.8 kN (5th%)
Tibia compression force	≤ 8 kN	Not specified
Tibia index (TI)	≤ 1.3 (top and bottom)	Not specified
Sliding knee displacement	≤ 15 mm	Not specified

UNECE R94 includes tibia compression, tibia index, and sliding knee joint movement as mandatory assessment criteria. FMVSS 208 does not specify lower leg injury criteria in its mandatory requirements, a difference that has been noted in regulatory literature [9]. This reflects the different structural demands of the two test configurations: the ODB test in R94 subjects the lower limbs to loadpath-specific intrusion and knee contact patterns not replicated in the full-width rigid barrier test, making lower-leg criteria more critical in the EMEA context.

4.4 Vehicle-Level Performance Requirements

In addition to dummy injury criteria, vehicle-level requirements also contribute to frontal safety evaluation. However, the way these requirements are organized differs between the two regions. In the EMEA framework, certain checks such as steering wheel displacement, door integrity, post-crash egress, and fuel leakage are assessed directly within UNECE R94. In the U.S. framework, comparable issues are more often distributed across separate standards, including FMVSS 204 for steering control rearward displacement, FMVSS 212 for windshield mounting, FMVSS 219 for windshield zone intrusion, and FMVSS 301 for fuel system integrity. For this reason, these items are treated in the present study as contextual elements rather than as a primary axis of comparison.

5. OEM Compliance Strategy and the Common Platform Challenge

5.1 Cross-Regional Platform Adaptation and Its Limitations

In global vehicle program management, platform development does not always begin from the same regulatory anchor. Depending on market priorities, production strategy, program timing, or business objectives, development may initially be oriented toward either the EMEA framework or the NAFTA framework. For this reason, the engineering challenge should not be understood as a one-directional transition from one region to the other, but rather as a broader issue of cross-regional adaptation between two frontal impact regulatory systems with different technical emphases.

When a vehicle platform is first developed around the EMEA framework, adaptation to NAFTA requirements may become challenging because FMVSS 208 includes frontal occupant conditions that are not explicitly required in the mandatory EMEA framework, particularly

unbelted occupants, broader small-stature occupant coverage, and out-of-position scenarios. In such cases, restraint system design may need to account for substantially different occupant kinematics, airbag interaction modes, and sensing requirements than those assumed in a belted ODB-focused development process.

Conversely, when a vehicle platform is first developed around the NAFTA framework, adaptation to EMEA requirements may also require reassessment. Although FMVSS 208 includes an offset deformable barrier condition, the overall NAFTA framework combines this with full-width rigid barrier tests, unbelted occupant requirements, and out-of-position related provisions. As a result, a platform optimized primarily around the broader FMVSS 208 matrix may not automatically deliver the most efficient or best-balanced performance under the more focused EMEA frontal framework represented by UNECE R94 and R137. In addition, adaptation from NAFTA to EMEA may create an overengineering risk. A system designed to satisfy the broader NAFTA matrix, including unbelted and out-of-position occupant conditions, may go beyond what is strictly necessary for compliance with the mandatory EMEA framework. Consequently, additional system complexity, sensing architecture, airbag capability, validation effort, or structural countermeasures may be carried into a regulatory environment with a narrower mandatory occupant-condition scope.

From this perspective, the main difficulty is not simply the addition of more test points, but the coexistence of different crash representations and different occupant interaction assumptions within the two systems. In the NAFTA framework, unbelted and out-of-position conditions place strong emphasis on airbag timing, inflator output, vent strategy, and occupant sensing logic. In the EMEA framework, frontal regulation is centered on UNECE R94 and R137, which prioritize belted frontal assessment and restraint-system performance under a narrower mandatory occupant-condition set. A vehicle architecture or calibration strategy optimized primarily for one set of assumptions may therefore require significant revision when assessed under the other.

Structural considerations further reinforce this challenge. Both regulatory systems include offset-type frontal assessment, but the relative emphasis of the test matrices differs. FMVSS 208 combines full-width rigid barrier conditions with a belted 5th percentile female ODB test, whereas the EMEA framework is built more directly around UNECE R94 offset deformable barrier assessment together with UNECE R137 frontal restraint-system evaluation. Consequently, the engineering balance between global pulse management, occupant condition coverage, and local intrusion performance may differ depending on which framework is taken as the primary development reference.

5.2 Toward a Simultaneous Development Approach

The differences described above suggest that the most effective compliance strategy for global platforms is concurrent regulatory consideration rather than sequential regional adaptation. Instead of treating one framework as the main target and the other as a later adjustment, a more robust development approach is to consider both EMEA and NAFTA requirements at the concept and architecture stages.

From a restraint system perspective, this implies developing airbag and seat belt strategies with awareness of both belted and unbelted occupant behavior, as well as small-

stature and out-of-position conditions where applicable. From a structural perspective, it implies defining frontal load targets that account for both offset deformable barrier conditions and full-width rigid barrier pulse characteristics. More broadly, it requires early recognition that compliance in one region does not automatically guarantee efficient compliance in the other.

Such an approach inevitably increases development complexity in the early phases. However, it may reduce the larger penalties associated with late-stage redesign, additional validation loops, packaging changes, recalibration efforts, repeated certification activities, or unnecessary carry-over of system complexity from one region to another. For OEMs operating across multiple regions, the engineering value of simultaneous regulatory consideration therefore lies not only in compliance efficiency, but also in reducing downstream program risk and avoiding both under-design and overengineering across regional applications.

6. Future Outlook

6.1 THOR Dummy Adoption

The transition from the Hybrid III family toward more advanced anthropomorphic test devices such as THOR is one of the most significant near-term developments in frontal impact assessment. In both regulatory and consumer-testing contexts, THOR is expected to improve biofidelity, instrumentation capability, and injury assessment sensitivity. For OEMs, this shift is likely to influence restraint-system calibration and target-setting as future test requirements gradually move beyond legacy Hybrid III-based evaluation.

6.2 Advanced Female and Elderly Occupant Representation

Another important trend is the increasing emphasis on occupants beyond the traditional mid-size male reference. Small-stature and elderly occupant protection are receiving greater attention in both regulatory and consumer assessment discussions, indicating a broader movement toward more diverse occupant representation in frontal crash evaluation. This trend may lead to more demanding expectations for restraint-system robustness across a wider range of body sizes and sensitivities.

6.3 Automated and Non-Traditional Seating Configurations

The emergence of automated driving technologies and non-traditional seating configurations introduces new questions for existing frontal impact regulations. Current procedures in both regions are still largely based on conventional seating positions and driver-control layouts. As vehicle architectures evolve, frontal crash assessment frameworks may need to address seating postures and interior configurations that are not adequately represented by present-day regulatory assumptions.

6.4 FMVSS 204 Revision

A further development in the U.S. framework is the recent proposal to revise FMVSS 204. This indicates continuing regulatory attention to steering-control rearward displacement and its relationship with broader occupant protection assessment. Although FMVSS 204 remains a separate standard, future updates may strengthen its practical interaction with the overall frontal crash compliance picture.

6.5 Harmonisation Prospects

Although full harmonization between the EMEA and NAFTA frameworks is not yet evident, both systems show signs of gradual evolution in related directions, particularly in dummy development and broader occupant representation. For OEMs, this means that frontal safety development will continue to require flexibility, early systems integration, and continuous monitoring of regulatory trends rather than assuming that present requirements will remain static.

7. Conclusion

This review shows that the EMEA and NAFTA frameworks address the same frontal occupant protection objective through different regulatory logics. The mandatory EMEA structure is mainly built around belted frontal crash conditions under UNECE Regulation No. 94 and UNECE Regulation No. 137, whereas the NAFTA framework, particularly through FMVSS 208, covers a broader matrix of occupant conditions including unbelted, small-stature, and out-of-position cases.

The comparison also indicates that the differences between the two regions are not limited to barrier type or test speed. They extend to dummy selection, occupant condition coverage, injury assessment philosophy, airbag-related requirements, and the overall way frontal safety is distributed across the regulatory framework. From an OEM perspective, these differences directly affect restraint-system development, compliance strategy, and the management of global vehicle platforms.

Overall, the study highlights the importance of understanding frontal regulations not only as legal requirements but also as engineering frameworks that shape vehicle design priorities. A structured comparison of these frameworks is therefore valuable for both regulatory interpretation and practical vehicle development.

References

[1] National Highway Traffic Safety Administration. (2025). State traffic data: 2023 data (DOT HS 813 743). Washington, DC: U.S. Department of Transportation.

[2] European Commission. (2025, March 18). EU road fatalities drop by 3% in 2024, but progress remains slow. Brussels, Belgium: Author.

[3] European Road Safety Observatory. (2024). Facts and figures: Road safety protective equipment. Brussels, Belgium: European Commission.

[4] European Commission. (2015). Road safety study for the interim evaluation of Policy Orientations on Road Safety 2011-2020. Brussels, Belgium: Author.

[5] Hollowell, W. T., Gabler, H. C., Stucki, S. L., Summers, S., & Hackney, J. R. (1999). Updated review of potential test procedures for FMVSS No. 208. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.

[6] National Highway Traffic Safety Administration. (n.d.). 49 CFR § 571.208 - Standard No. 208; Occupant crash protection. Washington, DC: U.S. Department of Transportation.

[7] United Nations Economic Commission for Europe. (2024). UN Regulation No. 94: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a frontal collision (Rev. 4). Geneva, Switzerland: Author.

[8] United Nations Economic Commission for Europe. (2020). UN Regulation No. 137: Uniform provisions concerning the approval of passenger cars in the event of a frontal collision with focus on the restraint system. Geneva, Switzerland: Author.

[9] Edwards, M. J., Hynd, D., Thompson, A., Carroll, J., & Visvikis, C. (2009). Technical assistance and economic analysis in the field of legislation pertinent to the issue of automotive safety: Provision of information and services on the subject of the tests, procedures and benefits of the requirements for the development of legislation on frontal impact protection (CPR 403). Crowthorne, England: Transport Research Laboratory.

[10] National Highway Traffic Safety Administration. (2017). Understanding NHTSA's regulatory tools: Instructions, practical guidance, and assistance for entities seeking to employ NHTSA's regulatory tools. Washington, DC: U.S. Department of Transportation.

[11] European Commission. (n.d.). Technical harmonisation in the EU. Brussels, Belgium: Author.

[12] European Commission. (n.d.). FAQ: Type approval of vehicles. Brussels, Belgium: Author.

[13] National Highway Traffic Safety Administration. (n.d.). 49 CFR § 571.204 - Standard No. 204; Steering control rearward displacement. Washington, DC: U.S. Department of Transportation.

[14] National Highway Traffic Safety Administration. (n.d.). 49 CFR § 571.212 - Standard No. 212; Windshield mounting. Washington, DC: U.S. Department of Transportation.

[15] National Highway Traffic Safety Administration. (n.d.). 49 CFR § 571.219 - Standard No. 219; Windshield zone intrusion. Washington, DC: U.S. Department of Transportation.

[16] United Nations Economic Commission for Europe. (2021). UN Regulation No. 16: Uniform provisions concerning the approval of safety-belts, restraint systems, child restraint systems and ISOFIX child restraint systems (Rev. 7). Geneva, Switzerland: Author.

[17] United Nations Economic Commission for Europe. (2019). UN Regulation No. 17: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the seats, their anchorages and head restraints (Rev. 5). Geneva, Switzerland: Author.

[18] United Nations Economic Commission for Europe. (2020). UN Regulation No. 21: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to their interior fittings (Rev. 3). Geneva, Switzerland: Author.

[19] United Nations Economic Commission for Europe. (2022). UN Regulation No. 129: Uniform provisions concerning the approval of enhanced child restraint systems (Rev. 3). Geneva, Switzerland: Author.

[20] National Highway Traffic Safety Administration. (2025, May 30). Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 204; Steering control rearward displacement [Proposed rule]. Federal Register, 90 FR 22890.

[21] National Highway Traffic Safety Administration. (2023, September 7). Anthropomorphic test devices; THOR 50th percentile adult male test dummy; incorporation by reference [Notice of proposed rulemaking]. Federal Register, 88 FR 61896.

[22] Euro NCAP. (2022, November). Euro NCAP 2030 roadmap: A safer future for mobility. Brussels, Belgium: Author.

[23] Euro NCAP. (2025, September). Crash protection frontal impact protocol (Version 1.1). Brussels, Belgium: Author.

[24] United Nations Economic Commission for Europe. (2023). Results of the review of UNECE regulations for automated vehicles (ECE/TRANS/WP.29/2023/86). Geneva, Switzerland: Author.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Comparison Study of Static Load Compensation CAE Analysis and Physical Test Results on Hood

Kübra Nur Kulaoğlu[1]
Tamer Aydıner[2]

Abstract

This study investigates the comparison between Static Load Compensation (SLC) CAE analyses and physical validation tests performed on hood. When the hood is latched in its design position, the combined effects of gravity, seals, bumpers, and gas struts introduce a measurable deformation on the hood structure. Excessive deflection can lead to poor hood-to-fender flushness, uneven gaps, and insufficient or excessive seal pressure. The SLC methodology quantifies this behavior by predicting the hem edge deflection under the combined static loads and ensuring that the designed fit-and-finish criteria are maintained. In addition to static sealing loads, aerodynamic forces at high vehicle speeds may cause upward displacement of the hood, potentially lifting it above the nominal design position and inducing permanent set or long-term deformation. Both SLC and aerodynamic load cases are modeled as static events with the hood constrained in the design position. The CAE model includes the contributions of gravity, seal compression forces, bumper reactions, and gas strut opening forces, along with the hood's structural stiffness and boundary conditions. The numerical results were compared with physical measurements obtained from prototype vehicles, including force–displacement behavior, hem deflection profiles, and local deformation modes. Comparisons focused on deflection magnitude at the hood hem, the overall deformation shape, and the interaction effects with adjacent components such as fenders and the front fascia. Results indicate that the CAE predictions achieve a correlation within %10–%12 of the physical test results, with deviations primarily attributed to manufacturing variability, seal stiffness tolerances, and idealized constraints used in the simulation environment. This work demonstrates the capability of CAE-based SLC and aerodynamic load analysis to accurately predict hood deformation behavior in early design stages. Furthermore, the study identifies key factors influencing correlation quality and provides guidance for improving virtual validation methods to reduce prototype testing effort and enhance fit and finish robustness.

Keywords: static load compensation, hood, fit and finish, seal, correlation

[1] Virtual Engineering Project Leader, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası, https://orcid.org/0000-0003-1967-6177
[2] Fellow (DSM), TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası, https://orcid.org/0000-0002-6401-5100

Introduction

The automotive hood is a critical exterior closure component that significantly influences vehicle appearance quality, structural performance, and customer perception. In addition to providing access to the engine compartment, the hood must preserve geometric stability and consistent fit-and-finish with adjacent components such as fenders, headlamps, and front fascia throughout the vehicle lifecycle. Excessive deformation may lead to visible flushness deviations, uneven gap distribution, and non-uniform seal compression, which are directly associated with perceived quality issues and long-term durability concerns [1,2]. To address these challenges, finite element–based analysis methods have been widely adopted in hood design and validation processes. Prior studies have demonstrated that both global and local stiffness characteristics of hood assemblies can be effectively assessed through static analysis approaches, allowing identification of critical deformation regions and supporting design improvements before physical prototyping [2]. These analyses typically consider gravity loading, latch and hinge constraints, bumper reactions, and gas strut forces as primary contributors to static hood behavior.

Several investigations have focused on improving hood structural performance through geometry optimization, stiffness enhancement, and material selection. Optimization-based CAE methodologies have shown that undesired deformations can be minimized without increasing mass or cost by intelligently redistributing stiffness within the hood inner panel [1]. Similarly, numerical studies evaluating local and global stiffness have highlighted the importance of accurately representing loading conditions and boundary constraints to obtain realistic deformation predictions [2].

While a substantial body of literature addresses hood stiffness and deformation from a numerical perspective, many studies remain limited to component-level simulations or simplified static loading scenarios. In parallel, a growing number of publications focus on alternative hood materials, such as aluminum or composite-based designs, primarily investigating weight reduction and material performance under static loads [3]. Although these works provide valuable insight into material behavior, they do not directly address the correlation between CAE predictions and physical vehicle-level deformation measurements under realistic operating conditions.

In production vehicles, hood deformation results from the combined interaction of multiple static loads acting simultaneously. When the hood is latched in its nominal design position, gravity, seal compression forces, bumper reactions, latch and hinge constraints, and gas strut forces collectively define the equilibrium deformation state. Capturing this compensated deformation condition is essential for accurately predicting hem edge deflection and overall hood geometry, which are critical attributes for achieving robust fit-and-finish performance [1,2].

Static Load Compensation (SLC) analysis has emerged as an industry-oriented CAE methodology to represent this combined static loading environment. By applying all relevant static loads while constraining the hood in its design position, SLC enables prediction of hood deformation consistent with physical vehicle conditions. Furthermore, aerodynamic forces acting on the hood at elevated vehicle speeds introduce additional upward pressure loads, which

may counteract gravity and sealing forces and potentially induce hood lift, permanent set, or long-term deformation if not accounted for during development [2].

Despite the widespread industrial application of SLC methodologies, limited publicly available studies quantitatively compare SLC-based CAE predictions including aerodynamic load effects with physical validation test results obtained from prototype vehicles. Correlation accuracy for hem edge deflection, deformation shape consistency, and interaction with adjacent body components remains insufficiently documented in the open literature.

The objective of this study is therefore to present a comprehensive comparison between Static Load Compensation CAE analyses and physical test results for an automotive hood system. The work evaluates deformation correlation under combined static and aerodynamic load cases, with specific focus on hem edge deflection magnitude, deformation profiles, and interaction behavior with surrounding components. By identifying key contributors to correlation deviations, this study aims to demonstrate the reliability of CAE-based SLC methodologies for early design validation and to support reduced prototype dependency while enhancing fit-and-finish robustness.

Static Load Compensation and Aerodynamic Load Methodology

Static Load Compensation analysis is applied to predict the deformation behavior of the hood assembly under combined static loading conditions while constrained in its nominal design position. The methodology assumes that the primary deformation state of the hood during vehicle operation can be represented as a quasi-static equilibrium condition resulting from the superposition of multiple load contributions. In the adopted SLC approach, the hood is constrained at hinge and latch locations to represent the closed and latched design position. Boundary conditions are defined to reflect realistic support conditions provided by the body structure while avoiding over-constraining the model. The applied load set includes gravitational forces acting on the hood mass, seal compression loads distributed along the hem region, bumper reaction forces at specified contact locations, and opening forces generated by the gas struts. Seal compression loads are represented using equivalent distributed forces or elastic elements based on nominal seal stiffness characteristics. Bumper reactions are modeled as localized supports or spring elements reflecting contact interaction and load transfer during hood closure. Gas strut forces are applied at their respective attachment points, considering both magnitude and direction corresponding to the closed-hood configuration. Gravity loading is applied globally as a body force acting on the complete hood assembly.

In addition to static sealing and structural loads, aerodynamic effects acting on the hood at high vehicle speeds are incorporated into the methodology. Aerodynamic loads are known to induce upward pressure on the hood outer panel, potentially reducing seal compression or causing upward displacement relative to the design position. In this study, aerodynamic forces are modeled as static equivalent pressure loads applied to the outer surface of the hood panel, representing steady-state maximum aerodynamic conditions. Although aerodynamic effects are inherently transient, previous studies have shown that static-equivalent representations provide sufficient accuracy for deformation predictions during early design evaluation. Both Static Load Compensation and aerodynamic load cases are treated as static events within the finite element framework. Nonlinear effects are included where necessary to capture geometric stiffness behavior and large displacement effects, particularly in hem and peripheral regions where

deformation sensitivity is high. The CAE model incorporates realistic material properties, structural stiffness contributions, and interface definitions consistent with production-intent designs.

Key output parameters evaluated from the simulations include hem edge deflection distribution, global deformation shape, and localized deformation modes. These numerical results are directly compared with physical measurements obtained from prototype vehicle tests, including force–displacement response, hem deflection profiles, and interaction behavior with adjacent components. The adopted methodology enables a systematic assessment of prediction accuracy and provides a robust framework for correlating CAE-based SLC analyses with physical validation results.

CAE Model Description

The computational model developed for this study represents a production-intent hood system using a half-vehicle finite element approach. The half-vehicle configuration was selected to reduce computational cost while preserving the structural load paths and deformation characteristics relevant to hood static behavior. The model was truncated along the vehicle center plane, where all six degrees of freedom were constrained to properly represent symmetry and overall body stiffness contributions. Material behavior, contact interactions, and the overall analysis were treated as nonlinear. The analyses were conducted using a nonlinear static formulation and solved with the Abaqus finite element solver, enabling accurate representation of nonlinear material response, contact interactions, elastic component behavior, and large displacement effects inherent to the hood system.

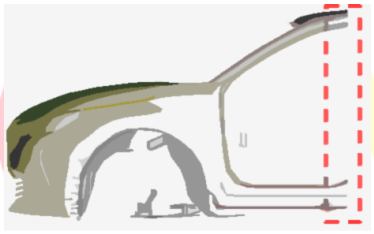


Figure 1. Half-vehicle CAE model of the hood assembly showing truncation plane and boundary conditions

The hood assembly was modeled together with its primary functional interfaces to accurately capture static equilibrium conditions. The model includes the latch mechanism, gas strut, cowl seal, TI seals, and elastic bumpers located at the front, rear, and middle regions. These components represent the dominant load-transfer elements influencing hood deformation in the closed position and are essential for Static Load Compensation analysis.

Figure 2. Hood assembly and integrated components included in the CAE model (seals, bumpers, gas strut, latch)

A mixed modeling strategy was adopted to balance accuracy and computational efficiency. The hood structure was modeled using shell elements representing the outer and inner panels, while the seals were represented using solid elements to capture their volumetric stiffness and nonlinear compression behavior. The elastic bumpers, gas strut, and latch system were modeled using one-dimensional elastic elements, enabling efficient representation of force–displacement behavior and preload effects while maintaining numerical stability. The compression levels and interference values of the elastic bumpers were explicitly considered and introduced as preload conditions in the corresponding one-dimensional elements, ensuring a realistic representation of their contribution to the static equilibrium state of the hood assembly.

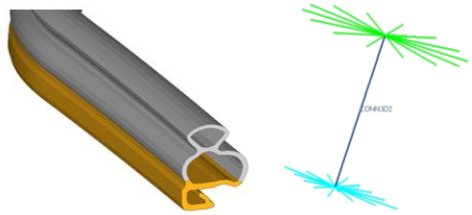


Figure 3. Modeling approach illustrating solid seal and elastic bumper

Contact and interaction definitions were established to ensure realistic load transfer between the hood and its supporting elements. Seal and bumper contacts were defined to allow progressive engagement during closure, while the latch and gas strut elements contributed to the overall constraint and preload state of the hood assembly. This interaction modeling enables accurate prediction of hem edge deformation and local displacement behavior critical for fit-and-finish assessment.

The analysis was performed using a nonlinear, multi-step static solution sequence designed to replicate the physical closure and loading process of the hood.

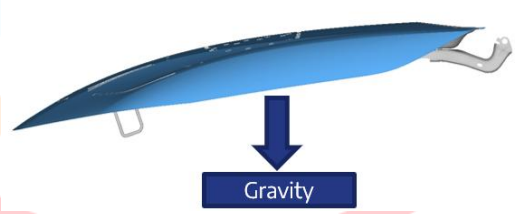


Figure 4. Analysis load sequence and step definition used in the CAE simulation

Aerodynamic load inputs calculated for the analyses were applied to both the hood outer and inner panel elements, accounting for push-down and push-up loading directions. In this way, aerodynamic effects acting on the hood during vehicle motion were introduced as direct inputs to the simulation environment, allowing systematic evaluation of their influence on hood deformation behavior.

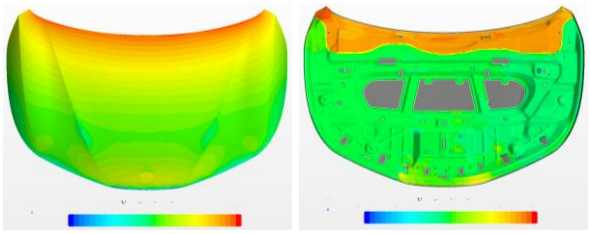


Figure 5. Analysis aeroload maps

The analyses were performed using a four-step nonlinear solution sequence, designed to replicate the physical hood closure and loading conditions in a progressive and controlled manner.

The first analysis step represents the interference fit condition during hood closure, where seals, elastic bumpers, and the gas strut are simultaneously engaged. This step captures the initial elastic deformation and seating behavior of the hood following closure. In the second step, gravitational loading was applied in addition to the interference fit state. The third step includes the application of aerodynamic pressure loads acting on the hood outer panel to represent steady-state high-speed driving conditions. In the final step, aerodynamic loads were unloaded to evaluate elastic recovery and potential residual deformation effects.

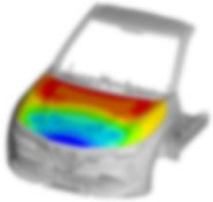


Figure 6. The overall displacement distribution

To evaluate the individual effects of the gas strut and elastic bumpers, the analyses were performed in three separate iterations, and the displacement distribution corresponding to each step was systematically analyzed. Since the aerodynamic load distribution effect was not included in the physical test outputs, the analyses were repeated under the gravity-only condition to isolate and evaluate the influence of the gas strut and elastic bumper contributions.

In the first analysis case, only the seal elements, gas strut, and gravity load were considered, and the resulting displacement distribution is presented in Figure 7.

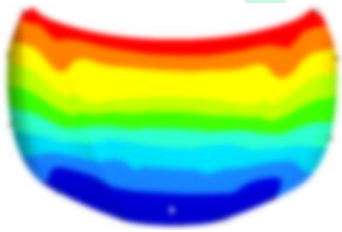


Figure 7. The displacement distribution obtained under gravity, seal, and gas strut loading

In the second analysis scenario, the gas strut was removed, and elastic bumpers were introduced into the system. The impact of the elastic bumpers on the displacement distribution was examined, and the corresponding results are presented in Figure 8.

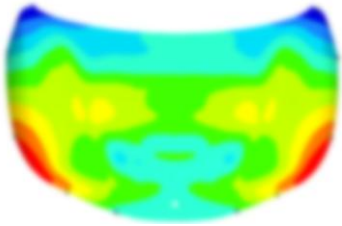


Figure 8. The displacement distribution obtained under gravity, seal and anti-vibration loading

In the final analysis scenario, the effects of gravity and seals were combined with the contributions of the gas strut and elastic bumpers, and their combined influence on the displacement distribution was evaluated. The resulting displacement distribution is presented in Figure 9.

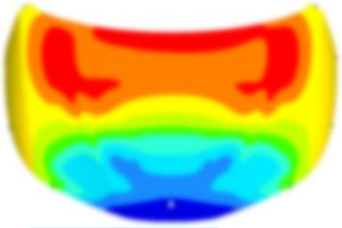


Figure 9. The overall displacement distribution obtained under gravity, seal, gas strut and anti-vibration loading

Across the three analyzed scenarios, the individual influence of each support system was evaluated, and their effects on the displacement distribution were systematically observed. The results indicate that the gas strut predominantly affects the hinge region, influencing the displacement behavior mainly in the rear area of the hood, whereas the elastic bumpers exhibit a more pronounced effect in the headlamp region. When both components are applied simultaneously, their combined contribution leads to a more balanced displacement distribution, indicating complementary behavior between the gas strut and elastic bumpers in supporting the hood structure.

Physical Test Setup and Measurement Procedure

Physical validation tests were conducted to assess hood deformation behavior under a simplified reference condition and to enable direct comparison with Static Load Compensation CAE results. The baseline test configuration corresponds to a disassembled condition, in which the hood is supported only by the hinges and latch mechanism, with gravity acting as the sole external load.

Figure 10. Physical test setup

In this disassembled test condition, all elastic support elements contributing to static load compensation were removed. Seals, elastic bumpers, and the gas strut were excluded from the setup, while the latch remained engaged to maintain the closed-hood configuration. Under gravity-only loading, the hood exhibits a characteristic flexural deformation, with the maximum displacement occurring in the central region of the hood, identified as measurement point 6.

This gravity-induced flexion leads to an increase in the measured hood-to-adjacent-component gap relative to the nominal design position. To ensure meaningful correlation with CAE predictions, test results are evaluated as the delta between the gravity-only disassembled condition and the nominal SLC state.

Gap and deflection measurements at the defined reference points were recorded and post-processed to extract deformation differences relative to the nominal position. This methodology enables isolation of gravity-induced effects observed during bench testing and supports direct comparison with CAE-based Static Load Compensation predictions.

Results and Discussion

The deformation behavior of the hood structure was evaluated through both CAE simulations and physical bench testing, with a particular focus on hem edge deflection and central hood flexion. The comparison was performed using deformation trends and relative displacement levels rather than absolute values, in order to ensure consistency between the Static Load Compensation (SLC) state and the gravity-only disassembled test condition.

Figure 11. Measurement locations used for CAE–test correlation along the hood surface and hem region

Physical test results obtained under the disassembled gravity-only condition reveal a characteristic flexural behavior of the hood, with maximum deflection observed in the central region (measurement point 6). This behavior is consistent with expectations for a hood structure supported only at the hinges and latch, without the contribution of seals, elastic bumpers, or gas strut forces. The gravity-induced deformation leads to an increase in local gap values relative to the nominal design position.

CAE results corresponding to the Static Load Compensation state demonstrate a deformation profile that follows a similar spatial trend to physical measurements. When gravity-only deformation is subtracted from the SLC state, the resulting displacement difference provides a consistent basis for comparison between simulation and test results.

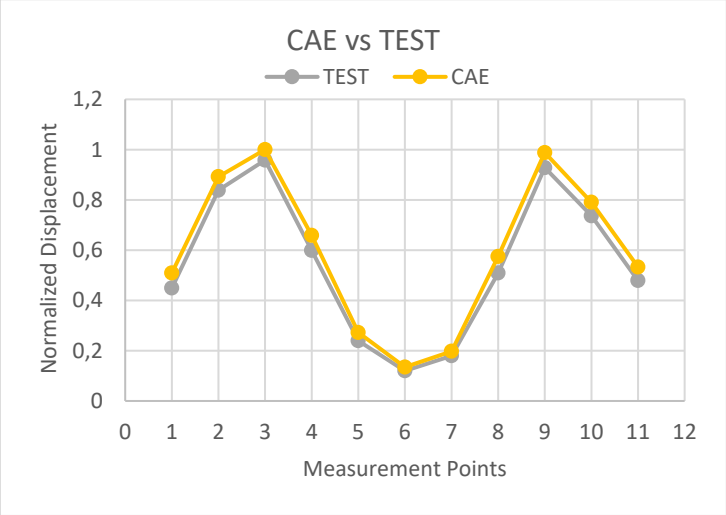


Figure 12. Comparison of CAE-predicted and physical test deformation curves at the defined measurement locations

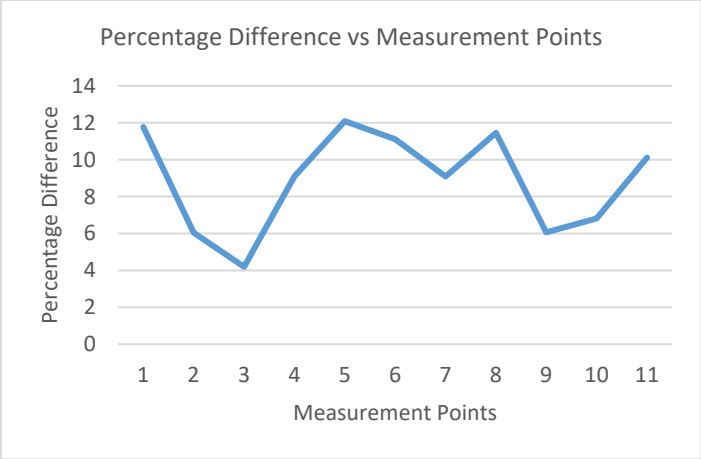


Figure 13. Percentage Difference vs Measurement Points

The deformation curve comparison shows good agreement in overall shape and trend between CAE predictions and physical measurements. In particular, the location of maximum deflection at measurement point 6 and the relative deformation distribution along the hood surface are captured accurately by the simulation model. The correlation level remains within an acceptable range, with deviations generally limited to approximately 10–12%, demonstrating strong agreement between numerical predictions and physical test observations. Aerodynamic loading introduced an additional upward displacement component in the CAE results, partially counteracting the gravity and sealing forces. The influence of aerodynamic loads was observed primarily as a global shift in the deformation curve rather than a change in deformation shape. Upon unloading of the aerodynamic forces, the hood structure exhibited elastic recovery, with no significant residual deformation predicted, indicating that the response remains predominantly elastic under the investigated load levels. Minor discrepancies between CAE predictions and physical test results are attributed to manufacturing variability, local seal stiffness tolerances, and simplifications inherent to numerical boundary conditions. Despite these limitations, the CAE model successfully captures the dominant deformation mechanisms and interaction effects governing hood static behavior.

Overall, the results demonstrate that Static Load Compensation CAE analysis provides a reliable prediction of hood deformation trends and relative displacement levels. When used in conjunction with gravity-only physical testing and delta-based comparison methodology, the approach enables effective correlation between simulation and test results and supports early identification of fit-and-finish risks during the design phase.

Conclusion

This study presents a comparison between Static Load Compensation (SLC) CAE analysis and physical validation test results for an automotive hood system under combined static and aerodynamic loading conditions. The aim was to assess the accuracy of CAE-based SLC methodologies in predicting hood deformation behavior.

The results show that the CAE model captures the dominant deformation mechanisms observed in physical testing. Hem edge deflection trends and central hood flexion, with maximum deformation occurring at measurement point 6, are predicted with good agreement. The overall correlation between CAE predictions and test measurements remains within 10–12%, demonstrating a reliable level of accuracy for early-phase virtual validation. Aerodynamic loading primarily affects the global deformation magnitude while preserving the deformation shape. The unloading sequence confirms predominantly elastic behavior, with no significant residual deformation predicted under the investigated load cases. Minor deviations are mainly attributed to manufacturing variability, seal stiffness tolerances, and modeling idealizations. Overall, the study confirms that SLC-based CAE analysis provides a robust and efficient tool for predicting hood deformation, supporting reduced prototype dependency and early identification of fit-and-finish risks during the vehicle development process.

References

[1] Hickman, A., Caudillo, M., Bhojan, R., *Automotive Hood Inner Panel Optimization with Tosca Structure.bead*, SAE OAEs, 2018.
[2] Darwish, S. M., Elseufy, S. M., Ahmad, A., *Finite Element Analysis of an Automobile Engine Hood*, King Saud University.
[3] Pandey, K. et al., *Static Structural Analysis of Engine Hood Using Natural Hybrid Fiber Composite*, AIP Conf. Proc., 2026.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Effect of a Lower Bumper Structural Element on Tibia Bending Moment in Pedestrian Collisions

Zubeyir Ramazan Aktasgil[1]
Firat Aras[2]

Abstract

Vehicle front-end design has increasingly emphasized pedestrian protection in recent years due to the evolution of regulatory requirements and consumer assessment programs. In vehicle pedestrian collisions, lower leg injuries particularly those involving the tibia and knee joint represent a significant proportion of overall injury risk and are closely associated with the design of the bumper system and the front lower structural architecture. Within this context, the Legform Impactor tests (a-PLI and Flex-PLI), utilized in Euro NCAP and UN Regulation No. 127 (Pedestrian Safety) protocols, evaluate lower leg injury risk through biomechanical metrics such as tibia bending moment, knee ligament elongation, and knee shear displacement. Among these parameters, the threshold defined for tibia bending moment is widely recognized as a key performance criterion in front-end structural design. Previous studies in the literature indicate that energy-absorbing components within the bumper system, the bumper beam, and the geometry of the lower support structures play a decisive role in lower leg injury mechanisms. The position of the bumper beam and the local stiffness distribution in the lower bumper region are identified as critical parameters that directly influence the rotational kinematics of the lower leg and the resulting bending moment distribution along the tibia during impact. Therefore, optimization of the lower bumper architecture is considered an effective design strategy for mitigating pedestrian lower leg injury risks. In this study, the influence of small-scale structural elements positioned in front of the pedestrian cross-member within the lower bumper region commonly referred to in the literature as “enablers,” “doghouses,” or “baffles”is investigated with respect to lower leg impact performance. Various design configurations were examined by modifying the position, geometry, and stiffness characteristics of these elements in order to evaluate their influence on impact load transfer mechanisms. Performance assessments were conducted through virtual simulations, and tibia bending moment distributions were analyzed under both homologation and consumer test scenarios. The results demonstrate that strategically positioned structural elements in the lower bumper region can modify the impact load path and effectively control the bending moment characteristics acting on the tibia. In particular, locally reinforced support regions created ahead of the pedestrian cross-member contribute to maintaining tibia bending moment values within target performance ranges while requiring minimal modification to the overall vehicle front-end architecture.

Keywords: Lowerleg, Tibia Bending, UNR127, EUNCAP, aPLi, Flex-PLI

[1] Technical Specialist, TOFAS, Orcıd: 0009-0000-3276-6586
[2] Senior Technical Specialist, TOFAS Orcıd: 0009-0008-9116-7450

1.INTRODUCTION

Pedestrian–vehicle collisions remain a significant issue in traffic safety, with pedestrians accounting for a considerable proportion of those injured in such accidents. This has led to pedestrian protection becoming a critical design criterion in the automotive industry. Regulations implemented in Europe, together with the Euro NCAP assessment program, have driven manufacturers to develop safer front end vehicle designs.

Lower leg injuries are among the most frequently observed injury types in pedestrian impacts, primarily because the initial contact typically occurs at the bumper system, increasing the risk of injury in this region. The assessment of lower leg injuries is commonly based on biomechanical criteria such as tibia acceleration, knee bending angle, and knee shear displacement. In this context, the Advanced Pedestrian Legform Impactor (A-PLI) has been developed to more realistically represent human lower limb biomechanics and to evaluate the performance of vehicle front end structures.

In modern vehicle architectures, the coordinated behavior of the bumper fascia, energy absorbing components, bumper beam, and surrounding structural elements enables controlled dissipation of impact energy, thereby reducing injury risks. The geometric and material properties of these components play a decisive role in pedestrian safety performance. Among passive pedestrian safety solutions, compliant bumper systems, deformation controlled structures, and knee friendly front end designs stand out. The effectiveness of these systems largely depends on optimization efforts conducted during the early stages of vehicle design.

Today, finite element method (FEM) based analyses, particularly those using explicit solvers, enable detailed investigation of A-PLI impact scenarios. This approach reduces the reliance on physical testing while allowing efficient improvement of pedestrian safety performance during the design process. The Euro NCAP Lower Legform (A-PLI) test is a fundamental criterion for evaluating pedestrian safety performance and plays a key role in shaping modern vehicle front end architectures.

A holistic and biomechanically informed design of the bumper system and associated structural components contributes significantly to the reduction of lower leg injuries. Furthermore, seemingly minor design modifications on the bumper can have a notable impact on lower leg impact performance. This study aims to investigate the effects of vehicle front end design on pedestrian lower leg injuries and to demonstrate how a simple design intervention can influence the performance of passive safety components.

2. EURO NCAP LOWER LEG FORM TEST METHODOLOGY and EVALATION CRITERIA

The A-PLI Legform test conducted within the scope of Euro NCAP is based on a standardized procedure aimed at evaluating the risk of lower leg injuries in pedestrian vehicle collisions. The A-PLI impactor used in the test has been developed to represent the biomechanics of the human tibia and knee joint, and it is propelled toward the vehicle's bumper region at an impact speed of 40 km/h. During the impact event, key biomechanical metrics such as tibia acceleration, knee bending angle, and knee shear displacement are measured. In addition, tibia bending moment and ligament elongations representing knee ligament injuries

are also recorded. Furthermore, in relevant scenarios, the femur bending moment parameter is considered to evaluate the interaction between the vehicle front end structure and the upper leg.

Within the Euro NCAP assessment methodology, these biomechanical criteria are evaluated through a graded scoring system based on predefined performance levels. This approach requires not only the optimization of global structural stiffness but also the control of local deformation behavior and load transfer mechanisms. In particular, parameters such as tibia bending moment, ligament elongations (e.g., MCL), and femur bending moment enable a comprehensive assessment of both bone and soft tissue injury risks.

3. LITERATURE SEARCH

Studies in the literature focusing on the optimization of vehicle front bumper systems to reduce pedestrian lower leg injuries emphasize the balance between structural stiffness and energy absorption capacity as a primary design criterion. T. J. Huang and colleagues conducted finite element analyses using a Flex-PLI legform impactor, investigating the effects of bumper beam stiffness, energy-absorbing layers, and substructure deformation behavior through a parametric approach. The results indicate that energy-absorbing structures reduce tibia acceleration, whereas increased stiffness negatively affects knee bending and shear displacement. The authors highlight that an optimal pedestrian protection performance requires a balanced design approach incorporating controlled deformation and appropriate stiffness distribution within the bumper system [1].

Research on pedestrian friendly bumper design further demonstrates that the geometric and material properties of front end components play a decisive role in injury mechanisms. Onur Can Kalay and co-authors analyzed the effects of bumper height, energy absorber thickness, and beam configuration on lower leg injury criteria using a legform impactor. Their findings reveal that properly positioned and lower stiffness energy-absorbing structures significantly reduce tibia acceleration and knee loads, whereas improper geometric configurations increase load transfer, thereby elevating injury risk. The authors emphasize that the compatibility between geometry and material properties is critical for pedestrian safety oriented bumper design [2].

In the study conducted by Yong Ha Han and Young Woo Lee, the front bumper structure was optimized to minimize pedestrian lower leg injuries. Using a finite element model with a Flex-PLI legform impactor, the authors performed a parametric investigation on bumper beam geometry, energy absorber characteristics, and connection structures. The results demonstrate that optimized energy absorbing components and beam design significantly improve tibia acceleration, knee bending, and shear displacement values, whereas high stiffness structures increase injury risk. The study concludes that a balanced structural design ensuring controlled deformation and effective energy dissipation is essential for improving pedestrian safety performance [3].

In another study, D. K. Par and C. D. Jang focused on mitigating the adverse effects of the high bumper geometry typical of SUVs on pedestrian lower leg injuries through design optimization. Using a Flex-PLI legform impactor-based finite element model, they conducted a parametric analysis of bumper height, beam position, energy absorbing structures, and subcomponent deformation behavior. The findings indicate that increased bumper height in

SUVs negatively affects knee bending and shear displacement; however, these effects can be mitigated through optimization of energy absorbers and beam positioning. The authors conclude that improving pedestrian performance in SUV bumper systems requires a combined optimization of geometric layout and energy absorption capacity [4].

4. FINITE ELEMENT MODEL

In this study, vehicle models for pedestrian lower leg impact analyses were developed using pre-post processing software in order to examine the tibia bending moment. Decomposing the complex structure of the vehicle into its fundamental components (such as the body, doors, crash boxes, engine, bumper, seat, and suspension) and developing finite element models for each separated component provides a more efficient solution in terms of both cost and time. The half-scale finite element (FE) model was completed by assembling each component's finite element representation using an assembly approach. The crash analyses were performed using an explicit method specifically developed for such impact simulations. The full-scale model consists of approximately 1,750,000 finite elements.

5. APPROACH and RESULTS

In the literature, studies focused on bumper design aim to control and minimize lower leg injuries by modifying and optimizing the vehicle front bumper structure, its stiffness, or the geometry of the absorber and bumper beam. In lower leg impact simulations, it is intended that the leg maintains its alignment (parallelism) during the impact event. However, considering real vehicle geometries, achieving this ideal condition is challenging. As illustrated in the figure 1, this balance is essentially attempted through three main regions: the bonnet, the bumper beam, and the pedestrian cross-member (front cross beam/traverse). To keep injury metrics such as MCL response, femur bending, and tibia bending within the desired target corridors, a deformation behavior close to the ideal condition is aimed for.

Figure 1 Bumper Design and Legform Derformation

In this study, approaches reported in the literature were implemented in order to satisfy the target performance criteria at all evaluation points. However, for the Y550 section, the required performance could not be achieved using the existing solutions. Since the pedestrian cross-member alone was not sufficient to meet the tibia bending targets, an additional enabler

was introduced in front of the pedestrian cross-member in this region. The structure was then optimized, resulting in performance levels that fall within the target corridor.

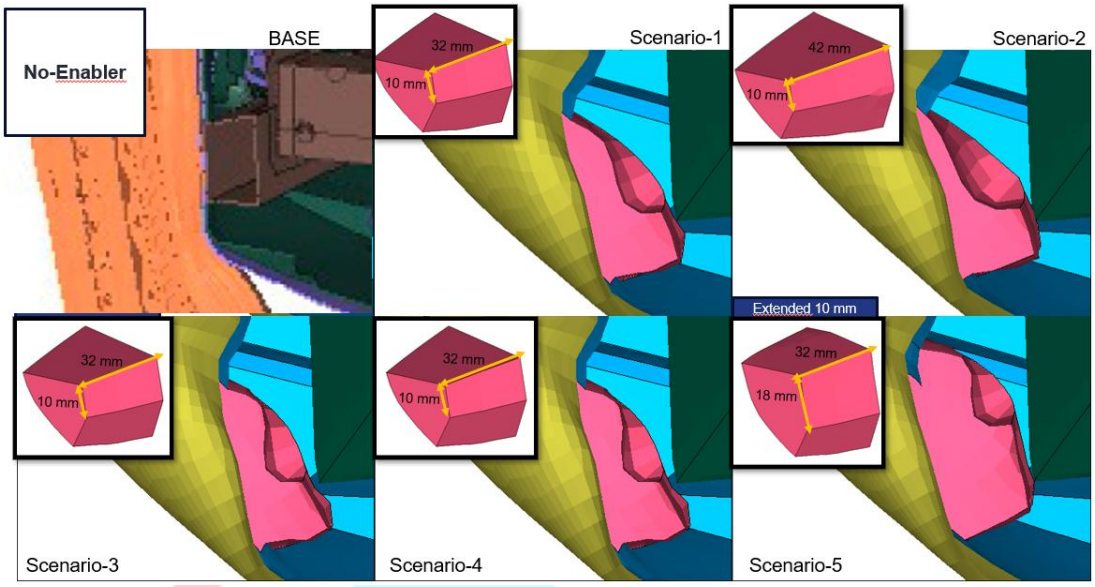
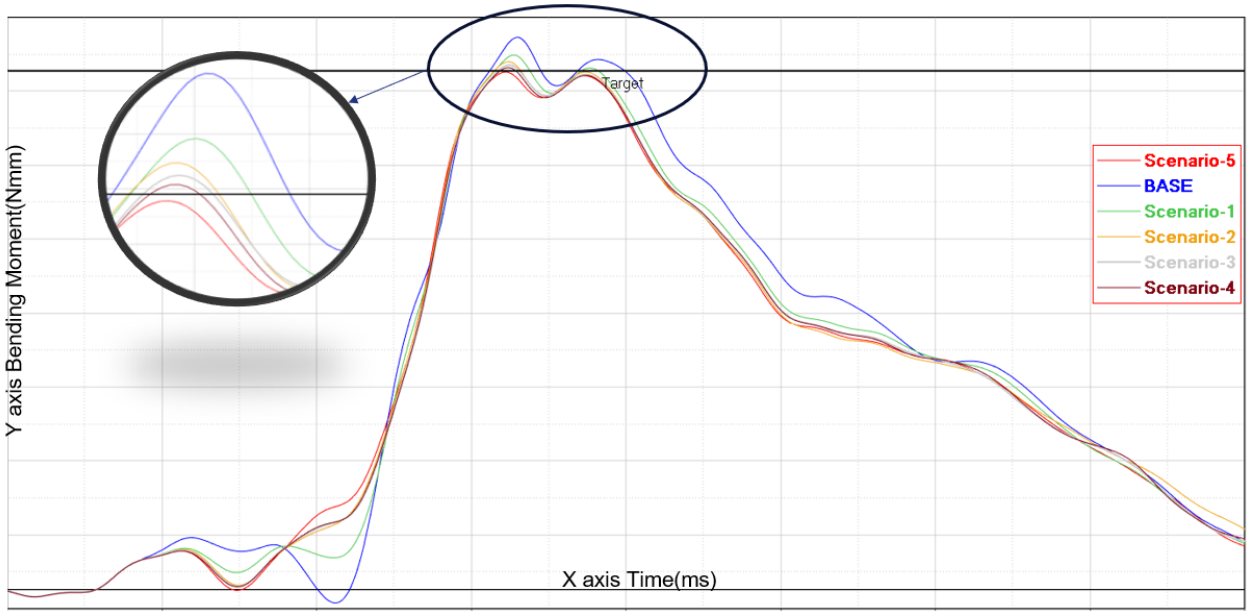


Figure 2 Enablers

As shown in Figure (2), five different scenarios were evaluated on this structure in order to determine the optimum configuration in terms of width, length, and height parameters. The objective was to control the tibia bending moment by modifying the deformation mode of the system.



Graphic 1 Tibia Bending Moment Curve

In Figure (1), when evaluating the different scenarios, it is observed that Scenario 5 successfully achieves the desired bending moment value below the target threshold.

5. CONCLUSION

In this study, in addition to conventional design parameters, a localized solution directly influencing the load transfer mechanism in the lower bumper region has been developed. In particular, for the Y550 section, where the pedestrian traverse component alone is insufficient

to meet the required performance targets, a dedicated enabler element positioned ahead of this region has been introduced to redirect the deformation behavior.

Analyses conducted across six scenarios involving different geometric and positional variations demonstrate that the enabler element effectively modifies the load path during the impact event and efficiently controls the bending moment acting on the tibia. Among these configurations, Scenario 5 was identified as the most effective solution, reducing tibial bending moment values below the target threshold limits.

In conclusion, the integration of small scale structural elements into the lower bumper region has been shown to provide significant pedestrian safety improvements with minimal design modifications. This approach offers a practical, low cost, and highly effective optimization strategy that can be implemented within existing vehicle architectures.

6. References

[1] T.-J. Huang, J.-T. Wu, C.-Y. Hsiao, M.-S. Wang, K.-C. Lee, (2011), *Design of a Bumper System for Pedestrian Lower-Leg Protection Using the Taguchi Method*, (Journal Article) (pp. 1578–1586)

[2] Onur Can Kalay, Sinan Vargelci, Lino Catenaro, Fatih Karpat, K (2022), *Pedestrian-Friendly Vehicle Bumper Design*, (European Journal of Science and Technology) (pp. 126–130)

[3] Yong Ha Han, Young Woo Lee, (2002), *Optimization of Bumper Structure for Pedestrian Lower Leg Impact*, (SAE Technical Paper) (SAE 2002-01-0023)

[4] D. K. Park, C. D. Jang, (2010), *Optimum SUV Bumper System Design Considering Pedestrian Performance*, (International Journal Article) (pp. 819–824)

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Impact of Crash Sensor Bracket Design and Mounting Location on Airbag Signal Quality

Halil İbrahim SANCAR[1]
Fırat ARAS[2]

Abstract

Airbag systems are critical passive safety components designed to protect vehicle occupants during crash events. The correct deployment of airbags depends on reliable signals obtained from crash sensors mounted on the vehicle structure. These sensors measure acceleration and velocity changes during impact and transmit the data to the airbag control unit, which determines the airbag deployment timing. Therefore, both the mounting location of the sensor and the structural stiffness of the bracket connecting the sensor to the vehicle body are important design parameters for obtaining stable and accurate signals.In vehicle structures, crash sensors are commonly integrated into structurally rigid regions of the body such as underbody rails, the central tunnel area, and structural pillars including A, B, and C pillars through dedicated mounting brackets. If the bracket design lacks sufficient stiffness or if the sensor is mounted on regions prone to deformation during a crash event, structural vibrations and local instabilities may occur. These conditions can introduce oscillations and noise into the acceleration signals measured by the sensor.In this study, the impact of crash sensor bracket design and mounting location on signal quality was investigated using finite element crash simulations. Different bracket stiffness levels and mounting configurations were evaluated. The results show that insufficient bracket rigidity or mounting sensors on structurally unstable regions can produce oscillatory acceleration curves and unreliable crash signals, potentially affecting airbag triggering performance.

Keywords: Airbag System, Crash Sensor, Sensor Bracket Design, Signal Quality, Crash Simulation

[1] Virtual Analysis Enginer,TOFAS, Orcıd: 0009-0005-7615-4449
[2] Senior Technical Specialist, TOFAS, Orcıd: 0009-0008-9116-7450

1. Introduction

Airbag systems in vehicles are among the most critical passive safety systems for ensuring occupant protection during a crash. The proper deployment timing of these systems depends on the accuracy of the data obtained from crash sensors. These sensors measure acceleration changes during impact and transmit the data to the control unit, where the deployment decision is made based on this information.

However, the signal measured by the sensor reflects not only the global vehicle acceleration behavior but also the local structural response of the region where the sensor is mounted. In particular, insufficient bracket stiffness, improper mounting surfaces, and local deformations may lead to oscillations and noise in the acceleration signal [1]. When the sensor bracket is connected to the vehicle body through a limited contact surface, the translational and rotational degrees of freedom of the bracket increase during the crash event. This condition amplifies local vibration and oscillatory behavior, which is directly reflected in the measured acceleration signal.

In this study, the fundamental structural causes of signal disturbances observed in different crash scenarios are investigated. It is demonstrated that these issues can be mitigated through simple improvements in sensor placement and bracket design.

2. Full Rigid Frontal Crash and Side Pole Crash

The full rigid frontal crash test involves a vehicle impacting a rigid barrier with 100% overlap and is primarily intended to evaluate the structural performance of the vehicle, as shown in Figure 1. Such frontal impact scenarios are assessed in conjunction with the test procedures defined under the United Nations regulation UN R137 [5].

Within this scope, multiple structural parameters are evaluated simultaneously, including the integrity of the occupant compartment, the energy absorption behavior of the front rails, the deformation characteristics of the vehicle body, load transfer paths, and the integrity of structural connections. In addition, this test represents a critical scenario for evaluating the performance of crash sensors located in the front region of the vehicle. These sensors measure the acceleration signal generated during the impact and transmit the data to the airbag control unit, where the deployment timing directly depends on the quality of this signal. Therefore, local structural deformations, sensor mounting conditions, and bracket stiffness play a decisive role in the measured signal.

The side pole test simulates a vehicle impacting a narrow and rigid pole from the side and is primarily used to assess the lateral structural performance of the vehicle, as shown in Figure 2. In this context, the UN R135 pole test, defined under United Nations regulations, is used to evaluate the side impact performance of vehicles [6]. In this test, impact loads are highly localized and occur over a short duration, placing critical loading on structural components, particularly around the B-pillar region. This condition requires sensors to accurately capture high-frequency and abrupt changes in acceleration.

In this study, unlike standard regulatory tests, the impact location is selected as the C-pillar instead of the B-pillar. Such scenarios are not part of standard regulations but are implemented as in-house pole tests by OEMs to evaluate the structural behavior of different

regions of the vehicle. An impact applied to the C-pillar provides a complementary loading condition for analyzing the performance of the rear side structure, luggage compartment region, and rear load transfer paths.

Both crash scenarios represent critical references from a sensing perspective. The local deformation characteristics during impact, sensor placement, and connection stiffness directly influence the quality of the measured acceleration signal. Therefore, these tests play an important role not only in evaluating structural performance but also in assessing the accuracy and reliability of crash sensing systems.

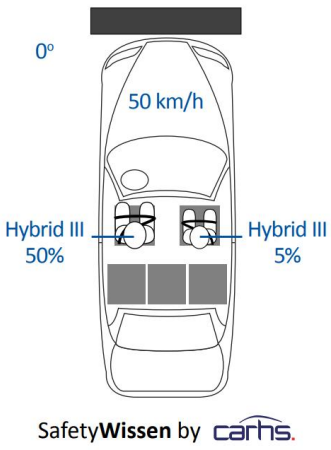


Figure 1 UN R137 full rigid frontal crash test

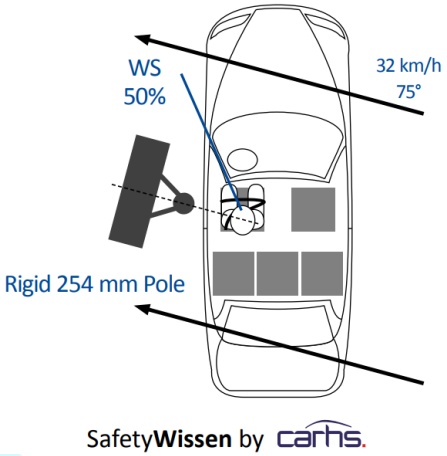


Figure 2 UN R135 side pole test

3. Existing Protective Methods

Studies aimed at improving the signal quality obtained from crash sensors indicate that the approaches in this field are predominantly focused on signal processing techniques and algorithm-based decision systems.

The first approach is based on filtering the measured acceleration signals. Since raw sensor signals obtained during a crash may contain high-frequency noise components, various filtering and preprocessing techniques are applied to make the signal more stable. In the literature, it has been shown that preprocessing methods such as filtering, resampling, and signal limiting are widely used in crash data processing [1]. Similarly, technical reports published by NHTSA indicate that raw acceleration signals are evaluated after being filtered [2]. However, especially during the early phase of a crash, these processes may alter the physical characteristics of the signal and lead to errors in timing information, which is critical for airbag deployment.

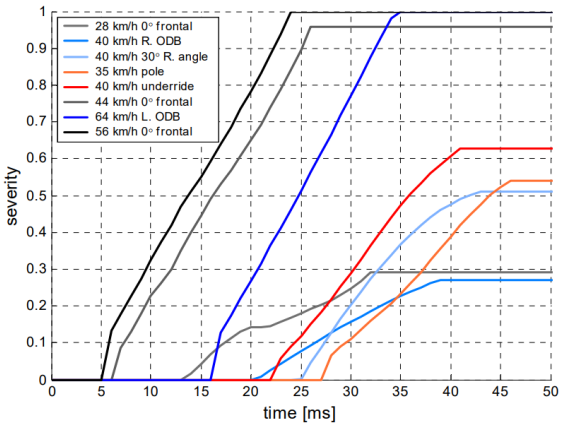


Figure 3 *Unfiltered curves (First approach)*

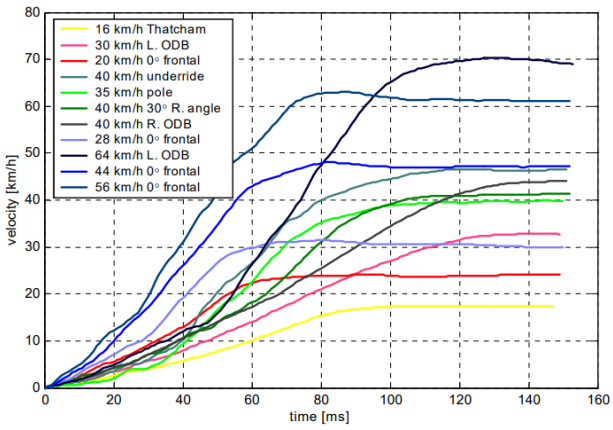


Figure 4 *Filtered curves (First approach)*

The second approach involves algorithm-based multi-sensor and crash mode classification methods. In the literature, there are studies in which data obtained from different sensor locations are evaluated together to determine the type of crash [3][4]. In these methods, data from multiple sensors are processed in parallel, and crash modes are classified to generate deployment decisions. However, these approaches focus on developing more robust and adaptive decision mechanisms based on the existing signal rather than directly improving the sensor signal itself.

A review of the existing literature shows that while signal processing and algorithm-based decision methods are widely studied, the effects of sensor bracket design, mounting interface, and local structural behavior on signal quality have been addressed only to a limited extent. In this study, this gap is directly targeted, and the influence of local structural behavior on sensor signals is investigated in detail under different crash scenarios

4.Finite Element Method for Model Creation

In this study, the finite element method was used to investigate the local structural behavior affecting sensor signal quality. To obtain results as close as possible to physical tests, full vehicle crash simulations were developed.

In the analysis model, the vehicle body, structural components, and the regions where the sensor is mounted were represented in detail. Within the model, the necessary connection elements and contact definitions were established to accurately capture crash behavior.

Crash analyses were performed using crash simulation software based on the explicit solution method. During the model preparation process, pre- and post-processing tools were used, and a high-resolution full vehicle model was preferred for the analyses.

To represent sensor behavior, time-dependent acceleration data were extracted from selected node points located in the regions where the sensor is positioned. Using these data, the characteristics of the sensor signal were evaluated. This approach aimed to directly examine the structural effects on the measured signal.

Within the scope of the study, two different crash scenarios were considered:

Side impact scenario: The sensor was positioned within the C-pillar, and the effect of local deformations in this region on the signal was investigated.

Frontal impact scenario: The sensor was positioned at the front rail tip and vertical link region, and the effects of load transfer and deformation during the crash on the signal behavior were analyzed.

In both scenarios, comparative analyses were conducted by defining different bracket designs, mounting surfaces, and connection conditions at the sensor mounting locations.

5. Approach and Results

Within the scope of the study, in the side impact (side pole) scenario, the sensor bracket placement and its connection characteristics were considered as one of the most critical parameters affecting sensor behavior. The sensor locations on the vehicle body and the reference regions are illustrated in Figure 6 through a sectioned BIW structure. In this configuration, the C-pillar region is identified as a critical area in terms of both impact load transfer and local deformation characteristics.

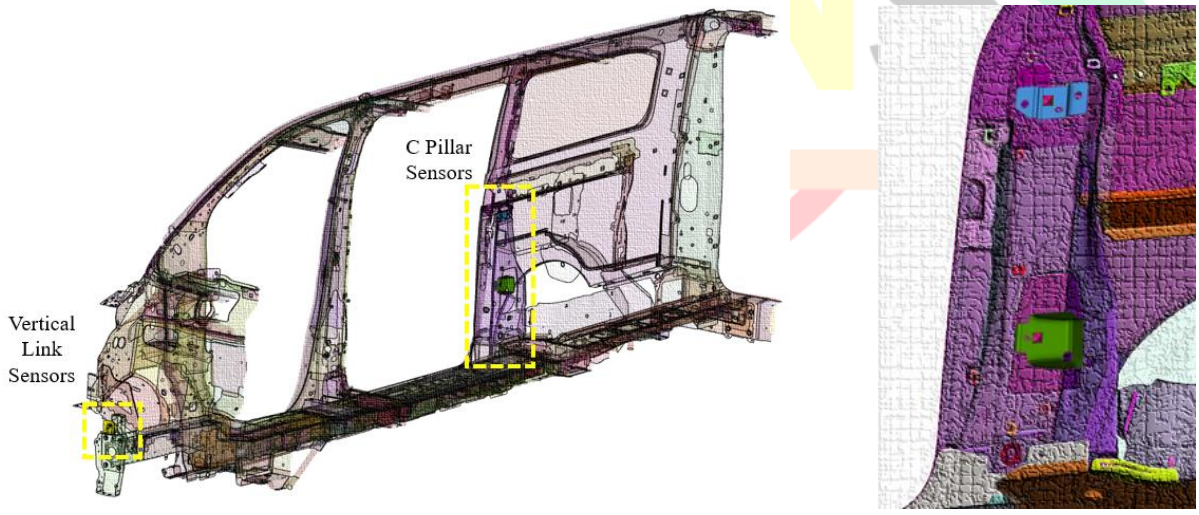


Figure 6 *BIW cross-sectional view showing the vertical link sensor and C-pillar sensor locations*

Figure 7 *Close-up view of the C-pillar, showing the old and new sensor placements*

Focusing on the C-pillar region, it was observed that the deformation occurring during the crash is not spatially uniform, and there are significant differences between the lower and upper regions. As shown in Figure 7, the lower part of the C-pillar experiences higher

deformation and consequently increased vibration, whereas the upper region exhibits relatively more stable structural behavior. The existing (baseline) sensor location is positioned in this highly deformable lower region, and the sensor bracket is connected to the body through a single surface.

In the baseline design, due to its placement in a high-deformation region and its single-surface attachment, the sensor bracket exhibits significant vibration and oscillatory behavior during the crash. This behavior is directly reflected in the acceleration signal measured by the sensor mounted on the bracket, leading to high-frequency noise and oscillations. As a result, the stability and reliability of the acceleration data used in airbag deployment algorithms are adversely affected. The geometry of the baseline bracket design is shown in Figure 8.

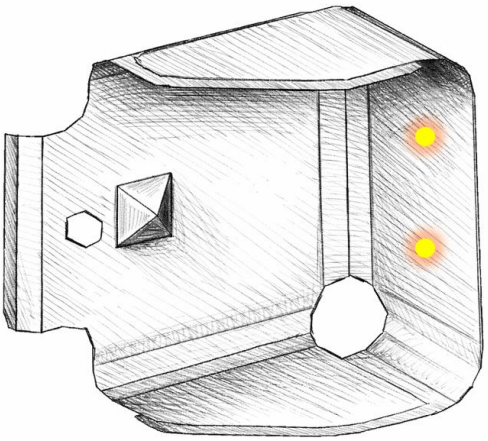


Figure 8 *Old design sensor bracket*

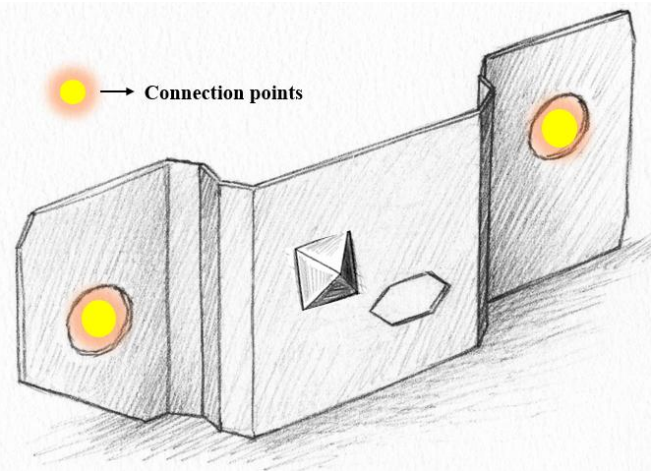
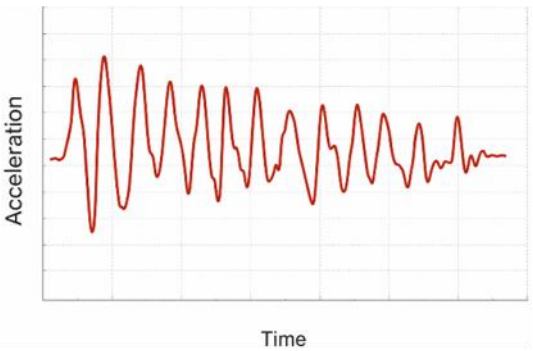


Figure 9 *New design sensor bracket*

To address this issue, two main improvements were implemented in the newly developed design approach. First, the sensor was relocated to the upper region of the C-pillar, which is subjected to lower levels of deformation. Second, the bracket design was revised to enable attachment to the vehicle body through multiple surfaces instead of a single surface. This configuration restricts the bracket's degrees of freedom, particularly in rotational and local translational directions, suppresses local vibration modes, and enhances the dynamic stability of the system. As a result, structural oscillations transmitted from the bracket to the sensor during the crash are significantly reduced. The geometry of the new bracket design is shown in Figure 9.

The effect of these design changes on the sensor signal can be clearly observed in the acceleration–time plots. The acceleration signal obtained from the baseline bracket design (Figure 10) exhibits pronounced oscillations and high-frequency fluctuations. These oscillations reflect both the influence of the high-deformation region and the vibration behavior of the single-surface-mounted bracket.

In contrast, the signal obtained from the new bracket design (Figure 11) shows a significantly more stable response with reduced oscillatory behavior. By relocating the sensor to a less deformable region and increasing the bracket stiffness through multi-surface attachment, noise in the signal is substantially reduced. The resulting cleaner and more stable signal provides more reliable input for airbag deployment algorithms.



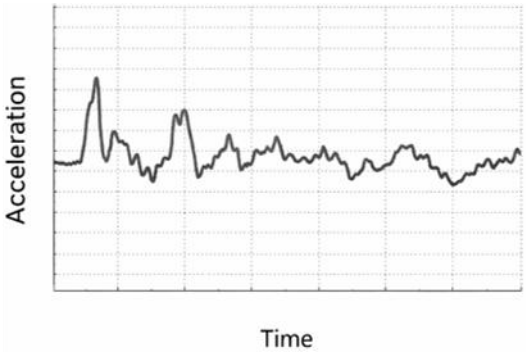
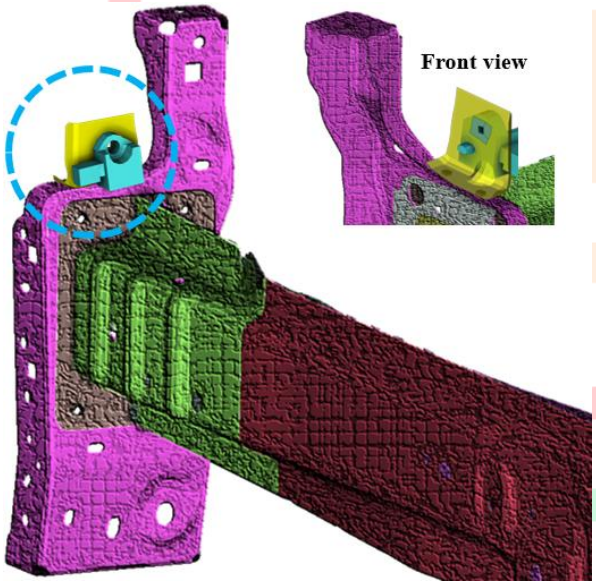


Figure 10 Oscillatory acceleration–time graph obtained from the old bracket design

Figure 11 Oscillatory acceleration–time graph obtained from the new bracket design

In conclusion, this study clearly demonstrates that sensor bracket design and placement have a direct impact on crash sensing performance. Instead of the oscillatory signal obtained from a configuration located in a high-deformation region with single-surface attachment, a more rigid and appropriately positioned bracket enables the acquisition of a stable and reliable acceleration signal. This approach shows that performance improvements can be achieved through sensor placement and bracket design alone, without requiring major structural modifications to existing vehicle platforms.

Within the scope of the frontal impact (FRW) scenario, another critical region affecting sensor signal quality was identified in the front structural components, particularly the rail tips and the vertical link region. Sensor locations and the existing design configuration in these areas are presented in Figure 12 and Figure 13.



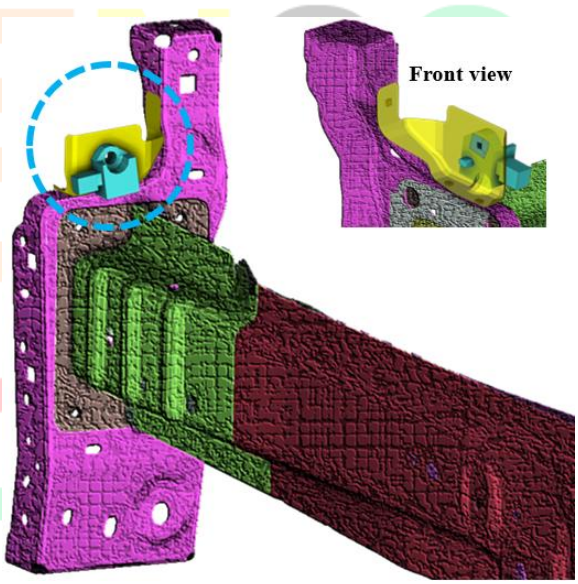


Figure 12 Old sensor bracket and sensor positioned on the vertical link

Figure 13 New sensor bracket and sensor positioned on the vertical link

In the FRW crash scenario, impact loads are transmitted directly through the rail and tend to concentrate in the vertical link region, resulting in high levels of deformation and dynamic loading in this area. In the existing (baseline) design, the sensor bracket is attached to the vertical link through a single surface only. This attachment configuration leads to additional

oscillatory and vibrational behavior of the bracket under the high deformation and load transfer conditions during the crash.

The geometry of the baseline bracket design is shown in Figure 14. In this configuration, due to the single-surface attachment, sufficient structural stiffness cannot be achieved, and the sensor is directly exposed to local vibrations.

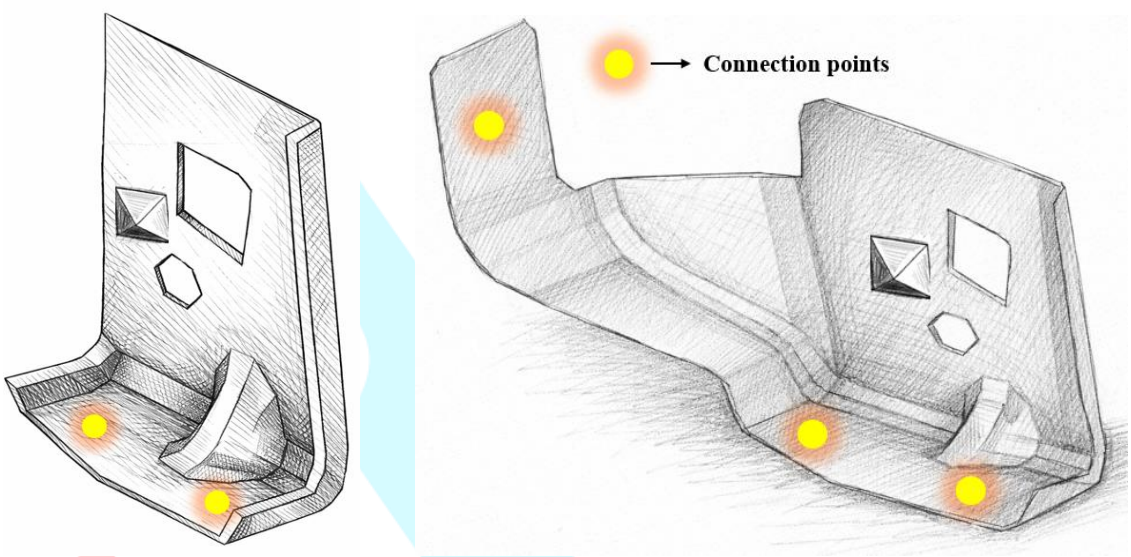


Figure 14 Old vertical link sensor bracket

Figure 15 New vertical link sensor bracket

This issue, similar to the findings observed in the side pole scenario, leads to high-frequency oscillations and noise in the measured acceleration signal. In this region, where load transfer is highly concentrated, the inherent oscillatory behavior of the bracket is superimposed on the sensor signal, thereby degrading measurement quality.

To address this, the sensor bracket was redesigned to establish contact with multiple surfaces of the vertical link instead of a single surface. With this approach, the rotational and translational degrees of freedom of the bracket during the crash are restricted, effectively locking the bracket to the vertical link. As a result, local stiffness is increased, bracket-induced vibration modes are suppressed, and the measured acceleration signal becomes more stable. The geometry of the new bracket design is shown in Figure 15.

With the multi-surface attachment approach, oscillatory and vibrational behavior of the bracket during the crash is significantly reduced. Consequently, the sensor is less affected by local structural vibrations, leading to a more stable measured acceleration signal.

The effect of this design modification on the sensor signal can be clearly observed in the acceleration–time plots. The signal obtained from the baseline bracket design (Figure 16) exhibits pronounced oscillations, reflecting the combined effect of the high-deformation region and insufficient connection stiffness.

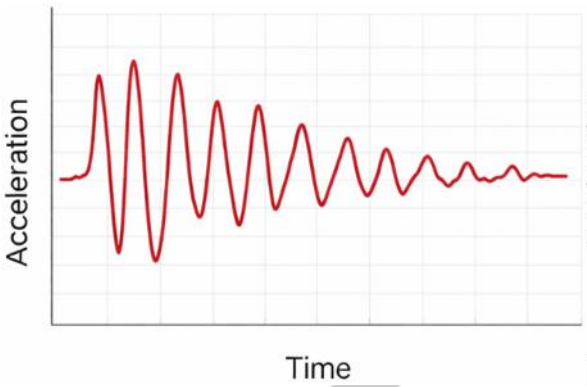


Figure 16 Oscillatory acceleration–time graph obtained from the old vertical link sensor bracket

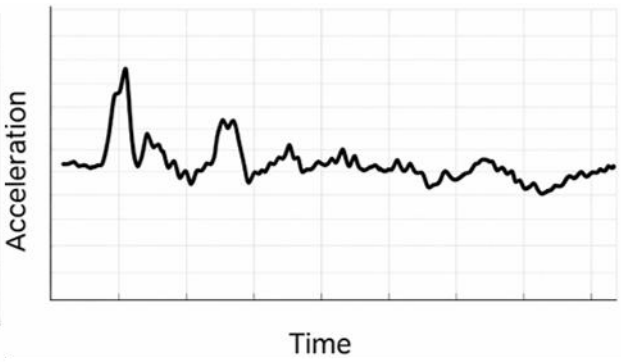


Figure 17 Oscillatory acceleration–time graph obtained from the new vertical link sensor bracket

References

[1] Pipkorn, B.,"Development of Crash Sensing Algorithms for Airbag Systems," SAE Technical Paper 2004-01-1633.https://doi.org/10.4271/2004-01-1633

[2] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA),"Event Data Recorder (EDR) and Crash Sensing Systems," https://www.nhtsa.gov

[3] Supriya M.S., Gangadhar N.D., "Automotive Crash Detection Using Multi-Sensor Data Fusion," Lecture Notes in Electrical Engineering, 2020. https://www.researchgate.net/publication/340800493_Automotive_Crash_Detection_Using_Multi-sensor_Data_Fusion

[4] Chan, C.Y., "A Treatise on Crash Sensing for Automotive Air Bag Systems," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002. https://www.researchgate.net/publication/321759621_Reliable_Automotive_Crash_Detection_using_Multi_Sensor_Decision_Fusion

[5] UN Regulation No. 137, "Uniform Provisions Concerning the Approval of Passenger Cars in the Event of a Frontal Collision," https://unece.org/transport/vehicle-regulations

[6] UN Regulation No. 135, "Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to their Pole Side Impact Performance," https://unece.org/transport/vehicle-regulations

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Simulation–Test Correlation of ECE R17 Luggage Retention Performance in a Commercial Vehicle

Tamer AYDINER[1]
Tuğberk İsmail ŞİMŞEK [2]

Abstract

This study presents a simulation methodology developed in FEA to accurately predict seatback performance for the ECE R17 homologation test. The objective was to establish a reliable numerical approach capable of supporting design evaluation during early development stages.

The methodology was first validated using an existing vehicle configuration for which physical test data were available. A detailed finite element model representing the tested seat system and boundary conditions was developed, and the simulation results showed strong agreement with the measured test responses. This correlation confirmed the reliability of the modeling strategy, material definitions, and applied loading conditions.

Following the validation phase, the same simulation approach was applied to a new vehicle prototype to evaluate its expected behavior under ECE R17 loading conditions during the development process. After the prototype vehicle was physically tested, the experimental measurements were compared with the corresponding simulation results.

The comparison revealed an almost perfect correlation between numerical predictions and test data, demonstrating that the validated FEA workflow can reliably reproduce ECE R17 test behavior and effectively support seat system development while reducing reliance on extensive physical prototyping.

Keywords: Luggage Retention, Test, CAE, correlation

[1] CAE Engineer, TOFAŞ, Orcid: 0000-0002-6401-5100
[2] CAE Engineer, TOFAŞ, Orcid: 0009-0002-8746-9137

Introduction

Passive safety requirements in the automotive industry constitute one of the most critical design inputs in the vehicle development process. Particularly in frontal crash and sudden acceleration scenarios, the movement of loads located in the luggage compartment toward the passenger cabin poses significant injury risks. Therefore, it is essential that the rear seat backrest, head restraint, and the structural systems supporting these components provide sufficient strength.

The ECE R17 regulation, published by the UNECE, defines the mechanical strength of seats, their anchorages, and head restraints; it also includes load retention tests aimed at protecting the passenger compartment against the displacement of luggage (UNECE, 2014). Within the scope of the regulation, the permissible displacement limits for the seat backrest and head restraint under a specified acceleration profile are clearly defined (UNECE).

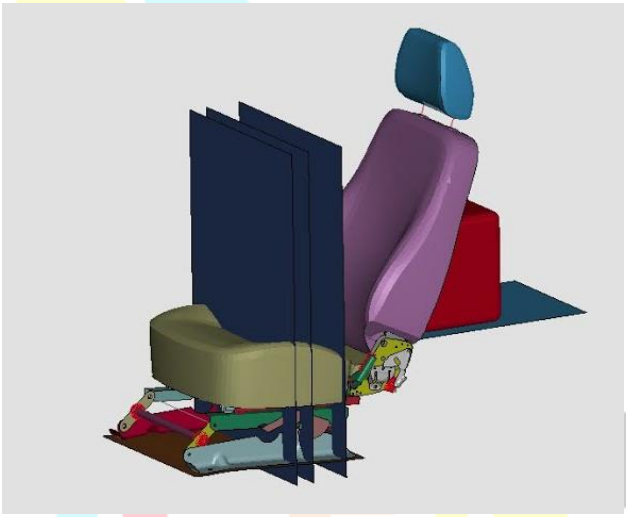


Figure 1

In current vehicle development processes, the verification of these requirements is predominantly carried out through physical testing. However, increasing product diversity, shortened development timelines, and cost pressures have heightened the need for reliable numerical evaluation methods that can serve as alternatives or complements to physical tests. The literature reports that validated finite element–based models can be used for such tests with high accuracy and can significantly reduce the number of physical prototypes required (Kondapalli) (Liu, 2020).

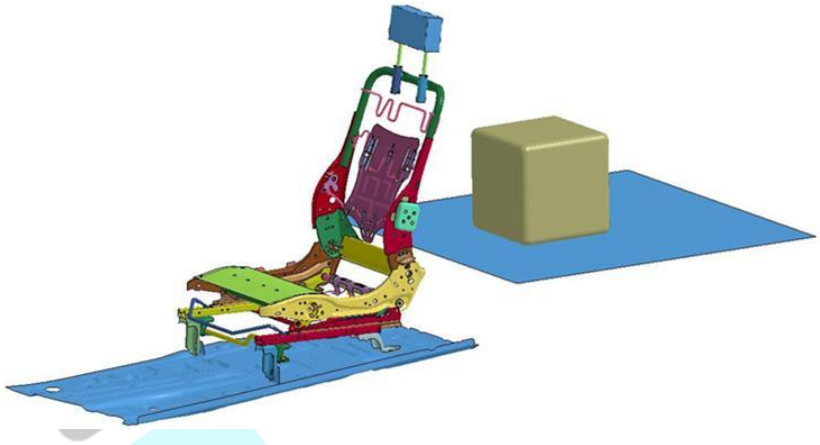


Figure 2

The aim of this study is to present a detailed numerical analysis evaluation methodology developed for the ECE R17 luggage retention test and to investigate its correlation with physical test results at different system levels.

Method

General Structure of the Numerical Model

Within the scope of this study, a detailed numerical model was developed to represent the luggage load retention behavior of the rear seat system. The model includes the seat backrest frame, head restraint structure, connection and locking components, and the regions where these components are attached to the supporting structure. All connection details—such as the interfaces between the BIW and the seat, spot welds between brackets, and bolted joints—were modeled comprehensively. The simulation was conducted under time-dependent dynamic loading conditions.

In the analyses, the test configuration defined in the regulation was taken as the basis, and the evaluation planes specified as criteria were positioned in space accordingly. Appropriate boundary conditions were applied to represent the effect of the vehicle body, and the loading was introduced to the system through the prescribed acceleration curve (UNECE, 2014).

Definition of Loading and Boundary Conditions

In the ECE R17 luggage retention test, the vehicle is subjected to an acceleration profile defined in the regulation, starting from a specified initial speed. Within the scope of this study, this loading was modeled through time-dependent inertial effects. Blocks representing the luggage loads were positioned according to the locations specified in the regulation and defined to come into contact with the seat backrest (UNECE).

While defining the boundary conditions:

• Rigid body motions of the supporting structure were constrained,

• Appropriate degrees of freedom and constraints were assigned at the seat mounting points to represent real test conditions,

• Contact interactions between the luggage blocks and seat components were defined.

This approach aims to accurately represent load transfer paths and local deformations.

Representation of Material and Structural Behavior

Material definitions for the structural components used in the model were established based on mechanical properties previously validated in similar safety assessments. Elastic–plastic behavior was considered for the seat frame and connection elements, and nonlinear effects arising from large deformations and contact interactions were incorporated into the model.

In order to capture stress concentrations and potential local damage mechanisms in the connection regions, these areas were represented in detail. This approach enabled the damage modes observed during physical testing to be tracked within the numerical environment as well.

Sub-Level (Rigid) Model Correlation

As a first step in the validation of the methodology, a reference seat configuration for which physical test data were available was used. The primary objective was to achieve consistency between these existing results and the FEA studies. At this stage, analyses were conducted using a simplified model, and the system behavior was evaluated in terms of fundamental displacement parameters. Instead of modeling the full vehicle level, the seat connection points were directly constrained, since the available test was performed with only the seat system fixed.

The rotation of the seat backrest, the motion of the head restraint, and the displacement values at the defined homologation planes were compared with the test measurements. As a result of iterative refinements, it was determined that the numerical analysis results showed a high level of agreement with the experimental data.

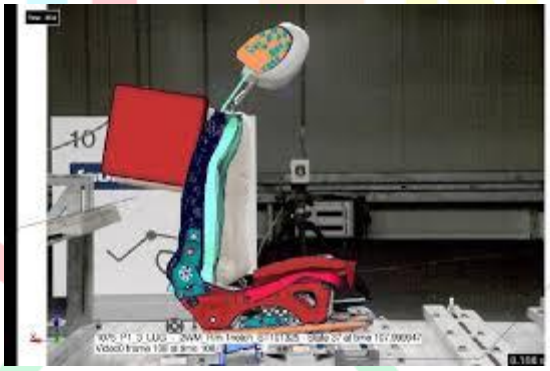


Figure 3

Full-Body Level Evaluation

After the lower-level validation was completed, the same methodology was applied to a more comprehensive model representing the entire vehicle body. At this stage, different loading angles were considered, and alternative scenarios defined in the regulation were evaluated.

During the development process, various design variants were analyzed and compared in terms of behavioral similarity against the baseline reference design. The selected design met the target values in terms of critical displacement and deformation criteria.

Test–Simulation Comparison and Measurement Effects

After the completion of the physical tests, the test and simulation results were compared in detail. A nearly same correlation and high overall agreement were achieved in terms of head restraint behavior, seatback deformation, and damage characteristics of the fastening components.

Connection points such as seat feet and floor connections, deformed nearly the same as the test results. Detailed modelling approach gave a well result for observing connection deformations.

Results

Within the scope of this study, it has been demonstrated that the developed numerical evaluation methodology can successfully represent the ECE R17 luggage retention test at different system levels. In both the sub-system and full-body level applications, displacement values at critical homologation planes were found to be consistent with physical test results.

Among the analyzed design variants, no significant differences in performance were observed. It was determined that some of the discrepancies initially interpreted as test–simulation differences were in fact related to measurement methods rather than structural behavior.

Discussion and Conclusion

The findings demonstrate that, within the scope of ECE R17, the luggage retention performance of rear seat systems can be reliably assessed using validated numerical methods. The proposed approach has the potential to support design decisions in early development stages, thereby reducing the need for physical testing and lowering overall development costs.

The study also highlights the critical importance of measurement techniques and evaluation perspective in test&simulation correlation. This represents an important consideration that should be taken into account in future safety studies of a similar nature.

References

Bolu, H. S. et al. (2022). Strength analysis of vehicle seats under ECE R17.

Kondapalli, S. et al. CAE simulation of automotive seat back structures under luggage retention loading.

Liu, J. et al. (2020). Luggage retention optimization design for rear seats. Cham: Springer.

UNECE. ECE R17 test procedures and measurement definitions.

UNECE. (2014). Regulation no. 17 – uniform provisions concerning the approval of seats and luggage retention systems. Geneva: United Nations.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

A Design Approach for Meeting the Noise, Vibration, and Harshness Requirements in Reinforcement-Free Instrument Panel Structures

Ahmet AKMAN [1]
Çağrı GENÇOL[2]
Hilal DOĞANAY KATI[3]

Abstract

Simplified instrument panel (IP) architectures that omit the conventional reinforcement component welded beneath the Upper IP are increasingly adopted in cost-sensitive vehicle segments to reduce weight, cost and assembly complexity. Removing this reinforcement, however, lowers the global section inertia of the IP and disrupts the load-transfer continuity that normally keeps natural frequencies above Noise, Vibration, and Harshness (NVH) targets. This study examines how NVH requirements can be met in a reinforcement-free IP architecture developed for a left-hand-drive B-segment hatchback equipped with a head-up display (HUD). An initial CAE modal analysis yielded a first natural frequency of 25 Hz against a 35 Hz target. Rather than addressing this deficit through local stiffness measures alone, the structural contributions of existing functional components, the HUD frame on the driver side, the HVAC distribution adapter at the centre and the passenger airbag chute channel on the passenger side, were evaluated as secondary load paths. Upper IP shell thickness was standardized at approximately 2.5 mm to remain compatible with pedestrian protection requirements, while rib topology and attachment locations were reorganised to improve load-path continuity. The results show that local wall-thickness increases alone cannot raise the first natural frequency to the target, whereas redistributing structural function across existing components, combined with rib and attachment optimisation, can. The proposed approach offers a viable design route for meeting NVH targets without a dedicated reinforcement part, while preserving the associated weight, cost and packaging constraints.

Keywords: Cockpit Design, Interiors, Instrument Panel (IP), NVH Optimization, Reinforcement-Free Design

[1]Makine Mühendisi, Tofas Turk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0003-7921-3841
[2]Makine Mühendisi, Tofas Turk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0001-7193-528X
[3]Dr.Öğr.Üyesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16310 Bursa, Türkiye, Orcıd: 0000-0002-2807-8040, hilal.doganay@btu.edu.tr

GİRİŞ

Instrument Panel (IP), otomotiv iç mekân sistemlerinde yer alan en büyük ve en karmaşık plastik trim bileşenlerinden biridir (Florence and Sherman, 1997). Görsel ve ergonomik fonksiyonlarının yanı sıra HVAC hava kanalları, gösterge paneli, multimedya ekranı, torpido gözü, yolcu hava yastığı modülü, elektriksel bileşenler ve çeşitli montaj arayüzleri için yapısal bir taşıyıcı görev üstlenir (Giba vd., 1997). Geniş geometrisi, çok sayıda bağlantı noktası ve farklı alt sistemlerle etkileşimi nedeniyle IP yapıları titreşim davranışı, akustik uyarımlar ve montaj toleranslarına karşı oldukça hassastır (Khatib-Shahidi vd., 1996; Billal vd., 2014). Otomotiv sektöründe artan rekabet koşulları, mühendislik ekiplerini daha hafif, daha düşük maliyetli ve daha az parça içeren sistem mimarileri geliştirmeye yönlendirmektedir. Özellikle B segmenti gibi maliyet duyarlılığı yüksek araç sınıflarında, küçük ölçekli ağırlık ve maliyet azaltımları dahi proje seviyesinde önemli kazanımlar sağlayabilmektedir (Lorenzo vd., 1995; Remigio-Reyes vd., 2022). Bu doğrultuda geleneksel IP tasarımlarında kullanılan ve Upper IP'ye kaynaklanan reinforcement yapısının kaldırılması önemli bir tasarım alternatifi olarak değerlendirilmektedir (Slik, 2002).

Konvansiyonel tasarımlarda reinforcement bileşeni yalnızca yardımcı bir parça olmayıp sistemin temel yapısal elemanlarından biri olarak görev yapar. Bu yapı, Upper IP'nin geniş ve ince yüzeylerini destekleyerek global rijitliği artırır, farklı alt sistemlerin montaj noktalarını birbirine bağlar ve yüklerin Cross-Car Beam (CCB) üzerine daha dengeli aktarılmasını sağlar (Baskar vd., 1995; Pisipati vd., 2016). Bu sayede doğal frekanslar yükseltilerek NVH performansı iyileştirilir (Khatib-Shahidi vd., 1996). Bununla birlikte reinforcement parçası; ek kalıp yatırımı, ilave malzeme kullanımı, kaynak operasyonları, montaj süreci karmaşıklığı ve lojistik maliyetler gibi çeşitli dezavantajlar da oluşturmaktadır (Lorenzo vd., 1995; Slik, 2002). Bu nedenle bu yapının kaldırılması daha yalın bir mimari sunarken, sistem rijitliğinin korunmasını önemli bir mühendislik problemi haline getirmektedir.

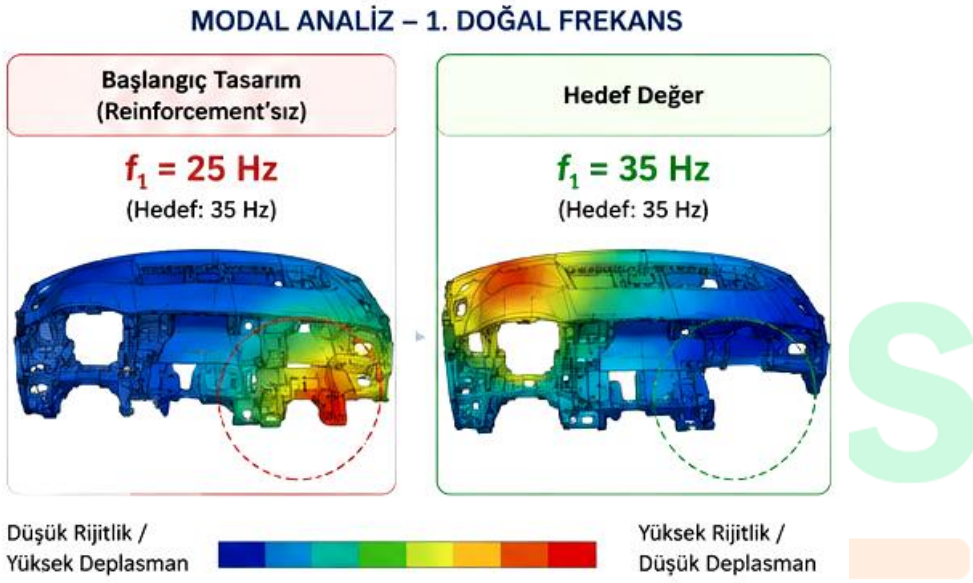
Literatürde IP yapısal performansının et kalınlığı, malzeme seçimi ve kesit geometrisi gibi parametrelere duyarlılığını inceleyen çalışmalar mevcuttur (Lam vd., 2003; Remigio-Reyes vd., 2022). Ancak reinforcement içermeyen IP mimarilerinde NVH performansının yalnızca mevcut fonksiyonel bileşenlerin yapısal katkıları ile nasıl optimize edilebileceğine dair sınırlı çalışma bulunmaktadır. Bu boşluk, yük yolu sürekliliği ve fonksiyonel entegrasyon yaklaşımının birlikte değerlendirilmesi ihtiyacını ortaya koymaktadır.

Bu çalışma kapsamında, Head-Up Display (HUD) donanımına sahip, soldan direksiyonlu bir B segment hatchback araç için geliştirilmiş reinforcement içermeyen bir instrument panel yapısı incelenmiştir. Çalışmanın amacı, ayrı bir reinforcement bileşeni kullanılmaksızın NVH gereksinimlerinin nasıl karşılanabileceğini ortaya koymak ve bu süreçte uygulanan tasarım stratejilerini sistematik olarak değerlendirmektir.

KONVANSİYONEL REINFORCEMENT KOMPONENTİNİN YAPISI GÖREVLERİ VE PROBLEMİN TANIMI

Geleneksel IP mimarisinde reinforcement bileşeni, Upper IP'nin alt yüzeyine sıcak plaka kaynağı, ultrasonik kaynak ya da mekanik bağlantılarla entegre edilir. Geniş açıklıklı ve kesit rijitliği düşük bölgelerde teknik yüzeyi destekleyerek IP'nin eğilme ve burulma rijitliğine

doğrudan katkı sağlar; alt yüzeyinde oluşturduğu rib ağı sayesinde lokal deformasyonları sınırlandırır ve kritik montaj noktaları arasında yük transferi sürekliliğini güçlendirir. HVAC kanalları, lower carrier ve ekran taşıyıcıları gibi alt sistemler için de rijit bir montaj altyapısı oluşturur. Reinforcement'ın bir diğer önemli avantajı, Upper IP'den bağımsız tasarlanabilmesidir. Class-A yüzey kısıtlarına tabi olmadığı için daha yüksek rib geometrileri, daha temiz draft açıları ve daha iyi kalıplanabilirlik koşulları kullanılabilmektedir. Bu üretim serbestliği, parçanın aynı kütle düzeyinde daha yüksek bir kesit atalet momenti sunmasına imkân tanır. Bu bileşenin sistemden çıkarılması, IP'nin global kesit atalet momentini düşürür ve yük transfer sürekliliğini bozar. Özellikle geniş açıklıklı bölgelerde lokal esneklik artar, doğal frekanslar düşer. Çalışmanın başlangıcında gerçekleştirilen modal analizde birinci doğal frekansın 25 Hz seviyesinde kaldığı; 35 Hz olan hedef değerin belirgin biçimde altında olduğu tespit edilmiştir (Şekil 1). Bu bağlamda temel mühendislik problemi, ek bir reinforcement bileşeni kullanmaksızın, mevcut geometrik paketleme kısıtları içinde yük yollarının yeniden organize edilmesi ve sistem rijitliğinin NVH gereksinimlerini karşılayacak seviyeye yükseltilmesidir.



Şekil 1- *Reinforcement içermeyen IP mimarisinin birinci doğal frekans analizi (f_1 = 25 Hz) ve hedef değer (f_1 = 35 Hz) karşılaştırması.*

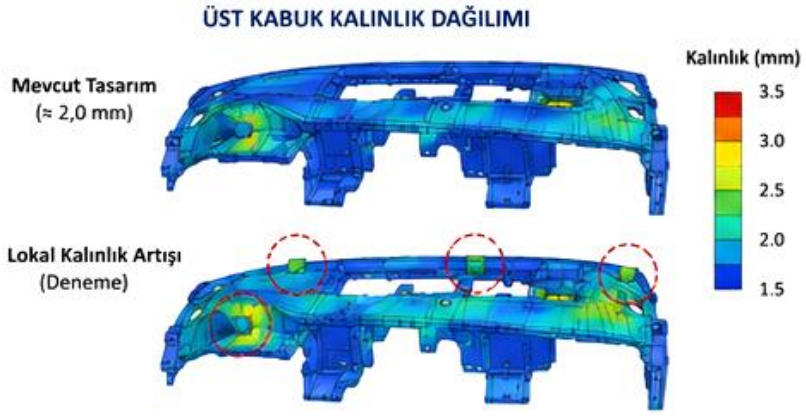
GELİŞTİRME SÜRECİNDE UYGULANAN MÜHENDİSLİK YAKLAŞIMLARI

Reinforcement içermeyen IP mimarisinde NVH performansını sağlamak için iki kademeli bir yaklaşım izlenmiştir. İlk aşamada, doğrudan rijitlik artışına yönelik klasik bir yöntem olarak lokal cidar (et kalınlığı) artışı değerlendirilmiş; bu yöntemin yetersiz kalması üzerine, ikinci aşamada mevcut fonksiyonel bileşenlerin yapısal katkıları sistematik olarak ele alınmıştır.

3.1 Lokal Cidar (Et Kalınlığı) Artırımları

Yaklaşımın ilk aşamasında, Upper IP kabuğu üzerinde uygulanan lokal et kalınlığı artırımları ile kesit atalet momentinin yükseltilmesi hedeflenmiştir. Doğal frekansları artırmaya yönelik bu klasik yöntem (Lam vd., 2003), CAE sonuçlarında sınırlı iyileşme sağlamıştır. Buna

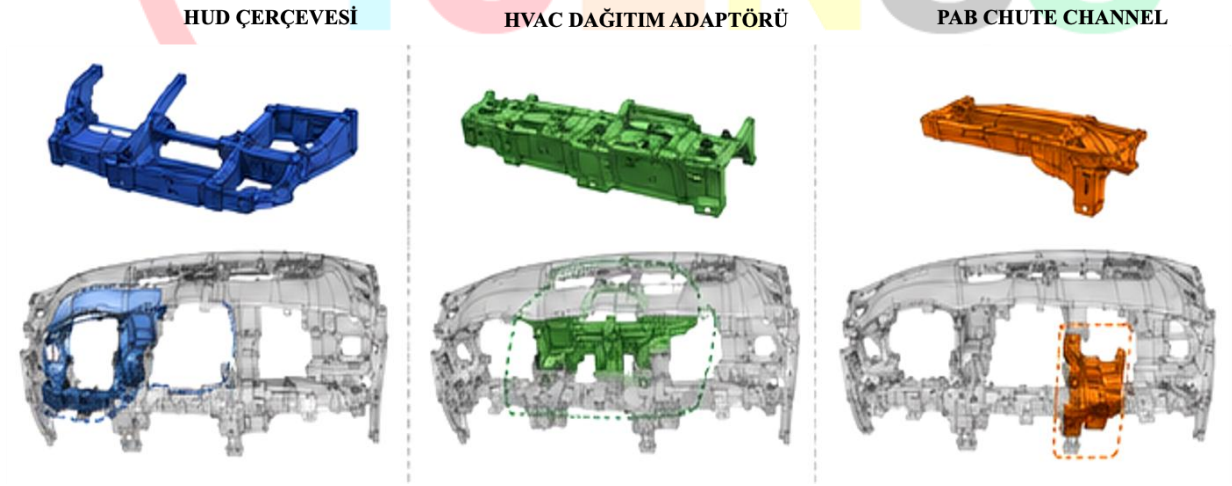
ek olarak et kalınlığı artışı; sink mark oluşumu, çevrim süresi uzaması ve kütle artışı gibi üretimsel olumsuzluklar getirmiştir. Avrupa yaya koruma (Pedestrian Protection) gereksinimleri açısından da ön cam altı bölgesinde aşırı lokal rijitlik, enerji emme performansını olumsuz etkileme riski taşımaktadır. Bu nedenlerle kabuk kalınlığı yaklaşık 2,5 mm seviyesinde standardize edilmiş ve NVH hedeflerine yalnızca lokal cidar artışı ile ulaşılamayacağı sonucuna varılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2- *Mevcut tasarım ve lokal et kalınlığı artırımı uygulanan tasarımın karşılaştırılması.*

Fonksiyonel Bileşenlerin Yapısal Katkı Olarak Değerlendirilmesi

Lokal cidar artışının yetersiz kalması üzerine, IP içinde paketleme zorunluluğu nedeniyle halihazırda bulunan fonksiyonel bileşenlerin yapısal davranışları yeniden değerlendirilmiştir. Bu bileşenlerin geometrik ve mekanik özellikleri, doğru konumlandırma ve bağlantı stratejileri ile birleştirildiğinde ikincil yük yolları oluşturma potansiyeli taşımaktadır. Bu kapsamda IP, sol, orta ve sağ olmak üzere üç fonksiyonel bölgeye ayrılarak her bölgenin yapısal katkı potansiyeli ayrı ayrı incelenmiştir.



Şekil 3- *Reinforcement içermeyen IP mimarisinde ikincil yük yolu oluşturan fonksiyonel bileşenler.*

Sol Bölge: HUD Çerçevesi

Soldan direksiyonlu ve HUD donanımlı araç mimarisinde, HUD taşıyıcı çerçevesi sol üst IP bölgesinde belirgin bir yapısal rijitlik bölgesi oluşturmaktadır. Optik modül taşıyıcı olarak

tasarlanmış olmasına rağmen, çerçevenin yüksek rijitliği direksiyon ve gösterge paneli çevresindeki lokal deformasyonları sınırlandırmış; bu bölgedeki modal şekil genliklerini azaltmıştır. Pratikte HUD çerçevesi, sol bölgede sistem rijitliğine yapısal bir reinforcement gibi katkı sağlayan ikincil bir yük yolu işlevi görmüştür.

Orta Bölge: HVAC Dağıtım Adaptörü

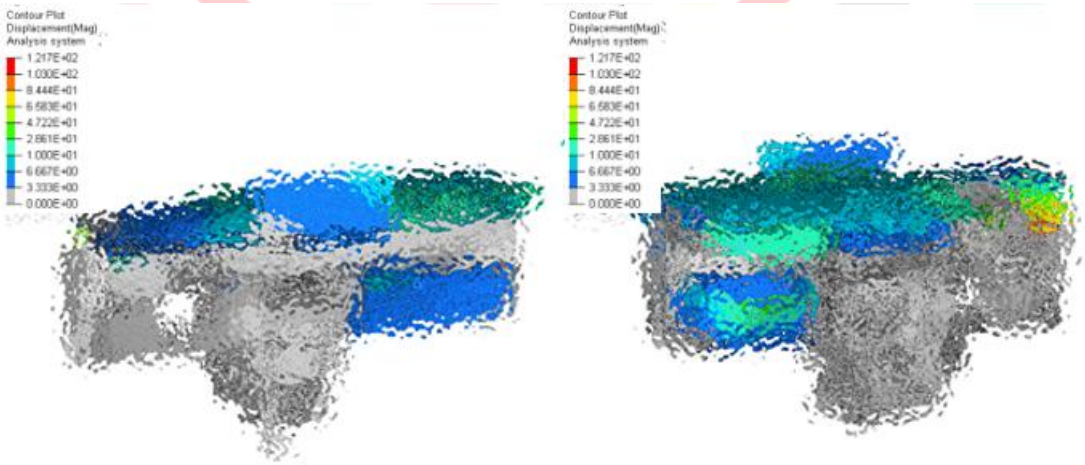
Orta bölgede yer alan HVAC hava dağıtım adaptörü, hava akış fonksiyonunun yanında yapısal bir rijitlik katkı elemanı olarak da değerlendirilmiştir. Adaptörün geniş yüzeyli ve kapalı kesite yakın geometrisi, hava yönlendirme fonksiyonuna ek olarak yük transferine katkı sağlayan bir taşıyıcı davranış oluşturmaktadır. Bu sayede orta bölgede ayrı bir reinforcement parçası olmaksızın kesit rijitliği artırılmıştır. Sonuç olarak HVAC adaptörü, orta bölgede ayrı bir reinforcement parçası olmaksızın yapısal sürekliliğin korunmasında belirleyici rol üstlenmiştir.

Sağ Bölge: Passenger Airbag Chute Channel

Yolcu tarafında bulunan airbag chute channel, hava yastığının kontrollü açılımını sağlayan yapı olmakla birlikte, kutu kesite yakın geometrisi nedeniyle yüksek lokal rijitlik sergilemektedir. Bu rijitlik, Upper IP sağ bölgesinde önemli bir yapısal destek oluşturmuş ve global deformasyon seviyesini düşürmüştür. Geleneksel anlamda bir reinforcement bulunmamasına rağmen sistemin sağ tarafında doğal bir yük yolu oluşmuştur. Sonuç olarak airbag chute channel, fonksiyonel bir zorunluluk gereği zaten sistem içinde bulunan ancak yapısal katkısı planlı biçimde değerlendirilmediğinde gözden kaçabilecek bir reinforcement işlevi görmüştür.

MODAL ANALİZ VE TASARIM OPTİMİZASYONU

Reinforcement içermeyen IP mimarisinin yapısal davranışı, sonlu elemanlar yöntemi tabanlı modal analiz ile değerlendirilmiştir. Analizler IP'nin araç gövdesine bağlandığı kritik noktalardan (CCB ve A-pillar bağlantıları üzerinden) kısıtlanmış sınır şartları altında gerçekleştirilmiş; özellikle Upper IP kabuğu ve bağlantı bölgelerinde oluşan düşük rijitlik alanları incelenmiştir. (Şekil 4) (*görsel yeni proje olması sebebiyle bulanıklaştırılmıştır*)).



Şekil 4- *Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen modal analiz sonuçları ve kritik deplasman bölgeleri.*

Bir sistemin doğal frekansları, kütle ve rijitlik matrislerinin oluşturduğu özdeğer probleminden elde edilir; her mod için frekans, $\omega = \sqrt{k/m}$ ilişkisi ile tanımlanır. IP gibi büyük plastik bileşenlerde kütle azaltımı paketleme ve montaj kısıtları nedeniyle sınırlı kaldığından, optimizasyon doğrudan rijitlik dağılımı ve yük yolu sürekliliğine odaklanmıştır. İlk modal analiz sonuçları, birinci doğal frekansın 25 Hz seviyesinde kalarak 35 Hz olan hedef değerin altında kaldığını ortaya koymuştur. Modal şekil incelemelerinde, maksimum yer değiştirmelerin kritik montaj noktaları arasında yeterli yük transferi oluşmayan geniş açıklıklı bölgelerde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Optimizasyon süreci bu bulgular doğrultusunda iki ana eksen üzerinde yürütülmüştür: (i) kritik montaj noktalarını birbirine bağlayan sürekli rib ağlarının oluşturulması ile yapısal rijitlik dağılımının yeniden düzenlenmesi (Remigio-Reyes vd., 2022); (ii) bağlantı noktalarının modal şekilde maksimum deplasman gösteren bölgelere göre yeniden konumlandırılması ile lokal esneklik azaltımı ve yük transfer verimliliğinin artırılması. Birlikte uygulanan bu iki adım, sistemin global eğilme davranışını iyileştirmiş ve ayrı bir reinforcement parçası kullanılmaksızın NVH hedeflerine yaklaşan bir yapısal performansa ulaşılmasını sağlamıştır.

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Çalışma sonucunda, klasik anlamda geniş kapsamlı bir reinforcement parçası kullanılmaksızın NVH hedeflerinin karşılanabildiği gösterilmiştir. Bu başarı, tek bir yöntemle değil, farklı yapısal elemanların birlikte değerlendirilmesiyle elde edilmiştir. Üst kabuk et kalınlığının kontrollü biçimde 2,5 mm seviyesinde tutulması, Pedestrian Protection gereksinimleri ile uyum sağlarken üretilebilirliği korumuştur. Sol bölgede HUD frame, orta bölgede HVAC dağıtım adaptörü ve sağ bölgede Passenger Airbag chute channel, bulundukları bölgelerde reinforcement benzeri davranarak sistem rijitliğine önemli katkılar sağlamıştır. Bu sayede ayrı bir reinforcement parçasına ihtiyaç duyulmadan, mevcut fonksiyonel bileşenlerin yapısal özelliklerinden yararlanılmıştır. Böylece maliyet, ağırlık ve parça sayısı azaltılırken NVH performansı hedef seviyede tutulmuştur. Bu yaklaşım, özellikle ekonomik segment araçlarda fonksiyonel entegrasyon ve çok amaçlı bileşen kullanımı açısından güçlü bir tasarım metodolojisi sunmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, geleneksel reinforcement bileşeni kullanılmaksızın instrument panel mimarisinde NVH performans hedeflerinin karşılanabileceği gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistem rijitliğinin tek bir yapısal eleman üzerinden değil, fonksiyonel bileşenlerin yapısal katkılarının bütüncül olarak değerlendirilmesi ile sağlanabileceğini ortaya koymaktadır. Başlangıç tasarımında birinci doğal frekans değeri 25 Hz seviyesinde olup hedef değer olan 35 Hz'in altında kalmıştır. Uygulanan tasarım optimizasyonları sonucunda, yük yolu sürekliliğinin artırılması ve kritik bağlantı noktalarının yeniden yapılandırılması ile birlikte sistemin global rijitliğinde anlamlı bir iyileşme elde edilmiştir.

Bu iyileşmenin temel mekanizması, sistem içerisindeki yapısal yük transferinin tek bir reinforcement elemanı yerine HUD frame, HVAC dağıtım adaptörü ve passenger airbag chute channel gibi fonksiyonel bileşenler üzerinden yeniden dağıtılmasıdır. Bu yaklaşım, lokal rijitlik artışının ötesinde, global yük yolu sürekliliğinin iyileştirilmesini sağlayarak modal enerji

dağılımını daha geniş bir yapısal alana yaymıştır. Böylece kritik bölgelerde oluşan lokal deformasyon modları bastırılmış ve sistemin global eğilme davranışı iyileştirilmiştir. Sonuç olarak NVH hedeflerine ulaşılırken aynı zamanda ek bir reinforcement bileşeni kullanılmamış, bu da parça sayısında azalma, üretim karmaşıklığında düşüş ve ağırlık optimizasyonu gibi sistem seviyesinde avantajlar sağlamıştır.

Bu çalışma, özellikle maliyet ve ağırlık optimizasyonu hedeflenen araç segmentlerinde, fonksiyonel bileşenlerin yapısal katkılarının sistematik olarak değerlendirilmesi yoluyla reinforcement içermeyen IP mimarilerinin NVH gereksinimlerini karşılayabileceğini göstermektedir. Bu yaklaşım, gelecekteki instrument panel tasarımları için fonksiyon entegrasyonu ve yük yolu mühendisliği açısından uygulanabilir bir tasarım metodolojisi sunmaktadır.

KAYNAKÇA

Baskar, S., Mohiuddin, G., Brooks, W., and Pilato, L., "Structural Instrument Panel: Synthesis Approach," International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, United States, February 27, 1995, https://doi.org/10.4271/950579.

Florence, R., and Sherman, K., "Trends Driving Design and Materials Changes in the Instrument Panel System," SAE Technical Paper 970445, 1997, https://doi.org/10.4271/970445.

Giba, R., Chapman, D., and Hertema, D., "Cockpit Module Approach to Instrument Panels - A System Evolution," International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, United States, February 24, 1997, https://doi.org/10.4271/970441.

K Billal, M., Subramani, V., Rao, M., and Potok, T., "Stiffness Simulation Techniques and Test Correlations in Automotive Interior Cockpit Systems (IP, Door Trim and Floor Console Assembly)," SAE 2014 World Congress & Exhibition, Detroit, Michigan, United States, April 8, 2014, https://doi.org/10.4271/2014-01-1025.

Khatib-Shahidi, B., Ho, W., and Han, B., "Steering Column/Instrument Panel NVH Analysis in Full Size Pickup Trucks Using MSC/NASTRAN - Part 1," 1996 SAE International Truck and Bus Meeting and Exposition, Detroit, Michigan, United States, October 14, 1996, https://doi.org/10.4271/962190.

Lam, K. P., K. Behdinan, and W. L. Cleghorn. 2003. “A Material and Gauge Thickness Sensitivity Analysis on the NVH and Crashworthiness of Automotive Instrument Panel Support.” Thin-Walled Structures 41(11):1005–18. doi:10.1016/S0263-8231(03)00050-8.

Lorenzo, L., Chapman, D., and Giba, R., "Material Selection Guidelines for Structural Instrument Panel Applications," International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, United States, February 27, 1995, https://doi.org/10.4271/950642.

Pisipati, Venkat, Srikanth Krishnaraj, Amy McGuckin Webb, and Pavankumar Reddy Kandukuri. 2016. “Simplified CAE Models for Upfront Development of Instrument Panel.” SAE International Journal of Materials and Manufacturing 09(3):2016-01–0524. doi:10.4271/2016-01-0524.

Remigio-Reyes, Joel Omar, Isaías E. Garduño, José Manuel Rojas-García, Hugo Arcos-Gutiérrez, and Rogelio Ortigosa. 2022. “Topology Optimization-Driven Design of Added Rib Architecture System for Enhanced Free Vibration Response of Thin-Wall Plastic Components Used in the Automotive Industry.” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 123(3–4):1231–47. doi:10.1007/s00170-022-10219-x.

Slik, G., "Evolution of Structural Instrument Panels," SAE 2002 World Congress & Exhibition, Detroit, Michigan, United States, March 4, 2002; and Automotive and Transportation Technology Congress and Exposition, Barcelona, Spain, October 1, 2001, https://doi.org/10.4271/2002-01-1270.

6thInternational
Congress of Engineering and Natural
Sciences

Binek Araçlarda Kapı Barlarının Rolü ve Önemi

Erdem GÜRSOY[1]

Abstract

Passenger vehicle safety is a critical issue that directly affects the lives of occupants. This paper presents a simplified yet comprehensive explanation of the role and function of door reinforcement bars in vehicle doors. Door bars are structural components placed inside vehicle doors to protect occupants during side impacts, which are among the most dangerous types of collisions due to the limited space available for energy absorption. They are typically made of high-strength steel, known for its superior strength and durability, although lightweight materials such as aluminum and advanced composites are also used in some applications to improve fuel efficiency and reduce overall vehicle weight. The geometry, thickness, and positioning of door bars, along with material selection, significantly influence how energy is absorbed and distributed during a collision, thereby directly affecting occupant protection and injury severity. This study explains the working principles of door bars, highlighting how they limit door intrusion and help maintain the integrity of the passenger compartment. It also emphasizes their contribution to overall vehicle structural rigidity and crash performance. Furthermore, the impact of different material choices on both safety performance and fuel consumption is discussed, supported by practical and real-world examples. In conclusion, door reinforcement bars are highlighted as essential yet often unseen safety components that play a vital role in saving lives. This paper is intended to help individuals interested in the automotive field easily understand the function, considerations, and significance of door bar systems in modern vehicle safety

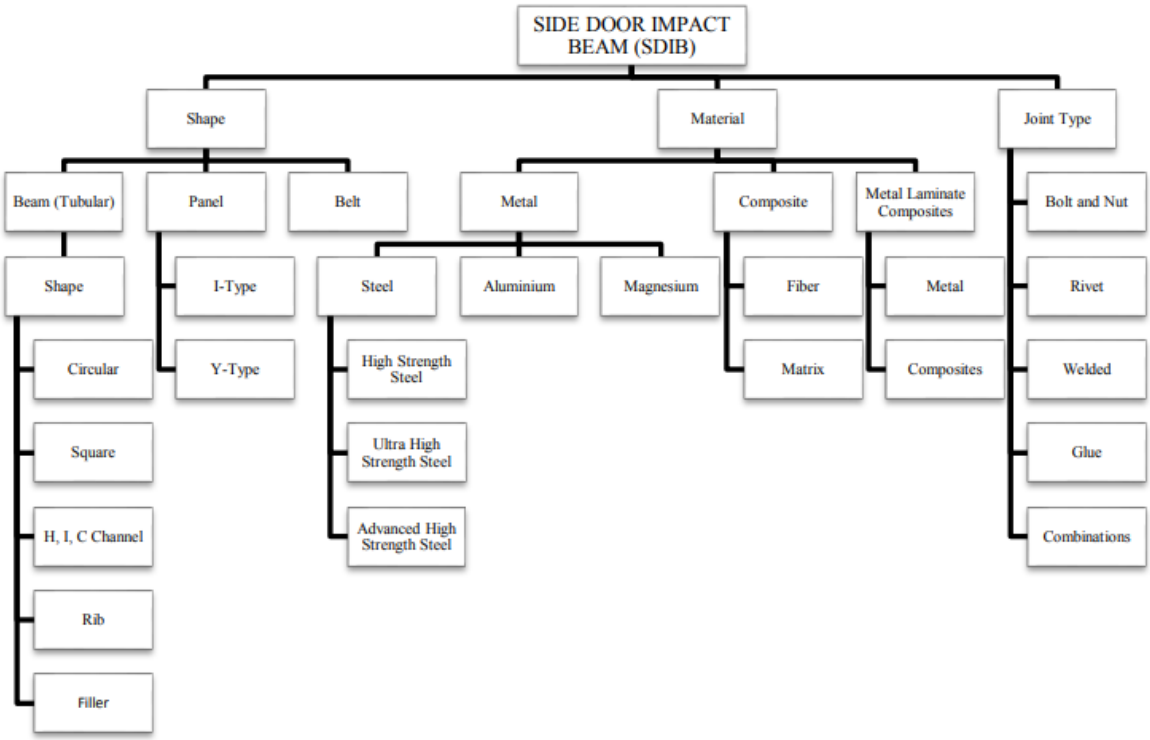
Keywords: Door reinforcement bar, side impact safety, high-strength steel, lightweight materials, automotive safety, energy absorption

[1] Makine Mühendisi, Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Orcıd: 0009-0009-4678-2400

GİRİŞ

Günlük hayatımızda sıkça kullandığımız binek araçlarda güvenlik, her zaman öncelikli bir konudur. Özellikle yan çarpışmalar, yolcular için ciddi riskler taşır. Bu nedenle, araç kapılarının içinde bulunan kapı barları, yolcuyu korumak amacıyla önemli bir görev üstlenir. Kapı barları, kapıların içine yerleştirilen dayanıklı ve güçlü parçalardır. Yan darbe anında kapının yolcu tarafına doğru ezilmesini önleyerek, yolcunun zarar görmesini engellerler. Bu bildiri, kapı barlarının temel işlevlerini, kullanılan malzemeleri ve tasarım özelliklerini sade bir dille anlatmayı amaçlamaktadır.

Kapı barlarının, detaylı sınıflandırması aşağıda verilmiştir (Şekil 1). Genel anlamda tasarım, malzeme ve birleştirme yöntemlerine göre ayrılmaktadır (Shaharuzaman, Sapuan, Mansor, & Zuhri, 2018).



Şekil 1- *Kapı Barlarının Sınıflandırılması (Shaharuzaman et al., 2018).*

YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, otomotiv sektöründe kullanılan kapı barlarının malzeme özellikleri, tasarım yapıları ve güvenlik performansları incelenmiştir. Çalışmada yüksek dayanımlı çelik, alüminyum ve kompozit malzemelerin kullanım amaçları ile avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiş; farklı araç modellerinde kullanılan kapı barı örnekleri ve kesit tasarımları ele alınmıştır.

Ayrıca literatürde yer alan araştırmalar incelenerek farklı malzeme ve tasarım yaklaşımlarının ağırlık, dayanım ve enerji sönümleme performanslarına etkileri karşılaştırılmıştır (Safari, Nahvi, & Esfahanian, 2017; Shaharuzaman et al., 2018). Bununla birlikte kapı barlarının yan çarpışma anındaki görevleri, üretim yöntemleri ve tasarım kriterleri

açıklanmış; güvenlik doğrulama süreçlerinde kullanılan FEM (Finite element method) analizleri ile fiziki çarpışma testleri hakkında bilgi verilmiştir.

Kapı Barı Malzemeleri

Kapı barları genellikle yüksek mukavemetli çelikten yapılır. Bu malzeme, darbelere karşı oldukça dayanıklıdır ve yolcuyu koruyacak sağlamlıkta bir kalkan görevi görür. Ancak, çelik malzeme aracın ağırlığını artırır ve bu da yakıt tüketimini yükseltebilir. Bu yüzden bazı araçlarda, ağırlık avantajı nedeniyle alüminyum ya da kompozit malzemeler tercih edilir. Kompozit malzemeler, farklı malzemelerin birleşimiyle oluşturulur ve bazı durumlarda çelikten hafif ama dayanıklı çözümler sunar.

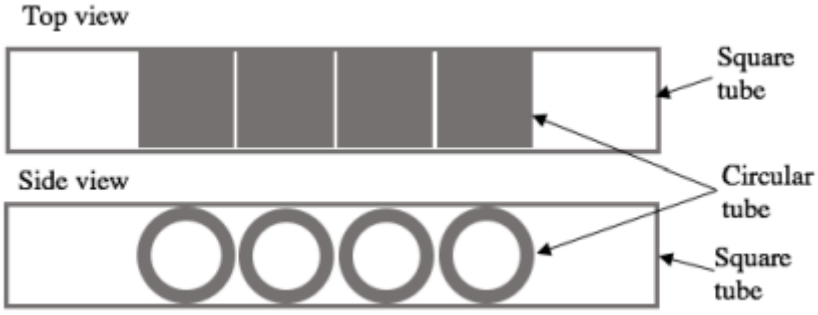
Tablo 1 *– Beş Farklı Araç Modeli İçin Kapı Barı Malzeme ve Kalınlık Bilgileri*

Model	Malzeme	Kalınlık [mm]
Model-1	DP1000	1.2
Model-2	DP590	0.65
Model-3	DP800	1.2
Model-4	DP800	1
Model-5	DP440	1.3

Geçmiş araştırmalar, alüminyum alaşımlı malzemeden üretilmiş kapı barlarının ağırlık anlamında %49,5 ve yük altında yer değiştirmede %43,9 oranlarında iyileşme sağlayabildiğini göstermiştir (Veeraswamy & Venkata Sudheer Babu, 2016).

Kutu profil içerisine dairesel kesitli kompozit tüpler yerleştirilerek tasarlanan bir kapı barı çalışmasında ise %30 ağırlık azaltımı ile birlikte %20 dayanıklılık artışı elde edilmiştir (Shaharuzaman et al., 2018). Benzer bir çalışmada panel tipi kompozit kapı barı ile çelik yapı karşılaştırıldığında %5–11,8 aralığında ağırlık azaltımı ve %146'ya varan enerji sönümleme artışı gözlenmiştir (Sheshadri, 2026).

Tablo 2'de çelik ve carbon fiber komposit malzemelerin yapısal özellikleri listelenmiştir. Bu tablolar kıyaslandığında karbon fiber kompozit malzemenin yoğunluğu çeliğe göre oldukça düşüktür ve bu durum büyük ağırlık avantajı sağlamaktadır.



Şekil 2- *Cam Fiber Epoksi Kutu Profili İçine Yerleştirilmiş Cam Fiber Epoksi Tüp Tasarımı (Shaharuzaman et al., 2018).*

***Tablo 2** – Karbon Fiber Kompozit Malzeme Özellikleri (Veeraswamy & Venkata Sudheer Babu, 2016).*

Özellik	**Değer**
Yoğunluk	1.58 g/cc
Boyuna Elastisite Modülü (E1)	142 GPa
Enine Elastisite Modülü (E2)	10.3 GPa
Düzlem İçi Kayma Modülü (G12)	7.2 GPa
Poisson Oranı	0.27
Boyuna Çekme Dayanımı (F1t)	1830 MPa
Enine Çekme Dayanımı	57 MPa
Düzlem İçi Kayma Dayanımı (F6)	71 MPa
Boyuna Basma Dayanımı	1096 MPa
Enine Basma Dayanımı (F2c)	228 MPa

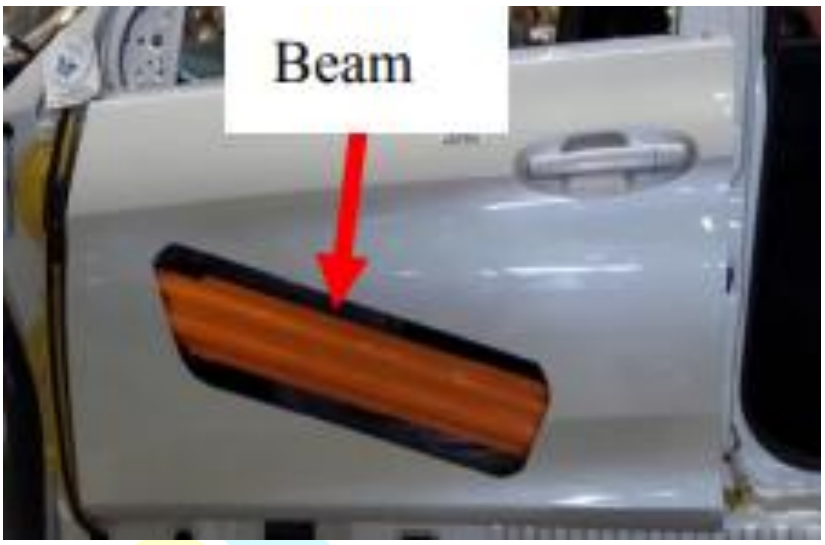
***Tablo 3** – Çelik Malzeme Özellikleri (Veeraswamy & Venkata Sudheer Babu, 2016).*

Özellik	**Değer**
Yoğunluk	7.8 g/cc
Young Modülü (Elastisite Modülü)	200 GPa
Poisson Oranı	0.3
Akma Gerilmesi	0.215 GPa

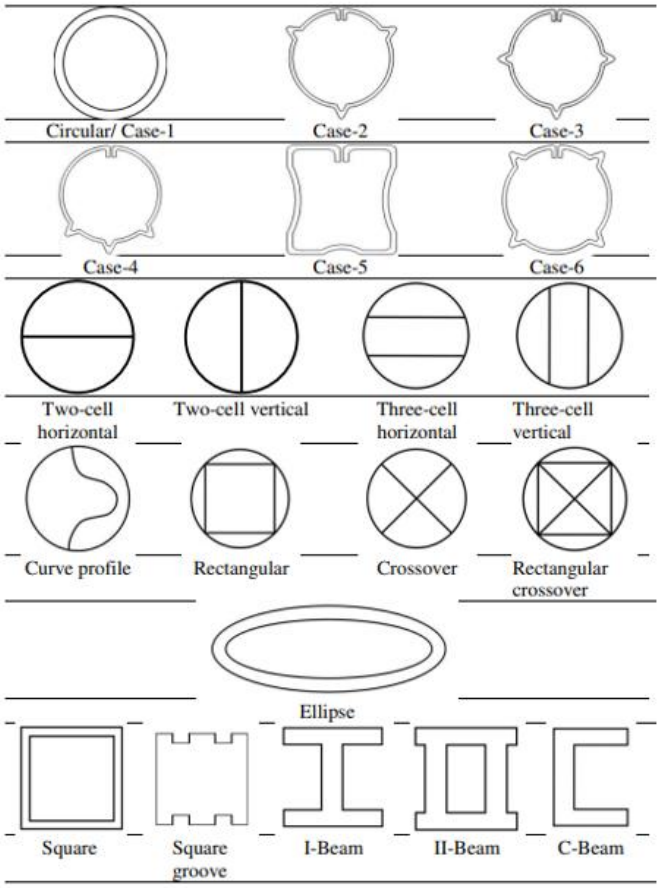
Kapı Barı Tasarımları

Kapı barları çeşitli şekillerde tasarlanabilir: boru, kutu veya D-profil gibi. Bu şekiller, çarpışma anında enerjiyi nasıl dağıttıklarını ve kapının dayanıklılığını belirler. Örneğin, kutu profilli kapı barları darbeyi daha iyi emer ve kapının içeri doğru ezilmesini engeller. Tasarımda amaç, mümkün olduğunca fazla enerjiyi kapı barının absorbe etmesi ve yolcuyu korumasıdır. Bu doğrultuda, aşağıdaki görsellerde verilmiş çeşitli kapı barı profilleri kullanılmaktadır.

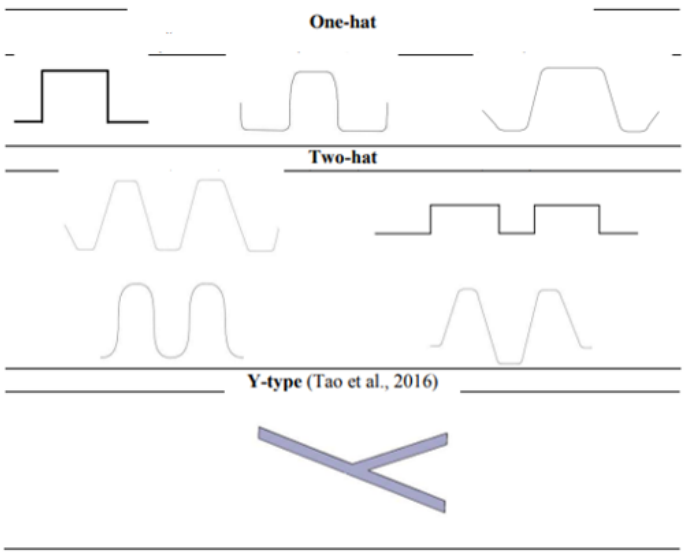
***Şekil 3-** Boru Tipi Kapı Barı Örneği (Shaharuzaman et al., 2018).*



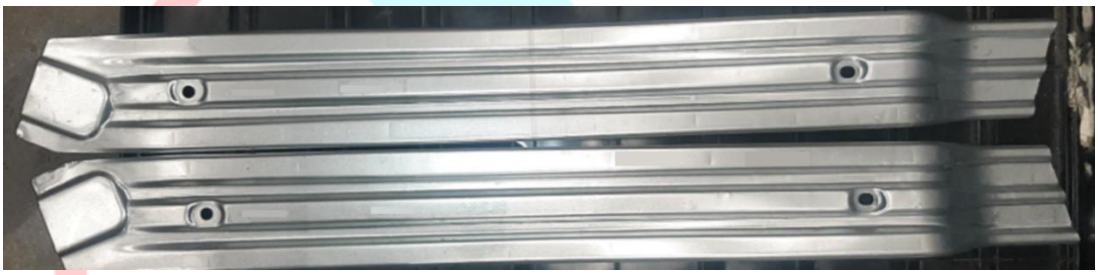
Şekil 4- *Panel Tipi Kapı Barı Örneği (Shaharuzaman et al., 2018).*



Şekil 5- *Boru Tipi ve Kutu Profil Kapı Barlarının Kesitleri (Shaharuzaman et al., 2018).*



Şekil 6- *Panel Tipi Kapı Barlarının Kesitleri (Shaharuzaman et al., 2018).*



Şekil 7- *Panel Tipi Kapı Barı Örnek-1*

Nadir bir örnek olarak roll form yöntemiyle (sabit kesitli/ekstrüzyon yöntemi) üretilen tasarımlar da mevcuttur (Şekil 8) (Erdeğirmenci, 2024). Kapı barları, kapı dış sacına macun ile yapıştırılmaktadır. Dolayısıyla tasarım; parçanın kapı dış sacı (stil yüzeyi) formunu kopyalamalıdır. Ekstrüzyon üretim durumunda stil yüzeyi kopyalanamaz ve verimli macun çalışması gerçekleştirilemez. Bu üretim yöntemi kullanımında macun verimsizliği ve stil yüzeyi kopyalamama durumundan ötürü için ek braket ve/veya ek operasyon gerekliliği doğar. Bu da ek maliyet ve işlemler gerektirmektedir.

Şekil 8- *Roll Form (Ekstrüzyon) Kapı Barı Örneği (Erdeğirmenci, 2024).*

1. Kapı Barlarının Görevi

Yan çarpışma durumunda kapı barları, kapının yolcuya doğru ezilmesini engelleyerek koruma sağlar. Kapı barı olmayan veya zayıf olan kapılar, çarpışma enerjisini yeterince absorbe edemez ve kapı içeri doğru çöker. Bu da yolcunun yaralanma riskini artırır. Kapı barları, çarpışma enerjisini emerek yolcuyu koruyan görünmez bir kalkan gibidir.

Sönümlediği enerji, yolcuların güvenliği ile doğrudan ilgilidir. Bu sebeple en bariz güvenlik parçalarından biridir. Tasarımında, üretiminde, montajında ve araç ömrü boyunca davranışında hataya yer verilmez. Maruz kalacağı en ağır şartlarda değerlendirilerek onaylanır. Test sonuçları, istenen değerlerlere ulaşırsa parçanın hammadde, maliyet, işçilik azaltma gibi konularına çalışılabilir. İlk öncelik her zaman fonksiyonelliğini yerine getirmesidir.

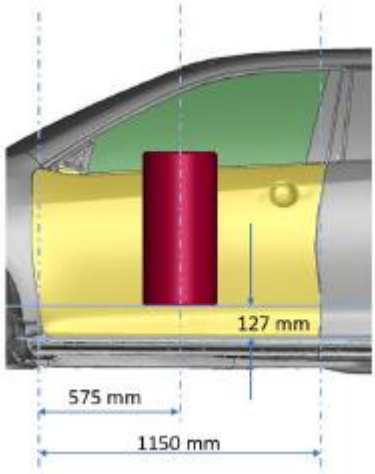
FMVSS 214 – ECE R95 Doğrulama/Güvenlik Testleri

Kapı barlarının, doğrudan güvenlik parçası olmasına rağmen tekil fiziki bir testi yoktur. Parçanın güvenlik testi, araç komplesi üzerine çarpma simulasyonları uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Fiziki test aşamasından önce ise mutlaka FEM (Finite Elemet Method) analizlerince macun, kaynak, dayanıklılık gibi kriterleri sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmektedir. Ancak, sanal analizler ile aracın fiziki şartları arasında belirli bir oranda korelasyon farkı vardır. Bu sebeple, gerçek sonuç fiziki çarpma testleri ile ortaya çıkmaktadır.

FMVSS 214 standardı, yan darbe koruması kapsamında araç içindeki yolcular üzerinde oluşan kuvvetleri ve kapı mukavemetini değerlendirmektedir (Reichert, Kan, & Park, 2022). Bu testte 1368 kg ağırlığında sert bariyer, belirli açı ve hız koşullarında aracın yan kapısına çarptırılarak kapının deformasyon davranışı analiz edilmektedir (Safari et al., 2017).

Parçanın dayanımı çok önemli olmakla birlikte belirli bir oranda deforme olması istenmektedir. Tasarım çalışmaları, malzeme seçimi gibi sınıflandırmalar, tüm bu şartları sağlayabileceği optimum seçenekler ile tamamlanır. Bu çarpma testinin asıl isteri; parçanın, sağlamlığını korurken darbeyi olabildiğince çok sönümlemesidir. Bu davranışların belirli sınırlar içerisinde olması istenir ve kontrolü FMVSS 214 – ECE R95 gibi global standartlar ile yapılmaktadır.

FMVSS 214 (Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 214 – Side Impact Protection), yan darbe koruması kapsamında araç içerisindeki yolcular üzerinde oluşan kuvvetleri ve kapı mukavemetini değerlendiren Kuzey Amerika merkezli yasal bir güvenlik standardıdır (Reichert, Kan, & Park, 2022). Bu regülasyon, yan çarpışmalar sırasında oluşabilecek yaralanma ve ölümleri azaltmayı amaçlamaktadır. Test kapsamında, bir kızak üzerine yerleştirilen 1368 kg ağırlığında ve 304,8 mm çapındaki sert metal silindirik bariyer, araca yaklaşık 27° açı ile sürücü tarafına doğru 15 m/s hızla çarptırılmaktadır (Safari, Nahvi, & Esfahanian, 2017). Bariyerin kapının alt orta bölgesine temas etmesiyle kapının kontrollü şekilde deforme olması sağlanmakta ve yapısal dayanım ile enerji sönümleme performansı değerlendirilmektedir (Şekil 9).



Şekil 9- *FMVSS 214 Bariyer Pozisyonu (Reichert et al., 2022).*

Avrupa için, FMVSS214 gibi, uygulanmakta olan farklı bir şartname vardır. ECE R95 (Economic Commission for Europe, EUROPE), araçların yan çarpışma durumunda yolcu korumasına ilişkin teknik özellikleri belirler. Bu regülasyon, FMVSS 214'teki dinamik yan darbe testlerine benzer şekilde, hareketli bir bariyerle yapılan çarpışma testini esas alır. Avrupa pazarında FMVSS214 yerine yürürlülükteki şartnamedir.

SONUÇ

Kapı barları, binek araçlarda yolcu güvenliği açısından kritik öneme sahip yapısal elemanlardır. Yapılan incelemeler sonucunda, yüksek dayanımlı çelik malzemelerin yan çarpışmalarda yüksek enerji sönümleme kapasitesi ve deformasyonu sınırlama özellikleri sayesinde en yaygın ve güvenilir çözüm olduğu görülmüştür. Alüminyum malzemeler ağırlık avantajı sağlasa da çelik ile benzer dayanım seviyelerine ulaşabilmek için daha yüksek et kalınlığı gerektirmekte; bu durum ise tasarım ve paketleme açısından çeşitli zorluklar oluşturmaktadır. Kompozit malzemeler ise hafiflik ve dayanım açısından önemli avantajlar sunsa da yüksek maliyetleri nedeniyle otomotiv sektöründe sınırlı kullanım alanına sahiptir.

Kapı barlarının performansı yalnızca malzeme seçimine değil, aynı zamanda parça geometrisi ve tasarımına da doğrudan bağlıdır. Optimum ağırlık, dayanım ve enerji sönümleme kriterlerinin sağlanabilmesi için uygun tasarım yaklaşımının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu güvenlik gereksinimleri, National Highway Traffic Safety Administration tarafından yayınlanan FMVSS 214 ve United Nations Economic Commission for Europe kapsamında yer alan ECE R95 gibi regülasyonlarla güvence altına alınmaktadır.

KAYNAKÇA

Erdeğirmenci, D. (2024). *Types of side door crash beams used in passenger vehicles*. 14. Uluslararası Bilimsel Çalışmalar Kongresi.

Reichert, R., Kan, C.-D., & Park, C.-K. (2022). *Crash simulation of FMVSS No. 214 safety performance* (Report No. DOT HS 813 276). National Highway Traffic Safety Administration.

Safari, H., Nahvi, H., & Esfahanian, M. (2017). Improving automotive crashworthiness using advanced high strength steels. *International Journal of Crashworthiness*. https://doi.org/10.1080/13588265.2017.1389624

Shaharuzaman, M. A., Sapuan, S. M., Mansor, M. R., & Zuhri, M. Y. M. (2018). Passenger car's side door impact beam: A review. *Journal of Engineering and Technology, 9*(1), 1–15.

Sheshadri, A. (2026). *Design and analysis of a composite beam for side-impact protection of occupants in a sedan* (Bachelor's thesis). Visvesvaraya Technological University, India.

Veeraswamy, K., & Venkata Sudheer Babu, V. (2016). Design and analysis of a composite beam for side impact protection of a car door. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 3*(6), 1120–1125.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Electromagnetic Investigation of Magnet Embrace and Offset Effects on Torque Ripple in In-Runner Servo Motors for Precision CNC Feed-Drive Applications

Mustafa ÖZSOY[1]
Sami ARSLAN[2]

Abstract

Torque ripple is a critical performance parameter in servo motors used in CNC feed-drive systems requiring precision positioning, as it directly affects machining quality, surface roughness, vibration level, and axis positioning accuracy. This issue becomes more critical in compact CNC systems, where servo motors are directly coupled to ball-screw mechanisms. In this study, the effects of magnet embrace ratio and magnet offset value on the electromagnetic performance of a three-phase, Y-connected, in-runner SPMSM servo motor rated at 1 kW and 3000 rpm with an IEC 80 frame size are investigated. An existing reference motor model was analyzed using FEM. N35H NdFeB magnets, M250-50A electrical steel, AISI 1010 rotor steel, and copper windings were used, while hysteresis, eddy current, and magnet demagnetization effects were considered. The magnet embrace ratio was varied between 0.55 and 0.95, and the magnet offset value was varied between 0 and 12 mm. For each design point, average electromagnetic torque, torque ripple, efficiency, induced voltage, and air-gap specific magnetic loading were evaluated. The results show that magnet offset can significantly reduce torque ripple. The torque ripple, approximately 5.1% in the reference design, decreases to approximately 0.35% at an embrace ratio of 0.85 and an offset value of 9 mm, corresponding to an improvement of more than 93%. However, this improvement is accompanied by reductions in air-gap specific magnetic loading from 0.71 T to 0.60 T, average electromagnetic torque from 3.10 Nm to 2.77 Nm, induced voltage per phase from 101.25 Vrms to 88.97 Vrms, and efficiency from 90.6% to 90.0%. To compensate for the reduced magnetic loading, magnet thickness was also investigated. The findings reveal the design trade-off between low torque ripple and torque production capability and provide rotor design guidelines for compact CNC feed-drive servo motors.

Keywords: Permanent Magnet Synchronous Motor, Torque Ripple, Magnet Embrace Ratio, Magnet Offset, Finite Element Analysis.

[1] Asst. Prof. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Orcid: 0000-0002-3448-1493
[2] Asst. Prof. Dr., Tekirdağ Namık Kemal University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Orcid: 0000-0002-1386-943X

1. Introduction

In recent years, advances in precision manufacturing technologies have significantly increased the performance requirements of motion control systems used in Computer Numerical Control (CNC) machine tools. Particularly in compact CNC machines, high positioning accuracy, low vibration level, improved surface quality, and stable motion characteristics are among the fundamental performance criteria expected from feed-drive systems. Since these requirements directly affect machining quality, the electromagnetic design of servo motors used in feed axes has become a critical issue.

In conventional CNC systems, gearboxes, belt mechanisms, or various mechanical transmission elements can be used between the motor and the driven axis. However, these structures introduce several disadvantages, such as backlash, mechanical losses, additional maintenance requirements, and limitations in dynamic performance. Therefore, the direct-drive approach has become increasingly widespread in recent years, particularly in compact CNC applications requiring high precision. In direct-drive systems, the servo motor is directly coupled to the ball screw or table drive mechanism, thereby eliminating errors originating from mechanical transmission elements. Nevertheless, due to the absence of the mechanical filtering effect, motor-induced electromagnetic vibrations and torque ripple can be directly transmitted to the motion axis. Figure 1 presents representative examples of ball-screw-based feed-drive systems commonly used in compact CNC machine tools. In such systems, servo motors are directly coupled to the ball-screw mechanism that generates linear motion or connected through a minimal number of mechanical transmission elements.

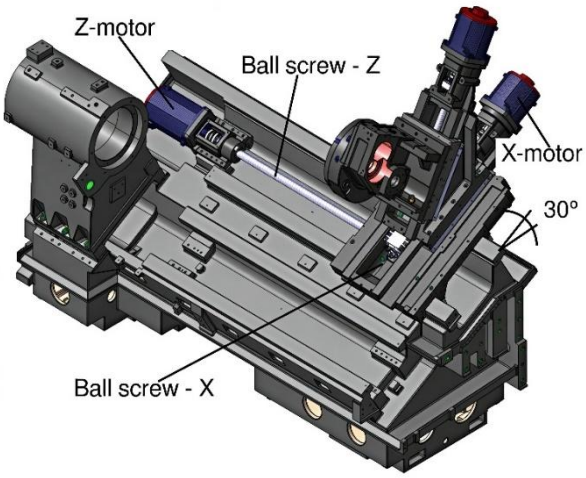


Figure 1. CNC feed-drive system with X- and Z-axis servo motors (Winiarski et al., n.d.)

However, the simplification of the mechanical transmission chain makes the electromagnetic performance of the servo motor more critical in terms of overall system behavior.

In particular, torque ripple generated by the motor can be directly transmitted to the feed axis without being attenuated by intermediate mechanical elements. This may lead to periodic ripples in axis speed, reduced positioning accuracy, increased vibration levels, and deterioration of the surface quality of the machined workpiece (Fei & Luk, 2012). Considering that even micrometer-level positioning errors in CNC machine tools can affect machining accuracy,

achieving low torque ripple characteristics in servo motors emerges as a critical design requirement.

Servo motors used in feed axes are evaluated not only in terms of their nominal torque production capability but also with respect to torque quality. In addition to achieving a high average torque level, it is also important that the generated torque be as smooth as possible and free from harmonic components(Avsar et al., 2021). High torque ripple may cause variable loading on the ball screw, reduced bearing lifetime, increased acoustic noise, and additional corrective effort by the control system. Consequently, rotor optimization aimed at reducing torque ripple during the electromagnetic design stage has become an important research topic for precision CNC feed-drive systems.

Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) are widely used in servo drive applications due to their high efficiency, high torque density, fast dynamic response, and suitability for precise speed–torque control (Soyaslan et al., 2019). In particular, in-runner surface-mounted PMSM (in-runner SMPMSM) topologies have an important application area in CNC feed-drive systems owing to their simple rotor structure, high power density, and compatibility with advanced vector control algorithms. However, even small geometrical modifications in the electromagnetic design of the motor can affect the air-gap magnetic field distribution, leading to significant variations in the induced voltage characteristics, torque production, and torque ripple.

An increase in torque ripple may lead to undesirable effects such as speed fluctuations, vibration, acoustic noise, positioning errors, and deterioration of the surface quality of the machined workpiece (Gundogan & Bakan, 2026). These effects become more pronounced particularly in compact CNC systems, since lighter mechanical structures and lower system inertia allow motor-induced torque harmonics to be transmitted more easily to the motion system. Therefore, reducing torque ripple at the motor design stage is of great importance for improving precision machining performance. Two of the most important parameters affecting rotor design in SMPMSMs are the magnet embrace ratio and the magnet offset value. The magnet embrace ratio defines the extent to which the magnet covers the pole pitch, whereas the magnet offset value refers to the displacement of the magnet position on the rotor with respect to the pole-center reference (Arslan et al., 2023). Magnet offset is defined as the tangential displacement of the magnet center from the pole-center reference. These parameters directly affect the air-gap flux density distribution and play a decisive role in the induced voltage waveform, cogging torque, average electromagnetic torque, and torque ripple. Therefore, the systematic investigation of these parameters constitutes an important research topic for the development of servo motor designs with low torque ripple.

2. Reference Servo Motor

In this study, an in-runner SMPMSM servo motor with an IEC 80 frame size, three-phase star-connected winding, 1 kW rated power, and 3000 rpm operating speed is investigated for use in compact CNC feed-drive systems. The motor is considered to operate under continuous duty (S1) and to be supplied by a servo drive with a 220 V AC input voltage, employing field-oriented control (FOC) and space vector pulse-width modulation (SVPWM). The selection of a 1 kW rated power and 3000 rpm nominal speed for the reference servo motor

is associated with the widespread use of this power range in compact CNC feed-drive systems. In particular, 1 kW-class servo motors are commonly preferred in applications such as desktop CNC machines, PCB machining systems, small- and medium-scale milling centers, precision positioning tables, linear axis drives, and auxiliary feed mechanisms (Altintas et al., 2011). In these applications, high positioning accuracy, low vibration level, and stable motion characteristics are of critical importance (Erkorkmaz & Altintas, 2001). In addition, 3000 rpm represents one of the standard speed levels commonly used in industrial servo systems and provides a suitable operating range for ball-screw mechanisms and directly driven feed axes.

Within the scope of this study, a new motor design was not developed; instead, an industrial reference servo motor model was used as the basis of the investigation. Only the magnet embrace ratio and magnet offset value were varied in the rotor geometry, while all other geometrical dimensions, winding configuration, material properties, and operating conditions were kept constant. In this way, the effects of these parameters on electromagnetic performance could be evaluated directly and independently. In the first stage, the effects of different magnet embrace and offset combinations on average electromagnetic torque, torque ripple, induced voltage characteristics, and air-gap flux density were investigated in detail using the finite element method (FEM). In addition, it was considered that variations in the embrace ratio and offset value also affect the air-gap magnetic field distribution and, consequently, the specific magnetic loading of the motor. Therefore, in the second stage, alternative design scenarios, such as increasing the magnet thickness and using magnet grades with higher energy product, were also evaluated to compensate for possible changes in average torque in rotor geometries obtained for torque ripple reduction. Thus, the study aims not only to reduce torque ripple but also to comprehensively reveal the relationship between torque production capability and torque quality. The obtained results are expected to contribute to the electromagnetic design of high-performance servo motors with low torque ripple for compact CNC feed-drive systems.

Table 1 presents the main electrical and mechanical specifications of the CNC feed-drive servo motor used as the reference model in this study. The investigated motor is an in-runner SPMSM with an IEC 80 frame size, supplied by a servo drive with a 220 V AC input voltage, FOC-based vector control, and SVPWM modulation. The nominal operating point of the motor is defined as 1 kW rated power and 3000 rpm rated speed.

Table 1. *Specifications of the Reference CNC Feed-Drive Servo Motor*

Parameter	Value	Unit
Reference Servo Drive Specifications		
DC Bus Voltage	310	VDC
Control Method	FOC	
Modulation Technique	SVPWM	
Number of Phases	3	
Connection	Y	
Reference Motor Specifications		
Motor Topology	In-Runner Surface-Mounted PMSM	
Frame Size	IEC 80	
Slot / Pole Combination	18 / 8	
Rated Power	1000	W
Rated Speed	3000	rpm
Rated Torque	3.1	Nm
Airgap Length	0.8	mm
Duty Cycle	S1	

Figures 2 and 3 illustrate the magnet embrace ratios and magnet offset values parametrically investigated within the scope of this study. The magnet embrace ratio was varied between 0.55 and 0.95, while the magnet offset value was examined in the range of 0–12 mm.

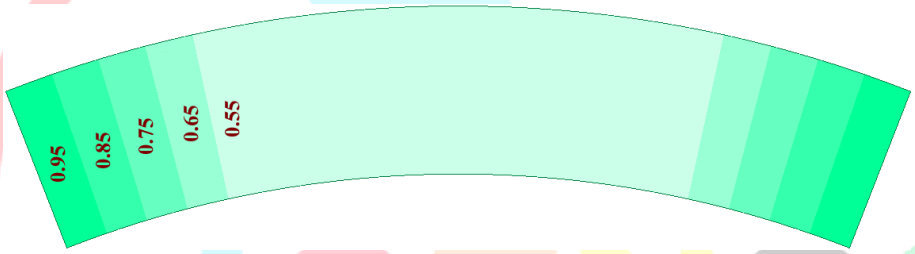


Figure 2. Investigated magnet embrace ratio configurations.

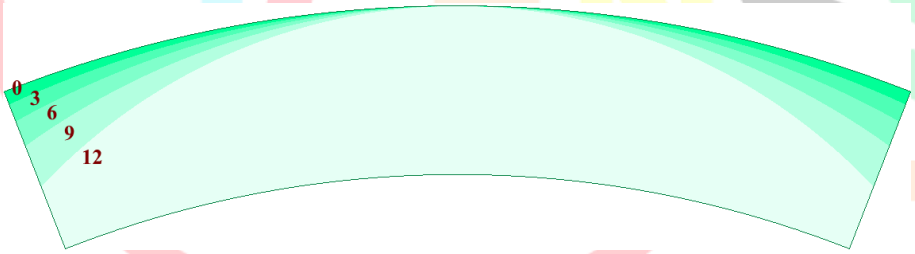


Figure 3. Investigated offset levels

The stator and rotor geometrical parameters of the reference feed-drive servo motor are presented in Table 2. The motor has an 18-slot/8-pole in-runner SMPMSM topology, which is commonly used in compact feed-drive servo motor applications. M250-50A electrical steel is used in the stator core, with a stator outer diameter of 75.3 mm and a stator inner diameter of 46 mm. The active stack length is defined as 60 mm.

The stator tooth width and stator yoke thickness are 4.5 mm and 4 mm, respectively. In addition, the slot opening width, slot opening height, slot wedge height, and total slot height are defined as 1.7 mm, 0.5 mm, 0.4 mm, and 9.3 mm, respectively.

Table 2. *Stator, Winding and Rotor Design Parameters of the Reference CNC Servo Motor*

Parameter	Value	Unit
Stator Design Parameters		
Stator Material	M250-50A	
Stator Slot Number	18	
Stator Outer Diameter	75.3	mm
Stator Inner Diameter	46	mm
Stator Stack Length	60	mm
Stator Tooth Width	4,5	mm
Stator Yoke Width	4	mm
Slot Opening Width	1.7	mm
Slot Opening Height	0.5	mm
Slot Wedge Height	0,4	mm
Slot height	9.3	mm
Winding Design Parameters		
Number of Turns in Phase	29	
Phase Current	3.7	A
Fill Factor	50	%
Phase Resistance (hot-AC)	1.5	ohm
Rotor Design Parameters		
Rotor Material	AISI 1010 Steel	
Rotor Pole Number	8	
Magnet Thickness	2.5	mm
Magnet Embrace	0.95	
Magnet Offset	0	
Magnet Type	Surface Mounted NdFeB (N35H)	
Rotor Outer Diameter	44.4	mm
Rotor Inner Diameter	25	mm
Rotor Stack Length	60	mm
Rotor Yoke Width	6.7	mm

AISI 1010 steel is used in the rotor structure as the rotor core and mechanical support material due to its suitable magnetic and mechanical properties. The rotor has an 8-pole surface-mounted permanent magnet configuration, with an outer diameter of 44.4 mm and an inner diameter of 25 mm. The active rotor stack length is set to 60 mm, identical to that of the stator. The rotor yoke thickness is approximately 6.7 mm.

N35H-grade NdFeB permanent magnets are used on the rotor. In the reference motor model, the magnet thickness, magnet embrace ratio, and magnet offset value are defined as 2.5 mm, 0.95, and 0 mm, respectively. These parameters represent the reference rotor geometry used as the initial point of the analyses.

In the comparative analyses presented in the following sections, the effects of different magnet geometries on electromagnetic performance are evaluated based on this reference rotor structure. In the winding configuration, 29 turns per phase are used, a fill factor of 50% is achieved, and the phase current is defined as 3.7 A under nominal operating conditions.

In addition, one of the notable features of the reference design is its aspect ratio of approximately 3.3. The aspect ratio is defined as the ratio of the active stack length to the pole pitch and is considered an important design parameter affecting the torque production capability, power density, and dynamic performance of servo motors (Jin Kim et al., 2025). Motors with a high aspect ratio contribute to torque production by providing a longer

electromagnetic interaction region for the same rotor diameter. This design approach is particularly preferred in compact CNC feed-drive systems, since a high aspect ratio allows the motor diameter to be kept limited while enabling the required torque level to be produced along the active stack length. Thus, by reducing the rotor moment of inertia, the acceleration and deceleration performance of servo systems can be improved, and a higher dynamic response can be achieved in applications requiring precision positioning (Al-Timimy et al., 2017).

3. Analysis Method

Within the scope of this study, the reference CNC feed-drive servo motor was first modelled based on the geometrical, electrical, and magnetic parameters given in Tables I and II using the FEM. The analyses were carried out using ANSYS Maxwell 2026 R1 Academic software. During model development, the stator, rotor, magnet, and winding regions were defined with their actual dimensions, while the material properties were assigned to the model using the nonlinear characteristics provided in the manufacturers' catalogues.

N35H-grade NdFeB permanent magnets were used for the rotor magnets, M250-50A electrical steel was used for the stator and rotor cores, AISI 1010 carbon steel was used for the rotor body, and copper conductors were used for the windings. To represent the actual operating conditions in magnet modeling, the N35H magnet data published by Arnold Magnetic Technologies were used (*Neodymium Magnets (NdFeB) | Arnold Magnetic Technologies*, n.d.). Considering that the feed-drive servo motor operates under continuous duty (S1), the demagnetization curves corresponding to an operating temperature of approximately 60°C were taken as the basis, and the B-H characteristics at this temperature were assigned to the FEM model. Thus, the temperature-dependent variations in magnet remanence and coercivity were included in the analyses. Since the investigated motor has a symmetric 18-slot/8-pole topology, geometrical and electromagnetic symmetry conditions were utilized in the analysis. For this purpose, instead of modeling the entire motor, a 180° half model representing two pole pairs was generated, and appropriate periodic boundary conditions were applied.

Thus, the solution domain was significantly reduced while preserving electromagnetic behavior equivalent to that of the full model (Eser & Üstkoyuncu, 2025). Since the investigated machine possesses both geometrical and electromagnetic periodicity, the adopted 180° model accurately reproduces the electromagnetic behavior of the complete machine.

The symmetric analysis approach is widely used in electrical machines, particularly in parametric design studies. When symmetry boundary conditions are correctly applied, air-gap flux density, induced voltage, electromagnetic torque, and loss calculations can be obtained with the same level of accuracy as the full model. On the other hand, the reduction in the number of finite elements to be solved significantly decreases the computational time and memory requirement (Akar et al., 2021). This advantage is of great importance in parametric optimization studies involving numerous embrace, offset, and magnet thickness combinations. In this study, the half-model approach was preferred due to the high number of analyses, thereby substantially reducing the solution time without compromising result accuracy. Since key performance parameters such as air-gap flux density distribution, torque ripple, and induced voltage are directly governed by polar symmetry, the adopted 180° symmetric model accurately represents the electromagnetic behavior of the reference motor. In the electromagnetic analyses,

not only ideal magnetic behavior was considered; core hysteresis losses, eddy current losses, and magnet demagnetization effects were also included in the model to obtain results closer to actual operating conditions. In this way, the obtained torque, loss, and electromagnetic efficiency results were intended to represent the real system behavior more accurately.

The analyses were performed using a two-dimensional (2D) transient FEM approach. All electromagnetic analyses in this study were carried out using a current-fed approach. The phase currents were kept constant to represent the nominal operating conditions of the reference motor, and all parametric designs were evaluated under the same current loading. Thus, the resulting performance variations were ensured to originate only from changes in the rotor geometry. Since the rotor and stator cross-sectional geometries of the investigated motor remain constant along the axial direction, no skew is applied to the rotor or magnets, and the main objective of the study is to examine the relative electromagnetic performance variations among different rotor geometries, the 2D analysis approach provides sufficient accuracy (Hendershot & Miller, 2010). In addition, 2D analyses require significantly lower computational time compared with 3D models and allow a much larger number of design points to be evaluated in parametric optimization studies (Özsoy et al., 2023).

In the first stage of the study, the magnet embrace ratio and magnet offset value were parametrically varied based on the reference motor design. The embrace ratio was investigated in the range of 0.55–0.95, while the magnet offset value was examined in the range of 0–12 mm. During the analyses, the stator geometry, winding configuration, air-gap length, magnet thickness, material properties, and operating point were kept constant, and only the relevant rotor parameters were varied. Thus, the resulting performance variations were ensured to directly originate from the embrace and offset parameters.

For each design point, the average electromagnetic torque, torque ripple, electromagnetic efficiency, induced phase voltage, and air-gap magnetic field distribution were calculated. To evaluate the air-gap magnetic loading, the average absolute value of the flux density distribution obtained along the air-gap circumference, referred to as Average Absolute Air-Gap Flux Density (AvgAbs(B)), was used.

In electrical machine design, torque production capability is directly associated with the specific magnetic loading (Bav) and the specific electric loading (A). However, since the air-gap flux density is a periodic quantity that changes sign between the north and south poles, its conventional arithmetic average theoretically gives a value close to zero. Therefore, the arithmetic average is insufficient to represent the actual magnetic loading level of the motor.

In contrast, AvgAbs(B) evaluates the total magnetic field level contributing to torque production in the air gap independently of pole polarity and enables a more accurate analysis of the effect of rotor geometry variations on the specific magnetic loading. This approach is consistent with the concepts of average air-gap flux density and specific magnetic loading used in electrical machines and is widely preferred for evaluating torque production capability (Pyrhönen et al., 2010).

Based on the obtained simulation outputs, the effects of rotor geometry variations on torque production capability and torque quality were evaluated comparatively. In addition, the induced phase voltage and dynamic electromagnetic torque waveforms were examined in detail

for both the reference motor and the design point providing the minimum torque ripple, defined by an embrace ratio of 0.85 and an offset value of 9 mm. In this way, the influence of rotor magnet geometry on the electromagnetic energy conversion characteristics was investigated.

Following the embrace and offset analyses, additional design cases were considered to evaluate the compensation of possible reductions in magnetic loading. For this purpose, magnet thickness and magnet grade were also examined for the rotor geometry that provided the lowest torque ripple. These additional analyses were carried out to determine whether the magnetic loading reduction caused by rotor geometry modification could be compensated by increasing the magnet volume or using magnet materials with a higher energy product. In addition, the possibility of increasing the specific electric loading was considered theoretically as an alternative compensation approach.

However, since this method would require higher ampere-turns and introduce additional constraints related to slot filling, conductor cross-section, phase resistance, and copper losses, it was not directly applied in the FEM analyses. Therefore, the analysis procedure was structured to evaluate the design trade-offs among torque ripple, magnetic loading, electromagnetic efficiency, and average torque production capability.

4. Results and Discussion

In this section, the effects of the magnet embrace ratio and magnet offset value on the electromagnetic performance of the reference CNC feed-drive servo motor are investigated in detail. For each design point, the average electromagnetic torque, torque ripple, electromagnetic efficiency, induced voltage characteristics, and air-gap magnetic loading level were calculated. In addition, the magnetic loading variations occurring at the design points with low torque ripple were evaluated, and the design trade-offs between torque quality and torque production capability were analyzed. To maintain the average torque in designs providing low torque ripple, magnet thickness analyses were also performed to increase the air-gap flux density. In this context, different magnet thicknesses were evaluated for the optimized magnet embrace and offset combinations, and the relationship between air-gap magnetic loading and torque production capability was investigated. The obtained results show that rotor magnet geometry directly affects not only torque ripple but also the air-gap magnetic field distribution, electromagnetic energy conversion characteristics, and overall motor performance.

Figure 4 presents the torque ripple results obtained for different magnet embrace ratios and magnet offset values. The results show that both the magnet embrace ratio and the magnet offset value have a significant effect on torque ripple. In the reference case with 0 mm offset, torque ripple starts from approximately 5.1% and decreases with increasing embrace ratio, reaching approximately 2.4% at an embrace ratio of 0.85. However, when the embrace ratio is increased to 0.95, torque ripple increases again. This behavior can be attributed to the deterioration of the magnetic field distribution in the pole transition regions and the reappearance of air-gap flux density harmonics contributing to torque pulsations at higher embrace ratios.

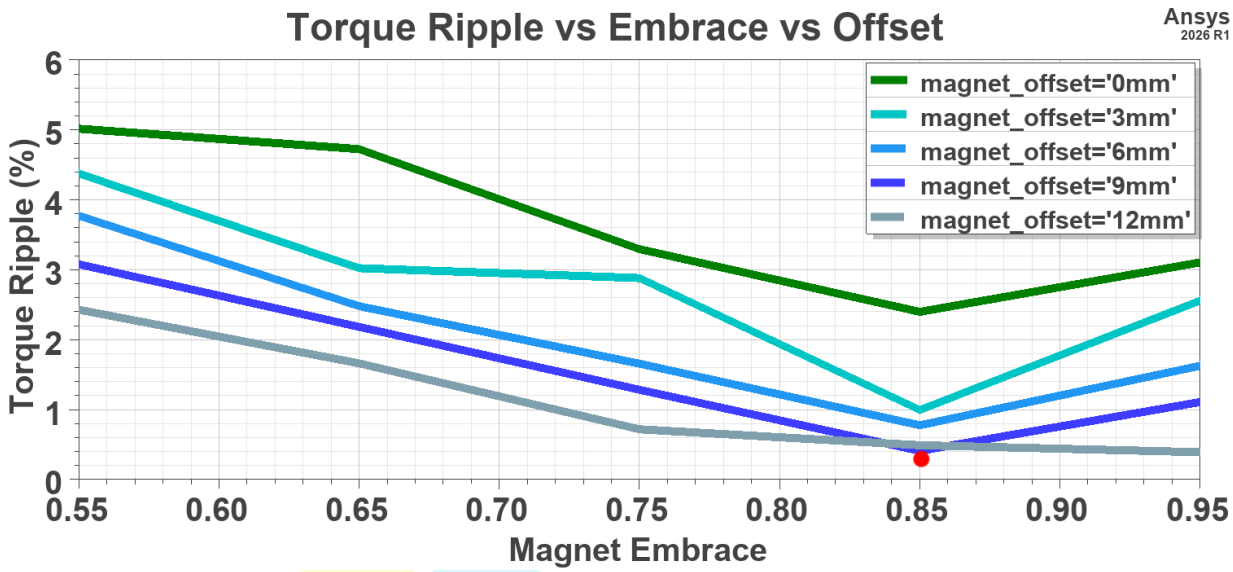


Figure 4. Effect of Magnet Embrace and Offset on Torque Ripple

Increasing the magnet offset value systematically reduces torque ripple at all embrace levels. Significant improvements are observed even in the embrace range of 0.55–0.75 with increasing offset. The main reason for this improvement is the modification of the effective magnetic field distribution around the pole center and the attenuation of harmonic components in the air gap. As a result of the offset application, periodic torque oscillations caused by rotor–stator interaction are reduced, leading to smoother electromagnetic torque production.

The most notable result in the graph is obtained at a magnet embrace ratio of approximately 0.85 and a magnet offset value of 9 mm. This design point provides the lowest ripple level among all analyzed designs, with a torque ripple of approximately 0.35%.

Considering that the reference design exhibits a ripple level of approximately 5%, it is observed that torque ripple can be reduced by more than 90% solely through the optimization of rotor magnet geometry. This result offers significant advantages for compact CNC feed-drive systems in terms of surface quality, vibration level, and positioning accuracy.

Although higher offset values also provide favourable results in terms of torque ripple reduction, the applicable offset amount in rotor design is not determined solely by electromagnetic performance criteria. Excessive offset may reduce the effective magnetic cross-sectional area in certain regions of the magnet and lead to local flux density concentrations. This may potentially increase the risk of local demagnetization by driving certain magnet regions closer to the critical operating limits of the demagnetization curve, particularly under high-load conditions. In addition, high offset values may make magnet placement mechanically more complex, complicate magnet retention and bonding surfaces, and increase sensitivity to manufacturing tolerances.

Therefore, not only minimum torque ripple but also manufacturability, mechanical strength, and demagnetization safety should be considered together in rotor design. This indicates that the offset amount provides benefits up to a certain optimum value, while the additional improvement becomes limited at higher offset values. Hence, for torque ripple

reduction, not only the offset amount but also the offset and embrace parameters should be optimized together.

Figure 5 presents the average electromagnetic torque results obtained for different magnet embrace ratios, magnet offset values, and magnet thicknesses. The results indicate that the average output torque increases with increasing magnet embrace ratio in all analysis scenarios. The torque increase is more pronounced particularly in the embrace range of 0.65–0.85, whereas the rate of increase decreases after an embrace ratio of 0.85. This behavior can be attributed to the expansion of the effective magnetic flux and electromagnetic interaction region in the air gap as the magnet pole arc increases.

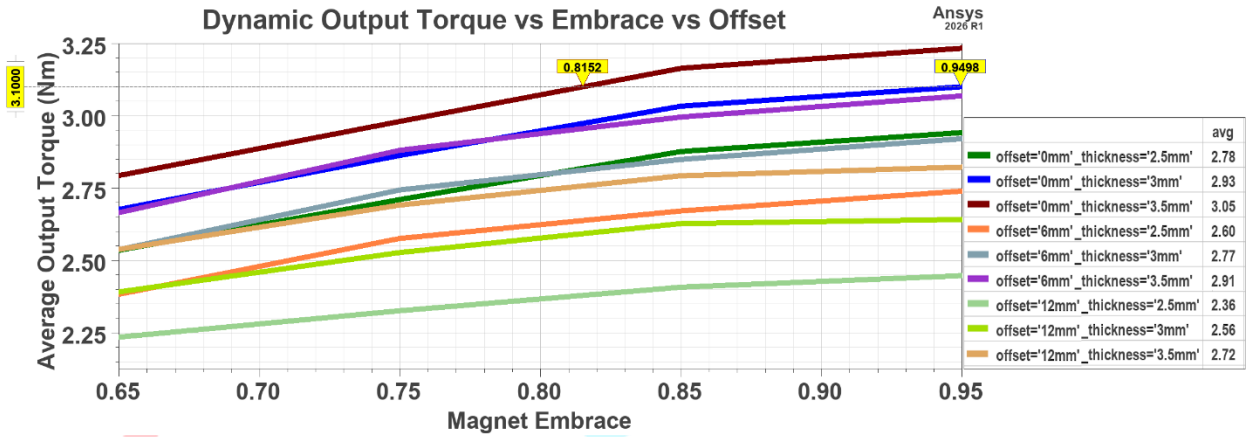


Figure 5. Effect of Magnet Embrace, Offset and Magnet Thickness on Average Electromagnetic Torque

Although increasing the magnet offset value provides significant advantages in terms of torque ripple reduction, it has an opposite effect on the average torque. In particular, when evaluated at a constant magnet thickness, increasing the offset value from 0 mm to 12 mm causes a noticeable reduction in the average torque level. For example, at a magnet thickness of 2.5 mm, the average torque decreases from approximately 2.78 Nm to 2.36 Nm. A similar trend is also observed for magnet thicknesses of 3 mm and 3.5 mm. This result is consistent with the AvgAbs(B) variation discussed in the previous section and indicates that higher offset values reduce the effective magnetic loading in the air gap. The reduction in torque production can be explained by the reshaping of the rotor pole geometry due to the offset application and the decrease in the effective magnet region capable of transferring flux to the air gap. In other words, while the harmonic components responsible for torque ripple are reduced, the fundamental magnetic field component is also weakened to some extent. Therefore, if only torque ripple reduction is targeted, undesirable losses in torque production capability may occur.

To address this issue, the effect of increasing the magnet thickness was also investigated. The results show that the average torque systematically increases with increasing magnet thickness at all offset levels. For example, at 12 mm offset, increasing the magnet thickness from 2.5 mm to 3.5 mm increases the average torque from approximately 2.36 Nm to 2.72 Nm. Similarly, at 6 mm offset, the average torque increases from 2.60 Nm to 2.91 Nm. These results indicate that the reduction in specific magnetic loading caused by the offset can be significantly compensated by increasing the magnet volume.

The highest average torque value, approximately 3.25 Nm, is obtained at 0 mm offset and 3.5 mm magnet thickness. However, this design does not represent the optimum solution in terms of torque ripple. On the other hand, the design with 9 mm offset and 0.85 embrace ratio, where the minimum torque ripple is achieved, can provide both low torque ripple and acceptable torque production capability when evaluated with appropriate magnet sizing.

These results show that the optimum rotor design in CNC feed-drive servo motors should not be determined solely based on maximum torque or minimum torque ripple criteria, but rather through the combined evaluation of torque quality, specific magnetic loading, and torque production capability. According to the obtained results, the reference motor does not fully reach the nominal catalog torque value of approximately 3.1 Nm under the existing design parameters and the phase current level used in the analyses.

However, this is not necessarily due to an inadequacy of the design, but rather to the fact that the analyses were performed under constant current loading. Therefore, the obtained torque values are not intended for absolute performance validation, but for comparing the relative performance of different rotor geometries under the same electromagnetic loading.

It is observed that the magnet offset approach applied to reduce torque ripple decreases the air-gap magnetic loading and, consequently, the average torque production capability. Therefore, magnet thickness was also parametrically investigated to establish a balance between low torque ripple and sufficient torque production. The obtained results show that, when the B-H characteristics of N35H-grade NdFeB magnets at an operating temperature of approximately 60°C are used, a magnet thickness of 2.5 mm may not provide sufficient magnetic loading, particularly in high-offset applications.

In contrast, increasing the magnet thickness to 3 mm significantly improves the air-gap magnetic loading, brings the average torque values closer to the reference motor level, and provides a more balanced torque-ripple optimization.

Therefore, for the analyzed motor topology, operating point, and N35H magnet material, the results indicate that using a magnet thickness of at least 3 mm is electromagnetically more suitable for offset configurations providing low torque ripple. Although higher magnet thicknesses provide additional torque improvement, they also introduce further design trade-offs in terms of cost, magnet volume, and rotor manufacturability. Accordingly, within the scope of this study, a magnet thickness of 3 mm is identified as a suitable design point in terms of the balance between torque production capability and torque quality.

Figure 6 compares the dynamic electromagnetic torque waveforms of the reference motor design (embrace = 0.95, offset = 0 mm) and the optimized design providing the minimum torque ripple (embrace = 0.85, offset = 9 mm). To eliminate the influence of magnet volume and isolate the effects of magnet embrace and offset parameters, the magnet thickness was fixed at 3 mm for both designs. The analyses were performed under identical current loading conditions to ensure a fair comparison. Therefore, the observed differences in torque characteristics originate solely from the variations in rotor magnet geometry.

In the reference design, the average electromagnetic torque is obtained as approximately 3.10 Nm, with the torque varying between 3.06 Nm and 3.16 Nm.

In contrast, the optimized design achieves an average torque of approximately 2.77 Nm, while the torque variation remains within the range of 2.77–2.78 Nm. These results demonstrate that the optimization of the magnet embrace ratio and offset value has a significant effect on the dynamic torque characteristics.

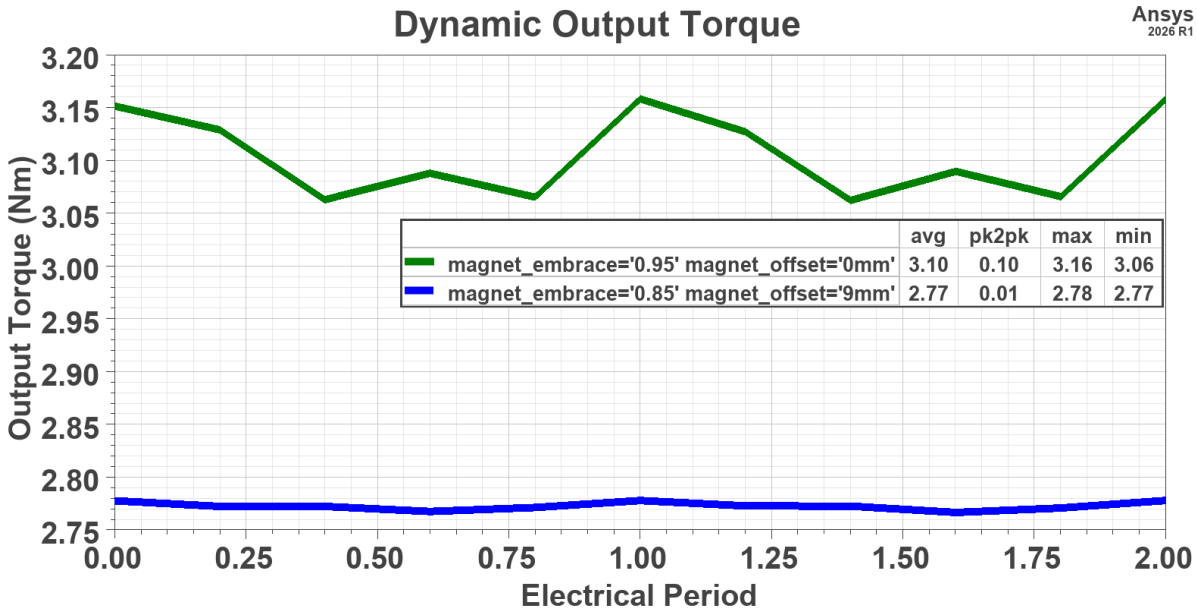


Figure 6. Comparison of Dynamic Electromagnetic Torque Waveforms

When the torque waveform of the reference motor is examined, distinct torque oscillations that repeat periodically over the electrical period are observed. These oscillations originate from harmonic interactions between the rotor and stator and result in a peak-to-peak torque variation of approximately 0.10 Nm.

In contrast, the torque waveform of the optimized design becomes considerably smoother, and the peak-to-peak torque variation decreases to approximately 0.01 Nm. This indicates that the peak-to-peak torque variation is reduced by approximately ten times.

Figure 7 presents the efficiency results obtained for different magnet embrace ratios and magnet offset values. The results show that motor efficiency increases regularly with increasing magnet embrace ratio at all offset levels.

A more pronounced increase in efficiency is observed particularly in the embrace range of 0.55–0.75, whereas the rate of increase decreases after an embrace ratio of 0.85. This behavior is associated with the increase in the effective magnetic flux transferred to the air gap as the magnet pole arc increases, resulting in higher electromagnetic power conversion under the same current loading.

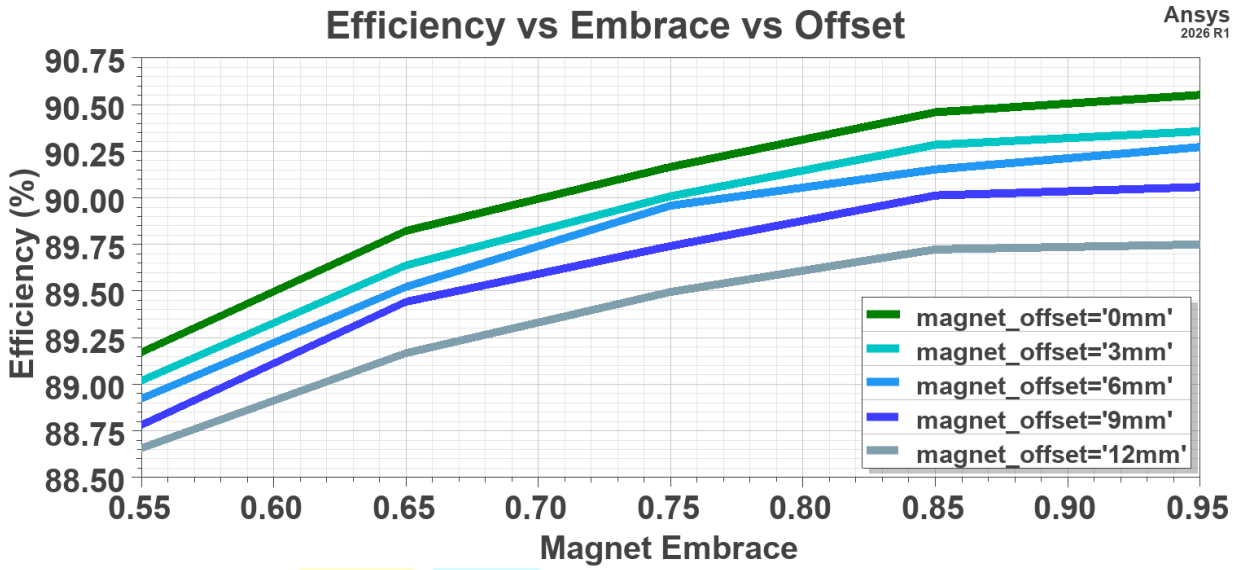


Figure 7. Effect of Magnet Embrace and Offset on Efficiency

However, increasing the magnet offset value has an adverse effect on efficiency. When evaluated at the same embrace ratio, increasing the offset value from 0 mm to 12 mm causes an efficiency reduction of approximately 0.7–0.8%. For example, at an embrace ratio of 0.95, efficiency decreases from approximately 90.6% to 89.8%. A similar trend is observed throughout the entire range investigated. This behavior is consistent with the average torque and AvgAbs(B) results presented in the previous sections.

As a result of the offset application, the effective magnetic loading in the air gap decreases, and the electromagnetic torque produced under the same current loading is reduced. Since the analysis were carried out under current-fed conditions, copper losses remain largely constant, whereas the reduction in output mechanical power appears as a decrease in overall efficiency. In other words, high offset values applied to reduce torque ripple introduce a certain penalty in electromagnetic energy conversion efficiency.

Nevertheless, the obtained results show that the reduction in efficiency remains at a relatively limited level. In the design with an embrace ratio of 0.85 and an offset value of 9 mm, where the lowest torque ripple is achieved, the efficiency is maintained at approximately 90%. This result indicates that while an improvement of up to approximately 90% in torque ripple is obtained, the efficiency loss remains only around 0.5%. Therefore, by properly optimizing the rotor geometry, significant improvements in torque quality can be achieved while largely preserving the high-efficiency characteristics of the motor.

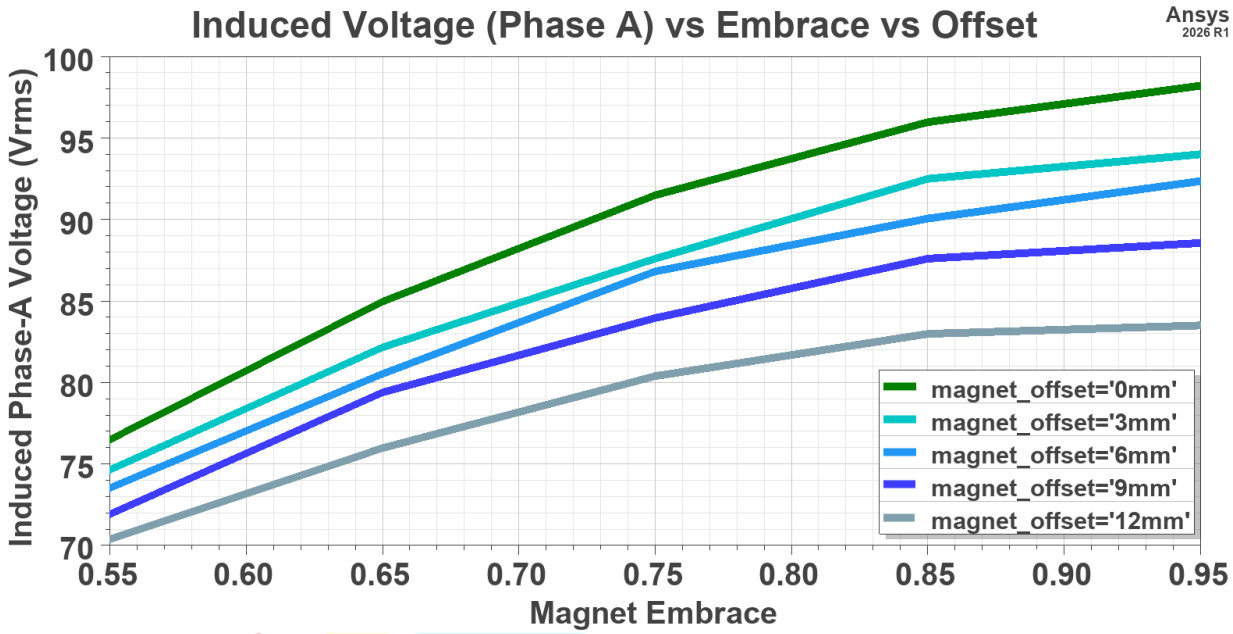


Figure 8. Effect of Magnet Embrace and Offset on Induced Phase Voltage

Figure 8 presents the A-phase induced voltage (Back-EMF) results obtained for different magnet embrace ratios and magnet offset values. Since the induced voltage is a direct indicator of the fundamental magnetic flux component generated in the air gap, it is an important parameter for evaluating the effect of rotor geometry variations on electromagnetic energy conversion.

The results show that the induced phase voltage increases regularly with increasing magnet embrace ratio at all offset levels. A pronounced increase is observed particularly in the embrace range of 0.55–0.85, whereas the rate of increase decreases at higher embrace values. This behavior can be explained by the increase in the effective magnetic flux linked to the air gap as the magnet pole arc expands, which in turn increases the total flux linkage with the stator windings. However, increasing the magnet offset value causes a systematic decrease in the induced voltage level. For example, at an embrace ratio of 0.95, the induced phase voltage reaches approximately 98 Vrms under 0 mm offset, whereas it decreases to approximately 84 Vrms when a 12 mm offset is applied at the same embrace ratio. A similar trend is observed throughout the entire investigated range. This result is highly consistent with the average torque and AvgAbs(B) results presented in the previous sections.

As is well known, in PMSM structures, the induced voltage constant is directly related to the fundamental magnetic flux component in the air gap. Therefore, the decrease in induced voltage indicates that the effective magnetic flux transferred by the rotor to the air gap also decreases with the application of offset. In other words, high offset values applied to reduce torque ripple reduce not only the harmonic components but also, to some extent, the fundamental magnetic field component that contributes to torque production. This is one of the main reasons for the reduction in average torque observed in the previous sections.

The results in Figure 8 also demonstrate a strong relationship among rotor geometry, torque production, air-gap magnetic loading, and induced voltage. In the design with an embrace ratio of 0.85 and an offset value of 9 mm, where the torque ripple reaches its minimum

level, the induced voltage is obtained as approximately 88 Vrms. Although this value is lower than that of the reference design, it remains acceptable considering the significant improvement achieved in torque ripple. Indeed, in CNC feed-drive systems, high torque quality is often considered a more critical design criterion than maximum voltage or maximum torque production.

Figure 9 compares the A-phase induced voltage waveforms of the reference motor design (embrace = 0.95, offset = 0 mm) and the optimized design providing the minimum torque ripple (embrace = 0.85, offset = 9 mm). To ensure a fair comparison, the magnet thickness was selected as 3 mm in both designs, and the analyses were performed at the same operating speed.

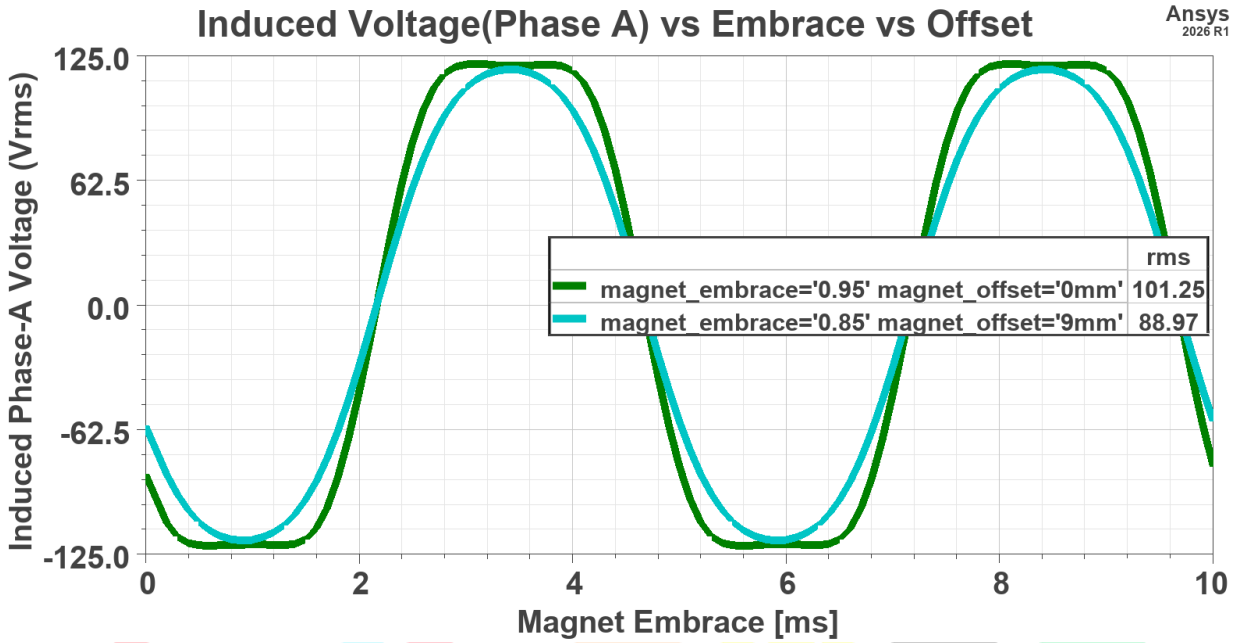


Figure 9. Comparison of Induced Voltage

The results show that both designs exhibit a highly symmetric induced voltage characteristic with low harmonic content. However, the variations in rotor geometry have a noticeable effect on the amplitude of the induced voltage. In the reference design, the A-phase induced voltage is obtained as approximately 101.25 Vrms, whereas this value decreases to approximately 88.97 Vrms in the design with an embrace ratio of 0.85 and an offset value of 9 mm, where the minimum torque ripple is achieved. This corresponds to a voltage reduction of approximately 12%.

When the waveforms are examined in detail, it is observed that the optimized design largely preserves the fundamental waveform, although its amplitude decreases. This result is also consistent with the average torque, efficiency, and AvgAbs(B) results presented in the previous sections.

Since the induced voltage constant in PMSM structures is directly related to the fundamental magnetic flux component generated in the air gap, the reduction in the effective magnetic flux transferred by the rotor to the air gap due to the offset application also leads to a decrease in the induced voltage level.

However, it should be noted that the decrease in voltage amplitude should be evaluated together with the improvement in torque ripple. Although the reference design provides higher induced voltage and higher average torque, it exhibits a noticeable torque ripple level. In contrast, although the induced voltage level decreases in the 0.85 embrace and 9 mm offset design, the torque waveform is significantly improved, resulting in a much smoother electromagnetic energy conversion.

Consequently, the obtained Back-EMF waveforms confirm the air-gap magnetic loading and torque results presented in the previous sections, indicating that the magnet offset application not only reduces torque harmonics but also affects the fundamental magnetic flux level of the motor. Therefore, an appropriate design balance should be established between maximum voltage generation and low torque ripple when determining the rotor geometry.

Since vibration and positioning accuracy are critical in CNC feed-drive applications, the observed reduction in voltage is considered acceptable in return for the significant improvement in torque quality.

Figure 10 presents the air-gap flux density results obtained for different magnet embrace ratios, magnet offset values, and magnet thicknesses. The values shown in the graph represent the Average Absolute Air-Gap Flux Density (AvgAbs(B)) calculated along the air gap and are used to evaluate the specific magnetic loading level of the motor.

As is well known, electromagnetic torque production in electrical machines is mainly related to the specific magnetic loading (Bav) and the specific electric loading (A). Therefore, variations in the air-gap flux density have a direct effect on the torque production capability of the motor.

The results show that the air-gap flux density increases regularly with increasing magnet embrace ratio in all analysis scenarios. This behavior results from the increase in the effective magnetic flux linked to the air gap as the magnet pole arc expands.

In contrast, increasing the magnet offset value causes a noticeable reduction in the air-gap flux density. Particularly at a magnet thickness of 2.5 mm, the air-gap flux density reaches approximately 0.71 T under 0 mm offset, whereas it decreases to approximately 0.52 T when a 12 mm offset is applied. This result indicates that the improvement in torque ripple is accompanied, to some extent, by a reduction in specific magnetic loading.

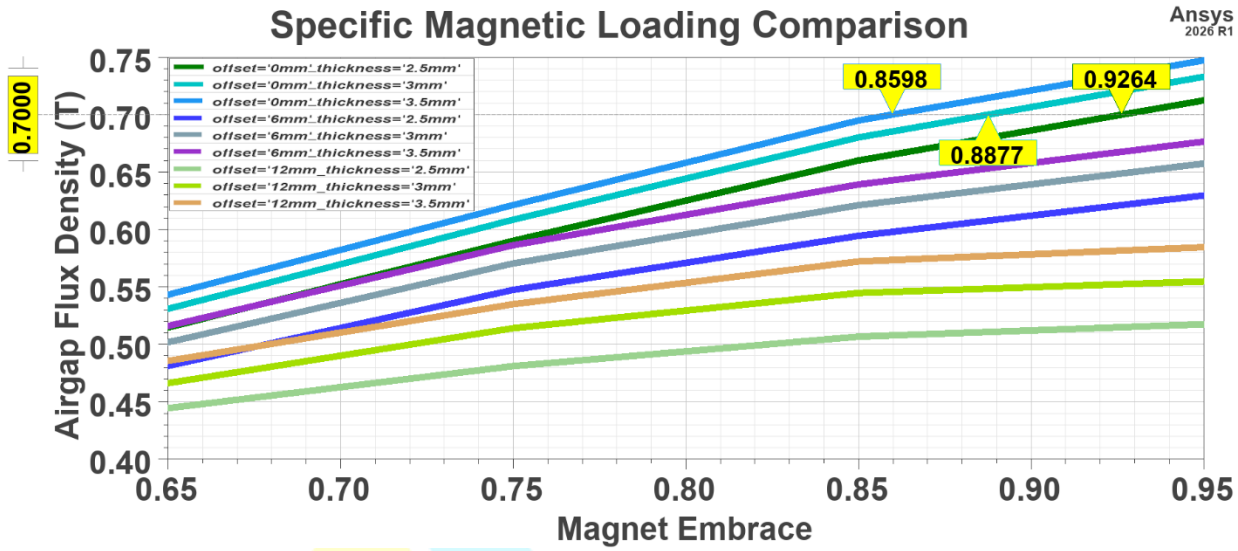


Figure 10. Effect of Magnet Geometry on Specific Magnetic Loading

When the average torque and induced voltage results presented in the previous sections are evaluated together, it is clearly observed that the reduction in torque production capability is mainly caused by the decrease in air-gap magnetic loading. In PMSM structures, the induced voltage constant and electromagnetic torque constant are directly related to the fundamental magnetic flux component in the air gap. Therefore, while the harmonic components responsible for torque ripple are reduced by the offset application, the fundamental magnetic field component contributing to torque production is also weakened to some extent.

For this reason, magnet thickness was also investigated to recover the reduced specific magnetic loading while preserving the improvement in torque ripple. The results show that increasing the magnet thickness from 2.5 mm to 3 mm and 3.5 mm at the same offset level can significantly increase the air-gap flux density. For example, under 12 mm offset, the air-gap flux density, which is approximately 0.52 T, can be increased to approximately 0.59 T by increasing the magnet thickness. Similarly, under 6 mm offset, an air-gap flux density of approximately 0.68 T is achieved with a magnet thickness of 3.5 mm.

The obtained results indicate that high offset values applied to reduce torque ripple should not be evaluated independently. This is because rotor geometries that provide low torque ripple may also reduce the air-gap magnetic loading. In this case, three main approaches can be used to maintain the average torque level. The first approach is to increase the magnet thickness. By increasing the magnet volume, the magnetic flux transferred to the air gap can be increased, and the lost magnetic loading can be significantly recovered. The second approach is to use magnet grades with higher remanence and energy product instead of N35H. Thus, a higher air-gap flux density can be obtained without changing the rotor geometry. The third approach is to increase the specific electric loading. However, this would require higher ampere-turns, leading to increased phase resistance and copper losses, and consequently reducing motor efficiency.

Therefore, for the investigated motor structure, the most suitable solution appears to be the use of embrace–offset combinations that provide low torque ripple together with sufficient magnet thickness. In particular, for the 0.85 embrace and 9 mm offset design, increasing the magnet thickness to 3 mm significantly recovers the air-gap magnetic loading while

maintaining low torque ripple performance. This result demonstrates that low torque ripple and high torque production capability can be achieved together within the same design.

Figure 11 compares the air-gap flux density distributions of the reference motor design and the optimized design providing the minimum torque ripple. The main purpose of this comparison is to reveal the relationship between the improvement achieved in torque ripple and the changes in the air-gap magnetic field distribution. The analyses were performed using the 2.5 mm magnet thickness employed in the initial design of the reference motor.

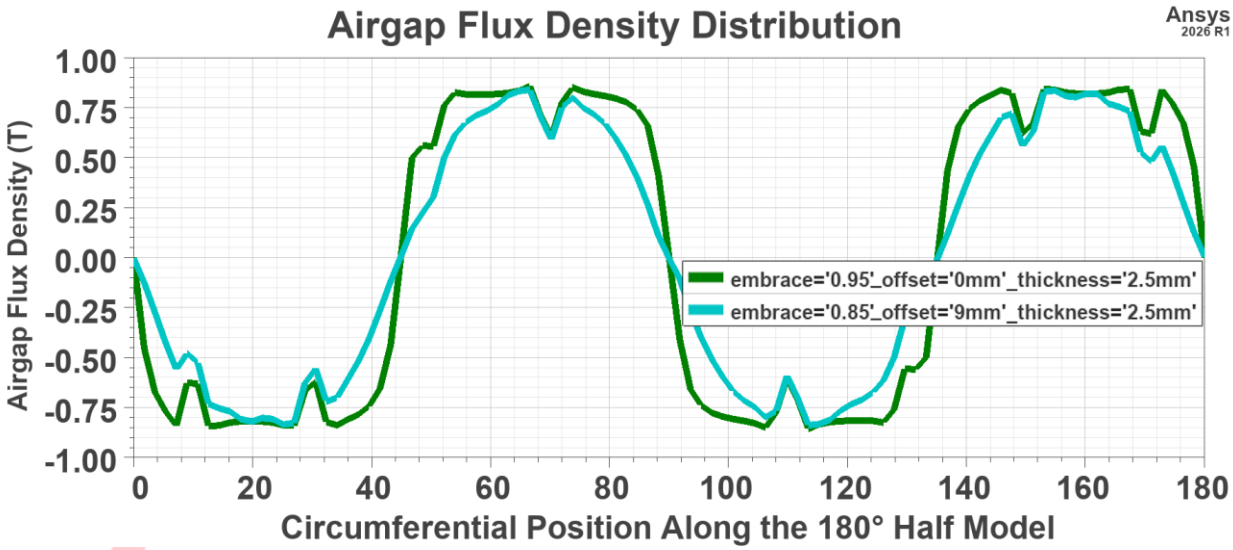


Figure 11. Air-Gap Flux Density Distribution Analysis

When the reference design is examined, the air-gap flux density is observed to reach approximately ±0.85 T in the pole regions. However, abrupt variations, high-gradient field distributions, and distinct harmonic components are noticeable in the pole transition regions. These harmonic components increase the electromagnetic interaction between the rotor and stator, thereby contributing to the formation of torque ripple. Indeed, the results presented in the previous sections show that the reference design has the highest torque ripple among the investigated configurations.

In the 0.85 embrace and 9 mm offset configuration, which is identified as the optimum design, the air-gap magnetic field distribution exhibits a smoother characteristic. In particular, the flux density variations in the pole transition regions become more gradual, and the air-gap field distribution approaches a more sinusoidal form.

This behavior contributes to the reduction of harmonic components originating from rotor–stator interaction and, consequently, to a significant decrease in torque ripple. The reduction of more than approximately 90% in torque ripple obtained from the dynamic torque analyses is directly associated with this electromagnetic behavior.

However, it is also observed that the peak values of the air-gap flux density decrease to some extent in the optimized design. This result is fully consistent with the AvgAbs(B), average torque, and induced voltage results presented in the previous sections. In other words, while the harmonic components responsible for torque ripple are reduced, the fundamental magnetic field component contributing to torque production is also weakened to a certain extent. Therefore,

the improvement in torque quality is accompanied by a certain reduction in specific magnetic loading.

The results in Figure 11 show that the primary effect of the magnet offset application is not merely a reduction in air-gap flux density. More importantly, the air-gap field distribution is reshaped and its harmonic content is reduced. In this way, a smoother electromagnetic field distribution is obtained, torque production becomes more stable, and torque oscillations caused by rotor–stator interaction are significantly reduced.

At the same time, the reduction in air-gap magnetic loading leads to decreases in the average torque and induced voltage levels. Therefore, as applied in the subsequent stages of this study, increasing the magnet thickness or using magnet grades with higher energy product represents an effective solution for recovering the lost specific magnetic loading while preserving the low torque ripple advantage. Accordingly, the obtained results indicate that the optimum rotor design should not be determined solely according to the minimum torque ripple criterion, but should be defined by considering the balance between torque quality and specific magnetic loading.

Figure 12 shows the magnetic flux lines and flux density distribution obtained from the 180° symmetric FEM model used in the analyses. As can be observed, the magnetic flux lines originate from the rotor magnets, pass through the air gap toward the stator teeth, and close through the stator yoke to the adjacent poles. When the flux distribution is examined, higher flux density levels are formed at the stator tooth tips and rotor pole regions, while the flux is distributed uniformly in the stator yoke. In addition, no distinct local saturation region is observed in the model, and the magnetic flux is carried smoothly throughout all active regions.

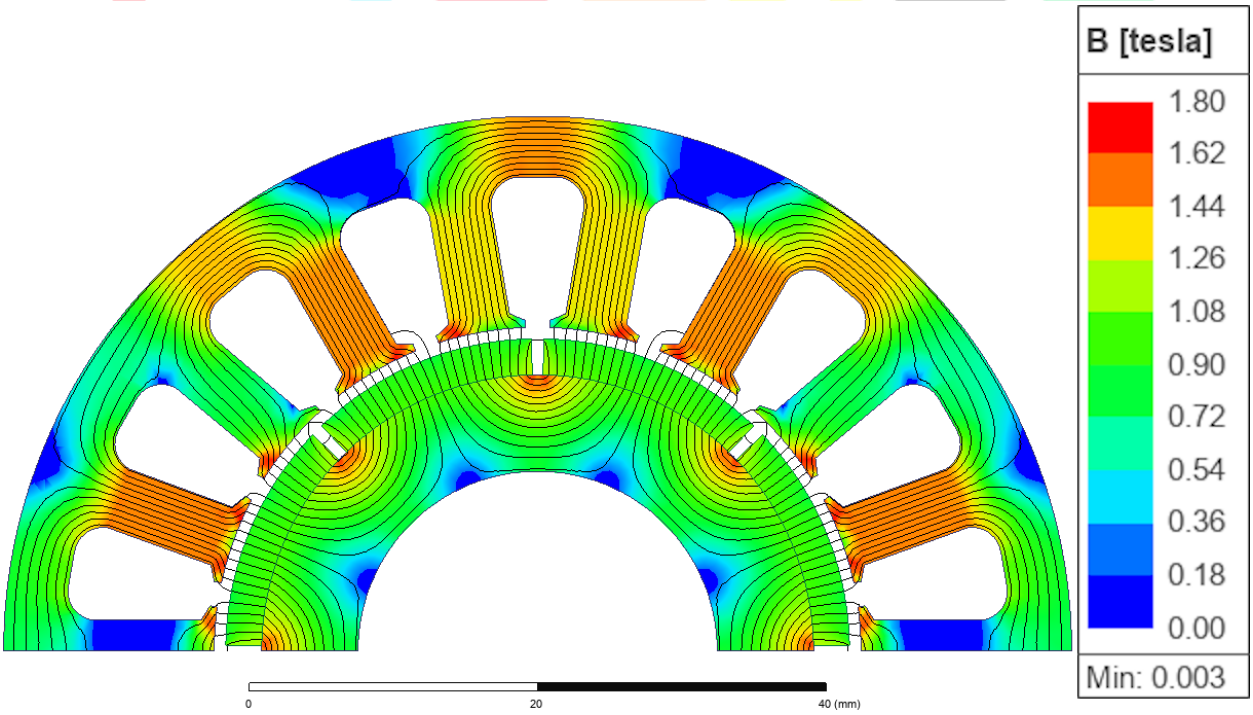


Figure 12. Half-model finite element representation of the investigated servo motor showing magnetic flux lines and magnetic flux density distribution under symmetry boundary conditions. (embrace = 0.85, offset = 9 mm)

5. Conclusion

In this study, the effects of the magnet embrace ratio and magnet offset value on the electromagnetic performance of a reference CNC feed-drive servo motor were comprehensively investigated.

Throughout the analyses, the stator geometry, winding configuration, material properties, operating point, and drive parameters of the motor were kept constant, while only the rotor magnet geometry was varied. Thus, the obtained results were ensured to directly originate from the magnet embrace and offset parameters.

The parametric analyses showed that the magnet offset application is a highly effective method for reducing torque ripple. The torque ripple of the reference design, which is approximately 5%, was reduced to nearly 0.35% by using suitable embrace–offset combinations. The obtained results indicate that an improvement of more than 90% in torque ripple can be achieved solely by rearranging the rotor magnet geometry. This provides a significant advantage, particularly for CNC feed-drive systems requiring high positioning accuracy.

However, it was also observed that the improvement in torque ripple involves certain electromagnetic trade-offs. Increasing the magnet offset value reshapes the air-gap magnetic field distribution and reduces harmonic components; however, it also decreases the specific magnetic loading level of the motor. The AvgAbs(B) results calculated along the air gap showed that the air-gap magnetic load systematically decreases with the application of offset. This leads to a reduction in induced voltage, electromagnetic torque production capability, and a limited decrease in efficiency. Therefore, geometrical modifications aimed at reducing torque ripple should also be evaluated by considering the associated losses in average torque.

When the parametric results are evaluated, the minimum torque ripple is obtained at approximately 0.85 magnet embrace ratio and 9 mm magnet offset. At this design point, torque ripple is significantly reduced, the air-gap flux density distribution becomes more sinusoidal, and the electromagnetic torque characteristic is clearly improved. Dynamic torque analyses show that the peak-to-peak torque variation decreases from approximately 0.10 Nm in the reference design to approximately 0.01 Nm in the optimized design. Similarly, the induced voltage waveforms confirm the changes in the air-gap magnetic field distribution.

The results also show that rotor geometries providing reduced torque ripple are accompanied by a decrease in specific magnetic loading. Therefore, magnet thickness was parametrically investigated, and alternative design scenarios were evaluated to recover the lost magnetic loading. The results indicate that a magnet thickness of 2.5 mm may be insufficient for high-offset applications in this motor topology when N35H-grade magnets are used under approximately 60°C operating conditions. In contrast, increasing the magnet thickness to 3 mm significantly recovers the air-gap magnetic loading, improves the average torque level, and provides a more balanced torque-ripple optimization. Although higher magnet thicknesses provide additional performance improvement, they also introduce further design constraints in terms of cost, magnet volume, and manufacturability.

In summary, the obtained results demonstrate that the magnet embrace and offset parameters directly affect not only torque ripple but also air-gap magnetic loading, induced voltage level, average torque production capability, and efficiency. The proposed design with an embrace ratio of 0.85 and an offset value of 9 mm provides a successful balance among high torque quality, low torque ripple, and acceptable electromagnetic performance when evaluated together with appropriate magnet sizing. These findings clearly reveal that rotor magnet geometry is a critical design parameter for low-vibration and high-precision servo motors intended for compact CNC feed-drive systems.

6. References

Akar, M., Eker, M., & Akin, F. (2021). BLDC Motor Design and Application for Light Electric Vehicle. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*. https://doi.org/10.35414/akufemubid.889877

Al-Timimy, A., Giangrande, P., Degano, M., Galea, M., & Gerada, C. (2017). Comparative study of permanent magnet-synchronous and permanent magnet-flux switching machines for high torque to inertia applications. *2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, 45–51. https://doi.org/10.1109/WEMDCD.2017.7947722

Altintas, Y., Verl, A., Brecher, C., Uriarte, L., & Pritschow, G. (2011). Machine tool feed drives. *CIRP Annals*, *60*(2), 779–796. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.010

Arslan, S., Iskender, I., & Navruz, T. S. (2023). FEM-based optimal design and testing of synchronous magnetic coupling for aerospace Starter/Generator applications. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, *41*, 101403. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101403

Avsar, Y., Fenercioglu, A., & Soyaslan, M. (2021). Design Optimization of PM Synchronous Motor Used in Belt Drive Elevator Systems. *2021 IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, 1–5. https://doi.org/10.1109/GUCON50781.2021.9573592

Erkorkmaz, K., & Altintas, Y. (2001). High speed CNC system design. Part III: high speed tracking and contouring control of feed drives. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *41*(11), 1637–1658. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00004-9

Eser, E., & Üstkoyuncu, N. (2025). Design and Analysis of a Novel Axial Flux Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, *20*(3), 1429–1438. https://doi.org/10.1007/s42835-024-02052-x

Fei, W., & Luk, P. C.-K. (2012). Torque Ripple Reduction of a Direct-Drive Permanent-Magnet Synchronous Machine by Material-Efficient Axial Pole Pairing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *59*(6), 2601–2611. https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2158048

Gundogan, A., & Bakan, A. F. (2026). Torque Ripple Reduction in Surface-Mounted Permanent Magnet Machine with Model-Based Current Reference Control. *Electronics*, *15*(6), 1240. https://doi.org/10.3390/electronics15061240

Hendershot, J. R., & Miller, T. J. E. (2010). *Design of Brushless Permanent-magnet Machines*. Motor Design Books. https://books.google.com.tr/books?id=n833QwAACAAJ

Jin Kim, K., Hoon Park, J., Hoo Min, D., & Guy Min, S. (2025). Data-Driven Optimization of Aspect Ratio in Permanent Magnet Machines Using Deep Learning and SHAP Analysis. *IEEE Access*, *13*, 122164–122174. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3586216

Neodymium Magnets (NdFeB) | Arnold Magnetic Technologies. (n.d.). Retrieved June 4, 2026, from https://www.arnoldmagnetics.com/products/neodymium-iron-boron-magnets/

Özsoy, M., Kaplan, O., & Akar, M. (2023). Implementation of Different 2D Finite Element Modeling Approaches in Axial Flux Induction Motors. *Electric Power Components and Systems*, *51*(19), 2385–2396. https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2240806

Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabovcová, V., & Niemelä, H. (2010). *Design of rotating electrical machines* (Reprinted). Wiley.

Soyaslan, M., Avsar, Y., Fenercioglu, A., & Eldogan, O. (2019). Cogging Torque Reduction in External Rotor PM Synchronous Motors by Optimum Pole Embrace. *2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, 1–4. https://doi.org/10.1109/ISMSIT.2019.8932915

Winiarski, Z., Kowal, Z., Jedrzejewski, J., & Kwasny, W. (n.d.). *PRECISE MODELLING OF MACHINE TOOL DRIVES WITH BALL SCREW THERMAL BEHAVIOUR*.

6thInternational
Congress of Engineering and Natural
Sciences

Otomotivde Kullanılan Koltuk Havalı Sistemlerinin Dinamik Özellikleri ve Sürücüye Etkileri

Furkan Melih EFE[1]

Abstract

Automobiles have become an indispensable part of human life in line with technological developments and increasing user expectations. This situation has intensified competition among automotive manufacturers pushing them to develop innovative solutions not only in terms of performance and safety but also in enhancing driving comfort. In this context, seat systems that directly affect in-cabin ergonomics have emerged as a significant area of research and development. In particular, pneumatic systems integrated into seats stand out as remarkable technologies due to their potential to improve both driver and passenger comfort and safety.

Conventional seat pneumatic systems generally provide fixed or manually adjustable structures and operate based on user intervention. However, next-generation systems adopt an dynamic approach capable of analyzing vehicle dynamics and driving conditions in real time through advanced sensor technologies and control algorithms. These systems evaluate parameters such as lateral acceleration, longitudinal acceleration, vehicle speed, and steering angle, and accordingly adjust the pressure levels and support points of the air bladders within the seat in real time. As a result, the driver's body stability is enhanced providing a more balanced seating position, especially during cornering and sudden maneuvers.

In addition, muscle fatigue and discomfort experienced during long drives are reduced contributing to the maintenance of the driver's attention level. Dynamic seat pneumatic systems also provide indirect safety benefits by optimizing the driver's contact with the seat, thereby improving vehicle control.

In this paper, the fundamental structure and working principles of seat pneumatic systems are examined in detail, existing system functions are explained and how these functions are dynamically adapted based on varying vehicle parameters is discussed. Furthermore, the effects of these systems on driver comfort and safety are comprehensively evaluated and inferences for their future development potential are presented.

Keywords: Automotive Seat Systems, Seat Pneumatic Systems, Dynamic Features, E&E System Development, Electronic Control Unit.

[1] Vehicle Network Engineer, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A,Ş., R&D Center, E&E Integration Administration, 0009-0001-4889-7289

Giriş

Otomotiv sektöründe kullanıcı beklentilerinin değişmesiyle birlikte araç geliştirme süreçlerinde konfor, ergonomi ve sürüş güvenliği kavramları giderek daha fazla önem kazanmıştır. Özellikle uzun süreli sürüşlerde sürücünün fiziksel yorgunluğunu azaltmak, dikkat seviyesini korumak ve araç hâkimiyetini desteklemek amacıyla araç içi sistemlerde yenilikçi teknolojiler geliştirilmektedir. Bu teknolojiler arasında araç koltuk sistemleri, sürücü ile araç arasındaki doğrudan fiziksel etkileşimi sağlaması nedeniyle kritik bir rol üstlenmektedir. Koltuk sistemlerinin yalnızca pasif bir oturma bileşeni olmaktan çıkıp sürüş dinamiklerine uyum sağlayabilen aktif yapılara dönüşmesi, otomotiv ergonomisi alanındaki önemli gelişmelerden biri olarak değerlendirilmektedir.

Koltuklarda kullanılan pnömatik destek sistemlerinin temelleri, manuel olarak ayarlanabilen lumbar destek mekanizmalarına dayanmaktadır. Van Sickle [1] tarafından geliştirilen pnömatik lumbar ayar sistemi, hava destekli yapıların sürücü konforunu artırmak amacıyla kullanılabileceğini ortaya koyan erken dönem çalışmalardan biri olmuştur. Bu sistemlerde temel amaç, sürücünün omurga yapısını destekleyerek daha ergonomik bir oturma pozisyonu sağlamaktır. Ancak geleneksel sistemler çoğunlukla sabit veya kullanıcı tarafından manuel olarak ayarlanabilen yapılara sahip olduğundan sürüş sırasında değişen araç dinamiklerine anlık tepki verememektedir.

Sensör teknolojilerinin, elektronik kontrol ünitelerinin ve gömülü yazılım sistemlerinin gelişmesiyle birlikte koltuk sistemleri daha akıllı ve adaptif bir yapıya kavuşmuştur. Choi ve ark. [2], sürücünün vücut formuna göre şekil değiştirebilen “Self-Shape Adjustment Cushion (SSA)” sistemi geliştirerek kişiselleştirilmiş koltuk desteği yaklaşımını ortaya koymuştur. Bu çalışma, sürücü konforunun yalnızca sabit destek yapılarıyla değil, kullanıcı davranışına uyum sağlayan dinamik sistemlerle artırılabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde Okiyama ve ark. [3], viraj alma esnasında koltuk yanal destek performansını inceleyerek sürücünün araç içerisindeki lateral hareketlerinin azaltılmasının hem konfor hem de sürüş stabilitesi açısından önemli olduğunu belirtmiştir.

Araç dinamiklerine bağlı çalışan aktif koltuk sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, sürücünün maruz kaldığı ivmesel etkilerin azaltılmasına odaklanmaktadır. Massara ve Gamache [4] tarafından geliştirilen ivme dengeleyici araç koltuğu sistemi, hızlanma ve yön değişimlerinden kaynaklanan kuvvetleri dengeleyerek sürücünün vücut stabilitesini artırmayı amaçlamaktadır. Frechin ve ark. [5] tarafından geliştirilen ACTISEAT sistemi ise aktif koltuk yapılarının hızlanma kompanzasyonu sağlayabileceğini göstererek sürüş konforuna yönelik önemli bir yaklaşım sunmuştur. Günümüzde bu sistemler; yanal ivme, boylamsal ivme, araç hızı ve direksiyon açısı gibi parametreleri analiz ederek hava keselerinin basınç seviyelerini gerçek zamanlı olarak değiştirebilmektedir. Böylece özellikle viraj alma, ani manevra ve hızlanma durumlarında sürücünün koltuk içerisindeki hareketi sınırlandırılarak daha dengeli bir oturuş sağlanmaktadır.

Sürücü konforunun sürüş güvenliği ile doğrudan ilişkili olduğu birçok çalışmada ortaya konmuştur. Healey ve Picard [7], fizyolojik sensörler aracılığıyla sürüş sırasında stres seviyesinin tespit edilebildiğini göstermiştir. Dong ve ark. [8] ise sürücü dikkat izleme

sistemlerini inceleyerek dikkat kaybı ve sürücü yorgunluğunun trafik güvenliği üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Bu çalışmalar, sürücü konforunu artıran sistemlerin dolaylı olarak sürüş güvenliğine de katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Ayrıca Behzad ve ark. [6], masaj fonksiyonuna sahip aktif otomotiv koltuklarının sürücü hareketleri ve konfor üzerindeki etkilerini incelemiş ve aktif destek sistemlerinin uzun süreli sürüşlerde kas yorgunluğunu azaltabildiğini ortaya koymuştur. Son yıllarda geliştirilen dinamik postür destek sistemleri ise sürücünün araç içerisindeki oturma pozisyonunu gerçek zamanlı olarak optimize etmeye odaklanmaktadır [9].

Bu çalışmada, otomotiv uygulamalarında kullanılan koltuk havalı destek sistemlerinin temel çalışma prensipleri incelenmiş, mevcut sistem fonksiyonları değerlendirilmiş ve araç dinamiklerine bağlı olarak geliştirilen adaptif özellikler ele alınmıştır. Ayrıca söz konusu sistemlerin sürücü konforu, ergonomisi ve güvenliği üzerindeki etkileri analiz edilerek gelecekteki gelişim potansiyellerine yönelik değerlendirmeler sunulmuştur. Bu yönüyle çalışma, aktif koltuk teknolojilerinin otomotiv sektöründeki önemini ortaya koymayı ve gelecekte geliştirilecek akıllı koltuk sistemlerine yönelik kuramsal bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır.

Yöntem

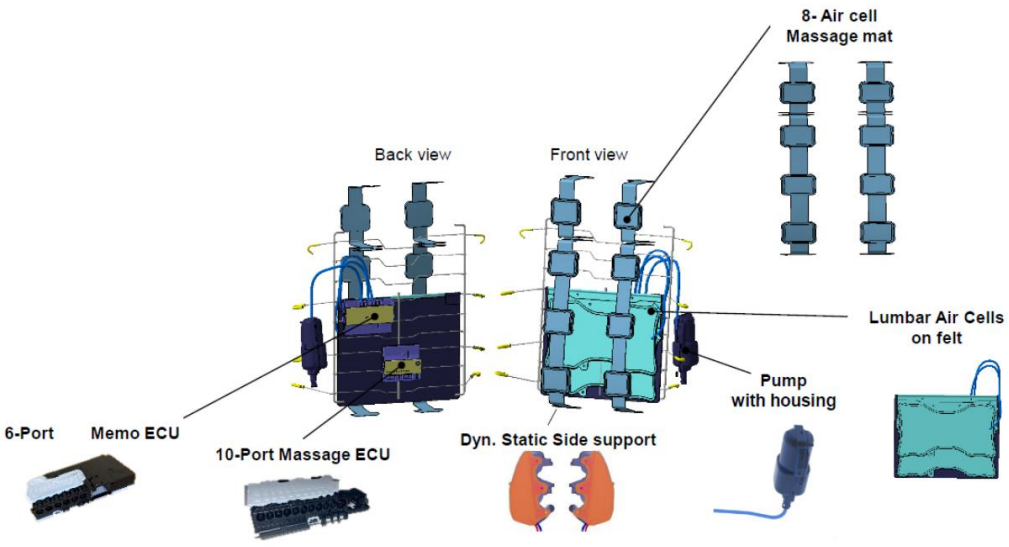
Bu çalışmada, otomotiv uygulamalarında kullanılan koltuk havalı destek sistemlerinin çalışma prensipleri ve dinamik özellikleri kuramsal olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında literatür taraması yapılarak akademik yayınlar, teknik çalışmalar ve patent dokümanları değerlendirilmiştir.

İnceleme sürecinde geleneksel havalı destek sistemleri ile dinamik koltuk havalı sistemleri karşılaştırılmıştır. Araç hızı, yanal ivme, boylamsal ivme ve direksiyon açısı gibi parametrelerin koltuk destek sistemleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Ayrıca bu sistemlerin sürücü konforu, oturma stabilitesi, yorgunluk ve sürüş güvenliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Elde edilen bilgiler doğrultusunda mevcut sistemlerin avantajları ve geliştirilmesi gereken yönleri incelenmiş, gelecekteki gelişim potansiyellerine yönelik değerlendirmeler sunulmuştur.

Koltuk Havalı Sistemi Nedir?

Geleneksel koltuk havalı sistemleri, koltuk üzerinde konumlandırılmış hava yastıklarının basınçlı hava ile şişirilip boşaltılması prensibine dayanan ergonomik konfor sistemleridir. Bu sistemler genel olarak, Şekil 1'de gösterildiği gibi içerisinde valf bloğu barındıran bir veya birden fazla elektronik kontrol ünitesi, hava pompası, hava kanalları ve hava keselerinden oluşmaktadır. Otomobil koltuklarında yer alan masaj, bel desteği ve yanal destek fonksiyonları koltuk havalı sistemi tarafından kontrol edilmektedir [1].



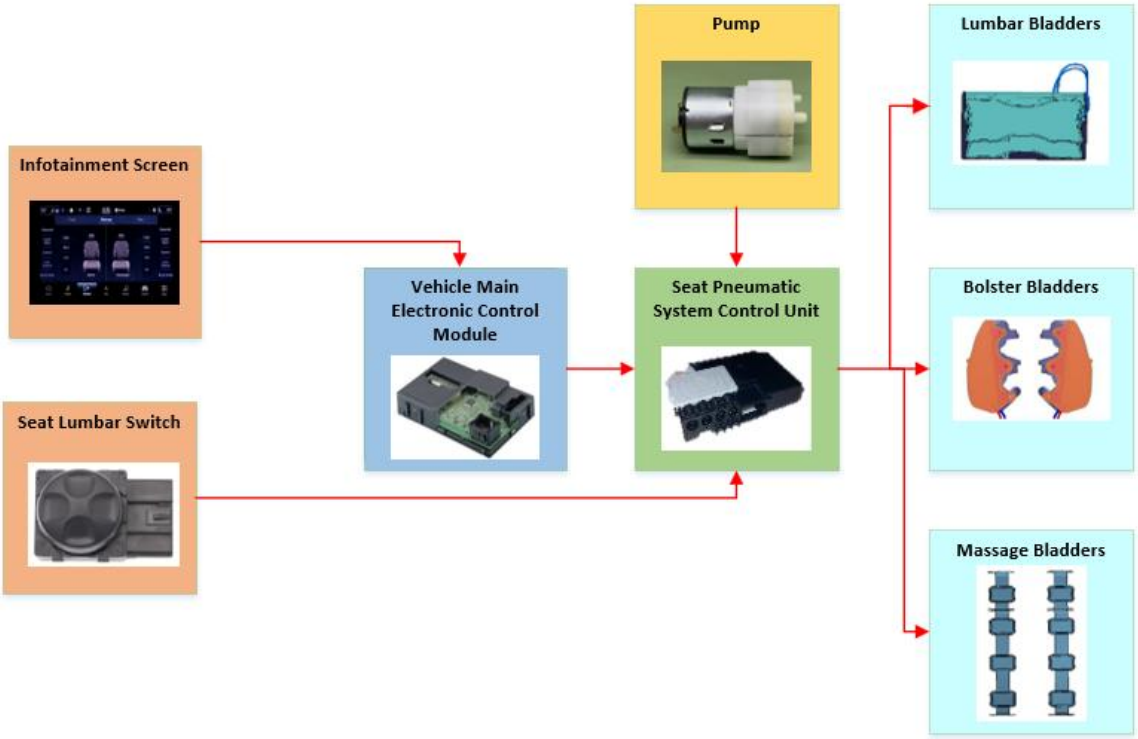
Şekil 1: Koltuk havalı sistemi genel görünümü

Koltuk Havalı Sistemi Nasıl Çalışır?

Otomobillerde bel desteği fonksiyonu genellikle koltuğun yan bölümünde bulunan fiziksel butonlar aracılığıyla kontrol edilirken, masaj ve yanal destek fonksiyonlarına ilişkin ayar talepleri çoğunlukla araç içi eğlence ekranı (infotainment sistemi) üzerinden yapılmaktadır. Kullanıcıdan gelen bu komutlar, aracın ana elektronik kontrol ünitesi üzerinden koltuk havalı sistemi elektronik kontrol ünitesine iletilir [1].

Koltuk havalı sistemi elektronik kontrol ünitesi, gelen talebe göre hava pompasını aktive eder. Pompa tarafından üretilen basınçlı hava, yine aynı kontrol ünitesi tarafından yönetilen ana valf üzerinden ilgili dağıtım valflerine yönlendirilir. Valfler aracılığıyla hava akışı kontrol edilerek hava kanalları üzerinden ilgili hava keselerine iletilir [1].

Basınçlı hava ile şişen hava keseleri, sürücü veya yolcunun vücudunu destekleyecek şekilde koltuk formunu değiştirir. Hangi hava kesesinin ne kadar süreyle ve hangi basınç seviyesinde şişirileceği veya tahliye edileceği, koltuk havalı sistemi elektronik kontrol ünitesi tarafından belirlenir. Bu kontrol süreci, önceden tanımlı konfor haritaları veya kullanıcı tarafından seçilen ayar seviyelerine göre gerçekleştirilir.



Şekil 2: Otomobil koltuk havalı sistemi çalışma diagramı

Koltuk Havalı Sistemi Dinamik Özellikleri

Koltuk havalı sisteminin dinamik özellikleri; aracın çeşitli sürüş parametreleri ve sürücünün kullanım koşullarına bağlı olarak hava keselerinin basınç ve konum seviyelerinin gerçek zamanlı ayarlanması yoluyla sürüş konforunu ve/veya güvenliğini artırmaya yönelik fonksiyonları kapsar.

5.1 Welcome Hug Özelliği

Welcome Hug, sürücü araca bindiğinde veya kapı kapandığında koltuk yan desteklerinin (hava keselerinin) kısa süreli olarak şişerek sürücüyü "saracak" şekilde desteklemesi özelliğidir. Bu özelliğin amacı, Şekil 3'te gösterildiği gibi hem sürücüye konforlu bir karşılama hissi vermek hem de sürücünün doğru oturma pozisyonuna yerleşmesini sağlar [2].

Welcome Hug özelliği, genel olarak sürücü araca yaklaşıp kapıyı açtığında ve araçta koltuğa oturduğunda tetiklenen, koltuk yan destek hava keselerinin kontrollü şekilde şişirilip ardından tanımlanan destek seviyesine ayarlanması prensibine dayanır. Araç üzerindeki anahtar algılama, kapı açıklık durumu, koltuk doluluk durumu ve kontak bilgileri koltuk kontrol ünitesine iletilir. Sürücü oturup kapı kapandığında koltuk kontrol ünitesi pompa ve valfleri kontrol ederek yanal destek hava keselerini önceden tanımlı bir basınç seviyesine yavaşça şişirir. Yanal destek hava keseleri basıncı hedef değere ulaştığında ya belirlenen zaman aralığından sonra tamamen indirilir ya da aynı basınç seviyesinde sabit olarak kalır.

Şekil 3: Welcome hug özelliği temsili gösterimi

5.2 Lateral Corner Assist Özelliği

Lateral Corner Assist özelliği, viraj dönüşleri sırasında oluşan merkezkaç kuvveti nedeniyle sürücünün gövdesinin dışa savrulmasını önlemek amacıyla koltuk yanal desteklerinin (hava keselerinin) şişerek sürücüyü desteklemesini sağlayan dinamik bir özelliktir. Bu özelliğin amacı, sürücünün konforunu artırarak direksiyon kontrolünü iyileştirmektir. Literatürde, viraj alma sırasında sürücünün gövde stabilitesinin koltuk yanal destekleri ile doğrudan ilişkili olduğu ve bu desteklerin sürücü kontrolü ile konfor üzerinde önemli etkiler oluşturduğu gösterilmiştir [3].

Lateral Corner Assist özelliği, viraj dönüşü sırasında dönüş yönüne göre farklı şekillerde çalışmaktadır. Direksiyon açı sensörü ile belirlenen viraj dönüş yönü bilgisi, ivmeölçerden alınan yanal ivme bilgisi ve aracın hız bilgisi dönüş sırasında koltuk kontrol ünitesine iletilir. Viraj dönüş yönü bilgisi koltuk kontrol ünitesinin dönüş yönünün tersi yönündeki koltuk yanal desteklerini şişirmesi için kullanılırken, aracın yanal ivme ve hız bilgileri ise yanal desteklerin şişirme seviyesinin koltuk kontrol ünitesi tarafından kontrol edilmesi amacıyla kullanılır. Bu yaklaşım, viraj sırasında sürücünün lateral hareketinin sınırlandırılması ve postür stabilitesinin artırılması prensibi ile uyumludur [3]. Özellik davranışın temsili gösterimi Şekil 4'te görsel olarak sunulmuştur.

Viraj dönüşü bittiğinde ise yanal desteklerin basıncı koltuk kontrol ünitesi tarafından kademeli olarak düşürülür ve koltuk normal formuna döner. Şişirme ve indirme işlemi koltuk kontrol ünitesi tarafından pompa ve valfler kontrol ederek yapılır. Düşük hızlarda belirlenen hız değerinin altında lateral corner assist fonksiyonu devre dışı bırakılabilir.

Şekil 4: Lateral Corner Assist özelliği temsili gösterimi

5.3 Longitudinal Speed Assist Özelliği

Longitudinal Speed Assist özelliği, tanımlı bir hız aralığında araç ani hızlanırken veya sert fren yaparken koltuk yan desteklerinin (hava keselerinin) ivme seviyesine bağlı olarak şişirilmesi prensibine dayanan dinamik bir özelliktir [4]. Şişirilen yan destekler, ani hızlanma veya frenleme sırasında sürücünün vücudunu kavrayarak sürüş konforunu artırır ve sürücünün güvenli bir şekilde koltukta sabit kalmasını sağlar. Literatürde, araç ivmesine bağlı olarak koltuk sistemlerinin aktif şekilde kontrol edilmesinin sürücü stabilitesi ve konforu üzerinde önemli etkileri olduğu gösterilmiştir [5].

Longitudinal Speed Assist özelliği, araç üzerinde bulunana ivme sensöründen alınan ivmelenme bilgisi ve aracın hız bilgisinin koltuk kontrol ünitesine iletilmesiyle çalışır. Koltuk kontrol ünitesi bu verileri sürekli olarak izleyerek aracın hızlanma veya frenleme durumunda olup olmadığını belirler ve bu durumların belirli koşulları sağladığını tespit ettiğinde koltuk içerisindeki havalı sistemi otomatik olarak etkinleştirir [4]. Kontrol ünitesi tarafından verilen komut doğrultusunda pompa devreye alınır ve valfler açılarak hava keselerine hava gönderilir. Bu süreçte sol ve sağ yan desteklerde bulunan hava keseleri aynı anda şişirilir. Böylece hızlanma sırasında sürücünün gövdesi koltuk tarafından daha iyi kavranarak koltuk içinde stabil kalması sağlanır. Şekil 5'te de gösterildiği gibi, ani frenleme durumunda ise şişirilen yan destekler sürücünün koltukla temasını artırarak öne doğru kayma eğilimini azaltır ve sürücünün koltuk içinde daha sabit bir pozisyonda kalmasına yardımcı olur. Bu tür ivme tabanlı aktif koltuk sistemleri, sürüş güvenliği ve konforunun birlikte iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır [5].

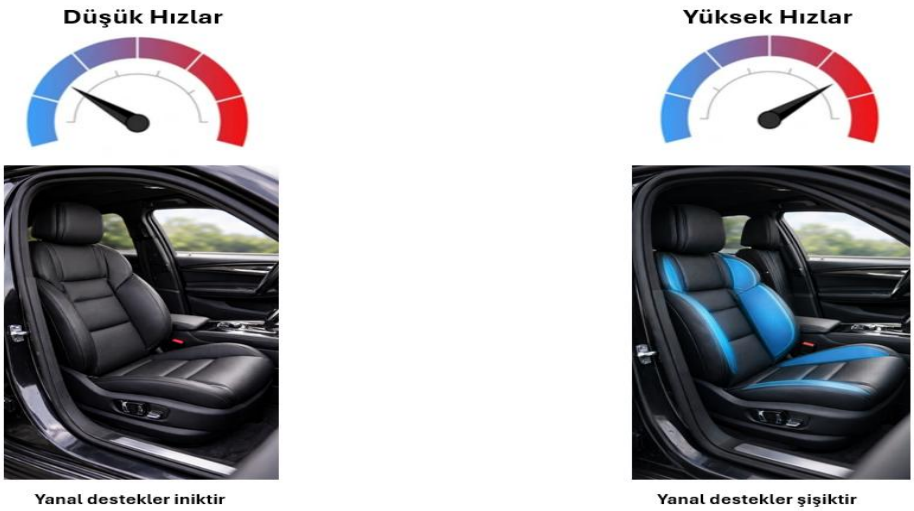
Ani hızlanma veya frenleme etkisi sona erdiğinde, koltuk kontrol ünitesi valfleri açarak hava keselerindeki basıncı kademeli şekilde düşürür ve yanal destekler normal konumlarına geri döner.

Şekil 5: Longitudinal Speed Assist özelliği temsili gösterimi

5.4 Highway Mode Özelliği

Highway mode özelliği, aracın belirli bir hız değerini aştığında (örn. otoyol hızları), koltuk yan desteklerinin (hava keselerinin) otomatik olarak şişirilerek otoyol kullanımında sürücü konforunu ve sabitliğini artırmak için kullanılan dinamik bir özelliktir.

Highway Mode özelliği, araç hız sensöründen elde edilen hız bilgisinin koltuk elektronik kontrol ünitesine iletilmesiyle etkinleşen bir özelliktir. Koltuk elektronik kontrol ünitesi, belirlenen hız eşiğinin aşılması durumunda ilgili valfleri açarak yan desteklerine ait hava keselerini tamamen şişirir ve yüksek hızlarda sürücü stabilitesini artırır. Araç hızı bu eşik değerin altına düştüğünde ise kontrol ünitesi valfleri yeniden açarak hava keselerindeki basıncı kademeli biçimde azaltır; böylece yanal destekler standart konumlarına geri dönerek normal koltuk ergonomisi yeniden sağlanır. Özellik davranışın temsili gösterimi Şekil 6'da görselleştirilmiştir.



Şekil 6: Highway Mode özelliği temsili gösterimi

5.5 Active Posture Correction Özelliği

Active Posture Correction özelliği, uzun süreli sürüşlerde sürücünün duruş kaynaklı yorgunluğunu azaltmak, bel ve sırt ağrılarını önlemek ve kan dolaşımını artırmak amacıyla koltuktaki bel ve sırt desteği fonksiyonunda kullanılan hava keselerinin anlık hava basınç seviyelerini dinamik olarak ayarlayan bir özelliktir.

Active Posture Correction özelliğinin etkinleştirilmesi için koltukta bulunan varlık sensöründen elde edilen sürücü varlığı bilgisi, emniyet kemeri tokası içerisindeki sensörden alınan kemer takılı durumu bilgisi ve aracın çalışma modu bilgisinin koltuk elektronik kontrol ünitesine iletilmesi gerekmektedir. Koltuk elektronik kontrol ünitesi, bu verileri aldıktan sonra ilk olarak bel ve sırt desteğinde kullanılan hava keselerinin mevcut basınç seviyesini, koltuk havalı sistemi içerisinde yer alan basınç sensörü aracılığıyla ölçerek referans değer olarak hafızasına kaydeder. Ardından kontrol ünitesi, belirli aralıklarla hava keselerini milimetre veya mikro bar seviyesinde hassas şekilde şişirip belirli bir süre sonra indirerek sürücünün omurga ve ilgili kas gruplarında mikro düzeyde postürel hareket oluşturur [6]. Bu mikro ayarlamalar genellikle sürücü tarafından fark edilmez, çünkü sistem, koltuk masaj fonksiyonlarında olduğu gibi yüksek hacimli hava hareketleri yerine, koltuk ergonomisini destekleyen hafif, ritmik ve sürekli basınç değişimleri uygular. Bu yaklaşım, yalnızca bir masaj fonksiyonu değil, aynı zamanda sürücü konforunu ve kas rahatlığını iyileştiren dinamik bir oturma stratejisidir. [6]

Active Posture Correction özelliği, sürücünün tercihine bağlı olarak infotainment ekranı üzerinden etkinleştirilebilir veya devre dışı bırakılabilir.

Şekil 7: Active Posture Correction özelliği temsili gösterimi

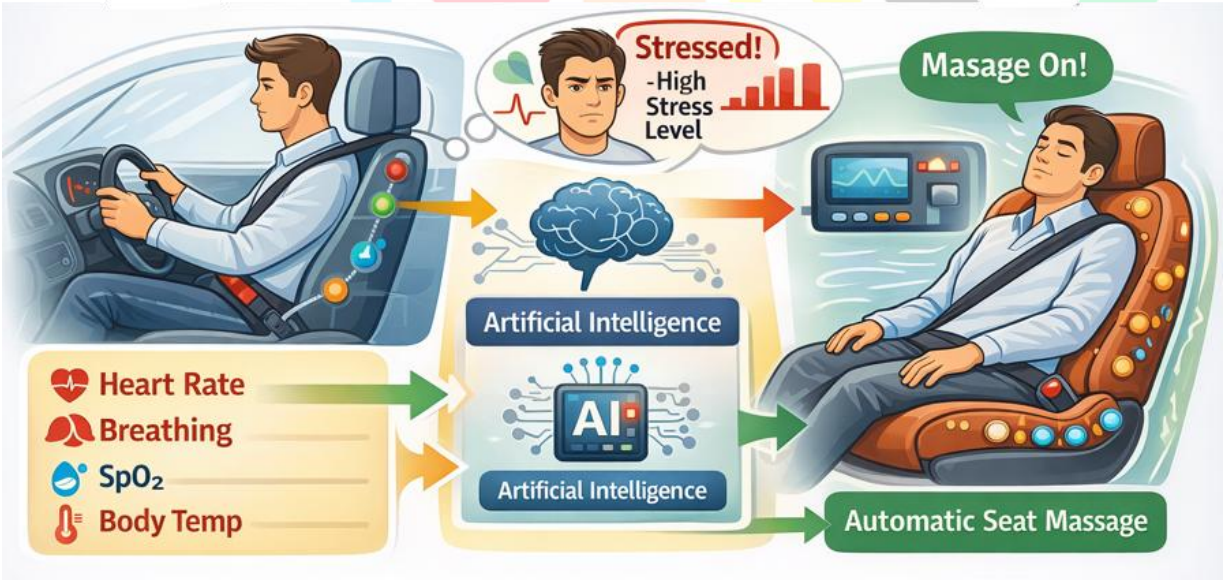
Geleceğin Koltuk Havalı Sistemleri Dinamik Özellikleri

6.1 Biyometrik Veri Tabanlı Dinamik Koltuk Masajı Aktivasyonu

Bu özellik, araç içine entegre edilen kalp atış hızı sensörü, oksijen doygunluğu sensörü, vücut sıcaklığı sensörü ve nefes sensörü gibi çeşitli sensörlerden elde edilen biyometrik verilerin yapay zekâ tabanlı analiz algoritmaları tarafından gerçek zamanlı olarak işlenmesine dayanır. Bu yaklaşımda sensör verileri, sürücünün fizyolojik tepkilerini yorumlamak için kullanılır; çünkü önceden yapılan çalışmalarda fizyolojik sinyallerin sürücü stres düzeyini belirlemede bir gösterge olarak kullanılabileceği bulunmuştur [7]. Sistem, sensörlerden alınan veriler üzerinden sürücünün fizyolojik durumunu çıkarır. Bu veriler, makine öğrenimi modelleri tarafından yorumlanarak sürücünün gerginlik veya stres durumu ve düzeyi tespit edilir, zira literatürde farklı sürüş koşullarında biyometrik ölçümlerin sürücü durumuna dair bilgi verdiği bildirilmiştir [7], [8]. Duygu ve stres değerlendirmesi, eğitimli derin öğrenme ağları tarafından yapılır.

Duygu ve stres durumu tespit edildiğinde, kontrol algoritması koltuk elektronik kontrol ünitesine bir komut gönderir. Bu komut doğrultusunda koltuk kontrol ünitesi masaj fonksiyonunu otomatik olarak etkinleştirir ve sürücünün rahatlamasını hedefleyen uygun bir masaj modu başlatılır.

Sistem, masaj fonksiyonunun sürüş güvenliğini olumsuz etkilememesi için aktivasyonu sadece güvenli sürüş koşullarında gerçekleştirir; örneğin ani direksiyon müdahalesi veya sert frenleme müdahalesi algılandığında masaj otomatik olarak durdurulabilir. Süreç boyunca sensör veri ve yapay zekâ analizleri devam eder, sürücünün stres seviyesinde düşüş algılandığında masaj fonksiyonu kendiliğinden sonlandırılır [8]. Bu bütünleşik yapı sayesinde sistem, sürücünün gerçek zamanlı duygusal ve bilişsel durumuna tepki vererek hem konforu artırmayı hem de sürüş güvenliğini desteklemeyi amaçlar.



Şekil 8: Biyometrik Veri Tabanlı Dinamik Koltuk Masajı Aktivasyonu temsili gösterimi

Sonuç

Gelişen teknolojiler ve yeniliklerle birlikte otomotiv üreticileri, insan yaşamını daha konforlu ve kolay hale getirmek amacıyla müşteri odaklı konfor özellikleriyle donatılmıştır. Bu amaçla konfor özellikleriyle donatılan parçalardan biri de araç koltuklarıdır.

Araç koltukları son dönemlerde elektrikli ve ısıtmalı koltuk fonksiyonlara ek olarak masaj, bel desteği ve yanal destek fonksiyonlarını içeren koltuk havalı sistemi ile donatılmıştır. Koltuklarda uygulanmaya başlayan bu yeni sistem beraberinde ilgili fonksiyonların otomatikleştirilerek konfor odaklı yeni özelliklerin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Bu bildiride, koltuk havalı sisteminin tanımı, mevcut sistem fonksiyonlarının çalışma prensibi, bu fonksiyonların değişen araç parametrelerine bağlı olarak geliştirilen dinamik özellikleri, ilgili dinamik özelliklerin çalışma prensibi ve sürücü konforuna etkileri ve gelecekte uygulanabilecek yeni dinamik özellikler anlatılmıştır. Bu kapsamda incelenen Longitudinal Speed Assist, Highway Mode ve Active Posture Correction gibi dinamik koltuk fonksiyonları, koltuk sistemlerinin yalnızca statik konfor sağlayan yapılar olmaktan çıkarak aracın çeşitli sürüş parametreleri ve sürücünün kullanım koşullarına uyum sağlayabilen akıllı sistemlere dönüştüğünü göstermektedir. Bu sistemler sayesinde hızlanma ve frenleme gibi boylamsal araç hareketlerinde ve viraj alma sırasında hava keseleri dinamik olarak şişirilerek sürücünün koltuk içinde savrulması engellenmekte, yüksek hız koşullarında koltuk ile sürücü arasındaki temas iyileştirilmekte ve uzun süreli sürüşlerde ergonomik duruş desteklenmektedir. Ayrıca, koltuk havalı sistemlerinin sensör verileri ile kullanılması, koltuk destek elemanlarının gerçek zamanlı ve kademeli olarak kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum, sürüş sırasında oluşan fiziksel etkilerin sürücü üzerindeki olumsuz etkilerini azaltarak hem konfor hem de sürüş güvenliği açısından önemli katkılar sunmaktadır.

Seri üretim uygulamaları incelendiğinde, bu sistemlerin sade kontrol algoritmaları ile hayata geçirildiği ancak buna rağmen kullanıcı deneyimini belirgin şekilde iyileştirdiği görülmektedir. Bu yaklaşım, maliyet, sistem karmaşıklığı ve güvenilirlik gereksinimleri ile performans arasında dengeli bir çözüm sunmaktadır.

Sonuç olarak, koltuk havalı sistemleri ve fonksiyonları üzerine geliştirilen dinamik özellikler, otomotiv sektöründe kullanıcı odaklı konfor teknolojilerinin önemli bir bileşeni haline gelmiştir. Gelecekte, daha gelişmiş sensör teknolojileri, yapay zekâ tabanlı kontrol algoritmaları ve kişiselleştirilmiş sürücü profilleri ile bu sistem özelliklerinin daha da artarak ve gelişerek sürücü ile araç arasındaki etkileşimi üst seviyeye taşıması beklenmektedir.

REFERANSLAR

[1] James R. Van Sickle, "Pneumatic lumbar adjustment system", US5967608A, 1998.

[2] Choi, S., Lee, J., Kim, H., & Park, D. (2021). *Development of self-shape adjustment cushion (SSA)*. Journal of Mechanical Science and Technology, 35(5), 2101–2110.

[3] Okiyama, H., Michida, N., Nishikawa, K., & Nouzawa, T. (2001). *Objective evaluation of seat lateral support for cornering*. SAE Technical Papers.

[4] Andrew J. Massara, Steven T. Gamache, "Acceleration compensating vehicular seat assembly", US5707109A, 1996.

[5] Frechin, M. M., Ariño, S. B. & Fontaine, J. (2004). *ACTISEAT: Active vehicle seat for acceleration compensation*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 218*(9), 925-933. DOI:10.1243/0954407041856809.

[6] A. Behzad, I. Michael, D. Eniyandunmo, D. M. Andrews, S. Cole, K. L. Arthurs ve E. Kim, "Assessing Driver Comfort and In-Chair Movements in an Automotive Seat with Anti-Fatigue Massage Function," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 10, article 5566, 2025.

[7] Healey, J., & Picard, R. W. (2005). Detecting stress during real-world driving tasks using physiological sensors. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 6(2), 156–166.

[8] Dong, Y., Hu, Z., Uchimura, K., & Murayama, N. (2011). Driver inattention monitoring system for intelligent vehicles: A review. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 12(2), 596–614.

[9] Samuel Baudu, Nour Besbes, "Dynamic posture assisting system in a vehicle seat", US20240217417A1, 2023.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

FEM-Based Analysis of Output Torque Degradation in PCB Drilling Spindle Servo Motors Due to Permanent Magnet Demagnetization

Sami ARSLAN[1]
Mustafa ÖZSOY[2]

Abstract

With the rapid development of electronic systems, the demand for printed circuit boards (PCBs) has increased significantly. However, lead times, logistics costs, and time losses due to design revisions in conventional PCB manufacturing may adversely affect rapid product development. Therefore, compact desktop PCB drilling and milling machines are widely used in rapid prototyping. In these systems, PMSM-based servo spindle motors are generally preferred to ensure high machining precision and stable spindle speed. However, thermal and electromagnetic stresses under high-speed operation may cause partial or complete demagnetization of permanent magnets, thereby reducing motor performance. In this study, the demagnetization behavior of a three-phase, star-connected, 700 W, 5000 rpm surface-mounted permanent magnet inner-rotor servo spindle motor with an IEC 80 frame size, suitable for PCB drilling and milling applications, was investigated using the Finite Element Method (FEM). Demagnetization levels of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% were applied to the magnets, and the variations in air-gap magnetic loading, induced phase voltage, and electromagnetic output torque were compared. The results showed that increasing demagnetization levels caused a significant deterioration in servo spindle performance. The electromagnetic output torque decreased from 1.29 Nm under healthy operating conditions to 1.00 Nm, 0.67 Nm, 0.33 Nm, and 0.01 Nm at 25%, 50%, 75%, and 100% demagnetization levels, respectively. Similarly, the air-gap magnetic loading decreased from 0.76 T to 0.61 T, 0.40 T, 0.20 T, and 0.01 T, while the induced phase voltage decreased from 96 Vrms to 77 Vrms, 51 Vrms, 26 Vrms, and 1 Vrms, respectively. The results indicate that permanent magnet demagnetization critically affects the torque production capability of high-speed servo spindle motors and provides useful insights for the reliability assessment of servo systems used in PCB machining machines.

Keywords: PCB drilling, spindle servo motor, permanent magnet demagnetization, finite element method, torque degradation.

[1] Asst. Prof. Dr., Tekirdağ Namık Kemal University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Orcid: 0000-0002-1386-943X
[2] Asst. Prof. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Orcid: 0000-0002-3448-1493

1. Introduction

The increasing complexity of electronic systems, the widespread use of power electronics applications, and rapid developments in the Internet of Things, industrial automation, communication systems, automotive electronics, and defence industry applications have significantly increased the demand for printed circuit boards (PCBs). Today, almost every electronic product under development requires one or more PCB prototypes during the design verification process. Particularly in research and development activities, university laboratories, electronic design centers, and low-volume custom production applications, PCB prototyping has become one of the critical stages of the product development cycle.

However, conventional PCB manufacturing processes are mostly carried out by external manufacturers. After the PCB design is completed, delivery times may extend from several days to several weeks due to the placement of the production order, waiting for the production queue, quality control procedures, and logistics processes. In addition, any design error or revision requirement that emerges during the design stage necessitates a new production cycle. This situation leads to time loss, increased costs, and a slowdown in design verification processes, especially in applications requiring rapid product development. Consequently, rapid prototyping capability has become an important engineering requirement in electronic system development studies. In line with this requirement, interest in desktop, compact, and portable PCB processing systems has increased significantly in recent years. These systems enable PCB drilling, milling, engraving, and isolation milling operations to be performed directly in laboratory or production environments, thereby reducing dependence on external manufacturers and significantly accelerating the design verification process. Figure 1 shows a commercial PCB drilling and milling system manufactured by KAVONE. As can be seen, desktop PCB processing machines with compact dimensions are widely used by small-scale PCB manufacturers, electronic design laboratories, and R&D centers due to their lightweight structures, low investment costs, high-precision CNC architectures, and ease of use (*Kavone Knd5035 Pcb Drilling Machine*, n.d.). These systems enable precise drilling and milling operations on commonly used PCB materials such as FR1, CEM1, and FR4.

Figure 1. *KAVONE PCB Drilling and Milling Machine*

One of the most important subsystems determining machining quality in PCB drilling and milling machines is the servo spindle unit. In applications where hole diameters can decrease to the level of several hundred micrometers, even small variations in spindle speed

can directly affect hole geometry, surface quality, tool life, and manufacturing accuracy. Therefore, servo spindle systems are expected to provide high speed, low vibration, fast dynamic response, and precise speed regulation.

Different motor technologies, such as belt-pulley-driven structures, brushed DC motors, induction motors, BLDC motors, and permanent magnet synchronous motors (PMSMs), can be used in PCB processing systems. However, with the increasing requirements for high precision and high production quality in recent years, servo-controlled spindle systems have become more prominent. In servo spindle structures, achieving high speed alone is not sufficient. During drilling, continuous variations in load torque occur when the tool enters and exits the PCB surface, when different material layers are processed, and as a result of tool wear. Therefore, the spindle speed must be maintained steadily despite varying load conditions. In addition, coordinated control of CNC axis movements and spindle speed is critical for hole accuracy and machining quality. Due to these requirements, closed-loop controlled servo spindle systems are widely used in modern PCB processing machines. In order to meet these requirements, PMSM-based drive systems are widely preferred in servo spindle applications. PMSMs have become one of the main drive components in servo applications due to their high efficiency, high power density, wide speed operating range, low rotor losses, and superior dynamic performance characteristics. In particular, the use of PMSMs in direct-drive architectures has become increasingly widespread in recent years. In direct-drive systems, since there are no mechanical transmission elements such as belts, pulleys, or gears between the motor and the load, mechanical losses are reduced, maintenance requirements decrease, and system rigidity increases. In addition, the elimination of mechanical backlash provides significant advantages in servo applications requiring precise speed and position control. A considerable portion of servo spindle motors operate at high rotational speeds, often reaching tens of thousands of revolutions per minute to improve PCB machining quality. This requirement drives motor designers toward compact, high-power solutions. Therefore, servo spindle motors are generally designed for high power density, increasing the power produced per unit volume.

In such applications, PMSM topologies with an inrunner structure and surface mounted permanent magnets (SPM) are widely used. The inrunner structure provides low rotor inertia, enabling reliable operation at high speeds. In addition, the surface-mounted magnet structure is preferred in high-speed servo applications due to its ease of manufacturing, low rotor losses, high efficiency, and successful dynamic performance characteristics. Owing to these advantages, inrunner-SPM motors are widely used today in CNC spindle systems, PCB processing machines, precision machine tools, and various high-speed servo applications. However, high-speed operating conditions create significant electromagnetic and thermal stresses within the motor. In particular, high-frequency iron losses, copper losses, and mechanical losses may cause considerable increases in rotor temperature.

Although NdFeB- and SmCo-based magnets, which are widely used in permanent magnet motors, provide high energy density, they exhibit a certain level of sensitivity to temperature effects. Long-term thermal stresses, overload conditions, short-circuit conditions, or reverse magnetic field effects may lead to irreversible reductions in the magnetic properties of the magnets (Wang et al., 2024; Woo & Jeong, 2016). This phenomenon is defined as permanent magnet demagnetization. As a result of demagnetization, the air-gap magnetic flux

decreases, the back-EMF is reduced, and the electromagnetic torque production capability of the motor is adversely affected (Eker & Özsoy, 2022). In precision machining applications, torque losses may lead to reduced machining accuracy, degraded tool performance, and decreased system efficiency.

Although numerous studies have investigated demagnetization effects in permanent magnet motors, most of these studies have focused on electric vehicle traction motors, industrial servo systems, generator applications, or general-purpose PMSM structures (Akar & Eker, 2013; Avşar et al., 2024; Kim et al., 2006, 2009). In particular, studies examining the demagnetization behavior of compact servo spindle motors used in high-speed PCB drilling and milling machines are quite limited. In addition, in many existing studies, demagnetization effects are evaluated only through back electromotive force or torque characteristics, while the application-oriented relationship among air-gap magnetic flux density, induced voltage, and electromagnetic output torque has not been sufficiently investigated together.

Therefore, in this study, an inrunner-SPM servo motor with an IEC 80 frame size, three-phase star-connected winding structure, 700 W rated power, and 5000 rpm rated speed, which can be used in PCB drilling and milling applications, is considered as the reference model. The motor is supplied by a servo drive with a 220 VAC input and is operated under continuous duty conditions (S1 duty cycle). The main objective of this study is to investigate in detail the effects of permanent magnet demagnetization on the electromagnetic performance of high-speed servo spindle motors. In this context, the motor model was analyzed using the Finite Element Method (FEM), and the demagnetization effect was represented through a uniform global demagnetization model, in which the magnetic properties of all permanent magnets were proportionally reduced to simulate demagnetization levels of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100%. For each operating condition, the air-gap magnetic flux density, induced phase voltage, and electromagnetic output torque characteristics were obtained and comparatively evaluated. This study contributes to literature in three main aspects. First, an industrial usage scenario is addressed by considering a real servo spindle motor that can be used in PCB drilling and milling applications as the reference model. Second, a gradual demagnetization model was developed at 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% levels to represent partial and complete demagnetization conditions that may occur in the magnets, and the corresponding performance variation was systematically investigated. Third, the effects of demagnetization on servo spindle performance were presented from a comprehensive perspective by evaluating the air-gap magnetic flux density, induced phase voltage, and electromagnetic output torque results together. In this respect, the study contributes to the reliability analysis of servo spindle motors used in high-speed PCB processing machines and aims to provide a basis for future thermal, electromagnetic, and predictive maintenance studies.

2. Reference Motor Configuration and Analysis Methodology

In this study, a three-phase, star-connected SPM-Inrunner servo spindle motor with an IEC 80 frame size, suitable for use in compact PCB drilling and milling machines, was considered as the reference model. Motors with an IEC 80 frame size provide a suitable structure for servo spindle applications due to their compact dimensions, sufficient torque production capability, and ability to operate in high-speed regions. In addition, the SPM-

Inrunner topology represents motor structures that can be used in compact CNC and PCB processing systems owing to its high-power density, low rotor inertia, and successful dynamic performance characteristics. The main electrical, geometrical, and electromagnetic parameters of the reference motor are given in Table 1.

The nominal operating values of the reference motor are 700 W output power, 5000 rpm speed, and 1.3 Nm torque. The system is supplied by a servo drive with a 220 VAC input voltage and has an approximately 310 VDC DC-bus voltage. The motor operates under the S1 duty cycle, which represents continuous operation. The nominal phase current is 2.5 A, and each phase has 30 series turns. The reference motor has a SPM-Inrunner topology. The inrunner structure provides advantages in terms of mechanical reliability and low rotor inertia at high speeds, while the surface-mounted magnet structure offers low rotor losses, high efficiency, and successful dynamic performance characteristics.

In the reference motor, 3 mm thick N38SH-grade NdFeB permanent magnets are placed on the rotor. When the geometrical structure of the motor is examined, the stator outer diameter is 75 mm and the stator inner diameter is 46 mm. The rotor outer diameter is 38.4 mm, while the rotor inner diameter is 25 mm.

The electromagnetic structure consists of 18 slots and 8 poles. The air-gap length is 0.8 mm, and the active stack length is 30 mm. The total stack length is 33 mm, while the external dimensions of the motor, excluding the brake mechanism, are approximately 80 mm × 80 mm × 112 mm. When the electromagnetic loading parameters of the motor are examined, the specific electric loading is 19 kA/m and the current density is 7 A/mm². The corresponding AJ product is 133 kA·A/mm².

In servo spindle motors, both electrical and magnetic loading values must be carefully determined in order to achieve high power density. In the reference motor, the maximum magnetic flux density at the stator tooth-tip region is 1.7 T, the average stator tooth flux density is 1.5 T, the maximum magnetic flux density in the stator yoke region is 1.4 T, and the maximum magnetic flux density in the rotor yoke region is 1.3 T. These values indicate that the motor operates under high electromagnetic loading in its active regions while avoiding excessive magnetic saturation. The parameters given in Table I summarize the electrical, geometrical, and electromagnetic characteristics of the reference servo spindle motor used in this study.

***Table 1**. Reference Servo Motor Design and Operating Parameters*

Parameter	Value	Unit
Electrical Specifications		
DC Bus Voltage (Rated)	310	VDC
Number of Phases / Connection	3 / Y	-
Rated Power	700	W
Rated Speed	5000	rpm
Rated Torque	1.3	Nm
Number of Series Turns per Phase	30	-
Phase Current	2.5	A
Duty Cycle	S1	-
Geometrical Specifications		
Servo Motor Frame Size	IEC 80	-
Stator Slot / Pole Number	18 / 8	-
Stator Outer Diameter	75	mm
Stator Inner Diameter	46	mm
Airgap Length	0.8	mm
Permanent Magnet Thickness	3	mm
Permanent Magnet Material / Grade	NdFeB (N38SH)	-
Rotor Outer Diameter	38.4	mm
Rotor Inner Diameter	25	mm
Active Stack Length	30	mm
Motor Stack Length	33	mm
Motor Dimensions (without brake)	80 x 80 x 112	mm
Electromagnetic Design Parameters		
Specific Electric Loading (A)	19	kA/m
Current Density (J)	7	A/mm^2
AJ Product	133	$kA \cdot A/mm^2$
Stator Tooth-Tip Flux Density (Max)	1.7	T
Stator Tooth Flux Density (Avg)	1.5	T
Stator Yoke Magnetic Flux Density (Max)	1.4	T
Rotor Yoke Magnetic Flux Density (Max)	1.3	T

The electromagnetic analyses of the reference servo spindle motor were carried out using ANSYS Electronics Desktop Maxwell 2026 R1 Academic version.

The model used in this study was developed based on the FEM to represent the electrical, geometrical, and material properties of the reference motor. In order to model the electromagnetic behavior of the servo spindle motor as closely as possible to real operating conditions, all active and passive materials used in the motor structure were defined in the analysis environment with their actual characteristics. M250-50A electrical steel was used in

the stator and rotor core laminations of the motor, and the nonlinear B-H curves of the material were defined in the Maxwell material library. 1010 Carbon Steel was used in the rotor shaft and mechanical support regions. The windings were modeled as copper, and all phase resistances and current excitations were considered in the analyses. N38SH-grade NdFeB magnet material was used for the surface-mounted permanent magnets on the rotor. In order to represent the operating characteristics of the permanent magnets under real application conditions, N38SH magnet data provided by Arnold Magnetic Technologies were used as the basis. Considering the possible increase in rotor temperature under continuous operating conditions of servo spindle motors, the magnet operating temperature was assumed to be 80°C. Accordingly, the B-H characteristics corresponding to 80°C operating conditions were generated and applied to the FEM model using the recoil characteristics, remanent flux density (Br), and magnetic polarization (Mp) values of the N38SH magnet material.

In the analyses, not only ideal magnetic behavior was considered, but electromagnetic losses occurring under real operating conditions were also intended to be included in the model. Therefore, hysteresis and eddy current losses occurring in the stator and rotor cores were included in the FEM solution. In addition, possible demagnetization effects in the permanent magnets were actively evaluated in the analysis environment. Thus, the electromagnetic performance of the reference motor was modelled as closely as possible to real operating conditions.

The condition in which the N38SH magnet used as the starting point of the study has its nominal operating characteristics was accepted as the healthy motor condition and defined as the 0% demagnetization level. This condition constitutes the reference analysis scenario. Subsequently, a uniform global demagnetization model was adopted, in which the remanent flux density (Br) and magnetization (Mp) values of all permanent magnets were proportionally reduced to represent demagnetization levels of 25%, 50%, 75%, and 100%. This approach was preferred to provide a controlled and systematic evaluation of the relationship between magnet weakening and motor performance, while eliminating the influence of location-dependent demagnetization effects. In this way, magnet weakening scenarios that may occur as a result of thermal stresses, aging effects, or severe operating conditions to which permanent magnets may be exposed over time were modeled.

To accurately compare the effects of demagnetization levels on motor performance, the geometrical structure of the motor was kept constant in all analyses. No dimensional changes were made to the stator, rotor, or permanent magnet geometries. In addition, the winding topology, phase connection structure, number of turns per phase, and conductor arrangement of the reference motor were preserved and transferred directly to the FEM model. Similarly, the air-gap length, material properties, and operating points were kept the same in all analyses.

Thus, the only parameter changed between the analysis scenarios was the demagnetization level of the permanent magnets. Furthermore, the finite element mesh structure, which is one of the important parameters affecting solution accuracy, was not changed in any of the analysis scenarios. Therefore, it was ensured that the obtained performance differences resulted only from changes in the demagnetization level.

The electromagnetic analyses were carried out using a current-fed approach. In this context, the stator phase currents were defined in the dq-axis reference frame based on the field-oriented control (FOC) strategy. To achieve maximum torque production, the d-axis current was set to zero, while the q-axis current was applied as the torque-producing component. Accordingly, the phase currents were supplied synchronously with the rotor position in the q-axis reference frame, maintaining a 90° electrical phase difference with respect to the d-axis. With this approach, the electromagnetic torque production capability of the motor was evaluated under operating conditions corresponding to FOC operation without directly including inverter switching dynamics in the model (Al-Kaf et al., 2025).

All electromagnetic analyses were performed using a two-dimensional (2D) transient FEM model. The servo spindle motor investigated in this study does not have an axially varying geometry, rotor skew, axial flux components, or a special three-dimensional magnetic structure along the motor length. Therefore, the fundamental electromagnetic behaviour of the motor can be largely represented by a radial cross section. In addition, the main objective of this study is to comparatively investigate the relative effects of different demagnetization levels on motor performance rather than to determine absolute performance values. Since the motor geometry, winding structure, current excitations, material properties, and solution parameters were kept constant in all analysis scenarios, the 2D FEM approach provides sufficient accuracy for evaluating the performance variations among different demagnetization levels (Lipo, 2017). Moreover, compared with 3D analyses, 2D analyses require significantly lower computational time and allow multiple demagnetization scenarios to be examined comparatively (Meeker, 2010). Therefore, all electromagnetic performance evaluations in this study were carried out using the 2D transient FEM model. In this context, current excitations representing the nominal operating conditions were directly applied to the motor phases, and the same current levels were maintained in all analyses. Thus, the effects of drive-related variables were eliminated, and only the influence of changes in magnet characteristics on electromagnetic performance was investigated.

For each demagnetization level, electromagnetic output torque, dynamic torque ripple, induced phase voltage, and air-gap magnetic flux density values were obtained. No redesign, optimization, or performance improvement procedure was performed on the motor in this study. The main objective of the research is to reveal the effects of different demagnetization levels on servo spindle performance under the same motor structure and operating conditions, and to quantitatively evaluate the changes caused by permanent magnet weakening in the electromagnetic characteristics.

3. Results

This section presents the results obtained from the demagnetization analyses performed for the reference servo spindle motor. In the study, the magnetic properties of the permanent magnets were modified to represent demagnetization levels of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100%, respectively, and the electromagnetic performance parameters were comparatively investigated for each operating condition. In the analyses, the motor geometry, winding configuration, current excitations, material properties, solution settings, and mesh structures were kept constant, while only the magnetic characteristics of the permanent magnets were changed.

Thus, it was ensured that the obtained performance variations directly resulted from the demagnetization level.

Permanent magnets constitute the main source of the air-gap magnetic field in surface-mounted PMSM structures. Therefore, any weakening in the magnet characteristics directly affects the air-gap flux density, induced phase voltage, and electromagnetic torque production. Since torque production capability and speed stability are critical in servo spindle applications, the effects of demagnetization on system performance should be investigated in detail. In this context, the variations in electromagnetic output torque were first evaluated, and then the air-gap magnetic loading and induced phase voltage results were compared.

Figure 2 shows the electromagnetic output torque waveforms obtained under different demagnetization levels. The results indicate that permanent magnet demagnetization has a direct and highly significant effect on the torque production capability of the motor. At the 0% demagnetization level, which represents the healthy operating condition, the motor produces an average electromagnetic torque of 1.29 Nm. This value represents the performance of the reference motor under nominal operating conditions. When the demagnetization level is increased to 25%, the average output torque decreases to 1.00 Nm. This corresponds to a torque reduction of approximately 22.5%. When the demagnetization level reaches 50%, the average torque is obtained as 0.67 Nm, corresponding to an approximately 48% reduction compared with the reference operating condition. Similarly, at the 75% demagnetization level, the electromagnetic torque that the motor can produce decreases to only 0.33 Nm. This result indicates a performance loss of approximately 74% compared with the initial value. In the most critical case, corresponding to the 100% demagnetization level, the average electromagnetic output torque of the motor is obtained as approximately 0.01 Nm. At this level, since the permanent magnets cannot generate a meaningful magnetic field in the air gap, the torque production capability of the motor almost completely disappears. The results clearly show that electromagnetic torque in PMSM structures is mainly produced by the interaction between the permanent magnet flux and the stator currents. As the magnet flux decreases, electromagnetic torque production decreases accordingly.

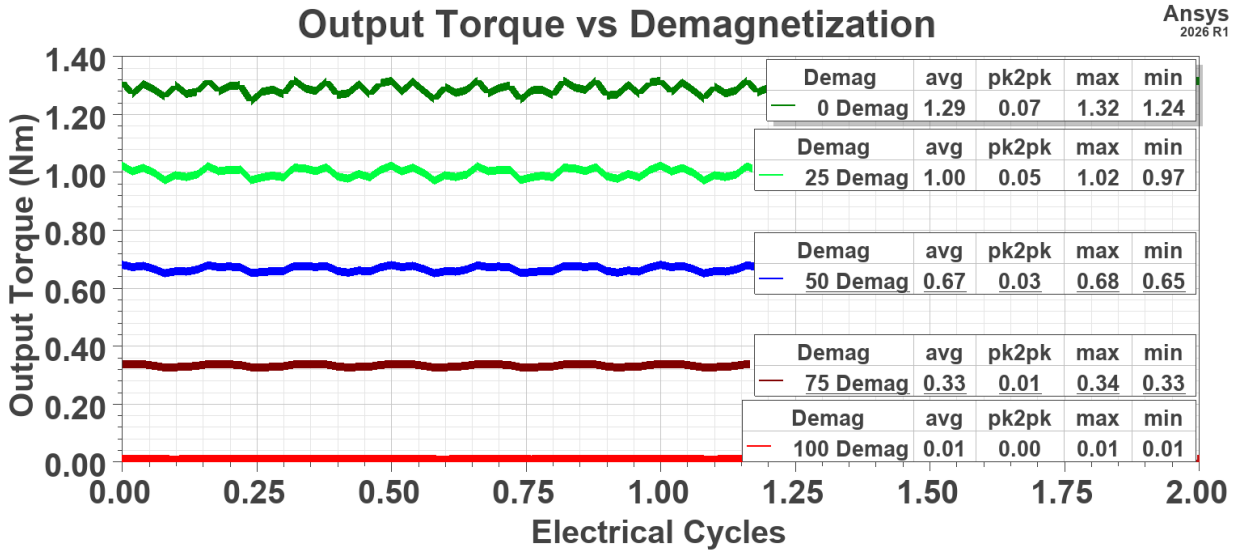


Figure 2. *Output torque versus demagnetization level*

When the waveforms in Figure 2 are examined, it is observed that not only the average torque level but also the torque ripple decreases depending on the demagnetization level. Although this may initially appear to be a positive outcome, the main reason for the reduction in torque ripple is not smoother motor operation, but rather the significant decrease in the total electromagnetic torque that the motor can produce. In other words, as the system loses its torque production capability, the ripple amplitude naturally decreases as well. Therefore, the reduction in torque ripple values should not be interpreted as a performance improvement. When the obtained results are evaluated together, it is seen that even partial demagnetization in the permanent magnets has serious effects on the torque production capability of servo spindle motors. At demagnetization levels of 50% and above, it becomes considerably difficult for the motor to meet its nominal operating requirements. This situation clearly demonstrates the importance of continuously monitoring permanent magnet temperature and magnet health in high-speed PCB processing applications.

Figure 3 shows the air-gap magnetic flux density distributions obtained under different demagnetization levels. In permanent magnet synchronous motors, the air-gap magnetic loading (specific magnetic loading, B_{av}) is one of the fundamental indicators of electromagnetic energy conversion and is directly related to the torque production capability of the motor. Therefore, the effects of demagnetization occurring in permanent magnets are expected to be first observed in the air-gap magnetic field. The ABSAVG (absolute average) method was used for the quantitative evaluation of the air-gap magnetic loading. In PMSM structures, the air-gap flux density periodically takes positive and negative values depending on the circumferential position. Therefore, when a conventional arithmetic average is used, the contributions of the positive and negative pole regions cancel each other out, and the average flux density value becomes close to zero. However, this result does not represent the electromagnetic loading level of the motor.

In an ideal and fully symmetrical PMSM structure, an average air-gap flux value close to zero is already an expected condition. Therefore, in electromagnetic machine design, the absolute average value, which represents the magnitude of the effective magnetic loading in the air gap, is used when determining the B_{av} parameter. The ABSAVG approach more accurately represents the total magnetic field level that contributes to electromagnetic energy conversion through the interaction between the rotor magnets and the stator windings, and provides a reliable performance indicator for comparing different operating conditions (Pyrhönen et al., 2010). Therefore, all B_{av} values presented in this study were obtained based on the absolute average of the air-gap flux density.

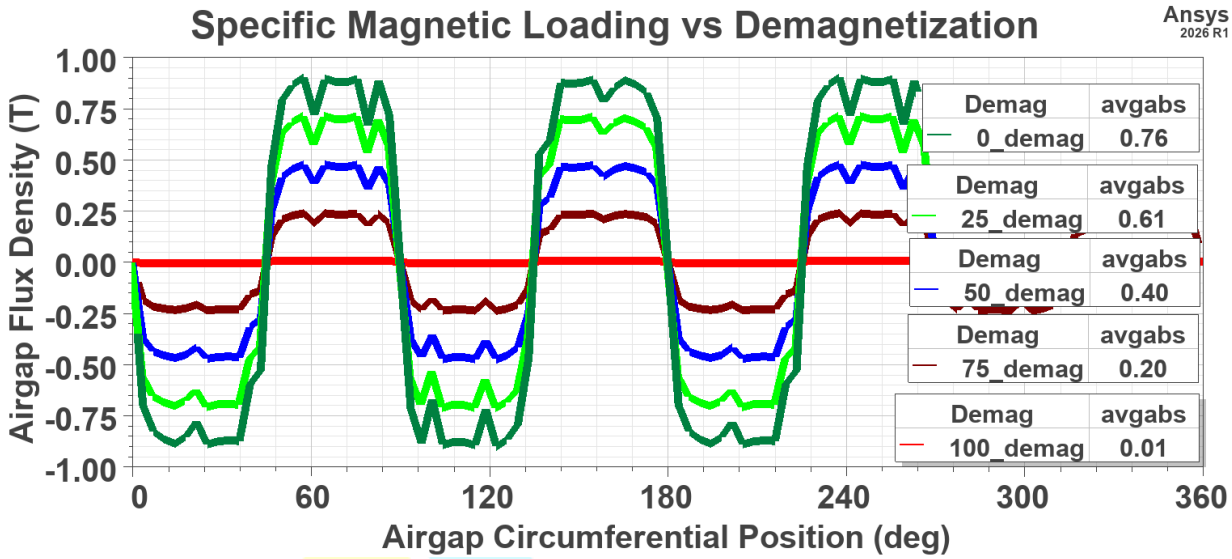


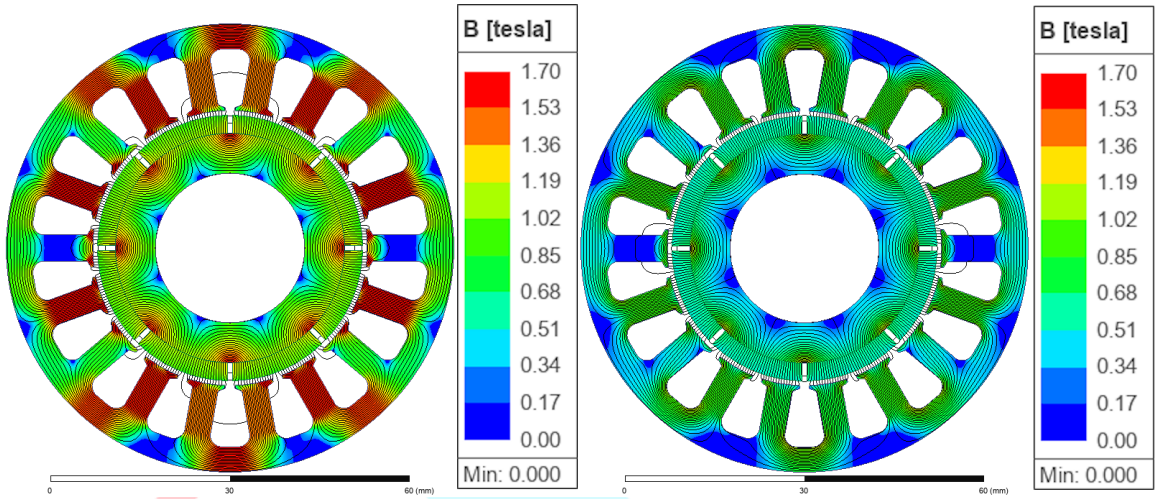
Figure 3. *Air-gap flux density comparison under different demagnetization levels*

At the 0% demagnetization level, which represents the reference operating condition, the average air-gap magnetic loading was obtained as approximately 0.76 T. When the flux density distribution measured along the air gap is examined, it is observed that a distribution close to the characteristic trapezoidal waveform expected from PMSMs with surface-mounted magnet structures is formed. This indicates that the rotor magnets generate a strong and stable magnetic field in the air gap. When the demagnetization level is increased to 25%, the average air-gap magnetic loading decreases to 0.61 T. This result corresponds to a magnetic loading loss of approximately 20%. Similarly, under the 50% demagnetization condition, the B_{av} value decreases to 0.40 T, corresponding to an approximately 47% reduction compared with the reference condition. When the demagnetization level reaches 75%, the air-gap magnetic loading remains only at 0.20 T. This indicates that the main magnetic field generated by the rotor magnets is significantly weakened. In the most critical scenario, corresponding to the 100% demagnetization level, the average air-gap magnetic loading was obtained as approximately 0.01 T. At this level, the contribution of the permanent magnets to the air gap almost completely disappears, and the rotor structure largely loses its permanent magnet characteristics from an electromagnetic perspective.

As a result, no meaningful magnetic field is formed in the air gap, and the energy conversion mechanism of the motor is severely weakened. When the curves in Figure 3 are examined, it is observed that not only the magnitude of the magnetic field decreases, but also the waveform gradually flattens. Especially at high demagnetization levels, the magnetic potential generated by the rotor magnets decreases, and the air-gap flux density distribution approaches the zero axis. Consequently, the total magnetic flux linking the stator windings also decreases. This directly leads to a reduction in the induced phase voltage and a decrease in electromagnetic torque production.

The obtained results clearly show a strong relationship between the increase in demagnetization level and the decrease in air-gap magnetic loading. The B_{av} value, which was obtained as 0.76 T in the reference condition, decreased to 0.61 T, 0.40 T, 0.20 T, and 0.01 T at 25%, 50%, 75%, and 100% demagnetization levels, respectively. When these results are

evaluated together with the torque results presented previously, it is clearly observed that the main reason for the reduction in electromagnetic output torque is the weakening of the air-gap magnetic field generated by the rotor magnets. Therefore, preserving permanent magnet integrity is critical not only for magnet performance but also for the sustainability of the overall electromagnetic energy conversion mechanism of the motor.



(a) *(b)*

Figure 4. *Flux density and flux-line distributions of the reference model: (a) 0% demagnetization and (b) 50% demagnetization*

Figure 4 presents the magnetic flux lines and magnetic flux density (B distribution) distributions obtained for the reference servo spindle motor under 0% and 50% demagnetization conditions. Under the 0% demagnetization condition, it is observed that the magnetic field generated by the permanent magnets on the rotor is effectively guided along the stator teeth and yoke regions. The concentration of flux lines, particularly at the stator tooth tips and around the rotor magnets, indicates the formation of a strong magnetic field in the air gap.

In addition, flux density values reaching approximately 1.7 T at the stator tooth tips were obtained, indicating that the motor operates under high electromagnetic loading. It is also observed that the magnetic flux is distributed in a balanced manner throughout the stator and rotor, and that the magnetic circuit is effectively utilized. Under the 50% demagnetization condition, a significant reduction occurs in the magnetic potential generated by the rotor magnets. As a result, the total magnetic flux passing through the air gap decreases noticeably, and the density of the flux lines is reduced. As can be seen from the figure, the flux density values formed in the stator teeth and yoke regions also decrease significantly compared with the reference operating condition. Due to the weakening of the magnetic coupling between the rotor magnets and the stator teeth, the effective magnetic field level in the air gap decreases, and the flux lines become less dense. This change in the magnetic flux distributions is consistent with the B_{av} and electromagnetic torque results presented in the previous sections. As the air-gap flux generated by the rotor magnets decreases due to demagnetization, the total magnetic flux linking the stator windings also decreases, resulting in a reduction in the induced phase voltage and the electromagnetic torque production capability. Under the 50% demagnetization

condition, the significant reduction in flux-line density clearly explains the decrease in electromagnetic output torque from 1.29 Nm to 0.67 Nm.

***Table 2**. Electromagnetic Performance Results under Different Demagnetization Levels*

Design Outputs	0 Demag.	25 Demag.	50 Demag.	75 Demag.	100 Demag.	Unit
Dynamic Torque Output	1.29	1	0.67	0.33	0.01	Nm
Dynamic Torque Ripple	%6.2	%5	%4.5	%3	%0.1	%
Specific Magnetic Loading	0.76	0.61	0.40	0.20	0.01	T
Induced Phase Voltages	96	77	51	26	1	(VAC-rms)
Airgap Mesh Count / TAU Elements	63000					-

Table 2 summarizes the main electromagnetic performance parameters obtained under different demagnetization levels. The results show that increasing the demagnetization level has adverse effects on all major performance indicators of the motor. In terms of electromagnetic output torque, the average torque value of 1.29 Nm obtained under the reference condition decreases to 1.00 Nm, 0.67 Nm, 0.33 Nm, and 0.01 Nm at 25%, 50%, 75%, and 100% demagnetization levels, respectively. This result clearly demonstrates the critical role of permanent magnets in electromagnetic torque production. Similarly, the air-gap magnetic loading decreases significantly depending on the demagnetization level. The B_{av} value, which was obtained as 0.76 T under the reference condition, decreases to 0.61 T at the 25% demagnetization level, 0.40 T at the 50% level, 0.20 T at the 75% level, and 0.01 T under the complete demagnetization condition.

This reduction in the air-gap magnetic field indicates that the magnetic potential generated by the rotor magnets gradually weakens. A similar trend is also observed in the induced phase voltages. The phase voltage, which was obtained as 96 V_{rms} under the reference operating condition, decreases to 77 V_{rms}, 51 V_{rms}, 26 V_{rms}, and 1 V_{rms}, respectively, as the demagnetization level increases. These results confirm that the reduction in air-gap flux directly affects the electromotive force induced in the stator windings. In terms of dynamic torque ripple, the torque ripple value decreases from 6.2% to 0.1%. However, this reduction does not indicate an improvement in motor performance. As the demagnetization level increases, the total electromagnetic torque production capability of the motor decreases significantly; accordingly, the absolute amplitude of the torque ripple also decreases. Therefore, low torque ripple values should be interpreted as a result of weakened electromagnetic energy conversion rather than as an indication of more stable operation.

The obtained results show a strong correlation between increasing demagnetization level and electromagnetic performance parameters. At demagnetization levels of 50% and above, the significant reductions in both air-gap magnetic loading and electromagnetic output torque make it difficult for servo spindle systems to maintain their nominal operating performance. Therefore, the thermal and electromagnetic protection of permanent magnets in

high-speed PCB processing applications is critically important for system reliability and long-term performance.

4. Conclusion

In this study, the effects of permanent magnet demagnetization on the electromagnetic performance of a high-speed servo spindle motor suitable for compact PCB drilling and milling machines were investigated in detail using the Finite Element Method (FEM). In the study, a three-phase, star-connected, surface-mounted permanent magnet inrunner servo spindle motor with an IEC 80 frame size was considered as the reference model, and performance variations were analyzed by creating demagnetization levels of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% in the magnets, respectively. In all analyses, the motor geometry, winding structure, current excitations, material properties, and solution parameters were kept constant, while only the magnetic characteristics of the magnets were changed. Thus, it was ensured that the obtained results directly represented the effects of demagnetization.

The analysis results showed that permanent magnet demagnetization has highly significant effects on the main electromagnetic performance parameters of servo spindle motors. The electromagnetic output torque, which was obtained as 1.29 Nm under the reference operating condition, decreased to 1.00 Nm, 0.67 Nm, 0.33 Nm, and 0.01 Nm, respectively, as the demagnetization level increased. In particular, the severe reductions in torque production capability at demagnetization levels of 50% and above make it considerably difficult for the motor to maintain its nominal operating performance.

The obtained results indicate that permanent magnet health is critical in servo spindle applications not only in terms of efficiency but also directly in terms of torque production. Similarly, when the air-gap magnetic loading was examined, the B_{av} value, which was obtained as 0.76 T under the reference condition, decreased to 0.61 T, 0.40 T, 0.20 T, and 0.01 T, respectively, with increasing demagnetization level. The reduction in the effective magnetic field in the air gap indicates that the contribution of the rotor magnets to electromagnetic energy conversion is directly weakened. Accordingly, the induced phase voltages in the stator windings also decreased significantly, and the phase voltage, which was obtained as 96 V_{rms} under the reference condition, decreased to approximately 1 V_{rms} under the complete demagnetization condition. These results show that demagnetization affects not only torque production but also the flux and voltage generation mechanisms that constitute the fundamental electromagnetic operating principle of the motor. In the study, magnetic flux lines and magnetic flux density distributions were also examined comparatively. The results showed that as the demagnetization level increased, the magnetic potential generated by the rotor magnets decreased significantly, the total magnetic flux passing through the air gap was reduced, and the electromagnetic coupling between the stator and rotor weakened. This situation clearly reveals the main physical reason for the reduction in electromagnetic output torque.

One of the important contributions of this study is that it systematically and comparatively demonstrates the effects of permanent magnet demagnetization on servo spindle motors. While demagnetization analyses in the literature mostly focus on electric vehicle traction motors, general-purpose PMSM structures, or industrial drive applications, studies on servo spindle motors used in compact PCB drilling and milling systems are quite limited. In

this study, the effects of different demagnetization levels on air-gap magnetic loading, induced phase voltage, electromagnetic output torque, and torque ripple were quantitatively demonstrated under the same operating conditions. The obtained findings show that thermal protection of permanent magnets and monitoring of magnet health are critical in high-speed servo spindle systems. Thermal stresses that may occur under long-term operating conditions can lead to performance losses over time. Therefore, in future studies, investigating demagnetization together with thermal models, comparing different magnet grades, developing online magnet health monitoring methods, and applying artificial intelligence-supported predictive maintenance algorithms to servo spindle systems can be considered important research directions.

In conclusion, this study has demonstrated in detail the effects of permanent magnet demagnetization on the electromagnetic performance of high-speed servo spindle motors and has provided important data that can contribute to the reliability assessment of servo systems used in PCB processing machines.

References

Akar, M., & Eker, M. (2013). Demagnetization Fault Diagnosis in Permanent Magnet Synchronous Motors. *Przegląd Elektrotechniczny*, *R. 89, nr 2a*, 229–233.

Al-Kaf, H. A. G., Mohammed, S. A. Q., & Lee, K.-B. (2025). Generalized MPC-DSVPWM Methods: Reduction Techniques and Explainable Machine Learning With Conformal Prediction for PMSM Drives. *IEEE Access*, *13*, 101827–101840. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3578600.

Avşar, Y., Soyaslan, M., & Fenercioglu, A. (2024). PMSM Design for Elevators: Determination of the Basic Topology Affecting Performance. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, *28*, 342–351. https://doi.org/10.55549/epstem.1523527.

Eker, M., & Özsoy, M. (2022). Investigation of the effect of demagnetization fault at Line Start AF-PMSM with FEM. *Academic Platform Journal of Engineering and Smart Systems*, *10*(2), 94–100. https://doi.org/10.21541/apjess.1007894.

Kavone Knd5035 Pcb Drilling Machine. (n.d.). Indiamart.Com. Retrieved June 2, 2026, from https://www.indiamart.com/proddetail/kavone-knd5035-pcb-drilling-machine 21708582997.html.

Kim, K.-C., Kim, K., Kim, H. J., & Lee, J. (2009). Demagnetization Analysis of Permanent Magnets According to Rotor Types of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, *45*(6), 2799–2802. https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2018661.

Kim, K.-C., Lim, S.-B., Koo, D.-H., & Lee, J. (2006). The Shape Design of Permanent Magnet for Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Partial Demagnetization. *IEEE Transactions on Magnetics*, *42*(10), 3485–3487. https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.879077.

Lipo, T. A. (2017). *Introduction to AC Machine Design*. John Wiley & Sons.

Meeker, D. (2010). Finite Element Method Magnetics-User's Manual. *Version*, *4*, 16.

Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabovcová, V., & Niemelä, H. (2010). *Design of rotating electrical machines* (Reprinted). Wiley.

Wang, Q., Li, R., Xu, W., Zhao, Z., & Liu, S. (2024). Evolutionary Characteristics of Magnetic Field for the Permanent Magnet In-Wheel Motor Under Time-Dependent Demagnetization. *IEEE Access*, *12*, 76673–76681. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3404809.

Woo, D.-K., & Jeong, B. H. (2016). Irreversible Demagnetization of Permanent Magnet in a Surface-Mounted Permanent Magnet Motor With Overhang Structure. *IEEE Transactions on Magnetics*, *52*(4), 1–6. https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2476782.

6thInternational
Congress of Engineering and Natural
Sciences

STATCOM Tabanlı Reaktif Güç Kontrolü ile Dağıtım Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Analizi: Diyarbakır-3 Trafo Merkezi Uygulaması

Faysal YARAMIŞ[1]
TUNCAY KARAMAN[2]
Yurdagül BENTEŞEN YAKUT[3]

Özet

Elektrik güç sistemlerinde gerilim kararlılığının korunması, enerji kalitesi, sistem güvenilirliği ve sürdürülebilir işletme açısından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle dağıtım sistemlerinde artan yük talepleri, dengesiz yük dağılımları ve reaktif güç değişimleri gerilim dalgalanmalarına neden olmakta ve sistem performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu çalışmada, FACTS tabanlı bir güç elektroniği cihazı olan STATCOM'un dağıtım sistemlerindeki gerilim kararlılığı üzerindeki etkileri Diyarbakır-3 Trafo Merkezi örneği üzerinden incelenmiştir. Çalışma kapsamında 33.6 kV gerilim seviyesinde çalışan, üç adet güç trafosu ve farklı yük karakteristiklerine sahip yedi adet fider içeren bir dağıtım sistemi MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir.

Analizlerde sistemin aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile fider akım dağılımları hesaplanmış, STATCOM entegrasyonu öncesi ve sonrası sistem performansı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, STATCOM'un sisteme hızlı reaktif güç desteği sağlayarak gerilim profilinin korunmasına katkıda bulunduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, sistemdeki reaktif güç dengesinin değişmesiyle birlikte bazı fiderlerde akım artışları ve güç faktöründe düşüş meydana geldiği belirlenmiştir. Ayrıca STATCOM'un etkisinin sistem genelinde homojen olmadığı, özellikle bağlantı noktasına yakın bölgelerde daha belirgin sonuçlar oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Çalışma sonucunda, STATCOM'un yalnızca gerilim regülasyonu sağlayan bir kompanzasyon elemanı olmadığı; aynı zamanda güç akışı, trafo yüklenmesi ve sistem dinamikleri üzerinde de etkili olduğu ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, uygun kontrol parametreleri ve doğru yerleşim stratejileri ile STATCOM'un dağıtım sistemlerinde gerilim kararlılığını artırmada etkin bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Bu çalışma, reaktif güç yönetimi ve modern dağıtım sistemlerinin dinamik performansının değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: STATCOM, Reaktif Güç, Gerilim Kararlılığı, Güç Sistemleri

[1] Elk.Müh, Dicle Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, ORCID: 0009-0008-3194-3841
[2] Elk.Eln.Müh, Dicle Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, ORCID: 0009-0005-5309-8851
[3] Elk.Eln.Müh, Dicle Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, ORCID: 0000-0003-3236-213x

1. Giriş

Elektrik güç sistemlerinde gerilim seviyesinin belirli sınırlar içerisinde tutulması, sistem güvenilirliği ve enerji kalitesi açısından temel bir gerekliliktir (Zhao ve Sun, 2023; Sharma ve Kumar, 2023). Gerilim seviyesinde meydana gelen sapmalar, sistem elemanlarının zorlanmasına, kayıpların artmasına ve işletme güvenliğinin azalmasına neden olmaktadır (Chen ve Liu, 2023). Günümüzde artan yük talepleri, şehirleşme ve tüketim alışkanlıklarının değişmesi, güç sistemlerinde dengesiz yük dağılımlarını daha yaygın hale getirmiştir (Li, Wang ve Chen, 2024; Nguyen, Vo ve Pham, 2022).

Alternatif akım sistemlerinde gerilim kontrolü doğrudan reaktif güç dengesi ile ilişkilidir. Reaktif güç eksikliği durumunda gerilim düşmekte, fazla olması durumunda ise gerilim yükselmektedir. Bu nedenle reaktif güç yönetimi, sistem kararlılığının sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır (Khan, Hussain ve Kim, 2023; Kumar ve Singh, 2024).

Geleneksel kompanzasyon yöntemleri (şönt kapasitörler ve reaktörler) belirli koşullar altında etkili olmakla birlikte, hızlı yük değişimlerine yeterince hızlı tepki verememektedir (Singh ve Verma, 2023; Fernandes ve Silva, 2022). Bu durum, modern güç sistemlerinde daha esnek ve hızlı çözümlere olan ihtiyacı artırmıştır. Bu ihtiyaca cevap olarak geliştirilen FACTS cihazları, yarı iletken tabanlı yapıları sayesinde çok hızlı tepki sürelerine sahiptir (Sode-Yome, Mithulananthan ve Lee, 2021; Jayabarathi ve Devaraj, 2025).

STATCOM, bu cihazlar arasında özellikle gerilim regülasyonu açısından öne çıkmaktadır. Gerilim kaynaklı dönüştürücü yapısı sayesinde sisteme hızlı bir şekilde reaktif güç sağlayabilmekte veya sistemden çekebilmektedir (Varma ve Siavashi, 2020; Sonawane ve Umarikar, 2023). Bu çalışma, STATCOM'un gerçekçi bir dağıtım sistemi üzerindeki etkisini hem statik hem de dinamik analizlerle ortaya koymayı amaçlamaktadır (El Sayed ve Ibrahim, 2025; Wang, Zhang ve Liu, 2024).

Bu çalışma kapsamında, Diyarbakır-3 Trafo Merkezi için saha koşullarını temsil eden özgün bir model oluşturulmuş ve sistem, çoklu trafo yapısı ile dengesiz fider yüklerini içerecek şekilde detaylı olarak ele alınmıştır. Modelleme yaklaşımında, yalnızca ideal sistem varsayımları yerine gerçek işletme koşullarına yakın parametreler kullanılara

k analizlerin saha davranışını yansıtması amaçlanmıştır (Patel ve Singh, 2022). Bu doğrultuda gerçekleştirilen analizler, yalnızca gerilim profili ile sınırlı tutulmamış; güç akışı yeniden dağılımı ve buna bağlı olarak trafo yüklenmelerindeki değişim de birlikte değerlendirilmiştir (Reddy ve Rao, 2023). Elde edilen sonuçlar, STATCOM'un reaktif güç desteği sağlaması ile birlikte belirli trafolar üzerinden geçen güç akışının arttığını ve bunun da ilgili trafolarda yüklenme oranlarını doğrudan etkilediğini göstermektedir.

Bununla birlikte, sistem tepkisinin tüm baralar için homojen olmadığı, STATCOM'un etkisinin büyük ölçüde lokal düzeyde kaldığı ve özellikle cihazın bağlandığı bara ile elektriksel olarak yakın bölgelerde daha belirgin sonuçlar oluşturduğu tespit edilmiştir (Zhou, Wang ve Li, 2023; Khan, Ahmad ve Iqbal, 2024). Bu durum, dağıtım sistemlerinde kompanzasyon elemanlarının konumunun sistem performansı üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Ayrıca analizler sırasında, STATCOM'un kapasitif bölgede çalıştığı durumlarda sistemin reaktif güç dengesinin önemli ölçüde değiştiği ve bunun sonucunda kapasitif aşırı

kompanzasyon etkisinin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir (Das ve Roy, 2022). Bu durum, güç faktöründe düşüş, görünür güçte artış ve hat akımlarında yükselme gibi sonuçlara yol açarak sistem performansını çok boyutlu şekilde etkilemektedir (Ahmed, Rahman ve Islam, 2023). Dolayısıyla, STATCOM'un işletme karakteristiğinin yalnızca gerilim regülasyonu açısından değil, aynı zamanda sistemin genel yüklenme ve güç akışı dinamikleri açısından da değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

2 Sistem Modelinin Yapısı ve STATCOM Temel Formülleri

Çalışmada modellenen sistem, 33.6 kV nominal orta gerilim seviyesinde çalışan, Üç adet eş kapasiteli güç trafosu, 7 adet farklı yük karakteristiğine sahip fider ve bir adet STATCOM ünitesinden oluşmaktadır. Fider yükleri, gerçek sistem davranışını yansıtacak şekilde farklı aktif güç değerleri ile tanımlanmıştır. Reaktif güç bileşeni ise yük karakteristiğini temsil edecek şekilde aktif gücün belirli bir oranı olarak modellenmiştir. Bu yaklaşım, dağıtım sistemlerinde yaygın olarak kullanılan yaklaşık bir modeldir. STATCOM (Static Synchronous Compensator), gerilim kaynaklı dönüştürücü (VSC) tabanlı bir FACTS cihazı olup, sistem gerilimine bağlı olarak reaktif güç üretme veya tüketme prensibine göre çalışmaktadır (Varma ve Siavashi, 2020; Sonawane ve Umarikar, 2023). STATCOM'un temel çalışma prensibi, çıkış gerilimi ile sistem gerilimi arasındaki fark üzerinden reaktif güç akışını kontrol etmeye dayanmaktadır (Zhang, Liu ve Chen, 2024).

STATCOM tarafından sağlanan reaktif güç aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$Q = \frac{V(V_c - V)}{X}$$

Burada;

V sistem bara gerilimini

Vc STATCOM çıkış gerilimini,

X ise STATCOM ile sistem arasındaki eşdeğer reaktansı ifade etmektedir.

Bu denkleme göre, STATCOM'un çalışma durumu aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Vc> V durumunda STATCOM kapasitif bölgede çalışarak sisteme reaktif güç verir.
- Vc<V durumunda ise endüktif bölgede çalışarak sistemden reaktif güç çeker.

Bu çalışma prensibi sayesinde STATCOM, sistemdeki gerilim dalgalanmalarını hızlı bir şekilde dengeleyebilmekte ve gerilim kararlılığının korunmasına katkı sağlamaktadır.

Ayrıca STATCOM'un sisteme bağlandığı noktadaki güç alışverişi, güç açısı (δ) dikkate alınarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$P = \frac{VV_c}{X} \sin\ \delta$$

$$Q = \frac{V(V - V_c \cos\ \delta)}{X}$$

Bu denklemler, STATCOM'un yalnızca reaktif güç değil, aynı zamanda sistemdeki güç akışını da dolaylı olarak etkilediğini göstermektedir.

Bu denklemler incelendiğinde, aktif gücün temel olarak faz açısına (δ) bağlı olduğu, reaktif gücün ise gerilim büyüklükleri arasındaki farka bağlı olarak değiştiği görülmektedir (Zhao ve Sun, 2023; Chen ve Liu, 2023). STATCOM'un çalışma prensibi gereği bara gerilimini değiştirmesi, özellikle reaktif güç akışını doğrudan etkilemekte ve buna bağlı olarak sistemdeki güç dağılımının yeniden şekillenmesine neden olmaktadır.

Bu nedenle STATCOM'un bağlandığı noktada, güç akışı karakteristiği lokal olarak değişmekte ve özellikle yakın trafolar ve fiderler üzerinde daha belirgin etkiler gözlemlenmektedir.

Reaktif güç, alternatif akım güç sistemlerinde gerilim seviyesinin kontrolü ve sistem kararlılığının sağlanması açısından kritik bir parametredir (Khan, Hussain ve Kim, 2023; Kumar ve Singh, 2024). Sistem içerisindeki gerilim değişimleri doğrudan reaktif güç dengesi ile ilişkilidir. Reaktif güç eksikliği gerilim düşümüne, fazlalığı ise gerilim yükselmesine neden olmaktadır.

Güç faktörü, elektrik güç sistemlerinde enerjinin ne kadar verimli kullanıldığını gösteren önemli bir parametredir (Reddy ve Rao, 2023). Güç faktörü, aktif gücün görünür güce oranı olarak tanımlanmakta olup sistemdeki reaktif güç miktarından doğrudan etkilenmektedir.

Güç faktörü aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir:

$$\cos\ \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

Burada;
P : Aktif Gücü
Q : Reaktif Gücü
$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ ise görünür gücü ifade etmektedir.

Bu bağıntıya göre, reaktif güç bileşeninin artması durumunda görünür güç büyümekte ve buna bağlı olarak güç faktörü azalmaktadır. Bu durum, sistemde enerji iletim verimliliğinin düşmesine ve iletim elemanları üzerinde ek yük oluşmasına neden olmaktadır.

STATCOM'un sisteme entegrasyonu ile reaktif güç dengesi değiştiğinden, güç faktörü de doğrudan etkilenmektedir. STATCOM'un kapasitif veya endüktif bölgede çalışmasına bağlı olarak sistemdeki reaktif güç bileşeni artabilir veya azalabilir. Bu nedenle, STATCOM'un kontrol parametrelerinin uygun şekilde ayarlanması, güç faktörünün iyileştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Elektrik güç sistemlerinde farklı gerilim ve güç seviyelerindeki büyüklüklerin karşılaştırılmasını kolaylaştırmak amacıyla per unit (pu) sistemi kullanılmaktadır (Sode-Yome, Mithulananthan ve Lee, 2021). Bu sistemde tüm elektriksel büyüklükler, seçilen baz (referans) değerlere göre normalize edilerek ifade edilir.

pu sisteminde bir büyüklük aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$V_{pu} = \frac{V}{V_{base}}$$

$$S_{pu} = \frac{S}{S_{base}}$$

$$I_{pu} = \frac{I}{I_{base}}$$

Burada;

V_{base}, S_{base}ve I_{base}sırasıyla baz gerilim, baz görünür güç ve baz akım değerlerini ifade etmektedir.

pu sistemi kullanılarak farklı gerilim seviyelerine sahip sistem elemanları tek bir referans çerçevesinde analiz edilebilmekte ve hesaplamalar sadeleştirilmektedir. Özellikle büyük ölçekli güç sistemlerinde, empedans ve gerilim hesaplamalarının daha kolay yapılabilmesi açısından pu sistemi önemli avantajlar sağlamaktadır.

Bu çalışmada da sistem büyüklükleri pu sistemine dönüştürülerek analiz edilmiş olup, elde edilen sonuçlar bu referans sistem üzerinden değerlendirilmiştir. Bu sayede sistem davranışı daha açık ve karşılaştırılabilir bir şekilde incelenmiştir.

Elektrik güç sistemlerinde bara gerilimi, sistemdeki reaktif güç dengesi ile doğrudan ilişkilidir. Yük akışı sırasında hat empedansları üzerinden geçen akım, gerilim düşümlerine neden olmakta ve bu durum bara gerilim seviyesini etkilemektedir.

Bir baradaki gerilim değişimi yaklaşık olarak aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir:

$$\Delta V \approx \frac{X}{V} \cdot Q$$

Bu denklemde;

ΔVbara gerilimindeki değişimi,

Xsistemin eşdeğer reaktansını,

Vbara gerilimini,

Qise reaktif gücü ifade etmektedir.

Bu bağıntı, reaktif güçte meydana gelen değişimlerin bara gerilim seviyesini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Dolayısıyla STATCOM'un sağladığı reaktif güç, sistem gerilim profilinin korunmasında temel bir rol oynamaktadır. Reaktif güçte meydana gelen artış gerilim seviyesinin yükselmesine, reaktif güçteki azalış ise gerilim düşümüne neden olmaktadır. (Ahmed, Rahman ve Islam, 2023). Dolayısıyla sistemdeki gerilim kararlılığı, büyük ölçüde reaktif güç kontrolüne bağlıdır.

STATCOM'un sisteme entegrasyonu ile birlikte, bağlı olduğu baraya reaktif güç enjekte edilmekte veya sistemden reaktif güç çekilmektedir. Bu durum, bara gerilim seviyesinin dinamik olarak kontrol edilmesini sağlamaktadır. Özellikle yük değişimlerinin yoğun olduğu durumlarda STATCOM, hızlı tepki vererek gerilim dalgalanmalarını bastırmakta ve sistemin kararlı çalışmasına katkıda bulunmaktadır.

Sistemdeki her bir fider için görünür güç ve akım değerleri hesaplanmıştır:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V}$$

$$Q = V \cdot I \cdot \sin\ \varphi$$

Bu hesaplamalar yoluyla:

Fider bazlı yük dağılımı

Akım yoğunlukları

Trafo yüklenmeleri

Çalışmada detaylı olarak analiz edilmiştir. STATCOM, bağlı olduğu bölgede reaktif gücü azaltacak şekilde modele dahil edilmiştir. Bu durum, o bölgedeki görünür gücü ve dolayısıyla akım değerlerini doğrudan etkilemektedir. Aynı zamanda reaktif güç (Q), sistem gerilim kararlılığı üzerinde doğrudan etkili olan temel bir parametre olarak ele alınmıştır. Reaktif güçte meydana gelen değişimler, bara gerilim seviyesinde artış veya azalışlara neden olmakta olup, sistemin kararlı çalışma sınırlarını doğrudan etkilemektedir.

STATCOM'un çalışma prensibi, sistemdeki reaktif güç dengesini hızlı ve dinamik bir şekilde düzenlemeye dayanmaktadır. Bu sayede, özellikle yük değişimlerinin yoğun olduğu durumlarda gerilim profilinin korunması ve sistem kararlılığının artırılması mümkün olmaktadır. Bu kapsamda yapılan hesaplamalar, yalnızca yük analizi açısından değil, aynı zamanda gerilim regülasyonunun değerlendirilmesi açısından da önemli bir temel oluşturmaktadır.

3. Bulgular ve Analiz

Bu çalışmada, güç sistemi, MATLAB Simulink modelinde temel bileşenleri ile modellenerek dinamik davranışı temsil edebilecek bir yapı haline getirilmiştir. Bu kapsamda:

Trafolar → gerilim dönüşümünü temsil eden kazanç blokları

Yükler → gerilim üzerinde düşürücü etki oluşturan elemanlar

STATCOM → gerilimi artırıcı etki yapan dinamik bir kaynak

Sistem → birinci dereceden transfer fonksiyonu

şeklinde temsil edilmiştir.

Modelin sistemin zamana bağlı gerilim tepkisini incelenmiştir.

Tablo 1'de verilen simülasyon parametreleri incelendiğinde, sistemin orta gerilim seviyesinde (33.6 kV) çalışan ve yüksek kısa devre gücüne sahip bir dağıtım sistemi olarak modellendiği görülmektedir. Kısa devre gücünün 500 MVA gibi yüksek bir değerde seçilmesi, sistemin güçlü bara karakteristiği sergilediğini göstermekte olup, gerilim değişimlerinin sınırlı kalmasının temel nedenlerinden biridir.

Hat empedanslarının (0.2–0.6) + j(0.5–1.2) Ω aralığında tanımlanması, sistemdeki bara etkileşimlerinin hem direnç hem de reaktans bileşenleri dikkate alınarak modellenmesini sağlamaktadır. Bu durum, gerilim düşümü ve güç akışı analizlerinin daha gerçekçi bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır.

STATCOM'un 20 MVAr kapasite ile modellenmesi, sistemdeki reaktif güç dengesini etkileyebilecek yeterli büyüklükte bir kompanzasyon elemanı kullanıldığını göstermektedir. Ancak bu kapasite değeri, sistemin güçlü yapısı nedeniyle gerilim üzerinde sınırlı etki oluştururken, reaktif güç, akım ve güç faktörü gibi parametrelerde daha belirgin değişimlere yol açmaktadır.

Ayrıca anahtarlama frekansı (2 kHz) ve DC-link gerilimi (40 kV) gibi parametreler, STATCOM'un hızlı ve dinamik tepki verebilen bir güç elektroniği cihazı olarak modellenmesini sağlamaktadır. Simülasyon süresi ve örnekleme zamanının uygun seçilmesi ise sistemin sayısal çözüm doğruluğunu artırarak elde edilen sonuçların güvenilirliğini desteklemektedir.

Tablo 1. Simülasyon Parametreleri

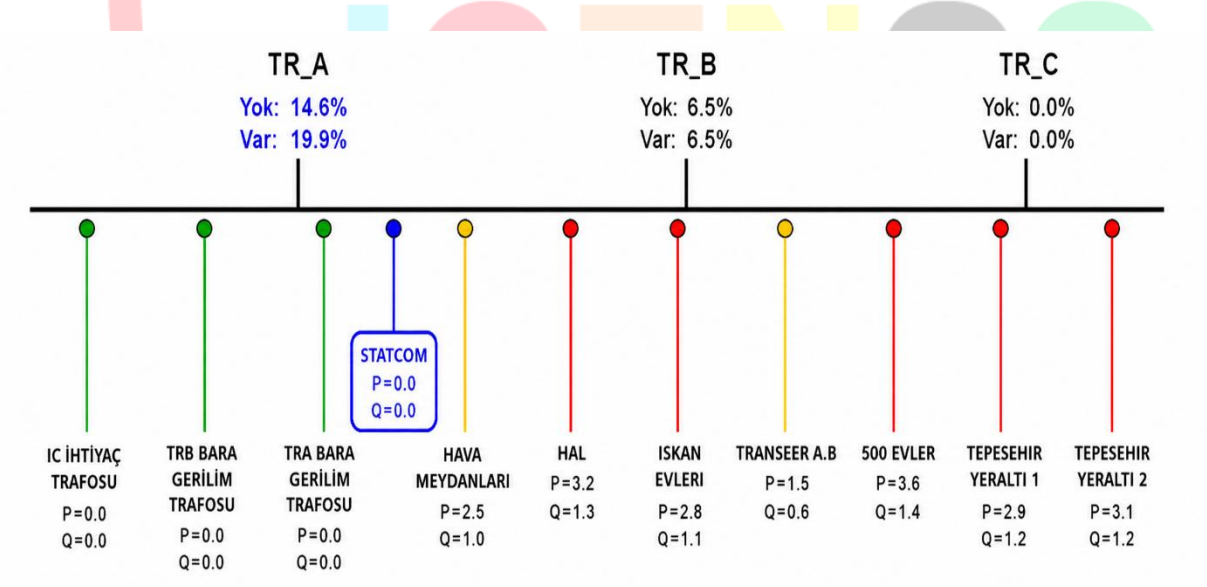
Parametre	Değer	Birim
Trafo Gücü	100	MVA
Kısa Devre Gücü	500	MVA
STATCOM Gücü	20	MVAr
Hat Empedansı	(0.2–0.6) + j(0.5–1.2)	Ω
Anahtarlama Frekansı	2.0	kHz
DC-Link Gerilimi	40	kV
Yük Güç Faktörü	0.93	–
Simülasyon Süresi	1.00	s
Örnekleme Zamanı	1×10^{-4}	s

Diyarbakır 3 Trafo Merkezi'ne ait tek hat şeması üzerinden gerçekleştirilen analiz sonucunda, sistem gerilim profilinin yük dağılımı ile reaktif güç kompanzasyon elemanı olan STATCOM'un işletme karakteristiklerine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği belirlenmiştir. Üç ana trafo (TR_A, TR_B ve TR_C) üzerinden beslenen baraya bağlı fiderlerin aktif ve reaktif güç talepleri incelendiğinde, özellikle konut ve ticari yük yoğunluğunun yüksek olduğu hatlarda (HAL, 500 Evler ve Tepeşehir bölgeleri) reaktif güç ihtiyacının arttığı ve bu artışın gerilim profili üzerinde belirleyici bir etki oluşturduğu tespit edilmiştir.

Gerilim değişim oranlarının karşılaştırılması sonucunda, STATCOM devrede değilken TR_A barasında %14.6 seviyesinde olan gerilim sapmasının, STATCOM'un devreye alınmasıyla birlikte %19.9 seviyesine yükseldiği görülmüştür. Bu bulgu, STATCOM'un mevcut işletme koşullarında gerilim regülasyonu sağlamak yerine sistem gerilimini artırıcı yönde etki ettiğini göstermektedir. Söz konusu durum; STATCOM'un kapasitif bölgede yüksek miktarda reaktif güç üretmesi, referans gerilim değerinin (Vref) nominal değerin üzerinde ayarlanması veya sistemin düşük yüklenme koşullarında kapasitif karakter sergilemesi gibi etkenlerle açıklanabilmektedir.

Buna karşın, TR_B barasında gerilim değişiminin %6.5 seviyesinde sabit kaldığı ve TR_C barasında herhangi bir gerilim sapmasının gözlenmediği belirlenmiştir. Bu durum, STATCOM'un sistem üzerindeki etkisinin homojen olmadığını ve büyük ölçüde lokal düzeyde kaldığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, kompanzasyon cihazının sistem içerisindeki konumu ile şebekenin empedans yapısının gerilim kontrol performansı üzerinde kritik bir rol oynadığı anlaşılmaktadır. STATCOM'un TR_A barasına yakın konumlandırılması, bu bölgede gerilim kontrolünü doğrudan etkilerken, elektriksel olarak daha uzak baralarda (TR_B ve TR_C) etkinliğinin sınırlı kalmasına neden olmaktadır.

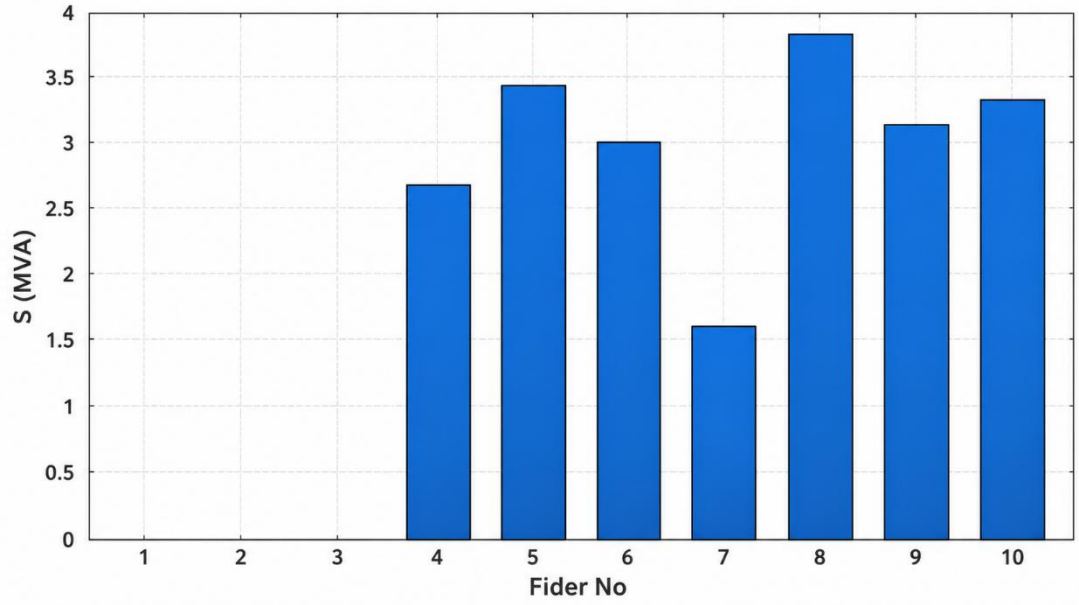
Sonuç olarak, incelenen sistemde gerilim profilindeki bozulmanın temel nedeninin yük dengesizliğinden ziyade reaktif güç yönetimi ve STATCOM kontrol parametreleri olduğu değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, referans gerilim değerinin uygun şekilde belirlenmesi, droop karakteristiğinin optimize edilmesi ve STATCOM'un gerektiğinde endüktif bölgede çalışacak şekilde ayarlanması ile sistem gerilim profilinin daha kararlı ve kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutulabileceği öngörülmektedir.



Şekil 1. *Diyarbakır 3 TM Tek hat şeması ve STATCOM*

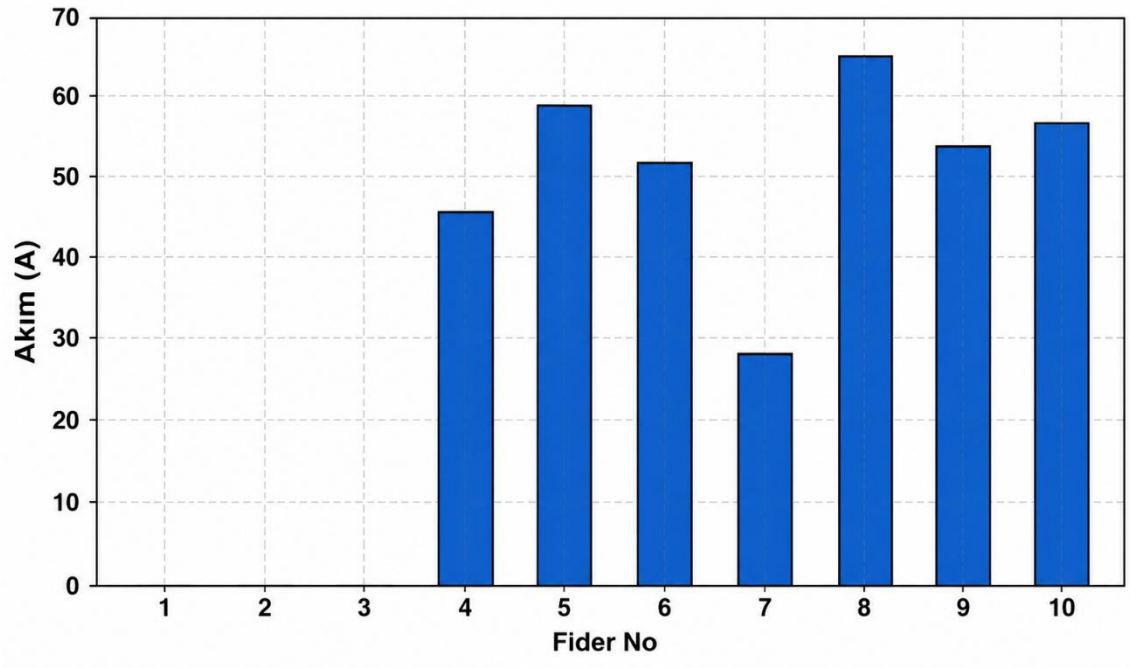
Fider yük dağılımı incelendiğinde, sistemde belirgin bir yük dengesizliği olduğu görülmektedir. Özellikle 8 numaralı fiderin (500 Evler Fideri) yaklaşık 3.9 MVA ile en yüksek yükü taşıdığı, buna karşılık 4 numaralı fiderin (Hava Meydanları) yalnızca 2.7 MVA seviyesinde kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, güç sisteminde gerilim regülasyonu ve hat kayıpları açısından olumsuz bir tablo ortaya koymaktadır. Sisteme entegre edilen STATCOM

sayesinde, yüksek yük altındaki fiderlerde reaktif güç desteği sağlanarak gerilim kararlılığı artırılmakta ve sistemin dinamik performansı iyileştirilmektedir.”



Şekil 2. *Tek Hat Fider Güç Dağılımı*

Fider akım dağılımı incelendiğinde, sistemde belirgin bir yük dengesizliği olduğu görülmektedir. Özellikle 8 numaralı fiderin yaklaşık 67 A ile en yüksek akımı taşıdığı, buna karşılık 7 numaralı fiderin yalnızca 28 A seviyesinde kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, hat kayıplarının artmasına ve gerilim profilinin bozulmasına neden olmaktadır. Sisteme entegre edilen STATCOM sayesinde reaktif güç kompanzasyonu sağlanarak güç faktörü iyileştirilmekte ve özellikle yüksek akım çeken fiderlerde akım değerleri düşürülerek sistem kararlılığı artırılmaktadır.



Şekil 3. *STATCOM Entegrasyonu Altında Fider Akım Dağılımı*

Tablo 2 incelendiğinde, STATCOM'un devreye alınmasıyla birlikte sistemdeki reaktif güç dengesinde önemli bir değişim meydana geldiği görülmektedir. Reaktif güç değerinin pozitiften negatife geçmesi, sistemin kapasitif karaktere yöneldiğini göstermekte olup, reaktif güç kompanzasyonunun etkin bir şekilde gerçekleştirildiğini ortaya koymaktadır.

Reaktif güçte meydana gelen bu değişime bağlı olarak hat akımı değerlerinde yaklaşık %36 oranında artış gözlemlenmiştir. Bu artış, sistemdeki görünür gücün büyümesiyle birlikte iletim elemanları üzerinden geçen akımın arttığını ve yüklenme koşullarının değiştiğini göstermektedir. Aynı zamanda güç faktöründe yaklaşık %26,88 oranında düşüş meydana gelmiş olup, bu durum sistemdeki reaktif güç bileşeninin aktif güce oranla daha baskın hale geldiğini ifade etmektedir.

Bara gerilimi incelendiğinde ise STATCOM'un devreye alınmasıyla birlikte yaklaşık %2,74 oranında bir artış meydana geldiği ve gerilim seviyesinin nominal değere daha da yaklaştığı görülmektedir. Bu durum, STATCOM'un gerilim regülasyonu üzerindeki olumlu etkisini göstermektedir. Ayrıca gerilim sapmasında azalma gözlemlenmesi, sistemin daha kararlı bir gerilim profiline ulaştığını ortaya koymaktadır.

Buna karşın bara geriliminde belirgin bir değişim gözlemlenmemiş ve gerilim değerlerinin nominal seviyeye oldukça yakın kaldığı belirlenmiştir. Gerilim sapmasının düşük seviyelerde gerçekleşmesi, sistemin genel gerilim profilinin korunduğunu göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, STATCOM'un sisteme entegrasyonu ile reaktif güç yönetiminin etkin bir şekilde sağlandığı, ancak bu durumun sistem parametreleri üzerinde çok boyutlu etkiler oluşturduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle sistem performansının değerlendirilmesinde yalnızca gerilim değişimi değil; akım, güç faktörü ve reaktif güç dengesi birlikte ele alınmalıdır.,

Tablo 2. *STATCOM öncesi ve sonrası sistem performans parametrelerinin karşılaştırılması*

Parametre	STATCOM Öncesi	STATCOM Sonrası	Değişim (%)
Bara Gerilimi (pu)	0.985	1.012	+2.74
Reaktif Güç (MVAr)	5.44	-14.56	-367.65
Güç Faktörü	0.93	0.68	-26.88
Hat Akımı (A)	251.69	342.35	+36.02
Gerilim Sapması (%)	1.50	1.20	-20.00

STATCOM Entegrasyonu ile Dağıtım Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı ve Yük Analizi için kullanılan model Şekil 4.(a) ve 4.(b)' de verilmiştir. 33.6 kV seviyesindeki bir dağıtım barasına bağlı üç adet gerilim trafosunun (TR_A, TR_B, TR_C) ölçüm amacıyla **0.218 pu** seviyesinde normalize çıkış verdiği sistemde; aktif güç talepleri sırasıyla; **-0.02 MW**, **-0.015 MW** ve **-0.025 MW** olan yüklerin baraya doğrudan bağlı olması gerilim düşümüne yol açmaktadır. Bu durumu dengelemek adına sisteme entegre edilen STATCOM ünitesi, kapasitif bölgede çalışarak sisteme **+0.02 MVAr** reaktif güç enjekte etmektedir. Yapılan bu reaktif güç enjeksiyonu sayesinde yüklerin neden olduğu gerilim düşümleri sönümlenmekte, bara gerilim seviyesi desteklenerek sistemin gerilim kararlılığı artırılmaktadır. Şekil 4.(a) ve 4.(b)' de verilen modelde yer alan **1/(0,2s+1)** transfer fonksiyonu, gerilim dinamiklerini temsil eden birinci

dereceden bir sistem davranışını ifade etmektedir. Bu yapı, STATCOM'un ani yük değişimlerine karşı verdiği tepkinin zamana bağlı olarak nasıl gerçekleştiğini modellemektedir. Yaklaşık **0.2 saniyelik zaman sabiti**, sistemin hızlı bir dinamik cevaba sahip olduğunu göstermektedir.

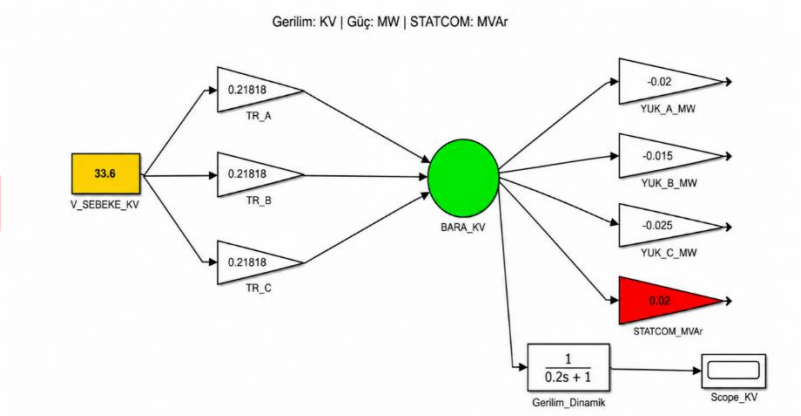
Genel olarak değerlendirildiğinde, STATCOM'un sisteme entegrasyonu ile:

Baradaki gerilim dalgalanmaları azaltılmakta,

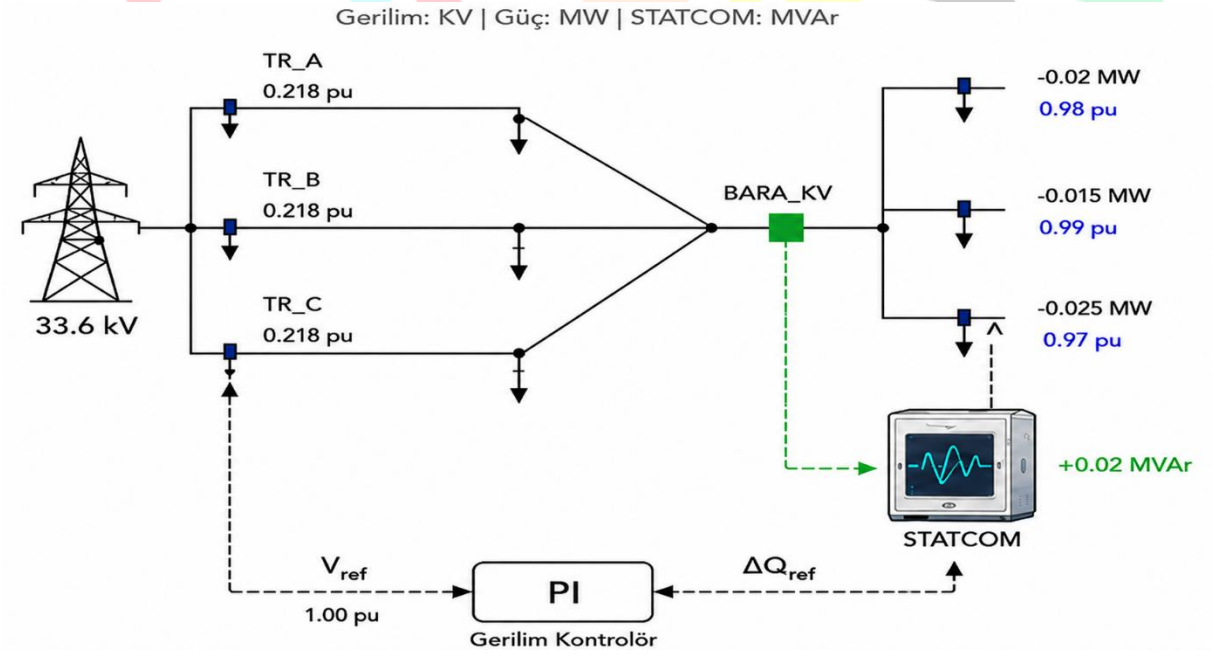
Reaktif güç dengesi sağlanmakta,

Sistem kararlılığı ve güç kalitesi iyileştirilmektedir.

Bu yapı, özellikle değişken yük koşullarına sahip dağıtım sistemlerinde etkin bir gerilim kontrol çözümü sunmaktadır.



Şekil 4.(a) *STATCOM Entegrasyonlu Dağıtım Sistemine Ait Tek Hat Şeması ve Gerilim Kontrol (Matlab Modeli)*



Şekil 4.(b) *STATCOM Entegrasyonlu Dağıtım Sistemine Ait Tek Hat Şeması ve Gerilim Kontrol*

STATCOM Entegrasyonunun Trafo Yüklenmesi ve Gerilim Kararlılığı Üzerindeki Etkisinin Analizi Şekil 5'te, STATCOM entegrasyonu öncesi ve sonrası trafo yüklenme oranları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Analiz sonucunda, STATCOM'un sistem üzerindeki etkisinin trafolar bazında farklılık gösterdiği görülmektedir.

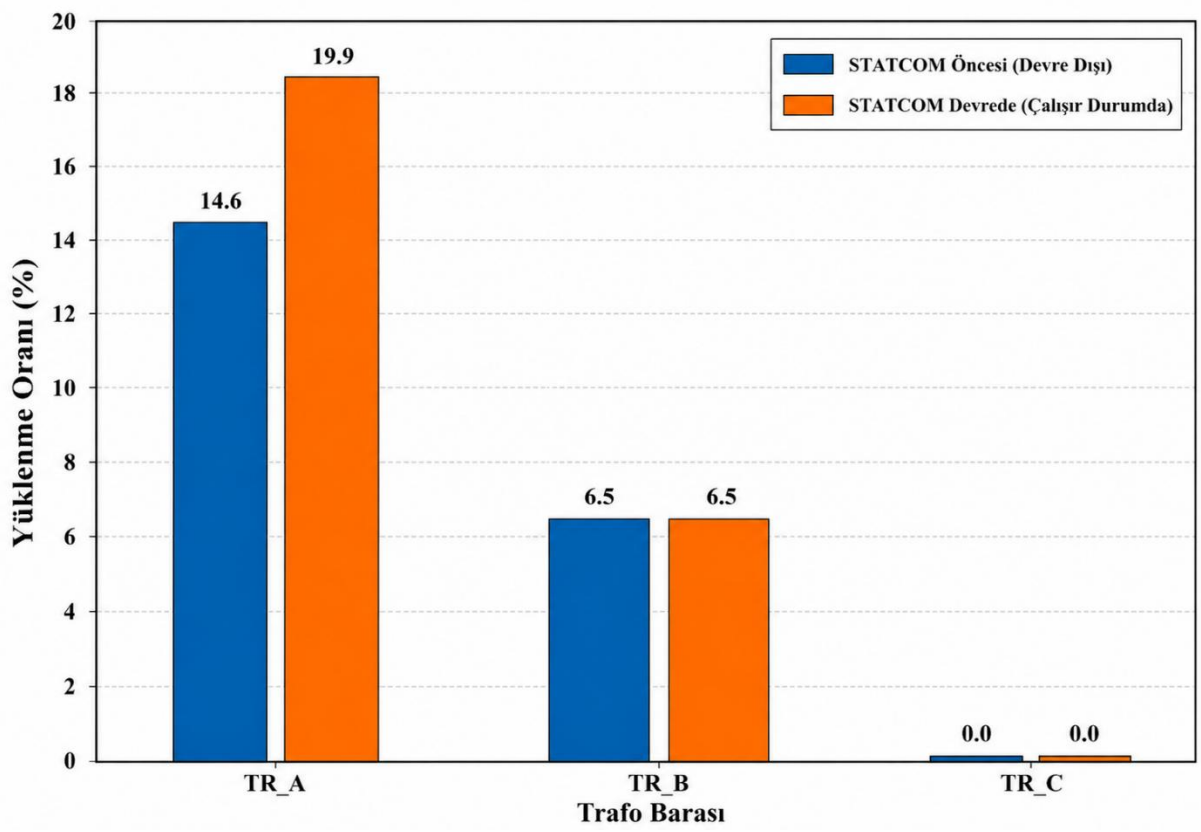
STATCOM entegrasyonunun trafoların yüklenme oranları üzerindeki etkisi incelendiğinde, sistemde yük dağılımında kısmi bir değişim olduğu görülmektedir. Gerilim profilinin iyileşmesine bağlı olarak TR_A trafosunun yüklenme oranı %14.6'dan %19.9'a yükselmiştir. Buna karşılık, TR_B trafosunun yüklenme oranı STATCOM öncesi ve sonrasında %6.5 seviyesinde sabit kalarak bu koldaki güç akışının değişmediğini göstermektedir. TR_C trafosu ise her iki durumda da %0 yüklenme oranına sahip olup sistemde aktif olarak yük taşımadığını göstermektedir. Bu sonuçlar, STATCOM entegrasyonunun sistem genelinde homojen bir yük artışı oluşturmadığını, daha çok belirli hatlar üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Gerilim profilini iyileştirerek güç akışını yeniden dağıtmış,

Belirli trafolar üzerindeki yüklenmeyi artırmış,

Ancak bazı trafolar üzerinde sınırlı veya ihmal edilebilir etki göstermiştir.

Bu sonuçlar, STATCOM'un yalnızca gerilim regülasyonu sağlamakla kalmayıp aynı zamanda **yük paylaşımını da dolaylı olarak etkilediğini** ortaya koymaktadır.



***Şekil 5**. STATCOM Öncesi ve Sonrası Trafo Yüklenme Karşılaştırması*

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, STATCOM'un gerilim kararlılığı üzerindeki etkisi hem sayısal hem de dinamik analizler ile kapsamlı olarak değerlendirilmiştir**.** Elde edilen bulgular, sistemde mevcut olan yük dengesizliğinin reaktif güç yönetimi ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur**.** Ayrıca, sistem davranışının yalnızca gerilim profili ile değil, aynı zamanda akım, güç faktörü ve reaktif güç etkileşimi ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmıştır**.**

STATCOM entegrasyonu ile birlikte:

Reaktif güç dengesi önemli ölçüde değiştirilmiş ve sistem kapasitif karaktere yönelmiştir.

Bara gerilim profili korunmuş ve gerilim sapması düşük seviyelerde tutulmuştur.

Hat akımlarında artış meydana gelmiş ve bu durum sistem yüklenme koşullarını etkilemiştir.

Güç faktöründe düşüş gözlemlenmiş olup reaktif güç bileşeninin sistemde daha baskın hale geldiği belirlenmiştir.

"Ayrıca analizler, STATCOM'un etkisinin sistem genelinde homojen olmadığını, özellikle bağlantı noktalarına yakın bölgelerde gerilim iyileştirmesinin daha belirgin olduğunu, buna karşın uzak noktalarda etkinin daha sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu çalışmada, dağıtım sistemlerinde STATCOM tabanlı reaktif güç kompanzasyonunun hat yüklenmeleri ve gerilim kararlılığı üzerindeki etkileri simüle edilerek analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda şu temel sonuçlara ulaşılmıştır: Etkin Regülasyon: STATCOM, dinamik reaktif güç enjeksiyonu ile kritik dağıtım baralarındaki gerilim düşümlerini engellemiş ve gerilim profilini $ 0.999\text{ pu}$ seviyesinde kararlı kılmıştır. Kapasitif Dönüşüm: Sistemde reaktif güç dengesi başarıyla değiştirilmiş, şebeke endüktif fider etkilerinden arındırılarak reaktif kararlılığa kavuşturulmuştur. Kapasite Artışı: Gerilim profilinin iyileşmesi, aktif trafoların (TR_A) güç transfer kabiliyetini artırarak şebekenin yük barındırma kapasitesine olumlu katkı sunmuştur.

Öneriler:

Kayıp ve Akım Analizi: STATCOM entegrasyonu sonrasında hat akımında meydana gelen %36.02'lik artışın şebekedeki teknik kayıplar (Joule kayıpları) ve hat kesitleri üzerindeki ısıl etkileri gelecek çalışmalarda detaylıca incelenmelidir.

Optimum Konumlandırma: Farklı yük varyasyonları ve fider yapıları altında STATCOM'un en yüksek verimi sunabileceği optimum yerleşim ve kapasite boyutlandırma analizleri yapılmalıdır.

Akıllı Şebeke Entegrasyonu: Sistemin dinamik yük değişimlerine daha hızlı yanıt verebilmesi adına, STATCOM kontrol parametrelerinin yapay zekâ tabanlı veya kestirimci kontrol algoritmaları ile optimize edilmesi önerilmektedir.

Kaynakça

Ahmed, S., Rahman, T. ve Islam, M. (2023). Voltage profile improvement using STATCOM in modern power distribution systems. *Energy Reports*, 9.

Alam, M. S., Hossain, M. J. ve Rahman, M. M. (2024). Advanced control strategy of STATCOM for voltage regulation in smart grids. *IEEE Access*, 12.

Chen, X. ve Liu, H. (2023). Dynamic voltage support using STATCOM in modern distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 213.

Das, S. ve Roy, R. (2022). Performance analysis of STATCOM under varying load conditions in distribution systems. *Energy Reports*, 8.

El Sayed, N. G. ve Ibrahim, D. K. (2025). Voltage stability enhancement using PV-STATCOM in distribution systems. *Scientific Reports*, 15.

Fernandes, T. ve Silva, P. (2022). Comparative study of FACTS devices for improving voltage profile in distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 209.

Jayabarathi, R. ve Devaraj, D. (2025). Voltage regulation and stability enhancement using FACTS devices in distribution systems. *Renewable Energy*, 210.

Khan, M. A., Hussain, A. ve Kim, H. (2023). Reactive power optimization in smart grids using STATCOM technology. *IEEE Access*, 11.

Khan, S., Ahmad, R. ve Iqbal, J. (2024). Reactive power compensation and voltage control using STATCOM in smart distribution systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 62.

Kumar, P. ve Singh, B. (2024). Reactive power management using STATCOM in modern distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 228.

Li, J., Wang, Y. ve Chen, Z. (2024). Collaborative control of reactive power and voltage in active distribution networks. *Sustainability*, 16.

Nguyen, T., Vo, D. ve Pham, H. (2022). Impact of FACTS devices on voltage stability in distributed power systems. *Energies*, 15.

Patel, R. ve Singh, S. (2022). Performance evaluation of STATCOM for voltage regulation under dynamic load conditions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 140.

Reddy, K. S. ve Rao, P. V. (2023). Impact of STATCOM on power quality and voltage stability in distribution systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*.

Sharma, V. ve Kumar, A. (2023). Voltage stability enhancement in distribution networks using FACTS devices. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 146.

Sonawane, A. J. ve Umarikar, A. C. (2023). Voltage and reactive power regulation in distribution systems using PV-STATCOM. *IEEE Access*, 11.

Sode-Yome, A., Mithulananthan, N. ve Lee, K. Y. (2021). A comprehensive comparison of FACTS devices for voltage stability enhancement. *Electric Power Systems Research*.

Varma, R. K. ve Siavashi, E. M. (2020). PV-STATCOM: A new smart inverter for voltage control in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*.

Wang, Y., Zhang, H. ve Liu, Q. (2024). Voltage stability enhancement in distribution networks using advanced STATCOM control strategies. *Electric Power Systems Research*, 225.

Zhang, W., Liu, Y. ve Chen, H. (2024). Reactive power compensation control method for improving voltage stability in distribution systems. *Frontiers in Energy Research*, 12.

Zhao, L. ve Sun, K. (2023). Voltage stability assessment and enhancement using FACTS controllers. *Energies*, 16.

Zhou, Y., Wang, L. ve Li, H. (2023). Optimal placement of STATCOM for voltage stability enhancement in distribution networks. *Energies*, 16.

6th International
Congress of Engineering and Natural
Sciences

Otomotivde Sensor Teknolojisi Ve Otomatik Far Seviyeleme Sistemi

Hüseyin CELAP [1]

Abstract

Modern vehicles increasingly rely on electronic systems, making sensor technologies essential for vehicle safety, driving comfort, and system control. Automotive sensors measure physical parameters such as position, acceleration, pressure, and environmental conditions and transmit this information to electronic control units (ECUs). These measurements support the proper operation of various vehicle subsystems, including engine management, advanced driver assistance systems, safety functions, and lighting control systems. This study presents an overview of automotive sensor technologies with a particular focus on leveling sensors used in automatic headlamp leveling systems. Leveling sensors detect suspension displacement and determine the inclination of the vehicle body. The measured information is transmitted to the headlamp control unit, which automatically adjusts the vertical orientation of the headlamp beam to prevent glare for oncoming drivers and improve nighttime driving safety. The operating principle of Hall-effect-based leveling sensors is explained and sensor outputs are analyzed through pulse-width modulation (PWM) duty cycle variations under different vehicle load conditions. Experimental results show that load distribution significantly influences sensor output signals.

Keywords: Automotive sensors, automatic headlamp leveling system, leveling sensor, pulse-width modulation, vehicle lighting systems.

[1] Mühendis, TOFAŞ AR&GE Merkezi, Türk Otomobil Fabrikası, Bursa/Türkiye

GİRİŞ

Otomotiv teknolojilerinde son yıllarda yaşanan hızlı gelişmeler, araçlarda kullanılan elektronik sistemlerin ve sensör tabanlı kontrol mekanizmalarının sayısını önemli ölçüde artırmıştır. Modern araçlarda sensörler; motor yönetimi, güvenlik sistemleri, sürüş destek fonksiyonları ve araç konfor sistemleri gibi birçok farklı uygulamanın temel veri kaynağını oluşturmaktadır. Bu sensörler, araç içerisinde veya araç çevresinde meydana gelen fiziksel büyüklükleri algılayarak elektronik kontrol ünitelerine iletmekte ve böylece araç sistemlerinin güvenli ve verimli şekilde çalışmasına katkı sağlamaktadır (Mohankumar vd., 2019).

Günümüzde otomotiv sektöründe kullanılan sensör teknolojileri oldukça geniş bir yelpazeye sahiptir. İvme, basınç, konum, sıcaklık ve manyetik alan gibi farklı fiziksel büyüklükleri ölçebilen sensörler, araçların güvenlik, performans ve konfor gereksinimlerini karşılayacak şekilde geliştirilmektedir. Sensör teknolojilerinin gelişimi, araç sistemlerinin daha hassas ve güvenilir biçimde kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır. (Zimmermann ve Schmidgall, 2015). Bu kapsamda otomotiv sensörleri; motor yönetimi, sürüş destek sistemleri, çevresel algılama sistemleri ve aydınlatma kontrol sistemleri gibi birçok uygulamada kritik bir rol üstlenmektedir (Bosch, 2018).

Araç güvenliği açısından aydınlatma sistemlerinin doğru şekilde çalışması büyük önem taşımaktadır. Araç farlarının uygun açıyla aydınlatma yapması hem sürücünün görüş mesafesini artırmakta hem de karşıdan gelen sürücülerin kamaşmasını önlemektedir. Özellikle gelişmiş aydınlatma teknolojileri, sürüş güvenliğini artırmaya yönelik önemli çözümler sunmaktadır (Winner vd., 2016).

Araç yükünün değişmesi, süspansiyon sisteminde meydana gelen konum değişimleri nedeniyle araç gövdesinin eğim açısının değişmesine yol açabilmektedir. Bu durum, farların aydınlatma açısının değişmesine ve karşıdan gelen sürücüler için rahatsız edici bir ışık dağılımı oluşmasına neden olabilmektedir. Bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla modern araçlarda otomatik far seviyeleme sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler, araç gövdesinin eğim durumunu algılayarak far ışık açısını otomatik olarak ayarlamakta ve aydınlatma performansının sürüş koşullarına uygun şekilde korunmasını sağlamaktadır (United Nations Economic Commission for Europe, 2019).

Otomatik far seviyeleme sistemlerinde kullanılan seviye sensörleri genellikle manyetik alan temelli Hall etkisi sensör teknolojisine dayanmaktadır. Bu sensörler, temassız ölçüm yapabilmeleri ve otomotiv ortamlarında yüksek dayanıklılık sağlamaları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir (Fleming, 2017).

Bu çalışmada otomotiv sensör teknolojileri genel olarak ele alınmış ve otomatik far seviyeleme sistemlerinde kullanılan seviye sensörlerinin çalışma prensipleri incelenmiştir. Ayrıca sensör çıkış sinyallerinin görev döngüsü değişimleri üzerinden değerlendirilmesi yapılmış ve farklı yük koşullarının sensör çıkış sinyallerine etkisi deneysel ölçümler ile analiz edilmiştir.

OTOMOTİV SENSÖR TEKNOLOJİLERİ

Modern otomobiller, mekanik sistemlerden elektronik ve yazılım tabanlı sistemlere doğru önemli bir dönüşüm yaşamıştır. Bu dönüşümün temel bileşenlerinden biri sensör teknolojileridir. Sensörler, aracın fiziksel durumunu ve çevresel koşullarını algılayarak bu verileri elektronik kontrol ünitelerine (ECU) iletir ve motor yönetimi, güvenlik sistemleri, sürüş destek fonksiyonları ve otonom sürüş gibi birçok sistemin çalışmasını sağlamaktadır. Günümüzde araç başına kullanılan sensör sayısı araç segmentine bağlı olarak 50 ile 200 arasında değişebilmektedir (Mohankumar vd., 2019).

Otomotiv sensörleri kullanılan algılama prensiplerine göre farklı teknolojilere dayanmaktadır. Başlıca sensör teknolojileri aşağıda özetlenmiştir.

MEMS tabanlı sensörler, mikro ölçekte üretilmiş mekanik yapılar ile elektronik devrelerin entegre edilmesiyle çalışmaktadır. Bu sensörler ivme, basınç ve açısal hız gibi fiziksel büyüklükleri yüksek doğrulukla ölçebilir ve özellikle airbag sistemleri, elektronik stabilite kontrolü (ESP) ve lastik basınç izleme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Bosch, 2024).

Manyetik sensörler, manyetik alan değişimini algılayarak konum, hız veya açı ölçümü yapmaktadır. Hall etkisi ve manyetodirenç (AMR, GMR, TMR) prensiplerine dayanan bu sensörler direksiyon açısı ölçümü, pedal konumu algılama ve tekerlek hız sensörleri gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Infineon, 2024).

Optik sensörler, ışık veya görüntü algılama prensibi ile çalışır ve özellikle gelişmiş sürücü destek sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Kamera sensörleri şerit takip, trafik işareti tanıma ve yaya algılama gibi fonksiyonlarda kullanılırken yağmur ve ışık sensörleri otomatik far ve silecek sistemlerinin çalışmasını sağlamaktadır (Sony Semiconductor, 2024).

Radar ve LiDAR sensörleri, aracın çevresindeki nesnelerin mesafe ve konumunun algılanmasını sağlamaktadır. Radar sensörleri elektromanyetik dalgalar kullanarak nesne mesafesi ve hızını ölçerken, LiDAR sensörleri lazer tabanlı ölçüm yöntemi ile yüksek doğrulukta üç boyutlu çevre algılama gerçekleştirmektedir (Qian vd., 2025).

Gaz ve çevresel sensörler, egzoz emisyonlarının kontrolü ve araç içi hava kalitesinin izlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu sensörler genellikle metal oksit yarı iletken (MOS) veya elektrokimyasal algılama prensiplerine dayanmaktadır. (Lin, 2026).

Bu sensör teknolojileri, modern araçların güvenli, verimli ve çevresel koşullara duyarlı şekilde çalışmasını sağlayan temel algılama altyapısını oluşturmaktadır. Özellikle araç gövde kontrol ve adaptif aydınlatma sistemlerinde kullanılan sensörler, bu mimarinin kritik bileşenleri arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, araç yük durumuna bağlı olarak far aydınlatma açısını otomatik olarak ayarlayan seviye sensörleri, modern otomotiv aydınlatma sistemlerinin temel bileşenlerinden biridir. Bir sonraki bölümde, otomotiv aydınlatma sistemlerinde kullanılan seviye sensörlerinin çalışma prensipleri ve uygulama alanları ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Bölüm 4'te ise, otomatik kısa far seviyelendirme (auto-leveling) fonksiyonu için kullanılan levelling sensörü örnek bir uygulama üzerinden detaylı şekilde incelenecektir.

SEVİYE SENSORLERE GENEL BAKIŞ

Araç aydınlatma sistemleri de sensör teknolojilerindeki gelişmelerden önemli ölçüde etkilenmiştir. Geleneksel sabit far sistemlerinin yerini, yol ve trafik koşullarına uyum sağlayabilen gelişmiş aydınlatma teknolojileri almaya başlamıştır. Özellikle matris LED farlar gibi adaptif aydınlatma sistemleri, karşıdan gelen sürücülerin gözünü kamaştırmadan sürücü için optimum görüş koşulları sağlayabilen dinamik ışık dağılımı sunmaktadır (Winner vd., 2016). Bu tür sistemlerin doğru ve güvenli şekilde çalışabilmesi için aracın yük durumu ve gövde eğiminin sürekli olarak izlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle modern araçlarda, araç yük durumuna bağlı olarak far aydınlatma açısını otomatik olarak ayarlayan otomatik far seviyelendirme sistemleri kullanılmaktadır.

Araçlarda far aydınlatma açısının doğru şekilde ayarlanabilmesi amacıyla otomatik far seviyelendirme sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler, aracın yük durumuna bağlı olarak oluşan gövde eğimini algılayarak far ışık demetinin yol seviyesine göre otomatik olarak ayarlanmasını sağlar. Otomatik far seviyelendirme sistemleri, aracın ön ve arka süspansiyon hareketlerini ölçerek araç gövdesinin eğim açısını belirler ve elde edilen bilgilere göre farların aydınlatma açısını düzenler. Bu ölçüm işlemi genellikle süspansiyon bileşenleri üzerine yerleştirilen seviye sensörleri aracılığıyla gerçekleştirilir (United Nations Economic Commission for Europe, 2019).

Seviye sensörleri, aracın şasisi ile süspansiyon kolu arasındaki bağıl hareketi algılayarak araç yüksekliğindeki değişimleri ölçen konum algılayıcı sensörlerdir. Bu sensörler genellikle mekanik bir bağlantı kolu aracılığıyla süspansiyon hareketini algılar ve bu hareketi elektriksel bir sinyale dönüştürerek far kontrol ünitesine iletir. Günümüzde otomotiv uygulamalarında kullanılan seviye sensörlerinin algılama prensibi çoğunlukla Hall etkisi sensör teknolojisine dayanmaktadır. Bununla birlikte bazı uygulamalarda endüktif konum sensörleri de kullanılabilmektedir (Zimmermann & Schmidgall, 2015).

DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde, otomotiv aydınlatma sistemlerinde kullanılan otomatik far seviyelendirme sensörlerinin çalışma prensibi deneysel bir ölçüm üzerinden incelenmiştir. Çalışmanın amacı, araç yükündeki değişimin süspansiyon geometrisini nasıl etkilediğini ve bu değişimin sensör çıkış sinyaline nasıl yansıdığını ortaya koymaktır.

Otomatik far seviyelendirme sistemlerinde kullanılan seviye sensörleri genellikle aracın ön ve arka aks bölgelerine yerleştirilir. Bu sensörler süspansiyon hareketlerini algılayarak aracın gövde eğimi hakkında bilgi üretir. Sensör tarafından üretilen sinyal far kontrol ünitesine iletilir ve böylece far ışık demetinin yol seviyesine uygun açıyla yönlendirilmesi sağlanır.

Bu çalışma kapsamında sensör davranışını incelemek amacıyla iki farklı araç yük durumu oluşturulmuştur:

Referans durum: Araç standart ağırlık koşulunda

Yük durumu: Araç arka bölümüne ek kütle uygulanmış durum

Bu iki farklı durumda sensör çıkış sinyalleri ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

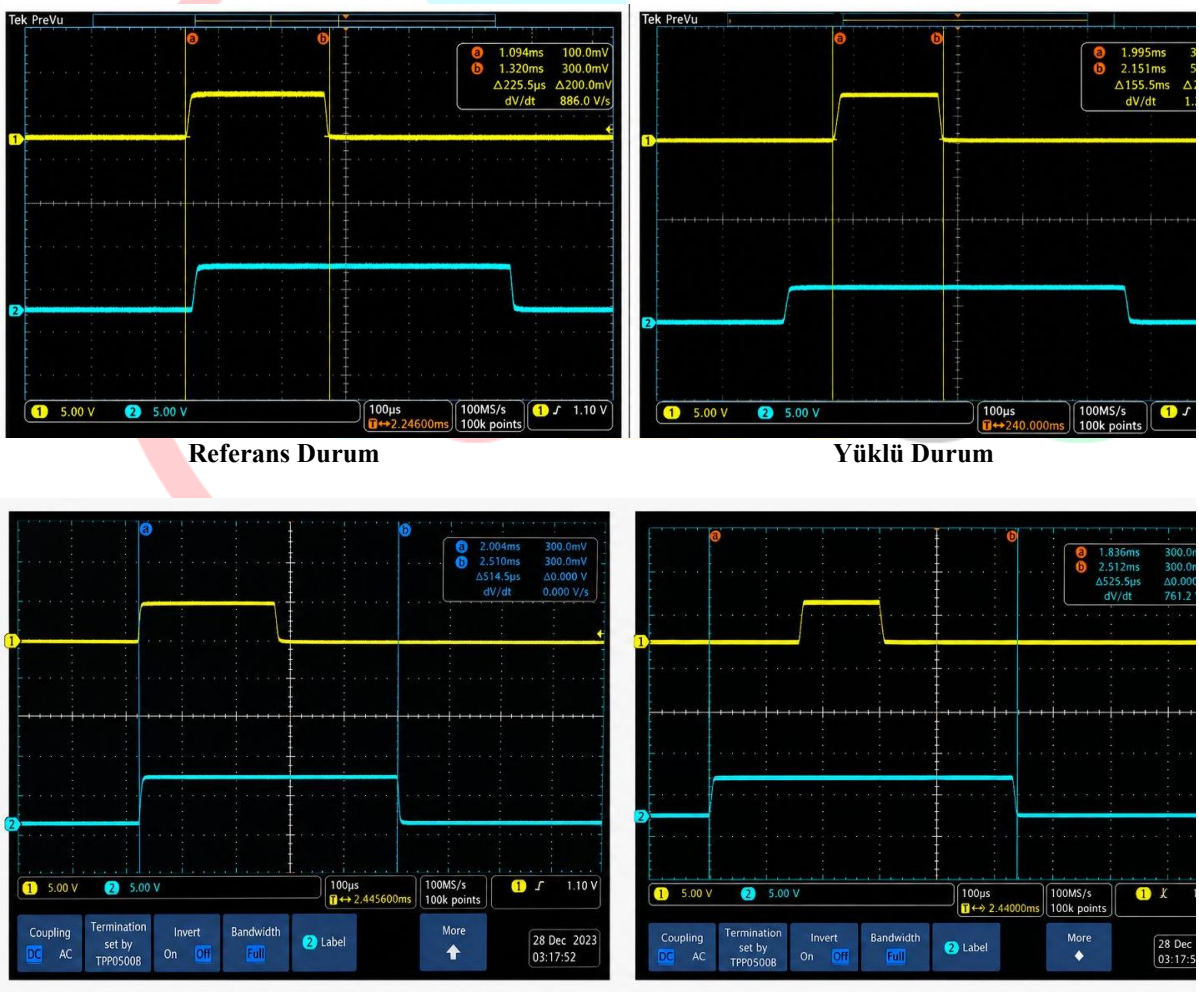
Sensör Çıkış Sinyali Ölçümü

Seviye sensörünün çıkış sinyali bir osiloskop yardımıyla ölçülmüş ve sensörün darbe genişlik modülasyonu (PWM, Pulse Width Modulation) tabanlı bir sinyal ürettiği gözlemlenmiştir. PWM sinyalinde frekans sabit kalırken görev döngüsü sensör kolunun konumuna bağlı olarak değişmektedir. Başka bir ifadeyle, süspansiyon hareketi ile sensör kolunun konumu değişmekte ve bu değişim sensör çıkış sinyalinin görev döngüsünde farklılık oluşturabilmektedir.

Şekil 1'de sensör ölçümlerinden elde edilen örnek sinyal dalga şekilleri gösterilmektedir. Ölçümler sonucunda elde edilen görev döngüsü değerleri ise Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de sunulan sonuçlar, sensör çıkış sinyalinin süspansiyon hareketi ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.

Tablo 1. *Sensör Ölçüm Sonuçları*

Araç Durumu	Arka Sensör Duty Cycle	Ön Sensör Duty Cycle
Referans durum	%22,25	%51,45
Yük uygulanmış durum	%15,55	%52,55



Referans Durum **Yüklü Durum**

Referans Durum *Yüklü Durum*

Şekil 1. *Seviye sensörlerinden elde edilen PWM sinyalleri*

Sensör Davranışının Değerlendirilmesi

Gerçekleştirilen ölçümler incelendiğinde, arka aks seviyelendirme sensörünün araç yükündeki değişimlere duyarlı bir tepki verdiği görülmektedir. Aracın arka bölümüne ek yük uygulanması durumunda arka süspansiyon sisteminde sıkışma meydana gelmekte ve buna bağlı olarak süspansiyon kolunun konumu değişmektedir. Bu değişim, sensör kolunun açısal konumunda bir varyasyona neden olmakta ve sensörün ölçüm mekanizması aracılığıyla elektriksel bir çıkış sinyaline dönüştürülmektedir.

Kullanılan seviyelendirme sensörü, süspansiyon konumunu PWM tabanlı bir çıkış sinyali ile temsil etmektedir. Sensör kolunun açısal konumundaki değişim, PWM sinyalinin görev döngüsünde (duty cycle) değişim olarak ECU tarafından algılanmaktadır. Ölçüm sonuçları, arka aksa yük uygulandığında PWM görev döngüsünün azaldığını göstermektedir. Bu durum, sensörün mekanik konum değişimini doğru şekilde elektriksel sinyale dönüştürdüğünü ve süspansiyon sıkışması ile sensör çıkışı arasında tutarlı bir transfer karakteristiği bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Ön aks seviyelendirme sensörüne ait ölçüm sonuçları incelendiğinde ise PWM görev döngüsünde anlamlı bir değişim gözlenmemiştir. Bunun temel nedeni, uygulanan yükün büyük ölçüde aracın arka aksında yoğunlaşmasıdır. Yük dağılımının arka aks lehine değişmesi sonucunda ön süspansiyon geometrisinde meydana gelen deformasyon sınırlı kalmakta ve bu nedenle sensör kolunun açısal konumunda önemli bir değişim oluşmamaktadır. Sonuç olarak ön aks sensöründen elde edilen PWM görev döngüsü değerleri ölçüm süreci boyunca büyük ölçüde sabit kalmıştır.

Elde edilen bulgular, seviyelendirme sensörünün araç yük dağılımındaki değişimleri doğru şekilde algılayabildiğini ve özellikle arka aks süspansiyon hareketlerini PWM tabanlı bir çıkış sinyali ile güvenilir biçimde temsil ettiğini göstermektedir. Bu davranış, sensörün araç far seviyelendirme sistemi veya süspansiyon kontrol algoritmaları için gerekli olan konum bilgisini sağlayabildiğini doğrulamaktadır.

SONUÇ

Elde edilen deneysel bulgular, araçlarda kullanılan seviyelendirme sensörlerinin çalışma prensibini açık biçimde ortaya koymaktadır. Sensör yapısı içerisinde bulunan mekanik kol, süspansiyon sisteminin dikey hareketi ile birlikte açısal olarak dönmekte ve bu açısal hareket sensör içerisinde yer alan manyetik veya temassız algılama elemanları tarafından algılanmaktadır. Algılanan mekanik konum değişimi sensör elektroniği tarafından elektriksel bir sinyale dönüştürülmektedir.

Sensör devresi, elde edilen konum bilgisini PWM tabanlı bir çıkış sinyaline dönüştürerek araç kontrol ünitesine iletmektedir. Kontrol ünitesi ise PWM sinyalinin görev döngüsünü ölçerek sensör kolunun açısal konumunu hesaplayabilmekte ve buna bağlı olarak süspansiyon yüksekliği hakkında bilgi elde edebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen ölçümler, araç yük dağılımındaki değişimlerin sensör çıkışındaki PWM görev döngüsü üzerinden güvenilir biçimde tespit edilebildiğini göstermektedir. Bu prensip sayesinde araç yük durumundaki değişimler gerçek zamanlı olarak algılanabilmekte ve far seviyelendirme sistemi tarafından far ışık demetinin yönü otomatik

olarak ayarlanabilmektedir. Böylece karşı yönden gelen sürücülerin gözünün kamaşması engellenmekte ve sürüş güvenliğine katkı sağlanmaktadır.

KAYNAKÇA

Bosch. (2018). *Automotive handbook* (10th ed.). Wiley.

Bosch Mobility. (2024). *MEMS sensors for automotive applications*. Bosch.

Fleming, J. (2017). *Sensor technology for automotive applications*. SAE International.

Infineon Technologies. (2024). *Magnetic position sensors for automotive applications*. Infineon Technologies.

Lin, X. (2026). In-vehicle gas sensing and monitoring using MEMS-based sensor arrays. *Chemosensors, 14*(1).

Mohankumar, P., Ajayan, J., Yasodharan, R., Devendiran, D. K., & Sambasivam, R. (2019). A review of micromachined sensors for automotive applications. *Measurement, 140*, 305–322. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.03.051

Qian, H., et al. (2025). Multi-sensor fusion in autonomous driving: A review. *Sensors, 25*.

Sony Semiconductor Solutions. (2024). *Automotive image sensor technologies*. Sony Semiconductor Solutions.

United Nations Economic Commission for Europe. (2019). *UN Regulation No. 48: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices*. UNECE.

Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., & Singer, C. (2016). *Handbook of driver assistance systems*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12352-3

Zimmermann, W., & Schmidgall, R. (2015). *Sensors for automotive applications*. Springer.

6th International
Congress of Engineering and Natural
Sciences

Thermal Runaway E&E Function Designs and Applications

Musa YILMAZ[1]

Abstract

In the transition to the electric vehicle (EV) ecosystem, it is of great importance not only to have efficiency-oriented batteries but also to maintain a strong focus on safety. Due to their inherently high energy and power densities, batteries installed in vehicles pose hazards such as fire and thermal runaway under the influence of factors including short circuits, overcharging, and high temperatures. In this context, the UNECE R100 (Rev.3) standard mandates that vehicle manufacturers develop systems to protect users in the event of thermal runaway. These systems can be addressed separately at the cell, battery, and vehicle levels. Battery Management Systems (BMS) continuously monitor the system through various sensors and diagnostic-capable algorithms, and in the event of thermal runaway, they perform energy cutoff and protection functions. In addition, they transmit thermal runaway information to other Electronic Control Units (ECUs) via various communication protocols (CAN/Ethernet). In this way, beyond the battery level, units managing body functions can also support driver and passenger evacuation through dedicated functions. This paper focuses on vehicle-level functions developed for thermal runaway scenarios. These functions aim to ensure rapid and safe evacuation of users. Examples of such systems include opening vehicle windows within a defined reference range, activating interior lighting, enabling hazard warning flashers, stopping the ventilation fan, and automatically unlocking all locked doors. The study addresses the design process of these functions along with their impact on the vehicle's E&E system architecture.

Keywords: Thermal Runaway, E&E System Design, Battery, Cell, Electronic Control Unit.

[1] E&E Sistem Mühendisi, Tofaş Türk Otomobil Fabrikası, Musa.yilmaz@tofas.com.tr

Giriş

Geçmişten günümüze otomotiv endüstrisi fosil yakıt kaynaklı çalışan içten yanmalı motorlara sahip araçlar geliştirmektedir. Bununla birlikte, küresel ölçekte artan iklim değişikliği, fosil yakıt rezervlerinin azalması ve şehirleşmeye bağlı olarak hava kirliliği gibi sorunlar, ulaşım sektöründe sürdürülebilir çözüm arayışına olan ihtiyacı artırmıştır [1]. Ayrıca, tüketicilerin sürdürülebilirlik konusunda farkındalıklarının artmasıyla birlikte tüketici davranışları da değişmektedir. Bundan dolayı araç geliştiricileri, toplumun beklentileriyle doğru orantılı olarak içten yanmalı motor ve fosil yakıt teknolojilerinin yanı sıra elektrik motorlu ve başta lityum iyon batarya (LIB) olmak üzere, katı hal bataryalar, lityum demir fosfat (LFP), nikel mangan kobalt (NMC) ve benzeri alternatif batarya teknolojilerini kullanan araçlar geliştirmeye yönelmişlerdir. Bu bağlamda, mobilite denilince akla içten yanmalı araçlardan daha çok elektrikli araçlar ve bataryalar gelmeye başlamıştır. Elektrikli araçlar, sürdürülebilir ulaşım ekosistemini tepeden tırnağa değiştiren çok çeşitli teknolojik çözümleri içermektedir [2]. Batarya, plug-in hibrit ve hibrit elektrikli araçlar olarak ayrılan her sınıf, enerji depolama ve güç sistemlerinin farklı bir kombinasyonunu ifade etmektedir [3-4]. Bu dönüşümle birlikte, güvenlik faktörü daha da büyük önem arz etmeye başlamakta ve bu faktör batarya ile çalışan elektrikli araçlar (BEV) için giderek daha acil bir konu haline gelmektedir. Araç üzerinde yapısı itibariyle yüksek enerji ve güç yoğunlukları nedeniyle bataryalar; kısa devre, aşırı şarj, yüksek sıcaklık gibi faktörlerin etkisiyle birlikte yangın ve termal kaçak gibi tehlikeleri de beraberinde getirmektedir. Batarya termal kaçak; aşırı şarj, yüksek sıcaklık ve fiziksel darbe gibi nedenlerden ötürü meydana gelmektedir. İçerisindeki her bir pil aşırı ısındığında meydana gelir ve hücre içindeki sıcaklık ve basıncın hızlı ve kontrol edilemez bir şekilde yükselmesine sebep olur.

UNECE R100 (Rev.3) standardı, termal kaçak durumunda araç içi sürücü ve yolcu güvenliğinin sağlanmasını zorunlu hale getirmektedir. Bu düzenleme, hücre seviyesinde termal kaçak oluşumunun doğrudan engellenmesini şart koşmamakla birlikte, aşağıdaki gereksinimleri açıkça belirtmektedir:

UNECE R100 (Rev.3) standardında yer alan madde 6.15.1 gereği, araç, iç kısa devre sonucu bir hücrede termal kaçak (thermal runaway) meydana geldiğinde, tehlikeli bir duruma dönüşmeden “en az 5 dakika önce” bir uyarı sinyali vermelidir. Bu uyarı, yolcuların aracı güvenli şekilde terk etmeleri için zaman sağlamak üzere tasarlanmıştır.

Sistem; uyarı mekanizmaları, yüksek gerilim izolasyonu ve gaz/alev yayılımının sınırlandırılması gibi kabin güvenliğini arttırıcı fonksiyonları yerine getirmelidir.

Batarya yönetim sistemleri (BYS) termal kaçak durumlarını fark edebilmekte ve risk durumunda sahip olduğu yüksek voltaj kontaktörlerini açarak yüksek voltaj çıkış kaynağını kapatabilmektedir. Ayrıca, BYS termal kaçak durumunu araç haberleşme ağı (CAN/Ethernet) üzerinden diğer elektrik kontrol ünitelerine (EKÜ) iletebilmektedir. BYS'in batarya seviyesinde aldığı önlemlere ek olarak, araç E&E sistem seviyesinde sürücü ve yolcuların güvenliğini garanti altına almayı hedefleyen çeşitli uyarılar ve tahliye kolaylığı sağlayan fonksiyonlar da geliştirilmektedir.

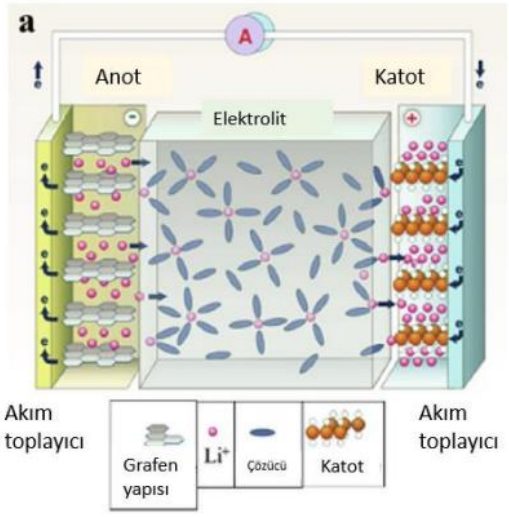
Bu bildirinin amacı; termal kaçak tespit edildiğinde araç seviyesinde tetiklenen fonksiyonlarını (Sürücü ve yolcu camların indirilmesi, Kapı kilidi açılması, Kapı çift yönlü kilidin açılması (Undeadlock), Çocuk kilidi açılması (Unchildlock), Klima sistemi (HVAC) deaktivasyonu, Dörtlü flaşör ve korna bildirimi) E&E sistem mimarisi üzerinden açıklamaktır.

Yöntem

Bu çalışma kapsamında termal kaçak senaryolarının araç üzerindeki E&E sistemlerine etkileri özellikle body seviyesi fonksiyonlar açısından ele alınmıştır. Çalışma kapsamında literatür taraması yapılarak akademik yayınlar, teknik çalışmalar değerlendirilmiştir. Analizlerde, termal kaçak tespiti sonrasında kullanıcı tahliyesi ve araç güvenliğinin sağlanmasına yönelik gerçekleştirilen fonksiyonel aksiyonlar incelenmiştir. Bu doğrultuda otomatik kapı kilidi açma, iç aydınlatma aktivasyonu, dörtlü flaşör aktivasyonu, cam kontrol stratejileri ve kullanıcı bilgilendirme senaryoları değerlendirilmiştir. Ayrıca gövde kontrol modülü başta olmak üzere ilgili kontrol ünitelerinin termal kaçak durumunda gerçekleştirdiği haberleşme ve durum yönetimi davranışları analiz edilerek sistemin güvenli durum geçişleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2. Termal Kaçak Durumlarında Batarya Seviyesinde Güvenlik Stratejileri ve Kontrol Algoritmaları

Araç üzerinde konumlandırılan batarya paketi, başta lityum iyon batarya (LIB) olmak üzere; lityum demir fosfat (LFP), nikel mangan kobalt (NMC), nikel kobalt alüminyum (NCA) gibi farklı lityum iyon kimyaları ile katı hal batarya (solid-state) gibi alternatif batarya teknolojilerini kapsayabilecek şekilde tasarlanabilmektedir. Bu batarya sistemleri çok katmanlı hücre–modül–paket mimarisine sahip olup, enerji ve güç gereksinimlerini karşılamak amacıyla ölçeklenebilir şekilde tasarlanmaktadır. Modüller genellikle yüksek sistem voltajı elde etmek için birbirine seri bağlanırlar. Bununla birlikte, her modülün içerisinde birbirine seri ve paralel şekilde bağlanmış birçok hücre bulunmaktadır. Hücreler arası Anot ve Katot katmanlarını birbirinden ayıran elektrolit adı verilen bir ayırıcı katman vardır. Bununla birlikte, hücre seviyesinde oluşabilecek elektriksel ve termal anormalliklerin üst seviyelere yayılma potansiyeli nedeniyle termal kaçak (thermal runaway) açısından kritik bir mühendislik değerlendirme alanı oluşturmaktadır.



Şekil 1. LIB bileşenleri ve reaksiyonları [5]

Termal kaçak, harici ısıtma veya hücre içindeki iç ısı üretimi nedeniyle hücre sıcaklığının artmasından kaynaklanır. Sıcaklık artmaya devam ederse, elektrolit kaynar ve hücre içindeki basınç artar **[6]**.

Basıncın kritik bir noktaya ulaşması durumunda, hücre yapısal bütünlüğünü kaybederek yırtılabilir ve yanıcı gazlar ve bazı durumlarda yüksek hızda fırlayan parçacıklar açığa çıkabilir **[7]**.

Mekanik, elektriksel veya termal kötüye kullanım, hücre içinde ekzotermik bir zincir reaksiyonu içeren bir termal kaçak reaksiyonuna neden olabilir. Bu reaksiyon, binlerce derecelik bir sıcaklık artışına neden olur ve sonuçta kendiliğinden yanmaya yol açar **[8]**.

1. Mekanik kötüye kullanım: Batarya paketinin almış olduğu yıkıcı hasar sebebiyle hücreler arası separatörün delinmesi veya yer değiştirmesi sonucunda modüller içerisindeki anot/katot katmanlarında iç kısa devre oluşur. Başlıca sebeplerinden birisi araç kaza yaptığında, batarya paketi hasar görür. **[9]**.

2. Elektriksel kötüye kullanım: Batarya geliştiricilerinin tanımladıkları referans aralıklarının dışında aşırı şarj ve aşırı deşarj gibi durumlardan dolayı anot üzerindeki katmanda erime meydana gelebilmektedir. Bu erimeden dolayı iç kısa devre meydana gelir.

3. Termal kötüye kullanım: Aşırı şarj, iç kısa devre, yüksek akım ve yetersiz termal yönetim gibi sebepler batarya sıcaklığının 90-120 ◦C bandına çıkmasına sebep olmaktadır. Bu bağlamda, 90–120 ◦C aralığındaki iç sıcaklık, batarya içindeki katı elektrolit ara faz tabakasının ekzotermik olarak ayrışmasına neden olur. 200 ◦C'nin üzerindeki sıcaklıklarda hidrokarbon elektrolit ayrışabilir ve ısı açığa çıkarabilir **[10]**.

Batarya yönetim sistemi (BYS) her bir hücre davranışını sahip olduğu çeşitli sensörler ve diyagnostik prosedürler sayesinde izleyebilmektedir. Örneğin, batarya yönetim sistemi her bir hücrenin sahip olduğu anlık voltaj, akım ve sıcaklık değerlerini 24 saat boyunca izleyebilme kabiliyetine sahiptir. Bunu çoklu sensör izleme kabiliyetine sayesinde yapabilmektedir. Çoklu sensör izleme sistemi, elektriksel/termal parametreler, gaz sensörleri ve titreşim sensörleri gibi

kaynaklardan beslenir. Anlık olarak toplanan bilgiler, BYS içerisinde işlenir ve olası termal kaçak durumunda, batarya içerisinde çeşitli önlemler alınır.

1. Yüksek voltaj iletimini durdurmak için kontaktörlerin açılması.

2. Direkt akım (DC) şarj istasyonu ile haberleşip (PLC/CCS protokolleri) hızlı şarj işlemini durdurmak.

3. Elektrikli araç kontrol ünitesi (EAKÜ) tarafından şarj soket kilidini açmak.

Tablo 1. BYS hata izleme tablosu [11]

Yaygın Hata / Anormallik	Tespit Eden	BYS Yanıtı
Aşırı gerilim / Aşırı şarj	Hücre voltaj sensörleri, voltaj algoritması	Şarjı kes/Hücreleri dengele
Aşırı Akım veya Kısa Devre	Akım Sensör	Elektrik akımının derhal kesilmesi
Gaz Emisyon (CO, H_2)	Gaz sensörler	Termal kaçak için erken alarm
Mekanik darbe veya Titreşim	İvmeölçer	Acil durum bağlantı kesme

BYS ve EAKÜ bu önleyici algoritmalara ek olarak, termal kaçak bilgisini CAN/Ethernet üzerinden diğer elektronik kontrol üniteleri ile paylaşmaktadır. Bu sayede, gövde kontrol ünitesi (GKM) ve gösterge paneli (GP) de çeşitli sistemler/uyarılar ile sürücü ve yolcuları güvenli tahliye edecek fonksiyonları başlatırlar.

3. Termal Kaçak Senaryolarında Yolcu Tahliyesini ve Güvenliğini Destekleyen E&E Sistem Fonksiyonları

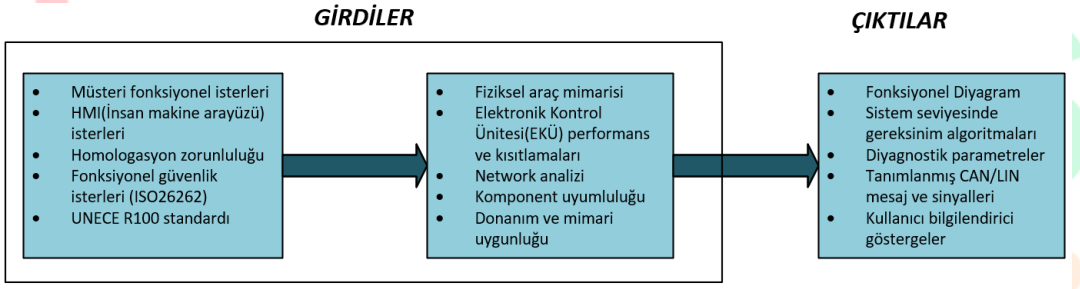
UNECE R100 (Rev.3) standardının, "Termal kaçak durumunda sürücü ve yolcular korunmalı, erken uyarı sağlanmalı ve hücreden hücreye termal kaçak yayılımı, yolcuların aracı güvenli şekilde terk edebileceği süre boyunca önlenmeli veya geciktirilmelidir" genel gereksinimine istinaden, otomotiv üreticilerinin standardize ettikleri uygulama aşamaları bulunmaktadır. Bu standartlarda yer alan fonksiyon isterlerine göre araç E&E sistem seviyesinde fonksiyon tasarımları yapılmaktadır. Regülasyonlar doğrudan bu fonksiyonları zorunlu kılmasa da yolcu tahliyesi ve ikincil risklerin azaltılması hedefleri doğrultusunda OEM seviyesinde bu fonksiyonlar tasarım gereksinimi haline gelmiştir. Bu kapsamda, termal kaçak senaryolarında yolcu güvenliğini ve tahliyeyi desteklemek amacıyla; Camların açılması, Kapı kilidi açma, Çift kapı kilidi açma/ Çocuk kilidi açma, İç aydınlatma aktivasyonu / Dörtlü flaşör açılması, Klima sistemi (HVAC) fan kapatılması ve sürücü uyarı sistemleri gibi araç içi güvenlik fonksiyonları ile değerlendirilmektedir. Bu bölümde tanımlanan her bir E&E fonksiyonu, termal kaçak senaryolarında ortaya çıkabilecek belirli yolcu güvenliği risklerini azaltmaya yönelik olarak ele alınmış; fonksiyonların amacı bu riskler üzerinden tanımlanmış ve buna bağlı olarak sistem seviyesinde gereksinimler oluşturulmuştur. Sistem fonksiyonları tasarlanırken, E&E mimari, network, fonksiyonel güvenlik (ISO26262), kullanıcı arayüzü (HMI) ve araç konfigürasyon analizleri yapılmaktadır. Bu bağlamda, yapılan analizler sonrası fonksiyon tasarımlarının etki analizi gerçekleştirilir. Etki analizine paralel olarak, yayınlanan müşteri fonksiyonel gereksinimleri incelenir ve tasarlanması öngörülen fonksiyonun temel

amacı, tanımlanmış parametreler ile netleştirilir. Tüm bu etkiler ve girdiler göz önünde bulundurularak sistem güncellemesi veya yeni sistem tasarımı ile değişiklik bildirimine gidilir.

3.1 E&E Sistem Fonksiyonlarının Tasarımı

Bir önceki bölümde termal kaçak esnasında kullanıcıyı kolay ve güvenli tahliye etme gerekliliğinden ve bu özelliklerin neler olduğundan bahsedilmiştir. Bu bölümde, fonksiyonların her biri E&E sistem gereksinim seviyesinde detaylı şekilde ele alınacaktır. Araç üzerindeki her bir fonksiyon bir veya birden fazla elektronik kontrol ünitesi (EKÜ) tarafından yönetilebilmektedir. Her bir fonksiyon araç bir özelliğe karşılık gelmektedir.

Öncelikli olarak tasarlanacak fonksiyonun hangi elektronik kontrol ünitesine konumlandırılacağına karar verilir. Bu bağlamda, entegrasyon yapılacak ünitenin performansı, donanım yapısı, sahip olduğu pin yapısı gibi teknik özellikleri analiz edilir. Şekil 1'de görüldüğü üzere, söz konusu analiz süreci ve ilgili girdiler/çıktılar gösterilmektedir. Daha sonra, fonksiyon tasarımına başlanırken müşteri fonksiyonel isterleri, homologasyon isterleri, network topoloji analizleri, fonksiyonel güvenlik isterleri (ISO26262) ve UNECE R100 standardı gibi girdiler referans alınarak E&E sistem gereksinim doküman tasarımına başlanır. Kullanıcıya tahliye desteği sağlamayı hedefleyen E&E sistem fonksiyonlarının, araç fonksiyonel güvenlik (FUSA) hedeflerine katkı sağlayabilecek fonksiyonlar olarak değerlendirilmesi mümkündür. ISO 26262 kapsamında fonksiyonel güvenlik yaklaşımı, temelde tehlikeli durumların oluşmasının önlenmesini ve toplam riskin azaltılmasını hedeflemektedir. Tehlike analizi ve risk değerlendirmesi (HARA) sonuçlarına bağlı olarak, ilgili fonksiyonlar için otomotiv güvenlik bütünlüğü seviyesi (ASIL) belirlenmektedir.



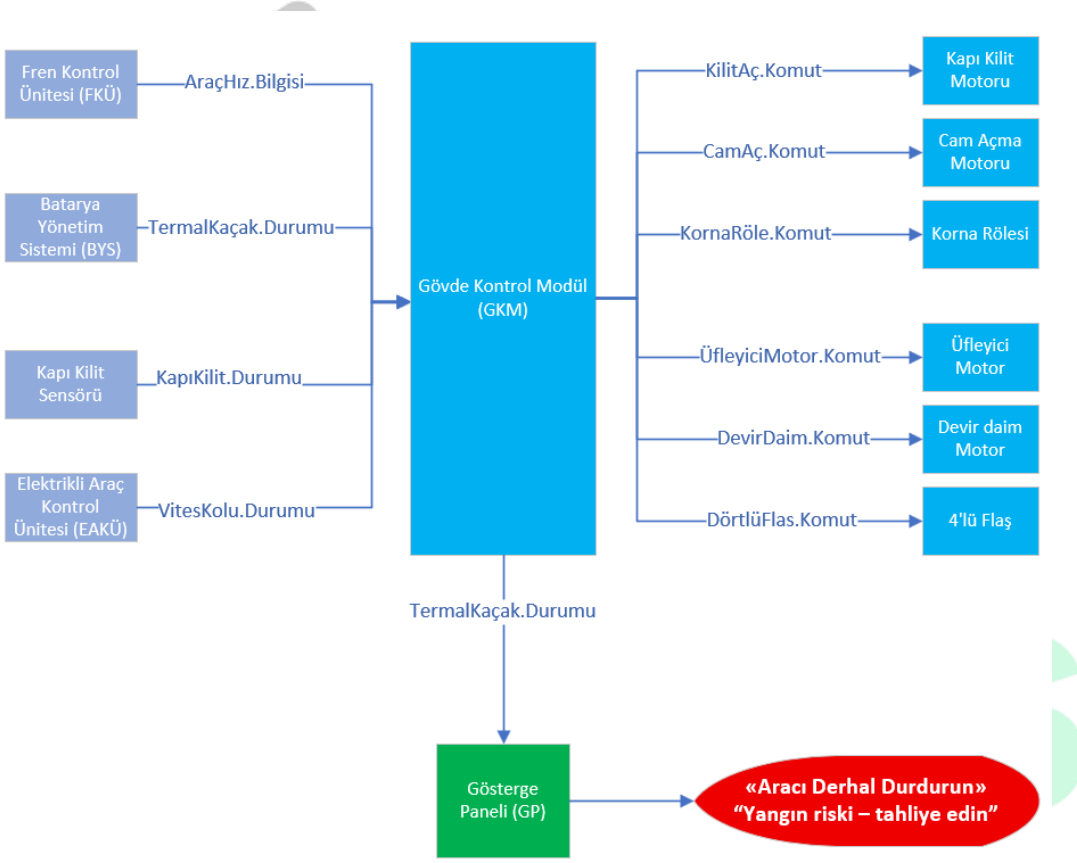
Şekil 2. Araç E&E Sistem Gereksinim Tasarımı

E&E sistem gereksinim dokümanları ilgili elektronik fonksiyon ile alakalı tüm teknik detayları içermektedir; INCOSE tarafından tanımlanan standart gereksinim yazım prensiplerine göre, gereksinimler ölçülebilir ve nesnel kriterler içermeli, böylece doğrulama ve hata ayıklama faaliyetleri sırasında açık ve anlaşılır olmalıdır. Bu doğrultuda gereksinimlerin sistematik olarak yönetilebilmesi ve izlenebilirliğin sağlanabilmesi amacıyla, yazılan her gereksinim parçacığına bir gereksinim numarası atanmıştır. Örneğin SR-TR-XX system requirement (Sistem gereksinimi) thermal runaway (termal kaçak durumu) anlamına gelmektedir. Bu sayede, gereksinimler arası ilişki kurarken sabit gereksinim numarası kolayca kullanılabilir. Ek olarak, gereksinim numarasına sahip olmak test ve validasyon süreçlerinde karmaşıklığın önüne geçilmiş olur. Bu gereksinimler ilgili fonksiyonu yöneten elektrik kontrol ünitesini (EKÜ) içermektedir. Tanımlanan E&E sistem gereksinim dokümanları diyagnostik ve kalibrasyon

gereksinimlerini de içermektedirler. Bu sayede, hata tanımlanmasını ve fonksiyona kapat-aç müdahalesi kabiliyeti kazandırılmış olur.

3.2 Fonksiyonel Diyagram

Diğer yandan, artan E&E sistem fonksiyonların birbirleriyle etkileşimi sebebiyle, fonksiyon tasarlanırken fonksiyonel diyagram (Şekil 3. Fonksiyonel Diyagram) yöntemi ile giriş-çıkış sinyalleri açık bir şekilde tanımlanmaktadır. Fonksiyonel diyagram ilgili elektronik kontrol ünitesi, aktüatör, anahtar (switch)ve CAN/ETHERNET/LIN... sinyallerini içermektedir.



Şekil 3. Fonksiyonel Diyagram

3.3 Gövde Kontrol Modülü (GKM) Üzerinde Yönetilen Fonksiyonel Gereksinimler

Fonksiyonel gereksinimler, E&E sistem mimarisi içerisinde yer alan tüm elektronik bileşenlerin üstlendikleri görev, sorumluluk ve sistem seviyesindeki fonksiyonel davranışlarının tanımlandığı bölümü ifade etmektedir. Bu kapsamda, her bir elektronik bileşen için ilgili alt başlıklar altında fonksiyonel davranışlar, çalışma koşulları ve kontrol lojikleri detaylandırılmıştır.

Fonksiyonel tanımlamalar oluşturulurken, sistem mühendisliği yaklaşımı doğrultusunda belirlenen sinyal sınıflandırmaları esas alınmış olup, sinyaller haberleşme altyapısı ve fiziksel iletim yöntemlerine göre kategorize edilmiştir. Bu doğrultuda kullanılan sinyal sınıflandırmaları aşağıda özetlenmektedir:

• CAN tabanlı haberleşme sinyalleri:

AraçHız.Bilgisi, TermalKaçak.Durumu, VitesKolu.Durumu

• Kablo(hardwired)sinyalleri:

KapıKilit.Durumu, KilitAç.Komut, CamAç.Komut, KornaRöle.Komut, ÜfleyiciMotor.Komut, DevirDaim.Komut, DörtlüFlaş.Komut

Fonksiyonel gereksinimlerin tasarım ve doğrulama süreçlerinde kullanılmak üzere kalibre edilebilir parametreler de tanımlanmıştır. Bu parametreler, sistem davranışının araç platformu, kullanım senaryosu ve güvenlik gereksinimlerine göre optimize edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda kullanılan temel parametreler aşağıda belirtilmiştir:

• T_Zaman: Tanımlanan kalibre edilebilir zaman parametresi

• V_Hız: Tanımlanan kalibre edilebilir hız parametresi

Aşağıdaki fonksiyonlar sadece "AraçTipi" BEV (Elektrikli araç) ise geçerli olacaktır. Termal kaçak durumunda, Elektrikli araç kontrol ünitesi (EAKÜ) tarafından gönderilen TermalKaçakDurumu sinyali gövde kontrol modülü (GKM) tarafından aşağıdaki gibi işlenmektedir.

3.3.1 Sürücü ve Yolcu Camlarının İndirilmesi.

Termal kaçak durumunda kabin içi basıncın azaltılması ve duman tahliyesinin desteklenmesi amacıyla cam kontrol fonksiyonu devreye alınmaktadır. Batarya yönetim sistemi tarafından gönderilen TermalKaçak.Durumu sinyalinin aktif olması koşullarında Gövde Kontrol Modülü (GKM) tarafından bir gecikme zamanlayıcısı başlatılmaktadır. Tanımlanan süre (T_zaman) sonunda cam açma komutu aktif edilerek camların aşağı yönde hareket etmesi sağlanmaktadır.

Fonksiyon tasarımında güvenli arıza (fail-safe) yaklaşımı benimsenmiştir. TermalKaçak.Durumu sinyalinin iletişim kaybı sebebiyle alınamaması durumunda sistem sinyali aktif olarak varsaymakta, hata kaydı oluşturmakta ve gecikme süresi sonunda cam açma fonksiyonunu yine devreye almaktadır.

3.3.2 Kapı Erişim ve Kilit Yönetimi Fonksiyonları.

Termal kaçak senaryosunda araç içerisindeki yolcuların hızlı ve güvenli şekilde aracı tahliye edilebilmesi amacıyla kapı erişim ve kilit yönetimi fonksiyonları otomatik olarak devreye girmektedir. Bu bağlamda standart kilit, çift yönlü kilit (deadlock) ve elektronik kapı kolu (E-Latch) sistemiyle entegre çalışan çocuk kilidi fonksiyonları kontrol edilmektedir.

TermalKaçak.Durumu bilgisinin aktif olması ile Gövde Kontrol Modülü (GKM) tarafından bir gecikme zamanlayıcısı başlatılmaktadır. Araç hızının tanımlanan değere eşit olması (V_hız) koşuluyla, gecikme süresi (T_zaman) tamamlandığında sistem mevcut kilit durumunu kontrol etmektedir.

Bu değerlendirme sonucunda:

• Kapılar kilitli ise kilit açma komutu tetiklenmekte,

• Çift yönlü kilit (deadlock) aktif ise devre dışı bırakılmakta,

• E-Latch sistemine bağlı çocuk kilidi aktif ise yazılım üzerinden iptal edilmektedir.

Fonksiyon tasarımında güvenli arıza (fail-safe) yaklaşımı benimsenmiştir. TermalKaçak.Durumu sinyalinin iletişim kaybı sebebiyle alınamaması durumunda sistem sinyali aktif olarak varsaymakta, hata kaydı oluşturmakta ve gecikme süresi sonunda ilgili kilit açma fonksiyonunu devreye almaktadır.

3.3.3 Klima Sistemi (HVAC) Deaktivasyonu.

Termal kaçak durumunda kabin içerisinde zararlı gaz birikimini engellemek amacıyla havalandırma sistemi güvenli konfigürasyona alınmaktadır. Bu kapsamda resirkülasyon fonksiyonu devre dışı bırakılarak dış ortam havasının kabine alınması hedeflenmektedir.

TermalKaçak.Durumu bilgisinin aktif olması ile Gövde Kontrol Modülü (GKM) tarafından üfleyici motor kapatılmakta ve hava sirkülasyonu devre dışı bırakılmaktadır. Aynı anda resirkülasyon (devir daim) komutu kapalı konuma getirilerek sistem dış hava moduna geçirilmektedir.

Bu yaklaşım ile araç hızından bağımsız olarak kabin hava güvenliğinin desteklenmesi amaçlanmaktadır.

3.3.4 Görsel ve İşitsel Uyarı Fonksiyonu.

Termal kaçak durumunda hem araç içerisindeki yolcuların hem de araç çevresinde bulunan kişilerin bilgilendirilmesi amacıyla görsel ve işitsel uyarı fonksiyonu devreye alınmaktadır. Bu kapsamda dörtlü flaşörler ve korna birlikte kullanılarak çevresel farkındalık oluşturulması hedeflenmektedir.

TermalKaçak.Durumu bilgisinin aktif olması durumunda, araç park konumunda (VitesKolu.Durumu = P) ve tanımlanan hız değerinde (AraçHız.Bilgisi = V_hız) ise, Gövde Kontrol Modülü (GKM) tarafından korna rölesi ve dörtlü flaşör komutu aktif edilmektedir.

Araç hareket halinde ise veya vites kolu park konumunda değilse, TermalKaçakDurumu sinyalinin tanımlanan süre (T_zaman) boyunca aktif kalması halinde yine korna ve dörtlü flaşör komutları devreye alınmaktadır.

Bu yapı ile hem park halindeki araçlarda anlık uyarı sağlanmakta hem de sürüş esnasında oluşabilecek geçici tetiklemelere karşı kontrollü bir aktivasyon stratejisi uygulanmaktadır.

3.4 Gösterge Paneli (GP) Üzerinde Yönetilen Fonksiyonlar

Termal kaçak durumunda sürücünün durumu hızlı ve doğru şekilde değerlendirebilmesi amacıyla gösterge paneli üzerinden kritik uyarılar sağlanmaktadır. Bu uyarılar sürücüyü aracı güvenli şekilde durdurmaya ve gerekli tahliye aksiyonunu almaya yönlendirmeyi amaçlamaktadır.

3.4.1 «Aracı Derhal Durdurun» Uyarısı

TermalKaçak.Durumu bilgisinin aktif olması ile birlikte Gösterge Paneli (GP) üzerinde «Aracı Derhal Durdurun» mesajı görüntülenmektedir. Bu uyarı, sürücünün aracı kontrollü şekilde durdurmasını ve güvenli konuma almasını hedeflemektedir.

3.4.2 «Yangın Riski – Tahliye Edin» Uyarısı

TermalKaçak.Durumu bilgisinin aktif olması durumunda Gösterge Paneli (GP) üzerinde «Yangın Riski – Tahliye Edin» mesajı da aktif edilmektedir. Bu gösterim, yolcuların aracı terk etmesi gerektiğine yönelik açık ve doğrudan bir yönlendirme sağlamaktadır.

Sonuçlar

Bu çalışmada, elektrikli araçlarda termal kaçak (thermal runaway) senaryoları yalnızca batarya ve hücre seviyesinde ele alınmamış; buna ek olarak, E&E mimarisi kapsamında araç seviyesinde uygulanabilecek fonksiyonel sistem tasarım yaklaşımları incelenmiştir. Özellikle GKM ve ilişkili sensör, röle, aktüatörler üzerinden gerçekleştirilebilen güvenlik ve tahliye destekleyici fonksiyonlar, yolcu güvenliğini artıran ve önem arz eden kritik unsurlar olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, termal kaçak gibi çok hızlı ve aniden gelişen yüksek risk içeren olaylarda, hızlı bir şekilde algılama kadar olay sonrası kullanıcıya sağlanan destekleyici fonksiyonların da hayati önem arz ettiğini göstermektedir. Kapı kilitlerinin otomatik olarak açılması, camların kontrollü şekilde indirilmesi, iç ve dış görsel/işitsel uyarıların aktive edilmesi gibi E&E fonksiyonları, kullanıcıların aracı hızlı ve güvenli bir şekilde terk edebilmesini desteklemektedir. Çalışma kapsamında değerlendirilen senaryolar, batarya yönetim sistemi (BYS) tarafından tespit edilen termal kaçak durumunun, araç içi ağlar (CAN, Ethernet vb.) üzerinden GKM ve diğer ilgili ECU'lara iletilmesiyle, merkezi ve koordineli bir E&E sistem fonksiyon zincirinin oluşturulabileceğini ortaya koymuştur. Bu yaklaşım, termal kaçak yönetiminin yalnızca enerji depolama bileşenleriyle sınırlı kalmaması gerektiğini, araç genelinde kullanıcıya sunulabilecek güvenli tahliye sistemleri gerektiğini göstermektedir. Bu tasarımlar yapılırken fonksiyonel güvenlik perspektifinden uzaklaşmadan çalışılması gerektiği anlaşılmıştır. Sonuç olarak, E&E sistem fonksiyonlarının termal kaçak senaryolarına entegrasyonu; yolcu güvenliğini artıran, tahliye süresini kısaltan ve olayın sonuçlarını hafifleten önemli bir tasarım yaklaşımı sunmaktadır. Yakın gelecekte batarya termal kaçak yönetiminin yalnızca olay sonrası müdahaleye değil, erken kaçak tespit ve yayılımın geciktirilmesi üzerine duran çok katmanlı güvenlik sistemlerine evrilmesi öngörülmektedir. Batarya hücre kimyası iyileştirmeleri, yüksek gelişmişlik seviyesinde paket izolasyon teknikleri ve öngörü hassasiyeti kuvvetli algoritmaların sisteme entegrasyonu ile sistem seviyesinde daha erken tespit eden ve önceden müdahale eden güvenlik stratejileri yaygınlaşacaktır. Diğer yandan, gelecekteki araç E&E mimarilerinde, termal kaçak senaryolarına yönelik kullanılabilecek E-call ve Bulut sistemine (Cloud) olay raporlanması incelenecektir.

Referanslar

[1] Uydur, C.Ç. Elektrikli Araç Tasarımında Batarya Teknolojileri: Yapı, Performans ve Entegrasyon Stratejileri. Trakya Üniversitesi.

[2] Modak, A. (2023). Design to Control a Thermal Runaway in Battery Electric Vehicles (BEVs) (master's thesis). KTH Royal Institute of Technology.

[3] Savari, G.F. et al. Assessment of charging technologies, infrastructure and charging station recommendation schemes of electric vehicles: A review. Ain Shams Eng J, 14 (2023), Article 101938.

[4] Sharma, S., Panwar, A.K., Tripathi, M.M. Storage technologies for electric vehicles. J Traffic Transp Eng (english Ed), 7 (2020), pp. 340-361.

[5] Odabaşı, M.S. Toplu Taşımada Kullanılan Elektrikli Otobüslerin Batarya Paketinin Fiziksel Verilerinin Karşılaştırılması (4-5).

[6] Hare, G. Lithium Batteries—What's the Problem? Branz. Report: No.174; Fire and Emergency New Zealand, 2019.

[7] Mier, F.A. et al. Overcharge and Thermal Destructive Testing of Lithium Metal Oxide and Lithium Metal Phosphate Batteries. J. Energy Storage 2017, 13, 378-386.

[8] Finegan, D.P. et al. The application of data-driven methods and physics-based learning for improving battery safety. Joule 5, 316-329 (2021).

[9] Shahid, S., Agelin-Chaab, M. A review of Thermal Runaway Prevention and Mitigation Strategies for Lithium-Ion Batteries. Energy Conversion and Management: X, 16, 100310, 2022.

[10] Un, C., Aydın, K. Thermal Runaway and Fire Suppression Applications for Different Types of Lithium-Ion Batteries.

[11] Bonnen Battery. What Is a Battery Fault Self-Diagnostic System in a BMS? (2025). https://www.bonnenbatteries.com/what-is-a-battery-fault-self-diagnostic-system-in-bms/

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Impact of Gaussian Noise and Spatial Filtering on MobileNetV2-Based Breast Cancer Histopathological Image Classification

Samiullah SHIRZAD [1]
Murat Alparslan GUNGOR [2]

Abstract

Breast cancer continues to be a major cause of cancer-related deaths among women worldwide. Histopathological examination plays a critical role in the definitive diagnosis of breast carcinoma. Deep learning models such as MobileNetV2 have emerged as effective tools for the automated diagnosis of Invasive Ductal Carcinoma (IDC) in histopathological images. However, benign and malignant histopathological images may be corrupted by noise artifacts, including Gaussian noise, which can reduce the robustness and accuracy of deep learning-based classification models. In this study, the effects of average and median filters on the benign-malignant classification performance of MobileNetV2 using histopathological images were investigated. First, Gaussian noise at different noise levels was added to the histopathological test images. Subsequently, the noisy test images were filtered using spatial filters with different kernel sizes and characteristics. The classification performance of the MobileNetV2 model was then evaluated on both filtered and unfiltered images. Experimental results showed that median filtering generally provided better classification performance than average filtering, particularly at larger kernel sizes. Under low Gaussian noise, the 9×9 median filter achieved the highest accuracy of 66.60%, while under high Gaussian noise, the 7×7 median filter achieved the best performance with an accuracy of 62.20%. Considering both Gaussian noise levels together, the 7×7 median filter can be regarded as the most suitable single filtering option, achieving a near-best accuracy of 64.93% under low noise and the highest accuracy of 62.20% under high noise. These findings indicate that an appropriately selected median filter, particularly the 7×7 median filter, can improve the robustness of deep learning-based histopathological image classification in noisy environments.

Keywords: Gaussian Noise, Breast Cancer Histopathology, MobileNetV2, Median Filter, Average Filter

[1]MSc student, Hitit University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering, Orcid: 0009-0004-1074-0958
[2]Assoc. Prof. Dr, Hitit University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering, Orcid: 0000-0001-7446-7808

1. Introduction

Breast cancer continues to represent a major global health burden, being one of the most commonly diagnosed and fatal cancer types among women worldwide, as reported by the World Health Organization (WHO) [1] and Siegel et al. [2]. In clinical practice, histopathological examination is considered the definitive method for confirming breast carcinoma, as emphasized by Gurcan et al. [3]. Recently, deep learning techniques, particularly Convolutional Neural Networks (CNNs), have gained considerable attention in the automated analysis of histopathological images. Owing to their ability to learn hierarchical and discriminative features directly from image data, CNN-based approaches have demonstrated remarkable potential in breast cancer detection and classification, reducing the dependency on handcrafted feature extraction methods. In this context, MobileNetV2, a lightweight and efficient CNN architecture proposed by Sandler et al. [4], has been commonly employed for image classification tasks due to its reduced computational complexity and strong feature extraction capability.

Despite the promising performance of CNN-based models, the reliability of histopathological image classification may be affected by image degradation factors such as noise. A wide range of noise types can be observed in images. Gaussian noise, often caused by sensor limitations and electronic circuit interference, is widely used as a common model for image noise [5,6]. Gaussian noise can distort fine tissue structures and reduce the discriminative information required for accurate benign–malignant classification. Thus, improving the robustness of CNN-based classification systems under noisy conditions remains an important research issue. To address this issue, conventional spatial filtering techniques such as average and median filters can be applied as preprocessing methods to reduce the effects of noise before classification. Therefore, selecting an appropriate filtering technique and kernel size is crucial for preserving diagnostic image information and improving classification performance under noisy conditions.

In this study, the effects of average and median filters with different kernel sizes on the benign–malignant classification performance of MobileNetV2 were investigated using Gaussian noise-corrupted histopathological images. First, Gaussian noise at different noise levels was added to the histopathological test images. Then, the noisy images were filtered using average and median filters with various kernel sizes and characteristics. Finally, the classification performance of the MobileNetV2 model was evaluated on both filtered and unfiltered images to determine the most suitable preprocessing strategy. As a result, this study aims to evaluate how different levels of Gaussian noise affect the classification performance of MobileNetV2 and to determine whether average or median filtering provides a more effective preprocessing strategy for histopathological image classification on the selected dataset.

2. Materials and Methods

In this study, we used the Breast Histopathology Image Dataset [7] to evaluate the performance of the MobileNetV2 model on Gaussian-noise images. A sample image from this dataset is shown in Figure 1.

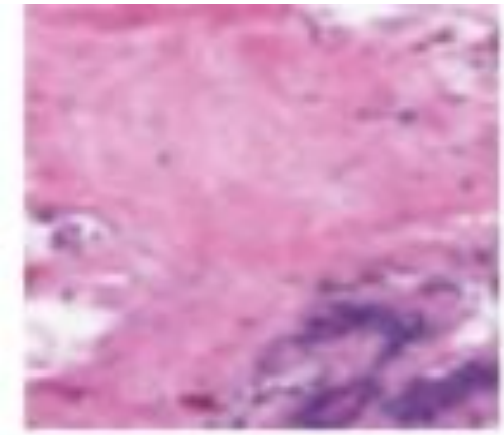


Figure 1. A sample image from the dataset used in this study

To evaluate the effect of noise on classification performance, Gaussian noise was artificially added to the original images. Two different noise levels, referred to as low noise and high noise, were used in this study. Figure 2 shows the low-noise and high-noise images generated from the sample image presented in Figure 1.

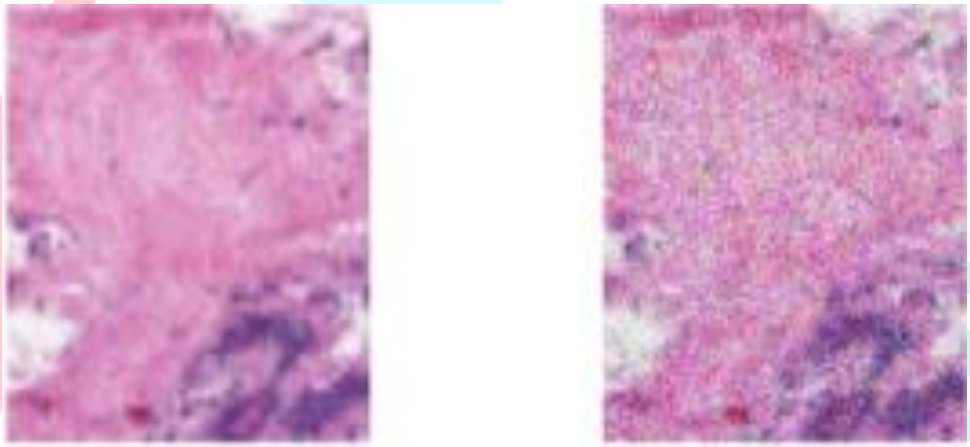


Figure 2. Gaussian noise-corrupted versions of the sample image: low-noise image on the left and high-noise image on the right.

Denoising filters aim to suppress noise in noisy images while preserving essential image information. In this study, two types of denoising filters were employed: median and average filters. The median filter replaces the center pixel of a predefined window with the median value of the pixels within that window. To obtain this value, the pixel intensities in the window are first arranged in numerical order, and the middle value is then selected. This median value is subsequently assigned to the central pixel. The average filters used in this paper are shown in Figure 3. The standard average filter smooths an image by calculating the mean value of the pixels within a selected window. In this filter, all kernel coefficients are equal to 1, and the resulting sum is divided by 9 for a 3 × 3 window. In contrast, the weighted average filter assigns different coefficients to the pixels in the window, allowing some pixels to have a greater influence on the final average. As shown in Figure 3, the center pixel is assigned a larger coefficient than the surrounding pixels, giving it higher importance in the averaging process.

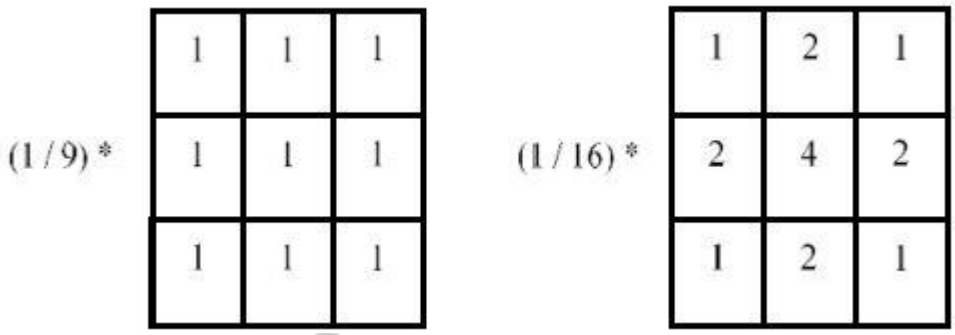


Figure 3. The average filters: standard average filter on the left and weighted average filters on the right.

Finally, the model performance was evaluated on unfiltered and filtered test images using the accuracy metric. Accuracy is one of the most commonly used performance metrics in classification problems. It measures the ratio of correctly classified samples to the total number of samples. Therefore, it provides a general indication of the model's overall classification performance. The accuracy metric is calculated as shown in Eq. 1:

$$Accuracy = \frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)} \quad (1)$$

where TP represents true positives, TN represents true negatives, FP represents false positives, and FN represents false negatives. True positives and true negatives indicate the correctly classified positive and negative samples, respectively. In contrast, false positives refer to negative samples that are incorrectly classified as positive, while false negatives refer to positive samples that are incorrectly classified as negative.

3. Results and Discussion

In this study, we used 10,000 IDC histopathological image samples from the Breast Histopathology Image Dataset. The dataset was split into training, validation, and test sets, consisting of 7,000, 1,500, and 1,500 samples, respectively. MobileNetV2 was trained on the training set and validated using the validation set. Subsequently, low- and high-level Gaussian noise was added to the test images to evaluate the model's robustness. The noisy test images were then filtered using two types of average filters, as shown in Figure 3, and median filters with kernel sizes of 3×3, 5×5, 7×7, 9×9, and 11×11. Finally, the unfiltered and filtered test images were classified using the trained MobileNetV2 model. The accuracy results obtained from these classifications are presented in Table 1.

Table 1. Classification accuracy results obtained from unfiltered and filtered noisy test images

Noise Level	No Filter	Median Filter 3×3	Median Filter 5×5	Median Filter 7×7	Median Filter 9×9	Median Filter 11×11	Standard Average Filter	Weighted Average Filter
Low	59.13%	55.13%	63.20%	64.93%	66.60%	61.73%	56.13%	52.53%
High	50.00%	50.00%	56.80%	62.20%	58.07%	51.47%	49.67%	50.07%

As shown in Table 1, without applying any filtering operation, MobileNetV2 achieved an accuracy of 59.13% under low Gaussian noise, whereas its accuracy decreased to 50.00% under high Gaussian noise. This result indicates that the classification performance of MobileNetV2 decreases as the noise level increases. Comparing the average filters, under low-noise conditions, both the standard average filter and the weighted average filter reduced the performance of MobileNetV2, whereas under high-noise conditions, they had almost no effect on its performance. The 3×3 median filter, similar to the average filters, reduced the model's performance under low-noise conditions, while it had no effect on the model's performance under high-noise conditions. However, median filters with larger kernel sizes improved the performance of MobileNetV2 under both low- and high-noise conditions. Among all filtering approaches, the 9×9 median filter achieved the highest accuracy under low-noise conditions, reaching 66.60%, whereas the 7×7 median filter provided the best performance under high-noise conditions, with an accuracy of 62.20%. When both noise levels are considered together, the 7×7 median filter can be regarded as the most suitable single filtering option, since it achieved near-best performance under low-noise conditions and the highest accuracy under high-noise conditions. These results suggest that, for the dataset used in this study, an appropriately selected median filter, particularly the 7×7 median filter, can enhance the robustness of MobileNetV2-based histopathological image classification under Gaussian noise conditions.

4. Conclusions

In this study, the effects of average and median filters on the benign–malignant classification performance of MobileNetV2 were investigated using histopathological images from the Breast Histopathology Image Dataset. Gaussian noise at different levels was added to the test images, and the noisy test images were processed using filters with various kernel sizes and characteristics. The results showed that, for the dataset used in this study, the classification performance of MobileNetV2 decreased as the Gaussian noise level increased. Average filters did not improve the performance of MobileNetV2 under any condition. When the median filters were considered, all median filters except the 3×3 median filter improved the classification performance of MobileNetV2. In particular, when selecting a single filter as a preprocessing strategy, the 7×7 median filter can be considered the most suitable filtering option for the dataset used in this study.

References

[1] World Health Organization (WHO), "Breast Cancer," 2023. [Online]. Available: https://www.who.int.

[2] R. L. Siegel et al., "Cancer statistics, 2020," *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, vol. 70, no. 1, pp. 7-30, 2020.

[3] M. N. Gurcan et al., "Histopathological image analysis: A review," *IEEE Reviews in Biomedical Engineering,* vol. 2, pp. 147-171, 2009.

[4] M. Sandler et al., "MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks*," in Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 4510-4520, 2018.

[5] T. Barbu. "Variational image denoising approach with diffusion porous media flow," *Abstract and applied analysis*, vol. 2013, pp. 856876, 2013.

[6] N. Thakur, & S. Devi, "A new method for color image quality assessment," *International Journal of Computer Applications,* vol. 15, no. 2, pp. 10-17, 2011.

[7] P. Mooney, "Breast Histopathology Images," Kaggle, 2017. [Online]. Available: https://www.kaggle.com/paultimothymooney/breast-histopathology-images. (Accessed: Dec. 2025).

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Sustainability in Software Defect Prediction Processes: A Conceptual Review from the Perspective of Green AI

Turgay TAYMAZ[1,2]
Kökten Ulaş BİRANT[3,4]

Abstract

Software Defect Prediction (SDP) is widely utilized to enhance quality assurance, prioritize testing efforts, and significantly reduce maintenance costs within the software development life cycle. In recent years, the complexity of machine learning and deep learning models employed in this domain has increased exponentially to capture intricate software metrics. While the integration of Large Language Models (LLMs) and massive neural networks into software engineering problems has undeniably improved theoretical model accuracy, it has simultaneously introduced severe sustainability issues. These challenges primarily revolve around exorbitant computational costs, excessive memory usage, and massive energy consumption required for training and deployment. In response to these growing concerns, this paper conceptually examines the necessity and applicability of the "Green AI" paradigm within the software defect prediction literature. The study critically discusses the literature's necessary shift towards lightweight machine learning algorithms. These streamlined algorithms operate with significantly fewer parameters, offer high energy efficiency, and still provide acceptable, robust accuracy rates at industrial standards, serving as viable alternatives to computationally exhaustive, hardware-intensive "Red AI" models. Furthermore, the paper addresses how intelligent feature engineering and evolutionary context-based approaches directly contribute to long-term sustainability. Rather than relying on brute-force processing power and expensive computational resources to solve inherent problems like label noise encountered during data preprocessing, these targeted methodologies offer a more environmentally conscious solution. Consequently, this study presents a comprehensive theoretical framework that strongly invites software engineering researchers to shift their evaluation criteria. It advocates for focusing not only on traditional performance metrics, such as accuracy, precision, and F1-score, but also on the environmental costs, training times, and overall carbon footprints of their proposed models.

Keywords: Software Defect Prediction, Green AI, Sustainability, Machine Learning, Computational Cost

[1] PhD Student, Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Computer Engineering, turgay@taymaz.org Orcıd: 0000-0002-1718-4315
[2] Lecturer, Afyon Kocatepe University, Sinanpasa Vocational School, Department of Computer Technologies, turgay@taymaz.org Orcıd: 0000-0002-1718-4315
[3] Assoc. Prof. Dr., Dokuz Eylül University, Department of Computer Engineering, ulas.birant@deu.edu.tr Orcıd: 0000-0002-5107-6406
[4] Assoc. Prof. Dr., Dokuz Eylül University, Information Technologies Research and Application Center (DEBTAM), ulas.birant@deu.edu.tr Orcıd: 0000-0002-5107-6406

Introduction

Software Defect Prediction (SDP) constitutes a critical quality assurance mechanism within the software development life cycle. By leveraging historical software metrics—such as code complexity, change history, and developer activity—SDP models identify fault-prone modules prior to formal testing, thereby enabling project managers to allocate limited testing resources more effectively (Hall et al., 2012; Hosseini et al., 2019). Decades of empirical research have demonstrated that early defect identification can reduce maintenance costs by orders of magnitude compared to post-release fault discovery (Boehm & Basili, 2001). Consequently, SDP has become a cornerstone of modern software engineering research, attracting sustained interest from both academic and industrial communities.

In recent years, however, the SDP literature has exhibited a pronounced escalation in model complexity. Driven by the broader deep learning revolution in artificial intelligence, researchers have increasingly adopted computationally intensive architectures—including Convolutional Neural Networks, Recurrent Neural Networks, and Transformer-based models—to extract semantic features from source code and predict defects (Li et al., 2018; Wang et al., 2016). More recently, Large Language Models (LLMs) pre-trained on massive code corpora have been fine-tuned for software engineering tasks, including defect prediction, under the premise that larger models with billions of parameters inevitably yield superior predictive performance (Hou et al., 2024; Fan et al., 2023). While these approaches have indeed reported incremental improvements in metrics such as F1-score and AUC, the magnitude of these gains often remains marginal—frequently in the range of one to three percentage points—relative to the computational overhead they introduce (Fu et al., 2016). Critically, rigorous replication studies have demonstrated that a simple Logistic Regression model can match or even outperform state-of-the-art deep learning architectures in just-in-time defect prediction when properly tuned (Zeng et al., 2021), and that streamlined, lightweight pipelines achieve finer-grained predictions with substantially fewer resources (Pornprasit & Tantithamthavorn, 2021).

This relentless pursuit of marginal accuracy gains at the expense of exponentially increasing computational resources exemplifies what Schwartz et al. (2020) have termed "Red AI." The Red AI paradigm is characterized by a research culture that prioritizes state-of-the-art benchmark performance while systematically ignoring the associated environmental and economic costs, including excessive energy consumption, prolonged training times, and substantial carbon emissions. Strubell et al. (2019) have compellingly demonstrated that training a single large Transformer model can emit as much carbon dioxide as five automobiles over their entire lifetimes. Within the specific context of SDP, this trend is particularly paradoxical: the very discipline that seeks to improve software quality and reduce waste in the development process is itself generating significant environmental waste through unsustainable research practices.

In direct response to this growing concern, the "Green AI" paradigm has emerged as a compelling alternative. Coined and formalized by Schwartz et al. (2020), Green AI advocates for research that treats computational efficiency, measured through floating-point operations, training time, and energy consumption, as a first-class evaluation criterion alongside traditional accuracy metrics. The Green AI movement does not call for abandoning performance; rather, it

promotes the development of models that achieve comparable or acceptable accuracy with substantially fewer computational resources (Verdecchia et al., 2023). This paradigm shift resonates with the broader sustainability agenda articulated in the United Nations Sustainable Development Goals and is gaining increasing traction across multiple domains of machine learning research (van Wynsberghe, 2021).

Despite its clear relevance, the Green AI perspective remains conspicuously underexplored in the SDP literature. The overwhelming majority of defect prediction studies continue to report exclusively on accuracy-centric metrics, with virtually no consideration of the computational or environmental costs incurred by the proposed models (Tantithamthavorn et al., 2019). This gap is both scientifically and ethically significant, particularly given that recent empirical evidence has consistently demonstrated that classical machine learning algorithms—such as Logistic Regression, Naïve Bayes, and Random Forest—deliver competitive and industrially acceptable defect prediction performance with dramatically lower computational requirements. Zeng et al. (2021) showed that a simple Logistic Regression outperforms deep learning in just-in-time defect prediction; Pornprasit & Tantithamthavorn (2021) demonstrated that a lightweight pipeline, JITLine, achieves finer-grained predictions more efficiently than complex neural approaches; and, beyond the SDP domain, Grinsztajn et al. (2022) provided compelling evidence at NeurIPS that tree-based models systematically outperform deep learning on typical tabular data—the very data modality upon which metric-based SDP operates.

The present study addresses this critical gap by conducting a conceptual review of sustainability considerations in SDP processes from the Green AI perspective. The primary objective of this paper is twofold: (1) to critically examine the growing computational footprint of contemporary SDP research and to articulate why this trajectory is environmentally and practically unsustainable, and (2) to advocate for lightweight machine learning algorithms and intelligent feature engineering strategies—particularly evolutionary context-based approaches that capture change history and developer behavior patterns—as sustainable and effective alternatives to computationally exhaustive deep learning pipelines. By reframing the evaluation discourse to encompass not only accuracy, precision, and recall, but also training time, energy efficiency, and carbon footprint, this study presents a theoretical framework that invites the software engineering research community to embrace a more responsible and sustainable approach to defect prediction.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 examines the ground truth crisis in SDP and explains how the field has fallen into a "Red AI" trap of escalating model complexity. Section 3 proposes intelligent feature engineering—specifically evolutionary context modeling—as a sustainable, Green AI–aligned alternative. Section 4 presents a broader theoretical framework for sustainable evaluation in SDP research. Finally, Section 5 concludes the paper and outlines directions for future work.

The Ground Truth Crisis and The "Red AI" Trap

A fundamental yet persistently underappreciated challenge in Software Defect Prediction research is the inherent unreliability of the ground truth upon which virtually all supervised models are trained. The construction of labeled datasets—distinguishing "buggy" from "clean" software modules—relies overwhelmingly on automated heuristic algorithms, most notably the SZZ family of approaches originally proposed by Śliwerski et al. (2005) and subsequently refined by numerous researchers (Kim et al., 2006; da Costa et al., 2016). The SZZ algorithm operates by tracing bug-fixing commits backward through version control history to identify the commits that ostensibly introduced each defect. While conceptually elegant, this retrospective blame-assignment procedure is demonstrably noisy: it systematically generates false positives by mislabeling cosmetic changes, whitespace modifications, and large-scale refactoring operations as defect-introducing commits (Rodríguez-Pérez et al., 2018). Furthermore, tangled commits—those that bundle unrelated changes within a single revision—exacerbate the labeling problem by conflating defective and non-defective modifications (Herzig et al., 2013). Empirical studies have estimated that the proportion of mislabeled instances in widely used SDP benchmark datasets can reach substantial levels, casting serious doubt on the validity of models trained and evaluated on such data (Yatish et al., 2019).

Given this well-documented ground truth crisis, one might reasonably expect the research community to have invested commensurately in improving the quality of the feature space and the labeling process itself. Instead, the predominant response has been to escalate model complexity. The implicit assumption underlying this strategy is that sufficiently powerful models—Deep Neural Networks with millions of parameters, attention-based architectures, and most recently, Large Language Models fine-tuned on code—will autonomously learn to overcome label noise through sheer representational capacity (Yang et al., 2015; Zhou et al., 2018). This assumption, however, is both theoretically questionable and practically counterproductive. When training data contains systematic labeling errors, increasing model capacity does not correct the underlying bias; rather, it risks overfitting to the noise itself, thereby amplifying rather than mitigating the problem (Frénay & Verleysen, 2014). The result is a paradox: the more complex the model, the more confidently it may learn spurious patterns embedded in the noisy labels, producing inflated performance metrics that do not generalize to real-world deployment contexts.

This escalation in model complexity has pushed SDP research squarely into the "Red AI" trap described by Schwartz et al. (2020). The consequences of this trajectory extend well beyond environmental concerns into the domains of scientific reproducibility and industrial applicability. From a reproducibility standpoint, training state-of-the-art deep learning models for SDP requires access to high-end GPU clusters that remain financially inaccessible to the vast majority of academic research groups, particularly those in developing countries (Wei et al., 2023). This computational barrier creates a two-tiered research ecosystem in which only well-funded laboratories can participate in the pursuit of benchmark leaderboard positions, fundamentally undermining the democratic and open character of scientific inquiry. From an industrial deployment standpoint, the situation is equally untenable. Modern software development practices demand continuous integration and continuous deployment (CI/CD) pipelines in which defect prediction must operate in near real-time on every commit (Humble

& Farley, 2010). Deploying billion-parameter LLMs for per-commit inference is not merely expensive; it is architecturally incompatible with the latency, throughput, and energy constraints of production CI/CD environments. A defect prediction model that requires minutes of GPU inference time per commit is effectively useless in a pipeline where builds must complete in seconds (Shahin et al., 2017). Thus, the Red AI trajectory in SDP is not only environmentally unsustainable but also fundamentally misaligned with the practical requirements of the industry it purports to serve.

Feature Engineering as a Green AI Solution

If the root cause of the SDP sustainability crisis lies in the attempt to compensate for noisy, unreliable labels with ever-larger models, then the logical corrective is to address the problem at its source: the feature space. This section argues that intelligent feature engineering, combined with lightweight classification algorithms, constitutes a theoretically sound and practically viable Green AI strategy for software defect prediction.

The central proposition advanced here is that of Evolutionary Context Modeling—the systematic extraction of process metrics that capture the temporal dynamics of software evolution. Unlike static code metrics (e.g., lines of code, cyclomatic complexity, or Halstead measures), which provide a snapshot of the codebase at a single point in time, process metrics encode the behavioral history of a software artifact over its entire lifecycle. These features include, but are not limited to, code churn (the volume of lines added, deleted, and modified across successive revisions), developer experience and ownership patterns (the number of distinct contributors and their familiarity with a given module), file age and modification frequency, and the temporal distribution of changes relative to release cycles (Moser et al., 2008; Rahman & Devanbu, 2013). A substantial body of empirical evidence has demonstrated that process metrics consistently outperform or complement static metrics in defect prediction tasks, precisely because they capture the instability and turbulence that characterize defect-prone regions of a codebase (Kamei et al., 2013; Nagappan & Ball, 2005).

Crucially, evolutionary context features possess a distinctive theoretical property that renders them particularly well-suited to the noisy-label environment created by SZZ-based ground truth construction. Process metrics such as high code churn, frequent ownership transfers, and rapid modification bursts are indicators of high-risk instability—a condition that correlates strongly with genuine defect introduction. However, this same instability also overlaps substantially with the characteristics of complex refactoring operations, which are among the most common sources of SZZ false positives (Mills et al., 2018). In other words, when the SZZ algorithm erroneously labels a large refactoring commit as defect-introducing, the process metrics associated with that commit—elevated churn, multiple file modifications, cross-module changes—still reflect a legitimately high-risk software event. The features themselves remain informative and directionally correct even when the label is technically erroneous. This inherent noise tolerance means that a model trained on evolutionary context features can absorb a substantial proportion of SZZ labeling errors without catastrophic degradation in predictive validity, a property that brute-force model complexity cannot replicate.

The practical implications of this feature-centric strategy align directly with the Green AI principles articulated by Schwartz et al. (2020). Extracting evolutionary context features is a computationally bounded, one-time preprocessing operation that traverses the version control history of a project using standard tools such as Git (Spinellis, 2012). Once these features are computed and stored, the classification task itself can be performed by lightweight algorithms—Random Forest, Decision Trees, Logistic Regression, or Gradient Boosted Trees—that train in seconds on commodity hardware and require negligible energy for inference. Recent large-scale studies have vindicated this approach: Grinsztajn et al. (2022) demonstrated at NeurIPS that tree-based models systematically outperform deep learning on tabular data, which is precisely the data modality of metric-based SDP; Zeng et al. (2021) showed that a properly configured Logistic Regression matches state-of-the-art deep learning in just-in-time defect prediction; and Pornprasit & Tantithamthavorn (2021) confirmed that their lightweight JITLine pipeline outperforms complex neural models while operating at a fraction of the computational cost. The contrast with an LLM-based pipeline is stark: whereas fine-tuning and deploying a code-aware language model demands GPU hours, terabytes of memory, and kilowatt-hours of energy per training cycle, a Random Forest trained on well-engineered process metrics achieves comparable or superior discriminative power with a computational cost that is lower by several orders of magnitude (Ghotra et al., 2015; Tantithamthavorn et al., 2019). This efficiency differential is not merely an academic curiosity; it represents the difference between a defect prediction approach that can be sustainably integrated into continuous industrial workflows and one that remains a laboratory artifact.

A Theoretical Framework for Sustainable Evaluatıon in SDP

The arguments presented in the preceding sections converge on a single, inescapable conclusion: the evaluation paradigm that currently governs Software Defect Prediction research is fundamentally incomplete. When studies report exclusively on accuracy-centric metrics—F1-score, AUC-ROC, precision, and recall—they implicitly treat computational cost as externality, thereby providing no mechanism for distinguishing between a model that achieves its performance efficiently and one that does so through profligate resource consumption. This section proposes a multi-criteria evaluation framework that operationalizes Green AI principles for the SDP domain.

The proposed framework supplements traditional predictive performance metrics with three additional evaluation dimensions. The first dimension is **Computational Training Cost**, which encompasses the hardware requirements (CPU versus GPU, number of accelerator hours), the total energy consumed during the training process (measured in kilowatt-hours), and the estimated carbon dioxide equivalent (CO_2e) emissions attributable to the training cycle (Lacoste et al., 2019). Reporting these quantities would enable the research community to assess whether observed performance gains justify their environmental expenditure. The second dimension is **Inference Latency**, defined as the wall-clock time required to generate a prediction for a single software module or commit. This criterion is of paramount importance for industrial applicability, as it directly determines whether a model can be deployed within CI/CD pipelines that impose strict latency budgets on each build stage (Shahin et al., 2017). A model that delivers marginally higher accuracy but violates these latency constraints offers no practical utility to the organizations it is intended to serve. The third dimension is **Noise**

Robustness, operationalized as the magnitude of performance degradation when a model is evaluated under controlled levels of synthetic label noise (Frénay & Verleysen, 2014). Given the documented unreliability of SZZ-derived ground truth, a model's ability to maintain stable performance in the presence of labeling errors is arguably as important as its peak accuracy on putatively clean benchmarks.

Within this framework, the notion of "state-of-the-art" must be fundamentally reconsidered. A model that achieves one to two percentage points of improvement in F1-score over a lightweight baseline, but requires a multi-GPU cluster, days of training time, and a carbon footprint exceeding that of hundreds of standard model-training runs, should not be unconditionally celebrated as a scientific advance (Schwartz et al., 2020; Strubell et al., 2019). Instead, the field should adopt Pareto-optimal evaluation, recognizing models that achieve the best trade-off across all four dimensions—accuracy, cost, latency, and robustness—as the genuine benchmarks for industrially relevant defect prediction research. Such a shift would not only align SDP with the Green AI movement but would also restore the field's practical relevance to the software engineering practitioners it ultimately serves.

Conclusion

This conceptual review has examined the sustainability crisis emerging within Software Defect Prediction research from the perspective of the Green AI paradigm. The paper has advanced three interconnected arguments. First, the ground truth upon which SDP models are trained is inherently noisy due to the systematic limitations of automated labeling heuristics such as the SZZ algorithm, and this noise cannot be overcome simply by escalating model complexity. Second, intelligent feature engineering—specifically, evolutionary context modeling through process metrics—offers a theoretically grounded and noise-tolerant alternative that addresses the data quality problem at its source rather than attempting to mask it with computational brute force. Third, the current evaluation paradigm in SDP, which rewards accuracy improvements in isolation from their computational and environmental costs, is both scientifically incomplete and misaligned with the sustainability imperatives of contemporary software engineering practice.

The implications of these arguments are clear. The software engineering research community must move beyond the Red AI trajectory that has come to dominate defect prediction research and embrace a more holistic evaluation culture—one that values not only what a model achieves but also what it costs to achieve it. Lightweight classifiers trained on well-engineered evolutionary context features represent a concrete instantiation of this sustainable approach: they deliver industrially acceptable predictive performance, operate within the latency and energy constraints of real-world CI/CD environments, and exhibit inherent robustness to the label noise that pervades existing benchmark datasets.

We conclude with a call to action. Future SDP studies should be expected, as a matter of scientific rigor, to report computational training cost, inference latency, and energy consumption alongside traditional accuracy metrics. Conference and journal reviewers should treat the absence of such reporting as a methodological limitation. Only by institutionalizing sustainability as a first-class evaluation criterion can the field ensure that its pursuit of better

defect prediction does not come at an unacceptable cost to the environment and to the broader accessibility of scientific research.

References

Boehm, B. W., & Basili, V. R. (2001). Software defect reduction top 10 list. *Computer*, *34*(1), 135–137.

Da Costa, D. A., McIntosh, S., Shang, W., Kulesza, U., Coelho, R., & Hassan, A. E. (2016). A framework for evaluating the results of the szz approach for identifying bug-introducing changes. *IEEE Transactions on Software Engineering*, *43*(7), 641-657.

Fan, A., Gokkaya, B., Harman, M., Lyubarskiy, M., Sengupta, S., Yoo, S., & Zhang, J. M. (2023). Large language models for software engineering: Survey and open problems. In *Proceedings of the IEEE/ACM International Conference on Software Engineering: Future of Software Engineering (ICSE-FoSE)* (pp. 31–53). IEEE.

Frénay, B., & Verleysen, M. (2014). Classification in the presence of label noise: A survey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, *25*(5), 845–869.

Fu, W., Menzies, T., & Shen, X. (2016). Tuning for software analytics: Is it really necessary? *Information and Software Technology*, *76*, 135–146.

Ghotra, B., McIntosh, S., & Hassan, A. E. (2015). Revisiting the impact of classification techniques on the performance of defect prediction models. In *Proceedings of the 37th International Conference on Software Engineering (ICSE)* (pp. 789–800). IEEE.

Grinsztajn, L., Oyallon, E., & Varoquaux, G. (2022). Why do tree-based models still outperform deep learning on typical tabular data? In *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, *35*, 507–520.

Hall, T., Beecham, S., Bowes, D., Gray, D., & Counsell, S. (2012). A systematic literature review on fault prediction performance in software engineering. *IEEE Transactions on Software Engineering*, *38*(6), 1276–1304.

Herzig, K., Just, S., & Zeller, A. (2013). It's not a bug, it's a feature: How misclassification impacts bug prediction. In *Proceedings of the 35th International Conference on Software Engineering (ICSE)* (pp. 392–401). IEEE.

Hosseini, S., Turhan, B., & Gunarathna, D. (2019). A systematic literature review and meta-analysis on cross project defect prediction. *IEEE Transactions on Software Engineering*, *45*(2), 111-147.

Hou, X., Zhao, Y., Liu, Y., Yang, Z., Wang, K., Li, L., Luo, X., Lo, D., Grundy, J., & Wang, H. (2024). Large language models for software engineering: A systematic literature review. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, *33*(8), 1–79.

Humble, J., & Farley, D. (2010). *Continuous delivery: Reliable software releases through build, test, and deployment automation*. Addison-Wesley.

Kamei, Y., Shihab, E., Adams, B., Hassan, A. E., Mockus, A., Sinha, A., & Ubayashi, N. (2013). A large-scale empirical study of just-in-time quality assurance. *IEEE Transactions on Software Engineering*, *39*(6), 757–773.

Kim, S., Zimmermann, T., Pan, K., & Whitehead, E. J. (2006). Automatic identification of bug-introducing changes. In *Proceedings of the 21st IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE)* (pp. 81–90). IEEE.

Lacoste, A., Luccioni, A., Schmidt, V., & Dandres, T. (2019). Quantifying the carbon emissions of machine learning. *arXiv preprint arXiv:1910.09700*.

Li, J., He, P., Zhu, J., & Lyu, M. R. (2018). Software defect prediction via convolutional neural network. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security (QRS)* (pp. 318–328). IEEE.

Mills, C., Pantiuchina, J., Parra, E., Bavota, G., & Haiduc, S. (2018). Are bug reports enough for text retrieval-based bug localization? In *Proceedings of the IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution (ICSME)* (pp. 381–392). IEEE.

Moser, R., Pedrycz, W., & Succi, G. (2008). A comparative analysis of the efficiency of change metrics and static code attributes for defect prediction. In *Proceedings of the 30th International Conference on Software Engineering (ICSE)* (pp. 181–190). ACM.

Nagappan, N., & Ball, T. (2005). Use of relative code churn measures to predict system defect density. In *Proceedings of the 27th International Conference on Software Engineering (ICSE)* (pp. 284–292). ACM.

Pornprasit, C., & Tantithamthavorn, C. K. (2021, May). Jitline: A simpler, better, faster, finer-grained just-in-time defect prediction. In *2021 IEEE/ACM 18th International Conference on Mining Software Repositories (MSR)* (pp. 369-379). IEEE.

Rahman, F., & Devanbu, P. (2013). How, and why, process metrics are better. In *Proceedings of the 35th International Conference on Software Engineering (ICSE)* (pp. 432–441). IEEE.

Rodríguez-Pérez, G., Robles, G., & González-Barahona, J. M. (2018). Reproducibility and credibility in empirical software engineering: A study of the SZZ algorithm. *Information and Software Technology*, *99*, 164–176.

Schwartz, R., Dodge, J., Smith, N. A., & Etzioni, O. (2020). Green AI. *Communications of the ACM*, *63*(12), 54–63.

Shahin, M., Babar, M. A., & Zhu, L. (2017). Continuous integration, delivery and deployment: A systematic review on approaches, tools, challenges and practices. *IEEE Access*, *5*, 3909–3943.

Śliwerski, J., Zimmermann, T., & Zeller, A. (2005). When do changes induce fixes? In *Proceedings of the 2005 International Workshop on Mining Software Repositories (MSR)* (pp. 1–5). ACM.

Spinellis, D. (2012). Git. *IEEE Software*, *29*(3), 100–101.

Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2019). Energy and policy considerations for deep learning in NLP. In *Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)* (pp. 3645–3650). ACL.

Tantithamthavorn, C., McIntosh, S., Hassan, A. E., & Matsumoto, K. (2019). The impact of automated parameter optimization on defect prediction models. *IEEE Transactions on Software Engineering*, *45*(7), 683–711.

Van Wynsberghe, A. (2021). Sustainable AI: AI for sustainability and the sustainability of AI. *AI and Ethics*, *1*(3), 213-218.

Verdecchia, R., Cruz, L., Sallou, J., Lin, M., Wickert, J., & Hotellier, E. (2023). A systematic review of Green AI. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, *13*(4), e1507.

Wang, S., Liu, T., & Tan, L. (2016). Automatically learning semantic features for defect prediction. In *Proceedings of the 38th International Conference on Software Engineering (ICSE)* (pp. 297–308). ACM.

Wei, X., Gonugondla, S. K., Wang, S., Ahmad, W., Ray, B., Qian, H., ... & Xiang, B. (2023, November). Towards greener yet powerful code generation via quantization: An empirical study. In *Proceedings of the 31st ACM joint european software engineering conference and symposium on the foundations of software engineering* (pp. 224-236).

Yang, X., Lo, D., Xia, X., Zhang, Y., & Sun, J. (2015). Deep learning for just-in-time defect prediction. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security (QRS)* (pp. 17–26). IEEE.

Yatish, S., Jiarpakdee, J., Thongtanunam, P., & Tantithamthavorn, C. (2019, May). Mining software defects: Should we consider affected releases?. In *2019 IEEE/ACM 41st international conference on software engineering (ICSE)* (pp. 654-665). IEEE.

Zeng, Z., Zhang, Y., Zhang, H., & Zhang, L. (2021). Deep just-in-time defect prediction: How far are we? In *Proceedings of the 30th ACM SIGSOFT International Symposium on Software Testing and Analysis (ISSTA)* (pp. 427–438). ACM.

Zhou, Y., Yang, Y., Lu, H., Chen, L., Li, Y., Zhao, Y., Qian, J., & Xu, B. (2018). How far we have progressed in the journey? An examination of cross-project defect prediction. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, *27*(1), 1–51.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

An Integrated Digital Marking Management System for Industrial Product Traceability

Ebru ÜSTÜNBAŞ[1]
Merve TEMUR[2]

Abstract

Product marking is widely used in manufacturing environments to enable real-time and retrospective product traceability, ensure product quality, and support process monitoring. Depending on production requirements and product characteristics, different marking methods such as laser marking, inkjet printing, labeling, and manual marking can be used. However, conventional marking verification workflows are often based on manual control and recording processes, which increase operator dependency, limit traceability, and introduce risks related to human error.This study presents a digital marking management system developed to automate product identification, marking verification, and process tracking operations in manufacturing lines. The proposed system consists of an Android-based mobile application integrated with a web-based monitoring interface. In the target production context, smartphone battery IDs serve as the primary product identifiers. The web interface centralizes incoming production data and provides filtering, listing, and monitoring functionalities to facilitate process control and retrospective analysis.In high-throughput lines where the target takt time is below 10 seconds per unit, the proposed solution provided an average time saving of approximately 2.4 seconds per product by eliminating manual verification and marking operations corresponding to more than 24% of the target cycle budget. In addition to time savings, the system improves process visibility, enables digital traceability, and supports faster feedback.The developed infrastructure offers a scalable and adaptable solution for manufacturing environments and contributes to improved operational efficiency, quality assurance, and production traceability in industrial applications.

Keywords: Digital marking, Traceability, Mobile application, Monitoring, Smart manifacturing

[1] R/D Engineer, Samsung Electronics Türkiye Production, e.karacelik@samsung.com
[2] R/D Engineer, Samsung Electronics Türkiye Production , m.temur@samsung.com

1. INTRODUCTION

The increasing complexity of modern manufacturing systems has significantly expanded the importance of product-level traceability, process verification, and real-time production monitoring within industrial environments. In high-volume production sectors such as consumer electronics manufacturing, even minor process deviations may lead to substantial quality losses, rework costs, and downstream production inefficiencies. As a result, manufacturers increasingly require traceability infrastructures capable not only of recording production history but also of preserving process visibility throughout the complete product lifecycle (Jansen-Vullers et al.,2003; Wang et al., 2016).

Within many manufacturing lines, manual marking practices are still commonly employed to indicate that a product has successfully passed a specific assembly, inspection, or verification operation. These markings may consist of handwritten symbols, marker dots, adhesive labels, or laser-generated indicators applied directly by operators during production activities. Although such methods are operationally simple, they inherently suffer from several limitations including operator dependency, inconsistent application quality, limited auditability, and lack of centralized monitoring capability (Lu,2017). Furthermore, manual marking workflows typically operate independently from digital production tracking systems, resulting in fragmented process visibility and limited retrospective analysis capability.

One of the most critical limitations emerges in pre-assembly manufacturing processes. In smartphone manufacturing environments, numerous control and verification operations are performed before final product assembly completion. However, once assembly is finalized, physically accessing manually applied markings often requires product disassembly. This creates a destructive verification dependency in which retrospective process confirmation becomes directly associated with additional labor cost, increased cycle time, and material damage risk. In practical production conditions, disassembly operations may also compromise component integrity, reduce process efficiency, and introduce secondary quality risks associated with repeated mechanical handling.

Simultaneously, the growing adoption of Industry 4.0 paradigms has accelerated the transition from paper-based and operator-dependent workflows toward interconnected digital manufacturing infrastructures. Technologies such as mobile computing, automatic identification systems, barcode-based traceability, cloud-connected monitoring platforms, and industrial IoT architectures enable manufacturers to transform isolated production records into centralized and analyzable digital datasets (Kagermann et al., 2013; Zhong et al., 2017). Within this context, mobile-device-based production systems offer important advantages due to their deployment flexibility, scalability, low hardware cost, and compatibility with existing manufacturing environments.

This study presents a digital marking management and traceability system specifically developed for smartphone production lines to address the limitations of conventional manual marking workflows. The proposed architecture consists of three integrated components:

(1) an Android-based mobile application operated in kiosk mode for production-line usage,

(2) a Spring Boot backend server exposing a REST API for data ingestion and storage, and

(3) a web-based monitoring interface designed for real-time and retrospective process tracking

Unlike traditional marking approaches that rely solely on visible physical indicators, the developed system establishes a persistent digital traceability structure through Battery ID association logic integrated with the manufacturing genealogy chain. In the proposed workflow, the unique Battery ID encoded within the battery Data Matrix structure is used as the primary product reference. A dedicated identification mechanism was developed to selectively extract the target Battery ID among multiple barcode structures present on the product. Following process verification, the mobile application automatically records process-specific information together with product identity, date, and timestamp data, then transmits these records to the centralized backend infrastructure via Wi-Fi communication.

The Spring Boot backend architecture serves as the centralized data management layer of the system, handling REST-based communication between production devices and the monitoring platform. The backend infrastructure stores all process verification records in a structured database environment, enabling secure and scalable traceability management. On top of this infrastructure, the web-based monitoring interface provides filtering, querying, and historical tracking capabilities for authorized users, enabling rapid access to product-specific verification histories without requiring physical product inspection or disassembly.

A particularly important contribution of the proposed system is the preservation of pre-assembly process visibility after final assembly completion. Since battery identity remains associated with the assembled smartphone within the manufacturing tracking infrastructure, process verification records generated before assembly remain digitally accessible throughout the entire product lifecycle. This eliminates the need for destructive retrospective verification procedures traditionally required in manual marking systems.

The proposed approach was experimentally evaluated in real smartphone production processes, particularly in coaxial cable assembly and multi-station camera assembly operations where operators perform repetitive tasks under strict takt-time constraints. Experimental observations demonstrated measurable reductions in operator interaction time while simultaneously improving process continuity, marking standardization, and centralized production visibility.

The primary contribution of this study is not merely the digitalization of marking operations, but the transformation of passive physical markings into an active and configurable digital manufacturing intelligence infrastructure capable of supporting real-time monitoring, retrospective analysis, and continuous process improvement in high-throughput industrial production systems.

1.1 RELATED WORKS

1.1 Product Traceability in Manufacturing

Product traceability has become one of the fundamental requirements of modern manufacturing systems due to increasing quality expectations, regulatory compliance requirements, and production complexity. Traceability infrastructures enable manufacturers to associate products with production parameters, process histories, inspection outcomes, and operator activities throughout the manufacturing lifecycle (Jansen-Vullers et al., 2003). In high-volume electronics manufacturing environments, traceability systems are particularly critical because large-scale production volumes amplify the operational impact of even minor process deviations.

Traditional traceability approaches historically relied on paper-based documentation, manually applied product markings, or isolated workstation-level records. However, such approaches provide limited real-time visibility and are highly vulnerable to operator-relatederrors including incomplete recording, incorrect product association, and retrospective data loss. Industry 4.0-oriented manufacturing architectures therefore increasingly depend on centralized digital data collection infrastructures capable of providing scalable and real-time process monitoring (Lu, 2017; Wang et al., 2016).

Recent studies have emphasized that digital traceability systems provide advantages extending beyond regulatory compliance. Real-time production visibility, root-cause analysis capability, process standardization, predictive quality monitoring, and manufacturing feedback generation are among the major operational benefits associated with digitally connected production systems (Zhong et al., 2017). Within this context, traceability data is increasingly considered not merely as historical documentation, but as an active manufacturing intelligence resource supporting continuous process improvement.

The limitations of manual marking become more critical in pre-assembly operations. Once final assembly is completed, manually applied markings often become physically inaccessible without product disassembly. This creates a significant manufacturing traceability challenge because retrospective process verification becomes dependent on destructive or semi-destructive inspection procedures. Existing literature has extensively discussed digital traceability architectures; however, limited attention has been given to preserving pre-assembly process visibility after final product assembly in high-throughput electronics manufacturing environments.

The present study addresses this gap by introducing a digital marking infrastructure specifically designed to maintain process-level traceability continuity across pre-assembly and post-assembly production stages through Battery ID genealogy association.

1.1.2 Barcode and Matrix Code Technologies in Production

Automatic Identification and Data Capture (AIDC) technologies constitute one of the core enabling technologies of digital manufacturing systems. Barcode, QR code, and Data Matrix structures are widely used for product identification, inventory management, process tracking, and component genealogy applications across industrial production environments (Finkenzeller, 2010).

Among these technologies, Data Matrix codes have gained widespread adoption in electronics manufacturing due to their high data density, compact physical footprint, and robust readability even under partially damaged conditions. Standardized under ISO/IEC 16022, Data Matrix structures are particularly suitable for component-level traceability applications where physical marking space is limited (ISO/IEC 16022:2006).

The increasing computational capability of Android-based mobile devices has further expanded the applicability of software-driven scanning systems in industrial environments. Mobile scanning frameworks such as ZXing and ML Kit allow consumer-grade mobile devices to perform real-time barcode decoding without requiring specialized hardware scanners. This significantly reduces deployment cost while improving deployment flexibility in dynamically changing production environments.

However, most existing studies primarily focus on barcode acquisition accuracy and data communication performance. Comparatively fewer studies investigate the integration of barcode-based identification systems with process-level digital marking architectures and retrospective verification infrastructures in smartphone manufacturing processes.

The present study differs from conventional barcode-tracking applications by using the Battery ID not merely as a product identifier but as a persistent genealogy reference preserving access to pre-assembly verification records after final assembly completion.

1.1.3 Mobile Applications in Industrial Settings

Mobile computing technologies have significantly influenced industrial digitalization strategies over the last decade. Portable smart devices are increasingly utilized in manufacturing systems for quality control, production monitoring, operator guidance, inventory management, and maintenance operations due to their scalability, portability, and relatively low deployment cost (Xu et al., 2021).

One important deployment strategy in industrial mobile systems is kiosk mode operation, in which the mobile device is restricted to a single dedicated application. Kiosk-mode architectures are widely adopted to prevent unauthorized application switching, accidental configuration changes, and workflow interruptions during production operations. Android Device Policy Manager (DPM) frameworks and Mobile Device Management (MDM) infrastructures are commonly used to enforce such operational constraints (Android Developers Documentation, 2024).

In addition to usability considerations, modern industrial mobile applications increasingly function as distributed edge data collection devices within broader Industrial IoT ecosystems. Instead of serving merely as standalone interfaces, mobile clients now operate as interconnected production nodes capable of collecting, validating, and transmitting process-level manufacturing data to centralized systems in real time (Xu et al., 2021).

The system proposed in this study follows this architectural approach by combining a kiosk-mode Android application with a centralized backend and web monitoring infrastructure. Unlike conventional mobile manufacturing applications that primarily support isolated workstation operations, the developed system establishes a configurable closed-loop digital

verification workflow integrating production operators, centralized databases, and supervisory monitoring interfaces.

1.1.4 Backend Architectures for Industrial Data Collection

Centralized backend architectures are essential for scalable industrial traceability systems because they provide unified data storage, synchronization, and process monitoring capabilities across distributed production environments. REST-based communication architectures have become the dominant paradigm for industrial software integration due to their platform independence, scalability, and compatibility with heterogeneous client devices (Fielding, 2000).

Spring Boot has emerged as one of the most widely adopted backend development frameworks for industrial web services because of its modular structure, rapid deployment capability, integrated security features, and compatibility with relational database infrastructures. Previous studies have demonstrated that Spring Boot-based REST architectures provide effective solutions for real-time industrial data acquisition and production monitoring applications (Gutierrez et al., 2019).

Web-based monitoring interfaces complement backend infrastructures by enabling centralized visualization, filtering, and retrospective analysis of production data. Such interfaces are particularly important in manufacturing environments where quality engineers and supervisory personnel require rapid access to process histories, operator activities, and product-specific verification records.

Existing industrial monitoring systems primarily focus on machine telemetry, equipment status monitoring, or MES-level production statistics. Comparatively limited attention has been directed toward process-specific digital marking management and operator-level verification tracking infrastructures integrated with mobile acquisition systems.

In the proposed system, the Spring Boot backend server functions as the centralized communication and persistence layer responsible for receiving marking verification data transmitted from Android production devices through REST API communication. The backend architecture stores process records together with Battery ID association information and timestamp metadata within a structured relational database environment. On top of this infrastructure, the web-based monitoring interface provides real-time record visualization, filtering, retrospective querying, and process tracking functionalities for authorized users.

This architecture enables the transformation of isolated manual marking operations into a centralized and analyzable digital manufacturing intelligence system capable of supporting retrospective traceability, process optimization, and production quality analysis.

2. METHOD

2.1 System Architecture

The proposed system adopts a three-tier client-server architecture comprising a mobile client layer, a backend service layer, and a web presentation layer. The mobile application serves as the primary data entry and acquisition interface for production line operators. The Spring

Boot backend server acts as the central data processing and persistence layer. The web-based monitoring interface serves as the presentation and analysis layer for supervisory personnel.

Communication between the mobile application and the backend server is conducted over HTTP using a RESTful API. The web interface consumes the same backend services to retrieve, filter, and display stored marking records. This design ensures a single source of truth for all production data and eliminates the data fragmentation characteristic of paper-based or siloed digital recording systems.

2.2 Data Flow

The end-to-end data flow proceeds as follows. An operator configures the mobile application by selecting the relevant product model and marking type via the settings screen. Upon encountering a product to be marked, the operator initiates a Data Matrix scan using the device camera. The application extracts the Battery ID from the scanned code and validates it against predefined format rules. If validation succeeds, the application provides immediate audiovisual feedback, combines the Battery ID with the selected model and marking type, and transmits the composite record to the backend server via a REST POST request. The server persists the record with an automatically generated timestamp. The record then becomes immediately accessible via the web monitoring interface.

2.3 Technology Stack

The technology stack was selected to balance development efficiency, operational reliability, and ease of maintenance. The mobile application was developed in Kotlin for the Android platform, leveraging its modern language features and strong ecosystem support. Local data persistence on the mobile device is handled by Android Room, a SQLite abstraction library that provides compile-time query verification and lifecycle-aware data access. The backend server was implemented using Spring Boot with a relational database for persistent storage. The web interface was developed using standard web technologies with server-rendered or API-driven views, providing cross-browser compatibility without requiring native application installation on supervisory workstations.

2.4 Mobile Application Design

2.4.1 Kiosk Mode Implementation

A central design requirement for the mobile application was its deployment in kiosk mode, ensuring that production line operators cannot navigate away from the application, access device settings, or launch unauthorized applications. This requirement was implemented using Android's Device Policy Manager API in conjunction with screen pinning, which restricts the device to a single foreground application for the duration of the production shift. The back button, home button, and recent applications gesture are disabled within the kiosk context, preventing accidental or deliberate exit from the marking workflow.

Kiosk mode enforcement is particularly important in high-throughput production environments where device misuse can disrupt line rhythm and introduce traceability gaps. By constraining operator interaction exclusively to the marking application, the system ensures workflow integrity and reduces the supervisory overhead required to monitor device usage.

2.4.2 Settings and Configuration Screen

The application provides a dedicated settings screen that enables operators or line supervisors to configure session parameters prior to commencing marking operations. The settings screen supports two primary configuration actions: selection of the product model and selection of the marking type. For both parameters, users may choose from a predefined dropdown list populated from the backend configuration or enter values manually when the required option is not present in the list. This dual-mode input mechanism balances standardization by encouraging selection from canonical lists with flexibility by accommodating edge cases such as new product introductions or non-standard marking requirements without necessitating a software update.

2.4.3 Data Acquisition and Validation Pipeline

Product identification is performed by scanning the Data Matrix code printed on the battery surface using the device's built-in camera. The application integrates a camera-based scanning library capable of decoding Data Matrix codes in real time, even under the variable lighting and handling conditions typical of production environments. Upon successful decoding, the application extracts the Battery ID from the scanned payload.

The extracted Battery ID is then subjected to a format validation procedure. The validation logic checks the ID against predefined rules governing its structure, length, character composition, and checksum (where applicable). This validation step serves as a critical quality gate, preventing malformed or misread codes from propagating into the traceability database. Only IDs that pass all validation checks proceed to the marking flow.

Upon successful validation, the application provides immediate multimodal feedback to the operator: the Battery ID is displayed prominently in green on the screen, and an audible notification is played through the device speaker. This feedback design minimizes the cognitive load on operators by providing clear, unambiguous confirmation of a successful scan without requiring them to read and interpret alphanumeric data.

2.4.4 Marking Flow and Data Transmission

Following successful Battery ID validation, the application combines the validated Battery ID with the model and marking type selected in the settings screen to form a complete marking record. This composite record is first persisted locally in a Room database on the device, ensuring that no validated record is lost regardless of network availability. The application then attempts to transmit the record to the backend server via an HTTP POST request to the designated REST endpoint. If the transmission succeeds, the local record is marked as synchronized; if it fails due to network unavailability, the record remains in the local buffer and is retried automatically once connectivity is restored. This offline-first approach decouples data capture from network transmission, guaranteeing zero data loss under intermittent connectivity conditions without requiring any operator intervention. The transmission is designed to complete within the available inter-cycle time, ensuring that network communication does not contribute materially to operator cycle time.

2.4.5 Offline Operation and Local Data Persistence

Network connectivity in production environments cannot always be guaranteed. Temporary outages caused by wireless infrastructure maintenance, device roaming between access points, or transient signal loss can interrupt communication between the mobile application and the backend server. To ensure uninterrupted data capture under such conditions, the application implements an offline-first architecture underpinned by Android Room, a persistence library that provides a structured abstraction layer over SQLite.

Every validated marking record is written to the local Room database before any network transmission is attempted. The database schema mirrors the server-side data model, storing the Battery ID, product model, mark type, local timestamp, and a synchronization status flag for each record. When the application detects an active network connection, a background synchronization routine queries the local database for all unsynchronized records and transmits them to the backend server in order of creation. Upon receiving a successful HTTP response, the routine updates each record's synchronization status flag, preventing duplicate submissions on subsequent sync cycles. The synchronization process runs as an Android background service, remaining active across scanning sessions and ensuring that buffered records are flushed to the server without requiring any explicit operator action.

This architecture ensures that production operations can continue uninterrupted during network outages. Operators experience no change in workflow: scanning and validation proceed exactly as during connected operation, and the application provides a visual indicator of the number of pending unsynchronized records so that supervisors are aware of any accumulated backlog. Once connectivity is restored, buffered records are automatically synchronized without any delay to the ongoing production flow, preserving full traceability continuity.

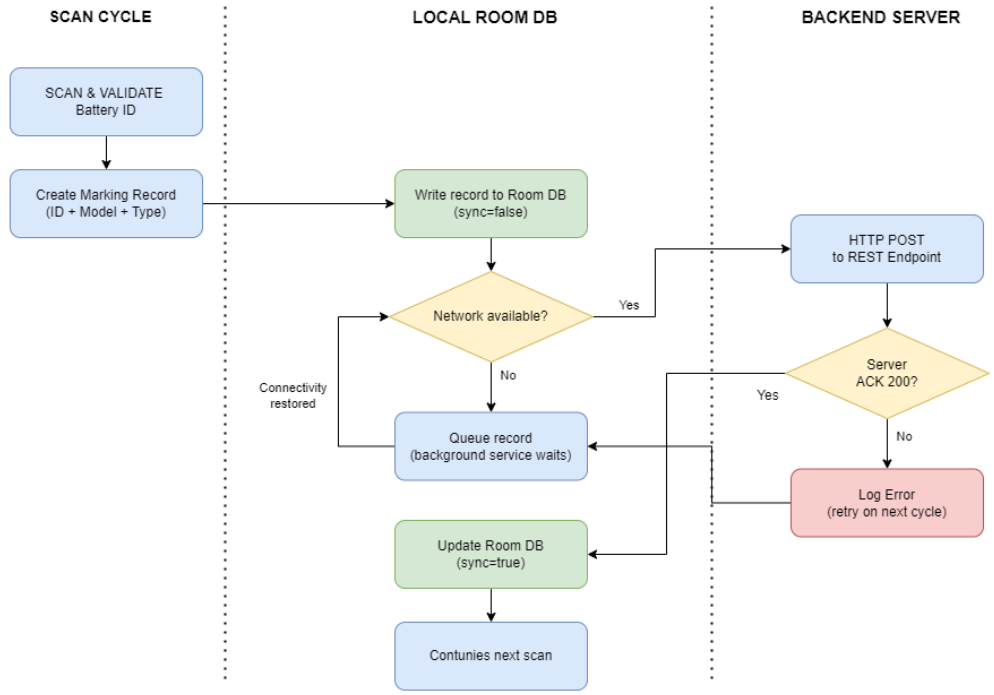


Fig. 1. *Offline operation and synchronization flow using Android Room database*

2.4.6 UI/UX Design Considerations

The user interface was designed with the specific constraints of production line use in mind. Key design principles included: minimization of the number of interactions required per product cycle; use of large, high-contrast UI elements suitable for use with gloved hands or under bright factory lighting; clear visual distinction between system states (idle, scanning, validated, error); and elimination of unnecessary navigational complexity. The interface was iteratively refined based on feedback from operators during pilot deployment, with particular attention to reducing hesitation and error rates during high-paced marking operations.

2.5 Web Tracking System

2.5.1 Authentication and Access Control

The web-based monitoring interface implements login authentication to restrict access to authorized personnel. Upon navigating to the system URL, users are presented with a login screen requiring valid credentials. Role-based access control ensures that different user classes such as production supervisors, quality engineers, and system administrators can be granted appropriate levels of access to the system's monitoring and configuration functions. Session management follows standard security practices, including session expiration and secure cookie handling.

2.5.2 Real-Time Record Viewing

The primary function of the web interface is to provide authorized users with a centralized, real-time view of marking records generated across all production stations. Records are displayed in a tabular format, with each row representing a single marking event and columns corresponding to the stored fields: Battery ID, product model, mark type, and timestamp. The interface refreshes periodically or upon user request to incorporate newly submitted records, providing supervisory personnel with an up-to-date picture of production activity without requiring access to the production floor.

2.5.3 Search, Filtering, and Historical Query

In addition to real-time viewing, the web interface provides robust search and filtering capabilities to support retrospective analysis and quality investigations. Users may filter the displayed record set by product model, mark type, Battery ID or barcode value, and date range. These filters may be applied individually or in combination, enabling targeted retrieval of records relevant to a specific product, batch, time period, or marking operation. The filtering interface is designed for ease of use by non-technical personnel, with intuitive controls and immediate feedback on the number of records matching the applied criteria.

Historical query support allows quality engineers to reconstruct the marking history of individual products or product batches, supporting root cause analysis in the event of quality escapes, customer complaints, or audit inquiries. The availability of complete, timestamped digital records eliminates the uncertainty inherent in paper-based historical records, which may be incomplete, illegible, or physically unavailable.

2.5.4 Backend API and Data Persistence

The Spring Boot backend server exposes a REST API consumed by both the Android mobile client and the web interface. The API provides endpoints for record submission (POST), record retrieval with filtering parameters (GET), and system configuration management. All marking records are persisted in a relational database, with the following fields stored for each event: Product/Battery ID, product model, mark type, and submission timestamp. The relational schema supports efficient indexed querying across all filterable dimensions, ensuring responsive retrieval performance even as the record volume grows over time.

3. RESULTS

3.1 Deployment Context

The digital marking system was deployed in a real production environment across multiple stations requiring product-level tracking, specifically including assembly stations, visual inspection posts, and functional test stations. These stations collectively represent the points in the production flow at which marking decisions are made and must be recorded. The deployment covered a high-throughput production line with a target takt time of below 10 seconds per unit, representing a demanding operational context for any additional digital workflow.

3.2 Quantitative Performance Results

The primary quantitative metric evaluated during deployment was the per-product time impact of the digital marking workflow relative to the preceding manual process. Under the prior workflow, operators applied the marking symbol to the product and immediately proceeded to the next unit; no Battery ID, mark type, or timestamp was captured. The digital system introduced a mandatory scan-and-validate step, but offset this by eliminating the physical logging effort and providing instant automated feedback. The net result was a measurable reduction in per-unit cycle time.

Following deployment of the digital system, time-motion studies conducted across the production stations indicated an average saving of approximately 2.4 seconds per product compared to the manual baseline. Given a target takt time of under 10 seconds per unit, this saving represents a reduction exceeding 24% of the available cycle budget. This substantial improvement in production efficiency is indicative of a significant enhancement in operational productivity. When extrapolated across production volumes, this per-unit saving has the potential to result in significant aggregate time recovery over the course of a production shift or campaign.

3.3 Qualitative Outcomes

Beyond the quantitative time saving, the deployment produced several significant qualitative improvements. Most significantly, the system established product-level traceability for the first time at these stations: whereas the prior workflow generated no data record at the point of marking, every unit processed through the digital system is now associated with a timestamped record linking its Battery ID to the applied mark type and the production context. This record is immediately accessible via the web interface and permanently retained for audit

and quality investigation purposes. Standardization of the marking process also improved, as the application enforced selection from canonical model and mark type lists, reducing variability introduced by individual operator decisions. Operator dependency was reduced, as automated validation ensures that only conforming Battery IDs proceed through the workflow regardless of operator skill level.

The availability of real-time centralized monitoring via the web interface enabled supervisory personnel to identify and respond to production anomalies more rapidly than was possible under the manual system, where data was only available after physical collection and aggregation of paper records. Full digital traceability was achieved for all products processed through the marked stations — a capability that was entirely absent prior to the deployment — supporting both internal quality management and external audit requirements.

3.4 Discussion

3.4.1 Industrial Applicability

The results of the deployment demonstrate that the proposed digital marking system is viable and effective in a real industrial production environment. The system's architecture — combining a kiosk-mode Android application with a REST API backend and a web monitoring interface — proved robust under the operational demands of a high-throughput production line. The measurable time saving per product, the establishment of product-level traceability where none previously existed, and the reliable capture of structured marking records collectively validate the system’s industrial applicability.

The system's configurability — specifically, the ability to adjust model lists and marking type options through the application settings screen without software modification — is an important practical feature that facilitates deployment across different product lines and enables rapid adaptation to changing production requirements. This characteristic contributes to the system's suitability for industrial environments, where product portfolios and marking requirements may evolve frequently.

3.4.2 Technical Challenges and Mitigations

Several technical challenges were encountered and addressed during development and deployment. Data Matrix reading reliability in variable lighting conditions required tuning of camera exposure parameters and scanning library settings to achieve acceptable first-read rates. Battery ID format validation required careful specification of validation rules in collaboration with production engineering to ensure that legitimate IDs were not incorrectly rejected while malformed or misread codes were reliably intercepted.

Preventing operator misuse — including deliberate circumvention of kiosk mode or scanning of incorrect products — was addressed through the kiosk mode implementation and the validation pipeline. Maintaining low interaction time per product required iterative UI optimization to minimize the number of operator actions required per cycle. Synchronization between the mobile client and the web interface was ensured through the shared backend database, which acts as a single authoritative data source for both systems. Implementing reliable offline operation required careful design of the local Room database schema and the

background synchronization service, with particular attention to ensuring exactly-once delivery semantics: the synchronization status flag on each local record prevents re-transmission of records that have already been accepted by the server, while the ordering of sync operations by creation timestamp preserves the chronological integrity of the production record on the backend.

3.4.3 Limitations and Future Work

The current system, while effective, has several limitations that warrant attention in future work. The offline buffering mechanism implemented via Android Room ensures data continuity during transient network outages; however, extended disconnection periods can result in a significant backlog of local records, and the current synchronization routine does not implement conflict resolution for cases where duplicate submission attempts may arise under unusual failure conditions. More robust synchronization protocols — such as idempotency tokens or server-side deduplication — could be introduced to further harden data integrity guarantees.

Future extensions could include integration with enterprise manufacturing execution systems (MES) or enterprise resource planning (ERP) platforms, enabling marking data to be automatically incorporated into broader production reporting and quality management workflows. Advanced analytics capabilities — such as trend detection, anomaly alerting, and production performance dashboards — could be added to the web interface to further increase its value to supervisory and engineering personnel. Expansion of the system to additional production stations and product types would further validate its scalability and generalizability.

4. CONCLUSIONS

This paper has presented a digital marking management system designed to replace manual product marking and recording workflows in manufacturing production environments. The system comprises an Android mobile application operating in kiosk mode, a Spring Boot REST API backend server, and a web-based monitoring interface, forming an integrated digital workflow for product identification, marking verification, and traceability data collection. A local Room database on the mobile device provides offline buffering, ensuring that validated marking records are never lost due to transient network unavailability and are automatically synchronized to the central server upon connectivity restoration.

The system was successfully deployed in a real production environment across assembly, visual inspection, and functional test stations. Quantitative evaluation demonstrated an average time saving of approximately 2.4 seconds per product relative to the manual baseline — a reduction exceeding 24% of the target takt time. Qualitatively, the system eliminated manual transcription errors, improved process standardization, reduced operator dependency, and enabled real-time centralized monitoring of marking activity across all instrumented stations.

The proposed system makes a practical contribution to the digital transformation of manufacturing operations, demonstrating that mobile-web integrated architectures can effectively replace legacy manual workflows with scalable, auditable, and efficient digital alternatives. The infrastructure developed in this work is designed to be extensible, supporting

future integration with enterprise systems, additional production stations, and enhanced analytical capabilities. These characteristics position the system as a reusable foundation for broader digital traceability initiatives in industrial manufacturing environments.

REFERENCES

Jansen-Vullers, M. H., van Dorp, C. A., & Beulens, A. J. M. (2003). Managing traceability information in manufacture. International Journal of Information Management, 23(5), 395–413.

Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. International Journal of Distributed Sensor Networks, 12(1).

Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. Journal of Industrial Information Integration, 6, 1–10.

Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0.

Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0. Engineering, 3(5), 616–630.

Android Developers Documentation. (2024). Device Policy Manager and kiosk mode APIs.

Fielding, R. T. (2000). Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. Doctoral dissertation, University of California.

Finkenzeller, K. (2010). RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication.

Gutierrez, J. J., Garbajosa, J., Diaz, J., & Yague, A. (2019). Providing a RESTful API for industrial monitoring systems using Spring Boot architectures.

Jansen-Vullers, M. H., van Dorp, C. A., & Beulens, A. J. M. (2003). Managing traceability information in manufacture. International Journal of Information Management, 23(5), 395–413.

Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0.

Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2021). Industry 4.0: state of the art and future trends. International Journal of Production Research, 59(11), 2941–2962.

Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0. Engineering, 3(5), 616–630.

Google. (2024). Save data in a local database using Room. Android Developers. https://developer.android.com/training/data-storage/room

International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2006). Information technology — Automatic identification and data capture techniques — Data Matrix bar code symbology specification (ISO/IEC Standard No. 16022:2006). https://www.iso.org/standard/44230.html

https://doi.org/10.1016/S0268-4012(03)00066-5

JetBrains. (2016). Kotlin programming language. https://kotlinlang.org

Pivotal Software. (2014). Spring Boot reference documentation. VMware / Broadcom. https://docs.spring.io/spring-boot/documentation.html

ZXing Authors. (2012). ZXing (“Zebra Crossing”) barcode scanning library for Java, Android [Kaynak kodu]. GitHub. https://github.com/zxing/zxing

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Taşıtlarda Enerji Depolama Teknolojilerinin Tarihsel Evrimi ve Sistem Düzeyinde Analizi

Mustafa ALKIN [1]
Meltem SÜPÜRTÜLÜ[2]

Abstract

Energy storage systems have played a pivotal and transformative role in the evolution of transportation technologies, continuously adapting to the increasing demands for higher energy density, improved system efficiency, extended cycle life, and enhanced environmental sustainability. From early steam-powered mechanical systems to the widespread adoption of internal combustion engines, and more recently to electrochemical solutions such as lead-acid and lithium-ion batteries, as well as emerging hydrogen fuel cell technologies, this progression reflects a fundamental transition from consumption-driven energy paradigms toward regenerative, efficient, and optimization-oriented system architectures.In this study, energy storage methods utilized in transportation systems are examined through a structured chronological framework. Mechanical, chemical, and electrochemical storage technologies are comparatively evaluated based on key performance indicators, including specific energy, specific power, cycle efficiency, operational lifetime, and cost-effectiveness. Particular emphasis is placed on understanding the technological and economic factors that have led to the dominance of lithium-ion batteries in modern electric vehicles. In parallel, the study critically analyzes the existing barriers—such as infrastructure limitations, high production costs, and system complexity—that constrain the large-scale adoption of hydrogen fuel cell systems. Furthermore, future-oriented technological pathways are explored, including solid-state battery technologies, hybrid energy storage architectures combining multiple storage mechanisms, and artificial intelligence-driven energy management strategies aimed at optimizing performance in real time. The findings of this study highlight that energy storage systems should not be evaluated solely on the basis of energy density; rather, a holistic system-level perspective that integrates efficiency, durability, safety, and lifecycle optimization is essential for the sustainable advancement of next-generation transportation systems.

Keywords: Energy storage systems, electric vehicles, lithium-ion batteries, hydrogen fuel cells, hybrid energy architectures, sustainable mobility.

[1] Mühendis, TOFAŞ AR&GE Merkezi, Türk Otomobil Fabrikası, Bursa/Türkiye, ORCID: 0009-0004-6176-8256
[2] Doktor Mühendis, TOFAŞ AR&GE Merkezi, Türk Otomobil Fabrikası, Bursa/Türkiye, ORCID: 0000-0003-0473-7731.

GİRİŞ

Ulaşım sektörü, küresel enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları açısından kritik bir konuma sahiptir. Uluslararası raporlara göre ulaştırma faaliyetleri dünya toplam enerji tüketiminin yaklaşık üçte birini oluşturmakta ve fosil yakıt kaynaklı karbon emisyonlarının önemli bir bölümünden sorumlu olmaktadır [1], [2], [3]. Özellikle karayolu taşımacılığında yaygın olarak kullanılan içten yanmalı motorlu taşıtlar, enerji dönüşüm verimi açısından önemli sınırlamalara sahiptir. Geleneksel içten yanmalı motor sistemlerinde yakıt enerjisinin yalnızca yaklaşık %18–25'lik kısmı mekanik harekete dönüştürülebilirken, geri kalan enerji ısı kayıpları ve çeşitli sistem kayıpları şeklinde çevreye aktarılmaktadır [4]. Buna karşılık elektrikli araçlarda şebekeden tekerleğe enerji dönüşüm verimi önemli ölçüde daha yüksek olup yaklaşık %40–50 seviyelerine ulaşabilmektedir [5]. Bu durum, enerji depolama ve enerji dönüşüm sistemlerinin taşıt performansı ve enerji verimliliği üzerindeki belirleyici rolünü açık biçimde ortaya koymaktadır.

Elektrikli araç teknolojilerinin son yıllarda hızlı bir gelişim göstermesine rağmen, enerji depolama sistemleri hâlen menzil, maliyet, güvenlik ve döngü ömrü gibi çeşitli mühendislik kısıtları ile karşı karşıyadır. Batarya teknolojilerinde enerji yoğunluğu, özgül güç, döngü ömrü ve termal güvenlik gibi parametreler elektrikli araçların yaygınlaşmasını doğrudan etkileyen temel faktörler arasında yer almaktadır [6], [7]. Ayrıca kritik hammaddelere olan bağımlılık, üretim maliyetleri ve sürdürülebilirlik konuları da enerji depolama teknolojilerinin geleceği açısından önemli araştırma alanları olarak değerlendirilmektedir.

Enerji depolama teknolojilerinin tarihsel gelişimi incelendiğinde, taşıt sistemlerinde kullanılan enerji kaynaklarının mekanik ve termal temelli çözümlerden kimyasal yakıt temelli sistemlere ve günümüzde elektrokimyasal enerji depolama teknolojilerine doğru evrildiği görülmektedir. Özellikle lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu, yüksek Coulomb verimi ve uzun döngü ömrü gibi avantajları sayesinde günümüz elektrikli araç teknolojilerinde baskın enerji depolama çözümü haline gelmiştir [7]. Bununla birlikte süper kapasitörler, kinetik enerji depolama sistemleri (FESS, Flywheel Energy Storage Systems) ve hidrojen yakıt hücreleri gibi alternatif teknolojiler, farklı güç ve enerji gereksinimlerinin karşılanabilmesi amacıyla hibrit enerji depolama mimarilerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır [8], [9].

Literatürde enerji depolama teknolojilerine yönelik çalışmalar çoğunlukla belirli bir teknoloji veya hücre kimyası üzerine odaklanmakta, ancak bu teknolojilerin taşıt sistemleri içerisindeki rolünün tarihsel gelişim ve sistem düzeyi mühendislik perspektifiyle birlikte değerlendirilmesi görece sınırlı kalmaktadır. Enerji depolama sistemlerinin yalnızca özgül enerji veya kapasite değerleri açısından değil, aynı zamanda güç yoğunluğu, döngü verimi, sistem entegrasyonu ve yaşam döngüsü performansı gibi çok boyutlu parametreler çerçevesinde ele alınması gerekmektedir.

Bu çalışma, taşıtlarda kullanılan enerji depolama teknolojilerinin tarihsel gelişimini kronolojik bir çerçevede incelemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda mekanik, kimyasal ve elektrokimyasal enerji depolama yöntemleri özgül enerji, özgül güç, döngü verimi ve sistem performansı gibi mühendislik parametreleri açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca modern elektrikli araç mimarilerinde giderek önem kazanan hibrit

enerji depolama sistemleri ele alınmakta ve gelecekteki enerji depolama teknolojilerine yönelik teknik gelişim eğilimleri tartışılmaktadır.

TARİHSEL EVRİM: BEŞ DÖNEMLİ ENERJİ DEPOLAMA PARADİGMASI

Taşıtlarda kullanılan enerji depolama teknolojileri, ulaşım sistemlerinin gelişimi ile birlikte önemli bir dönüşüm geçirmiştir. Enerji yoğunluğu, güç aktarım kapasitesi, sistem verimi ve çevresel sürdürülebilirlik gibi mühendislik gereksinimleri, enerji depolama çözümlerinin zaman içerisinde farklı teknolojik paradigmalara evrilmesine neden olmuştur. Bu dönüşüm mekanik ve termodinamik temelli sistemlerden başlayarak kimyasal yakıt teknolojilerine, ardından elektrokimyasal enerji depolama sistemlerine ve günümüzde hibrit enerji mimarilerine kadar uzanan çok aşamalı bir gelişim sürecini ifade etmektedir.

Mekanik ve Termodinamik Enerji Depolama Dönemi

Taşıtlarda enerji depolamanın erken örnekleri mekanik ve termal temelli sistemlere dayanmaktadır. Buhar makinelerinde enerji, kömür gibi yakıtların yanmasıyla elde edilen ısının buhar basıncına dönüştürülmesi ve bu basıncın mekanik harekete aktarılması prensibiyle kullanılmaktaydı. Ancak erken dönem buhar makinelerinde termodinamik verimin düşük olması (genellikle %5 – 10), sistem ağırlığının yüksekliği ve enerji dönüşüm sürecinin yavaş gerçekleşmesi, bu teknolojinin modern taşıt uygulamaları için sürdürülebilir bir çözüm olmasını sınırlamıştır [10]. Bu dönem, taşıtlarda enerji depolama anlayışının mekanik ve termal kaynaklardan daha verimli kimyasal ve elektrokimyasal sistemlere doğru evrilmesinin ilk basamağı olarak değerlendirilebilir.

Kimyasal Yakıt ve İçten Yanmalı Motor Dönemi

19.yüzyılın sonlarında içten yanmalı motorların geliştirilmesiyle birlikte kimyasal yakıt temelli enerji depolama dönemi başlamıştır. Özellikle Karl Benz tarafından geliştirilen motorlu taşıtlar, hidrokarbon yakıtların yüksek enerji yoğunluğundan faydalanmıştır. Benzin ve dizel yakıtların gravimetrik enerji yoğunluğu yaklaşık 12.000 Wh/kg seviyesindedir [4]. Bu değer, günümüzde kullanılan batarya teknolojilerinden oldukça yüksektir. İçten yanmalı motorlarda kimyasal enerji, kontrollü yanma reaksiyonu ile mekanik enerjiye dönüştürülmektedir. Ancak bu sistemlerin termodinamik verimi genellikle %25–35 aralığındadır [4], [12]. Bununla birlikte, karbon dioksit ve azot oksit emisyonları iklim değişikliğinin temel nedenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir [2]. Bu çevresel baskılar, alternatif enerji depolama sistemlerine olan ihtiyacı artırmıştır.

Elektrokimyasal Batarya Dönemi

Kurşun-Asit Akü Teknolojisi

Kurşun-asit aküler, taşıtlarda kullanılan ilk yaygın elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinden biri olup özellikle marş, aydınlatma ve yardımcı elektrik sistemlerinde uzun süre temel çözüm olarak kullanılmıştır [6]. Düşük maliyet, olgun üretim altyapısı ve güvenilir çalışma karakteristiği bu teknolojinin güçlü yönlerini oluştururken; düşük özgül enerji (yaklaşık 30–40 Wh/kg aralığında), yüksek ağırlık ve sınırlı döngü ömrü, kurşun-asit akülerin elektrikli araçlarda ana çekiş bataryası olarak kullanımını kısıtlamıştır [5], [6]. Bu nedenle kurşun-asit

teknolojisi tarihsel açıdan önemli bir geçiş basamağı olmakla birlikte, modern elektrikli araç mimarilerinde yerini daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip batarya teknolojilerine bırakmıştır.

Lityum-İyon Bataryalar

1990'lı yıllarda Sony tarafından ticarileştirilen lityum-iyon bataryalar, enerji depolama teknolojilerinde önemli bir dönüm noktası olarak kabul edilmektedir. Bu batarya türünde enerji, lityum iyonlarının şarj ve deşarj süreçleri sırasında anot ve katot elektrotları arasında hareket etmesiyle elektrokimyasal olarak depolanmaktadır. Bu mekanizma, yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek döngü verimi sağlayarak önceki nesil batarya teknolojilerine kıyasla önemli performans avantajları sunmaktadır [7]. Lityum-iyon bataryaların özgül enerji değerleri genellikle 150–300 Wh/kg aralığında olup, döngü verimleri %90–95 seviyelerine ulaşabilmektedir.

Yüksek Güç Yoğunluklu ve Hibrit Depolama Dönemi

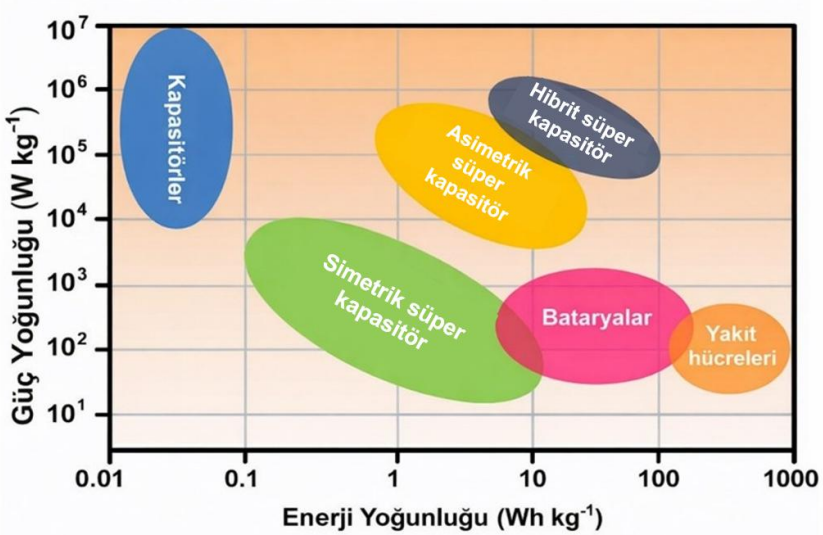
Enerji depolama teknolojilerinin gelişiminde önemli bir aşama, enerji yoğunluğundan ziyade güç yoğunluğuna odaklanan depolama sistemlerinin geliştirilmesi olmuştur. Elektrikli araç uygulamalarında ani ivmelenme, rejeneratif frenleme ve yük dalgalanmaları gibi dinamik çalışma koşulları, yalnızca yüksek enerji kapasitesine değil aynı zamanda çok yüksek güç aktarım kabiliyetine sahip depolama çözümlerini gerekli kılmaktadır. Bu gereksinim doğrultusunda süper kapasitörler ve kinetik enerji temelli depolama sistemleri olan Flywheel Energy Storage System (FESS) teknolojileri ön plana çıkmıştır.

Süper kapasitörler (ultrakapasitörler), elektrostatik çift tabaka veya psödokapasitif mekanizmalar aracılığıyla enerji depolayan sistemlerdir. Elektrokimyasal reaksiyonlara dayanan bataryalardan farklı olarak yüzey temelli yük depolama prensibiyle çalışmaları, çok yüksek şarj–deşarj hızlarına olanak sağlamaktadır. Literatürde süper kapasitörlerin bataryalara kıyasla yaklaşık 100 kat daha yüksek özgül güç sağlayabildiği belirtilmektedir [5]. Bu özellik, özellikle rejeneratif frenleme sırasında ortaya çıkan yüksek güç akışlarının kısa sürede depolanabilmesini mümkün kılmaktadır. Ancak özgül enerji değerlerinin düşük olması (Wh/kg seviyesinde) bu sistemlerin tek başına ana enerji kaynağı olarak kullanılmasını sınırlamaktadır.

Yüksek güç yoğunluklu bir diğer teknoloji ise kinetik enerji depolama prensibine dayanan FESS'tir. Bu sistemlerde enerji, yüksek hızla dönen bir rotorun atalet momenti ve açısal hızına bağlı olarak depolanmaktadır. Modern FESS sistemleri %85–95 aralığında döngü verimi sunabilmekte ve çok yüksek şarj–deşarj döngü sayısına ulaşabilmektedir [8]. Süper kapasitörler ve batarya sistemleri ile birlikte kullanıldığında bu teknolojiler, enerji depolama mimarisinde yüksek güç taleplerinin karşılanmasını sağlayarak batarya üzerindeki pik yükleri azaltabilmektedir. Enerji depolama teknolojilerinin özgül enerji ve özgül güç açısından karşılaştırılması literatürde yaygın olarak Ragone diyagramı ile gösterilmektedir. Şekil 1'de süper kapasitörler, bataryalar ve yakıt hücrelerinin enerji ve güç yoğunluğu açısından konumları şematik olarak gösterilmektedir.

Elektrikli araç teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte enerji depolama mimarileri tek kaynaklı yapılardan çok kaynaklı hibrit sistemlere doğru evrilme eğilimi göstermiştir. İlk dönem elektrikli araç tasarımlarında enerji depolama çoğunlukla yalnızca batarya tabanlı çözümlerle sağlanırken, artan güç talepleri, rejeneratif frenleme gereksinimleri ve menzil

optimizasyonu farklı enerji depolama teknolojilerinin birlikte kullanılmasını teşvik etmiştir. Bu bağlamda batarya ve süper kapasitör, batarya ve volan enerji depolama sistemi (FESS) veya yakıt hücresi, batarya ve süper kapasitör kombinasyonları literatürde hibrit enerji depolama mimarileri olarak incelenmektedir [5]. Bu yaklaşım, enerji ve güç gereksinimlerinin farklı zaman ölçeklerinde karşılanmasını mümkün kılan görev odaklı bir sistem mimarisinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 1. *Enerji depolama teknolojilerinin özgül enerji ve özgül güç açısından karşılaştırılması (Ragone diyagramı).*

Ragone diyagramı, enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu arasındaki temel mühendislik dengesini göstermektedir. Bataryalar enerji yoğunluğu bakımından avantaj sağlarken, süper kapasitörler kısa süreli yüksek güç taleplerinde öne çıkmaktadır. Bu nedenle modern taşıt mimarilerinde tekil enerji depolama sistemi yerine hibrit çözümler giderek önem kazanmaktadır.

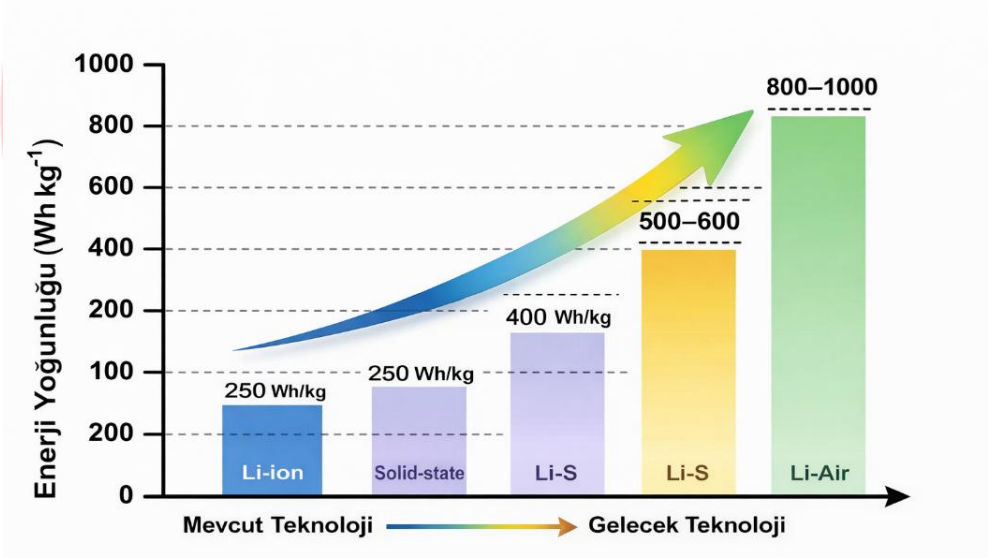
Hibrit enerji depolama sistemlerinde her bir bileşen farklı bir işlev üstlenmektedir. Yakıt hücreleri yüksek özgül enerji sağlayarak uzun süreli enerji gereksinimini karşılamakta, bataryalar orta vadeli enerji depolama ve güç dengesi sağlamakta, süper kapasitörler ise ani güç taleplerini ve rejeneratif frenleme sırasında ortaya çıkan yüksek akım piklerini absorbe etmektedir [9]. Bu tür mimarilerde yakıt hücresinden elde edilen elektrik enerjisi güç elektroniği dönüştürücüleri aracılığıyla elektrik tahrik motoruna iletilirken, batarya paketi sistemdeki güç dalgalanmalarını dengeleyen yardımcı enerji kaynağı olarak görev yapmaktadır.

Bu fonksiyonel görev dağılımı, batarya üzerindeki pik akım stresini azaltarak ısıl yükü düşürmekte ve elektrokimyasal bozunma süreçlerini yavaşlatabilmektedir. Bununla birlikte hibrit enerji depolama sistemlerinin etkin çalışabilmesi gelişmiş enerji yönetim stratejilerini gerektirmektedir. Optimizasyon temelli enerji yönetim algoritmaları, çok kaynaklı sistemlerde güç dağılımını dinamik olarak düzenleyerek hem sistem verimini artırmakta hem de batarya degradasyonunu azaltabilmektedir [11]. Bu nedenle hibrit enerji depolama mimarileri günümüzde yalnızca donanım performansı açısından değil, aynı zamanda kontrol algoritmaları ve sistem optimizasyonu perspektifinden ele alınan bütünleşik mühendislik çözümleri olarak değerlendirilmektedir.

Yeni Nesil ve Akıllı Enerji Yönetimi Dönemi

Elektrikli araç teknolojilerinde günümüzde lityum-iyon bataryalar baskın enerji depolama çözümü olarak kullanılmaktadır. Ancak enerji yoğunluğu, güvenlik ve ham madde sürdürülebilirliği gibi sınırlamalar nedeniyle yeni nesil enerji depolama teknolojilerine yönelik araştırmalar hız kazanmıştır (Şekil 2). Bu kapsamda katı hal bataryalar (solid-state batteries), lityum-sülfür (Li–S) bataryalar ve lityum-hava (Li–O_2) sistemleri geleceğin yüksek enerji yoğunluklu enerji depolama çözümleri arasında değerlendirilmektedir. Bu teknolojilerin ortak amacı, mevcut lityum-iyon sistemlerinin enerji yoğunluğu sınırlarını aşarken aynı zamanda güvenlik ve döngü ömrü açısından daha sürdürülebilir çözümler sunmaktır.

Katı hal bataryalar, sıvı elektrolit yerine seramik, sülfür bazlı veya polimer katı elektrolitlerin kullanıldığı enerji depolama sistemleridir. Bu yapı, sıvı elektrolitli bataryalarda görülen sızıntı, yanıcılık ve termal kaçak risklerini azaltarak güvenlik açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca katı elektrolitlerin geniş elektrokimyasal stabilite penceresi sayesinde daha yüksek voltajlı katot malzemeleri kullanılabilmekte ve bu durum teorik enerji yoğunluğunun artırılmasına olanak tanımaktadır. Literatürde katı hal bataryaların enerji yoğunluğunun 400 Wh/kg seviyesinin üzerine çıkabileceği öngörülmektedir [7]. Bununla birlikte düşük iyon iletkenliği, elektrot–elektrolit arayüz direnci ve üretim ölçeklenebilirliği gibi teknik zorluklar bu teknolojinin ticari uygulamalara geçişinde önemli mühendislik riskleri oluşturmaktadır.



Şekil 2. *Yeni nesil batarya teknolojilerinin enerji yoğunluğu karşılaştırması.*

Yeni nesil enerji depolama teknolojileri arasında lityum-sülfür ve lityum-hava bataryalar, mevcut lityum-iyon bataryaların enerji yoğunluğu sınırlarını aşma potansiyelleri nedeniyle dikkat çekmektedir [7], [16]. Lityum-sülfür bataryalar, sülfürün yüksek teorik özgül kapasitesi ve düşük maliyetli yapısı sayesinde lityum-iyon bataryalara kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu potansiyeli sunmaktadır. Ancak polisülfit shuttle etkisi, düşük elektriksel iletkenlik, hacimsel genleşme ve döngü stabilitesi sorunları bu teknolojinin taşıt uygulamalarında yaygınlaşmasını sınırlamaktadır [16], [17]. Lityum-hava bataryalar ise oksijenin aktif katot reaksiyonuna katılması sayesinde teorik olarak çok yüksek enerji yoğunluklarına ulaşma potansiyeline sahiptir. Buna rağmen oksijen yönetimi, elektrolit

bozunması, elektrot tıkanması, lityum dendrit oluşumu ve uzun dönem kararlılık problemleri henüz tam olarak çözülememiştir [17]. Bu nedenle lityum-sülfür ve lityum-hava bataryalar, gelecek için umut vadeden teknolojiler olmakla birlikte, günümüz taşıt uygulamaları açısından henüz araştırma ve geliştirme aşamasındaki sistemler olarak değerlendirilmelidir.

SİSTEM SEVİYESİNDE KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRME

Enerji depolama sistemlerinin taşıt performansına etkisi yalnızca özgül enerji ile açıklanamaz. Modern elektrikli araç mimarilerinde enerji depolama seçimi, çok parametreli mühendislik optimizasyon problemi olarak ele alınmalıdır. Bu bağlamda özgül enerji (Wh/kg), özgül güç (W/kg), döngü verimi (%), döngü ömrü, termal stabilite ve maliyet parametreleri eş zamanlı değerlendirilmelidir [5]. Tablo 1'de taşıt enerji depolama teknolojileri tarihsel gelişim, özgül enerji, özgül güç, sistem verimi, döngü ömrü, altyapı gereksinimi ve sistem entegrasyon karmaşıklığı açısından değerlendirilmiştir. Karşılaştırma, literatürde bildirilen tipik performans aralıkları ve taşıt uygulamalarındaki kullanım senaryoları dikkate alınarak yapılmıştır.

Tablo 1 – Taşıt Uygulamaları İçin Enerji Depolama Sistemlerinin Karşılaştırılması

Sistem	Özgül Enerji (Wh/kg)	Özgül Güç (W/kg)	Sistem Verimi (%)	Döngü / Çalışma Ömrü	Temel Avantaj	Temel Dezavantaj
İçten Yanmalı Motor (Yakıt)	11000 – 13000	1000 – 3000	25 – 35	Yakıt tüketimine bağlı	Çok yüksek enerji yoğunluğu	Yüksek emisyon
Kurşun-Asit Akü	30 – 40	200–400	70 – 80	1500 – 5000	Düşük maliyet	Yüksek ağırlık
Ni-MH Batarya	60 – 120	250 – 1000	65 – 75	1000 – 2000	Güvenli yapı	Düşük enerji yoğunluğu
Lityum-iyon batarya	150 – 300	1000 – 3000	90 – 95	1000 – 3000	Yüksek verim ve enerji yoğunluğu	Termal kaçak riski
Süper kapasitör	5 – 10	10000 – 20000	95 – 98	>500.000	Çok yüksek güç yoğunluğu	Düşük enerji yoğunluğu
Flywheel Enerji Depolama (FESS)	20 – 80	5000 – 10000	85 – 95	>100.000	Çok hızlı şarj/deşarj	Mekanik karmaşıklık
Yakıt Hücresi (PEMFC)	800 – 2000	200– 1000	50 – 60	5.000 – 10.000 saat	Sıfır lokal emisyon	Hidrojen altyapı gereksinimi

Not: Değer aralıkları literatürde bildirilen tipik taşıt uygulaması değerlerinden derlenmiştir [4], [5], [7], [8], [12], [15].

NEDEN LİTYUM-İYON BASKIN? HİDROJEN NEDEN YAYGINLAŞAMADI?

Lityum-iyon bataryaların elektrikli araç pazarında baskın teknoloji haline gelmesi, yalnızca yüksek özgül enerji değerleri ile değil, sistem seviyesinde sunduğu bütüncül

avantajlarla açıklanmalıdır. Öncelikle lityum-iyon sistemler %90–95 seviyelerine ulaşan yüksek döngü verimi sayesinde enerji dönüşüm zincirinde düşük kayıp sunmakta ve şebekeden tekerleğe verimin optimize edilmesine katkı sağlamaktadır. Bunun yanında mevcut elektrik altyapısına doğrudan entegre edilebilmesi, bu teknolojinin hızlı yayılımında belirleyici bir rol oynamıştır. Elektrik şebekesinin küresel ölçekte yaygın olması, hidrojen gibi yeni bir dağıtım altyapısı gerektiren alternatif teknolojilere kıyasla önemli bir avantaj sunmaktadır. Ayrıca son yıllarda artan üretim hacmi ile birlikte ölçek ekonomisi devreye girmiş ve batarya maliyetleri önemli ölçüde düşmüştür. Bu durum, lityum-iyon teknolojisinin hem ekonomik hem de teknolojik açıdan olgunlaşmasını hızlandırmıştır [7]. Buna karşılık hidrojen yakıt hücreli sistemler, teorik olarak yüksek enerji yoğunluğu ve hızlı dolum süreleri gibi önemli avantajlara sahip olmasına rağmen, çok boyutlu mühendislik ve ekonomik zorluklar nedeniyle geniş ölçekli yaygınlığa ulaşamamıştır. Literatürde yakıt hücreli sistemlerin yaklaşık %60 verimle çalışabildiği ve özellikle uzun menzil gerektiren uygulamalarda avantaj sağlayabildiği belirtilmektedir [15]. Bununla birlikte hidrojenin düşük hacimsel enerji yoğunluğu, araç üzerinde depolama için genellikle 350–700 bar basınç altında sıkıştırılmasını gerektirmekte ve bu durum hem güvenlik hem de sistem tasarımı açısından önemli mühendislik zorlukları oluşturmaktadır [12], [15].

Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde hidrojen üretim maliyetleri önemli bir sınırlayıcı faktör olarak öne çıkmaktadır. Fosil yakıt temelli hidrojen üretiminin 0.5–1.7 $/kg aralığında olduğu, yenilenebilir kaynaklara dayalı yeşil hidrojen üretiminin ise 3–8 $/kg seviyelerine ulaştığı rapor edilmektedir [15]. Bu maliyet farkı, hidrojen yakıt hücreli sistemlerin toplam sahip olma maliyetini artırmakta ve batarya tabanlı çözümler karşısında ekonomik rekabet gücünü sınırlamaktadır. Buna ek olarak hidrojen dolum altyapısının sınırlı olması, teknolojinin yaygınlaşmasını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Örneğin, 2023 yılı itibarıyla Amerika Birleşik Devletleri'nde yalnızca 59 adet hidrojen dolum istasyonunun aktif olduğu rapor edilmiştir [15]. Bununla birlikte hidrojen teknolojileri tamamen dezavantajlı olarak değerlendirilmemelidir. Özellikle ağır ticari araçlar, uzun menzil gerektiren taşımacılık ve kesintisiz operasyon gerektiren uygulamalarda hidrojen yakıt hücreleri önemli bir alternatif sunmaktadır. Yakıt hücreli araçların kısa dolum süreleri ve yüksek menzil kapasitesi, batarya tabanlı sistemlerin sınırlı kaldığı kullanım senaryolarında avantaj sağlamaktadır [15].

Son olarak, lityum-iyon teknolojisinin baskınlığı mutlak bir üstünlük olarak değerlendirilmemelidir. Lityum, kobalt ve nikel gibi kritik hammaddelere olan bağımlılık, tedarik zinciri güvenliği ve jeopolitik riskler açısından önemli bir kırılganlık oluşturmaktadır. Artan elektrikli araç talebi bu hammaddelerin arz-talep dengesini etkilemekte ve sürdürülebilirlik tartışmalarını beraberinde getirmektedir. Bu durum, katı hal bataryalar, lityum-sülfür ve diğer alternatif enerji depolama teknolojilerine yönelik araştırmaları hızlandırmaktadır [6], [7].

Bu karşılaştırma, lityum-iyon sistemlerin mevcut altyapıya uyumlu ve olgun bir teknoloji olduğunu, hidrojen sistemlerinin ise altyapı bağımlılığı yüksek ve sistem entegrasyonu açısından daha karmaşık bir çözüm sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Dolayısıyla kısa ve orta vadede lityum-iyon teknolojisinin baskınlığını sürdürmesi beklenirken, uzun vadede çoklu enerji depolama teknolojilerinin birlikte kullanıldığı hibrit ve görev odaklı sistem mimarilerinin ön plana çıkması muhtemeldir.

GELECEĞE YÖNELİK TEKNİK SENARYO

Enerji depolama sistemlerinin gelecekteki evrimi, yalnızca daha yüksek enerji yoğunluğu hedefiyle değil, aynı zamanda güvenlik, döngü ömrü, sürdürülebilirlik ve sistem optimizasyonu ekseninde şekillenecektir. Bu bağlamda katı hal bataryalar önemli bir aday teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Katı elektrolit kullanımı sayesinde sıvı elektrolitli sistemlerde görülen termal kaçak riskinin azaltılması ve daha yüksek enerji yoğunluklarının (>400 Wh/kg) teorik olarak mümkün hale gelmesi, bu teknolojiyi özellikle otomotiv uygulamaları açısından cazip kılmaktadır [7]. Bununla birlikte iyon iletkenliği, arayüz direnci ve üretim ölçeklenebilirliği gibi teknik zorlukların aşılması gerekmektedir. Katı hal teknolojisinin olgunlaşması durumunda, hem güvenlik hem de menzil açısından önemli bir sıçrama beklenmektedir.

Bunun yanında enerji depolama mimarisinin tekil hücre performansından ziyade sistem entegrasyonuna doğru evrilmesi beklenmektedir. Batarya , süper kapasitör ve FESS gibi çok katmanlı hibrit mimariler, farklı zaman ölçeklerinde enerji ve güç taleplerini karşılamak üzere optimize edilebilir. Bu yaklaşımda batarya orta ve uzun süreli enerji ihtiyacını karşılar; süper kapasitörler ani güç taleplerini ve rejeneratif frenleme enerjisini absorbe eder; FESS sistemleri ise yüksek döngüli, kısa süreli enerji dalgalanmalarını dengeler [5]. Böylece batarya üzerindeki pik akım stresleri azaltılarak degradasyon hızı düşürülebilir ve toplam sistem ömrü uzatılabilir. Bu yapı, enerji depolama evriminde “çok kaynaklı entegre sistem” paradigmasının güçleneceğini göstermektedir.

Geleceğin enerji depolama sistemlerinde donanım kadar kontrol algoritmaları da belirleyici olacaktır. Yapay zekâ tabanlı enerji yönetim sistemleri, sürüş profili, trafik durumu, sıcaklık ve kullanıcı alışkanlıklarını dikkate alarak enerji akışını gerçek zamanlı optimize edebilecektir.

SONUÇ

Taşıtlarda enerji depolama sistemleri tarihsel olarak mekanik/termal sistemlerden elektrokimyasal ve hibrit sistemlere evrilmiştir. Lityum-iyon bataryalar yüksek verim, mevcut altyapı uyumu ve maliyet düşüşü nedeniyle kısa-orta vadede baskın kalacaktır. Hidrojen yakıt hücreleri özellikle ağır ticari araçlar ve uzun menzil uygulamaları için tamamlayıcı bir çözüm olabilir. Gelecekte enerji yoğunluğu kadar güç yoğunluğu, güvenlik, döngü ömrü ve enerji yönetim algoritmaları belirleyici olacaktır. Hibrit enerji depolama mimarileri, batarya üzerindeki pik yükleri azaltarak sistem ömrünü artırma potansiyeline sahiptir.

KAYNAKÇA

[1] Hall, D., & Lutsey, N. (2017). *Emerging best practices for electric vehicle charging infrastructure*. International Council on Clean Transportation.

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. Cambridge University Press.

[3] International Energy Agency. (2023). Global EV outlook 2023. IEA.

[4] Heywood, J. B. (2018). Internal combustion engine fundamentals (2nd ed.). McGraw-Hill Education.

[5] Kurtulmuş, Z. N., & Karakaya, A. (2024). Review of mechanical, electrochemical, electrical, and hybrid energy storage systems used for electric vehicles. International Journal of Automotive Science and Technology, 8(1), 44–51.

[6] Tarascon, J.-M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. Nature, 414(6861), 359–367.

[7] Manthiram, A. (2017). An outlook on lithium ion battery technology. ACS Central Science, 3(10), 1063–1069.

[8] Barelli, L., Bidini, G., Bonucci, F., Castellini, L., & Ottaviano, A. (2019). Flywheel hybridization to improve battery life in electric vehicles. Energy, 173, 937–945.

[9] Li, Q., Chen, W., Li, Y., Liu, S., & Huang, J. (2012). Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 43(1), 514–525.

[10] Smil, V. (2017). Energy transitions: Global and national perspectives (2nd ed.). Praeger.

[11] Yi, F., Liu, K., & Yang, C. (2022). Energy management strategy considering battery degradation for hybrid energy storage systems. Sustainability, 14(3), 1214.

[12] Barbir, F. (2013). PEM fuel cells: Theory and practice (2nd ed.). Academic Press.

[13] Manoharan, Y., Hosseini, S. E., Butler, B., Alzhahrani, H., Senior, B. T. F., Ashuri, T., & Krohn, J. (2019). Hydrogen fuel cell vehicles: Current status and future prospect. Applied Sciences, 9(11), 2296.

[14] Toyota Motor Corporation. (2020). Toyota Mirai fuel cell vehicle technology overview.

[15] Staffell, I., Scamman, D., Abad, A. V., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Shah, N., & Ward, K. R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. Energy & Environmental Science, 12(2), 463–491.

[16] Manthiram, A., Chung, S.-H., & Zu, C. (2015). Lithium–sulfur batteries: Progress and prospects. Advanced Materials, 27(12), 1980–2006.

[17] Bruce, P. G., Freunberger, S. A., Hardwick, L. J., & Tarascon, J.-M. (2012). Li–O_2 and Li–S batteries with high energy storage. *Nature Materials, 11*, 19–29.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Physics-Informed Neural Network Approaches for 2D Magnetic Field Modeling in Cartesian Coordinates: Residual-Based and Energy-Based Training Strategies

Hüseyin YILDIZ[1]
Yasemin POYRAZ KOÇAK[2]
Erol UZAL[3]

Abstract

Physics-Informed Neural Networks (PINNs) have become an alternative approach for solving partial differential equations without requiring traditional mesh-based numerical methods. In this study, a PINN-based framework is proposed for modeling the two-dimensional magnetic field distribution generated by a coil in the Cartesian coordinate system using Maxwell's equations. The study focuses on a region containing a coil in order to investigate the learning performance of PINNs under electromagnetic conditions. Two different training strategies are investigated within the same PINN framework. In the first, the loss function is constructed using the residuals of the governing differential equation and boundary conditions. In the second approach, a variational energy-based formulation is used by minimizing the magnetic energy functional of the system. The performances of both methods are comparatively analyzed in terms of convergence behavior, training stability, and smoothness of the obtained magnetic field distribution. In addition, the magnetic field distribution obtained from the PINN models is compared with results computed using the Finite Difference Analysis (FDA) method. Numerical results demonstrate that both PINN approaches can successfully approximate the magnetic vector potential and magnetic field distribution in the coil domain with results consistent with FDA solutions. However, the variational energy-based approach provides more stable convergence and smoother field representations during training. The study highlights the applicability of physics-informed deep learning methods for computational electromagnetics and presents a comparison between residual-based and energy-based PINN optimization strategies.

Keywords: Physics-Informed Neural Networks, Maxwell Equations, Magnetic Field Modeling, Variational Learning.

[1] Assos. Prof. Dr., Istanbul University-Cerrahpaşa, Mechanical Engineering Department, huseyin.yildiz@iuc.edu.tr, Orcıd: 0000-0002-0575-3904
[2] Research Assistant Dr, Istanbul University-Cerrahpaşa, Computer Technologies Department, yasemin.poyraz@iuc.edu.tr, Orcıd: 0000-0002-1502-7260
[3] Prof. Dr, Istanbul University-Cerrahpaşa, Mechanical Engineering Department, euzal@iuc.edu.tr, Orcıd: 0000-0003-0008-1376

1 INTRODUCTION

Analysis of the Magnetic field distribution has an important role in the design, control and optimization of many engineering systems, such as electric machines, transformers, magnetic actuators, and robotic devices controlled by magnetic field (Jackson, 1999) (Sadiku, 2001). Robust and fast computation of magnetic field behavior is essential for predicting electromagnetic interactions, energy transfer mechanisms, and material responses under different conditions. Traditional numerical techniques such as the Finite Difference Method (FDM) and Finite Element Method (FEM) have been widely employed for solving Maxwell's equations in computational electromagnetics (Jin, 2015). Although these methods provide highly accurate solutions, but they generally require mesh generation and extensive computational resources, particularly for geometrically complex and heterogeneous domains. In recent years, deep learning-based approaches have emerged as promising alternatives for solving partial differential equations without relying on conventional mesh-based discretization techniques (Raissi, 2019), (Karniadakis, 2021). Among these approaches, Physics-Informed Neural Networks (PINNs) incorporate governing physical laws directly into the neural network training process through differential equation constraints and boundary conditions. PINN-based frameworks have attracted significant attention in computational electromagnetics for modeling magnetic field distributions and solving Maxwell-based physical systems under complex domain conditions.

Several numerical and neural network models have been developed for the solution of Maxwell-based electromagnetic field problems. Among classical methods, finite difference approaches, particularly the FDA with time-domain method, have been widely used. For instance, Maxwell's curl equations are discretized on staggered Cartesian grids in (Yee, 1966), (Taflove, 2005). These methods are simple and efficient for regular domains; however, their accuracy and computational cost strongly depend on grid resolution, stability constraints, and the treatment of material interfaces. The authors of (Zhao P. N., 2012) employed the Finite Difference Method (FDM) to solve static electromagnetic field problems derived from Maxwell's equations and demonstrated the computation of two-dimensional and three-dimensional electromagnetic field distributions under prescribed boundary conditions.

The finite element method has also become one of the most established techniques in computational electromagnetics because of its flexibility in handling complex geometries, irregular boundaries, and heterogeneous materials (Monk, 2003), (Jin, Theory and computation of electromagnetic fields, 2015). FEM-based models are particularly effective for magnetostatic and low-frequency electromagnetic problems, where the magnetic vector potential is commonly used to transform Maxwell's equations into elliptic partial differential equations. (Nikitenko, 2020) developed a finite difference formulation for computing magnetic field distributions in an axisymmetric synchronous generator. The magnetic vector potential equation derived from Maxwell's equations was discretized using finite differences, enabling the evaluation of magnetic induction throughout the computational domain.

In addition to FDM and FEM, meshless and collocation-based methods have been investigated for electromagnetic and general PDE problems. Radial basis function collocation methods offer an alternative to mesh-dependent discretization by approximating the solution

through scattered nodes (Kansa, 1990). Such methods can reduce the burden of mesh generation, but their performance is sensitive to the choice of basis functions, shape parameters, and collocation point distributions.

Recently, physics-informed deep learning has emerged as a promising direction for solving forward and inverse problems governed by partial differential equations. Physics-Informed Neural Networks incorporate governing equations, boundary conditions, and initial conditions into the loss function, allowing the neural network to learn physically consistent solutions without requiring labeled simulation data (Raissi, 2019), (Karniadakis, 2021). In computational electromagnetics, PINN-based approaches have been applied to Maxwell's equations, low-frequency electromagnetic analysis, magneto-quasi-static problems, and magnetic field prediction tasks (Khan, 2022) (Baldan, 2021) (Hou, 2024). These studies demonstrate that PINNs can provide mesh-free approximations of electromagnetic fields while embedding physical constraints directly into the learning process.

Besides residual-based PINN formulations, variational and energy-based learning strategies have attracted attention for PDE problems that can be expressed through an energy functional. The Deep Ritz method introduced a neural-network-based framework for solving variational problems by minimizing the associated energy functional (E, 2018). This idea is particularly relevant for magnetostatic field modeling, where the magnetic energy functional can be minimized to obtain the magnetic vector potential. Compared with pointwise residual minimization, energy-based formulations may provide smoother field representations and improved training stability, especially in elliptic problems.

In this study, two Physics-Informed Neural Network (PINN) training strategies are proposed and comparatively investigated for modeling two-dimensional magnetic field distributions in Cartesian coordinates: a residual-based approach derived from the governing Maxwell equations and an energy-based approach obtained through minimization of the magnetic energy functional.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 presents the governing Maxwell equations, the problem formulation, and the proposed residual-based and energy-based PINN approaches for modeling the magnetic field distribution. Section 3 provides the FDA results and comparative performance analysis of the proposed PINN methods. Finally, in Section 4, the conclusions and future directions are given.

2 PROBLEM FORMULATION AND METHODOLOGY

2.1. Maxwell Equations

In the proposed framework, the magnetic field distribution is computed by Maxwell's equations. Under magnetostatic conditions, the time-varying terms vanish and Maxwell's equations reduce to Equation 1 and 2 (Jackson, 1999).

$$\nabla \times H = J \tag{1}$$

$$\nabla . B = 0 \tag{2}$$

where H denotes the magnetic field intensity, B represents the magnetic flux density, and J is the current density within the coil region. The constitutive relation between the magnetic field intensity and magnetic flux density is given by Equation 3.

$$B = \mu H \tag{3}$$

where μ denotes the magnetic permeability of the medium. To satisfy the divergence-free condition of the magnetic flux density, the magnetic vector potential A is introduced by Equation 4.

$$\mathrm{B} = \nabla \times A \tag{4}$$

Since a two-dimensional Cartesian coordinate system is considered, only the out-of-plane component of the magnetic vector potential is retained, i.e., A = A(x,y). Consequently, the magnetic flux density components can be expressed as Equation 5.

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y}, \qquad B_y = -\frac{\partial A}{\partial x} \tag{5}$$

Substituting the magnetic vector potential formulation into Ampère's law yields the governing equation of the magnetostatic problem like Equation 6.

$$\nabla.\left(\frac{1}{\mu}\nabla A\right) = -J \tag{6}$$

In this study, for the homogeneous medium considered, the magnetic permeability is assumed to be constant throughout the computational domain. Therefore, the governing equation is can described like Equation 7 (Sadiku M. N., 2001).

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu J \tag{7}$$

This equation forms the physical model used in both the Finite Difference Analysis (FDA) reference solution and the proposed Physics-Informed Neural Network (PINN) formulations (Kuczmann, 2009).

2.2. Computational Domain and Boundary Conditions

In this study, the computational domain is defined as a two-dimensional square region ($\Omega = [0, \mathrm{L}]\mathrm{x}[0, \mathrm{L}]$), representing an air-filled region. A rectangular coil region is embedded within the domain and acts as the source of the magnetic field through a prescribed current density (J). The geometry is illustrated in Figure 1.

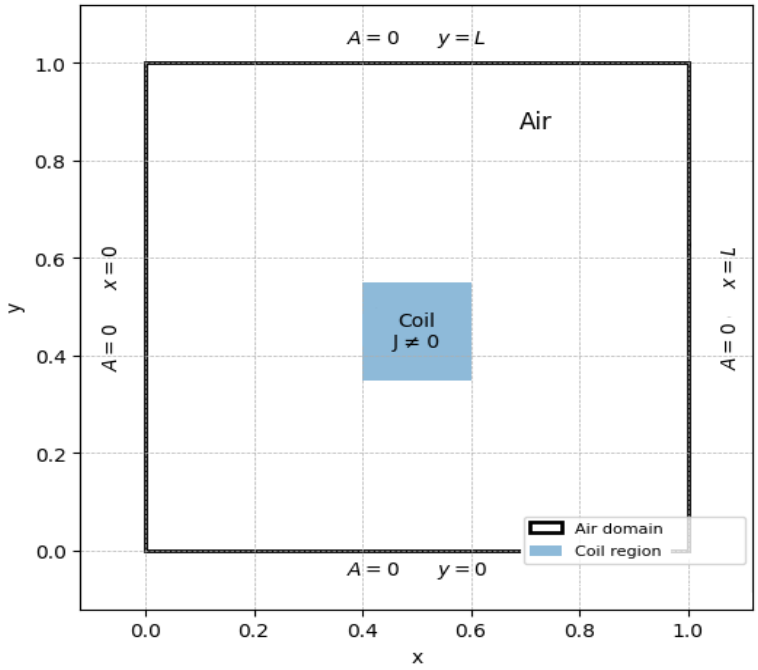


Figure 6: *Computational domain employed for two-dimensional magnetic field modeling in Cartesian coordinate system.*

The governing magnetostatic problem is formulated in terms of the magnetic vector potential **A**. The magnetic field distribution is obtained from the spatial derivatives of the magnetic vector potential within the computational domain. The coil subdomain occupies the region [0.4 ≤ x ≤0.6], [0.35≤ y ≤ 0.55] where a uniform current density is applied. Outside the coil region, the source term is set to zero, corresponding to the air domain. To ensure a well-posed boundary value problem, Dirichlet boundary conditions are employed on all boundaries of the computational domain. Accordingly, the magnetic vector potential is prescribed as [A=0] on the boundaries (x=0), (x=L), (y=0), and (y=L), as shown in Fig. 1.

2.3. Finite Difference Analysis (FDA)

FDA model was implemented to generate a reference solution for validating the proposed PINN formulations. FDA is a widely used numerical method in computational electromagnetics, where the governing partial differential equation is discretized on a structured grid and transformed into a system of algebraic equations (Chapra, 2015), (Sadiku M. N., 2001). In this study, the magnetic vector potential formulation is adopted and the governing equation can be written as Equation 8:

$$\nabla \cdot \left(\left(\frac{1}{\mu} \right) \nabla \mathbf{A} \right) = -\mathrm{J} \tag{8}$$

where **A** denotes the magnetic vector potential, μ is the magnetic permeability, and J represents the current density applied within the coil region. The computational domain is discretized using a uniform Cartesian coordinat system. Applying central FDA to the spatial derivatives yields a discrete equation relating each interior node to its neighboring nodes. For a typical interior point (i,j), the resulting update equation can be written as Equation 9:

$$A(i,j) = \left(\frac{1}{M(i,j)} q(i,j) + E(i,j)\right) \quad (9)$$

where M(i,j) contains the finite difference coefficients and E(i,j) represents the contribution of neighboring nodal values.

Homogeneous Dirichlet boundary conditions (A = 0) are imposed on all outer boundaries of the computational domain, while the current density source term is applied only within the coil region. The resulting algebraic system is solved iteratively using the Gauss–Seidel method with relaxation until convergence is achieved.

After obtaining the magnetic vector potential distribution, the magnetic flux density is computed from the spatial derivatives of A. The FDA solution is subsequently used as a benchmark for evaluating the prediction accuracy and convergence characteristics of the residual-based and energy-based PINN approaches.

2.4. Physics-Informed Neural Network Framework

Physics-Informed Neural Networks (PINNs) provide a mesh-free framework for solving partial differential equations by incorporating the governing physical laws directly into the training process. Instead of relying on labeled solution data, PINNs optimize the neural network parameters by minimizing the residuals of the governing equation together with the prescribed boundary conditions.

The architecture of the proposed PINN framework is illustrated in Figure 2. The spatial coordinates (x,y) are provided as inputs to a fully connected feed-forward neural network, and the output of the network corresponds to the magnetic vector potential A(x,y). Hidden layers with hyperbolic tangent activation functions are employed to construct a continuous approximation of the solution over the entire computational domain.

A key feature of PINNs is the use of automatic differentiation to evaluate the derivatives required by the governing equation. Using automatic differentiation, the first and second order spatial derivatives of the magnetic vector potential are computed directly from the network output. These derivatives are subsequently used to evaluate the residual of the governing magnetostatic equation.

In addition to the governing equation, the homogeneous Dirichlet boundary conditions are enforced on all external boundaries of the computational domain. For all boundary points where the prescribed value of the magnetic vector potential is zero. The total loss function is constructed as the combination of the PDE residual loss and the boundary-condition loss.

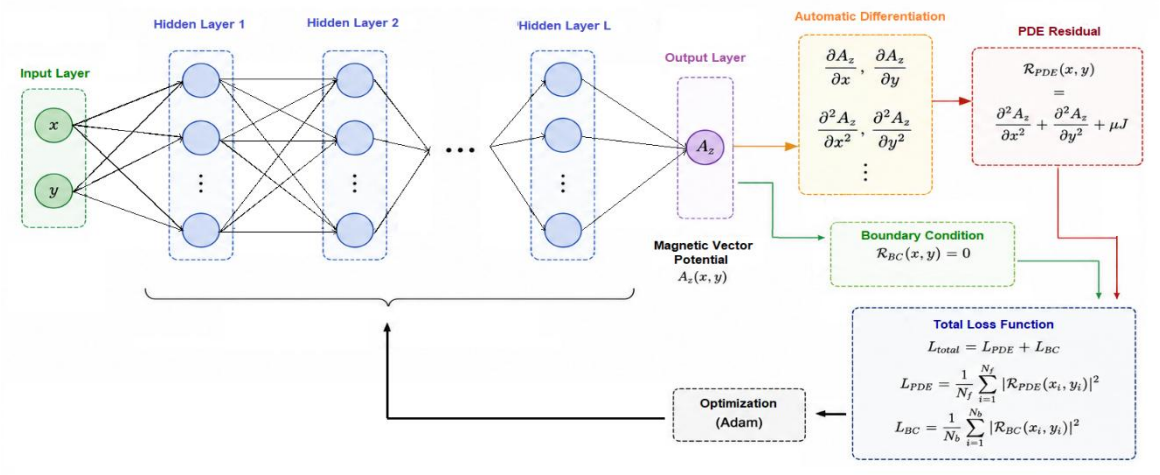


Figure 7: Architecture of the proposed residual-based Physics-Informed Neural Network (PINN). The spatial coordinates (x,y) are provided as inputs to a fully connected neural network that predicts the magnetic vector potential A(x,y).

During training, the network parameters are iteratively updated using the Adam optimizer. The optimization process continues until the total loss converges to a sufficiently small value. After training, the neural network provides a continuous approximation of the magnetic vector potential throughout the computational domain, from which the magnetic flux density components can be obtained through spatial differentiation.

2.4.1. Residual-Based PINN Formulation

In the residual-based PINN approach, the neural network is trained by minimizing the residual of the governing magnetostatic equation at collocation points distributed throughout the computational domain. The magnetic vector potential A(x,y) is represented by a fully connected neural network, and the required spatial derivatives are computed through automatic differentiation, as illustrated in Figure 2. For the homogeneous medium considered in this study, the governing equation can be written as Equation 10.

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu J \tag{10}$$

The corresponding PDE residual is defined as Equation 11.

$$R_{PDE}(x, y) = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \mu J \tag{11}$$

where N_f denotes the number of interior collocation points. In addition to the governing equation, homogeneous Dirichlet boundary conditions are imposed on all outer boundaries of the computational domain. Therefore, the magnetic vector potential is constrained to satisfy A(x,y) = 0 on x = 0, x = L, y = 0, and y = L. By simultaneously enforcing the governing equation and the prescribed boundary conditions, the neural network learns a continuous approximation of the magnetic vector potential throughout the computational domain. After training, the magnetic flux density components are obtained from the spatial derivatives of the predicted vector potential according to Equation 5.

2.4.2. Energy-Based PINN Formulation

In contrast to the residual-based PINN approach, the energy-based formulation does not enforce the governing magnetostatic equation through pointwise residual minimization. Instead, the neural network is trained by minimizing the total magnetic energy of the system. This approach is based on the variational principle, which states that the physical solution corresponds to the minimizer of an appropriate energy functional. For the magnetostatic problem considered in this study, the magnetic vector potential A(x,y) is obtained by minimizing the magnetic energy functional using Equation 12.

$$J(A) = \int_{\Omega} \left[\frac{1}{\mu} \left(\left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 \right) - 2AJ \right] d\Omega \tag{12}$$

where μ denotes the magnetic permeability, J represents the current density distribution within the coil region, and Ω is the computational domain.

The stationary point of this functional satisfies the Euler–Lagrange equation, which recovers the governing magnetostatic equation introduced in the previous section. Therefore, instead of minimizing the PDE residual directly, the neural network is trained to minimize the total magnetic energy of the system. Within this framework, the magnetic vector potential is represented by the neural network, while the spatial derivatives required in the energy functional are computed using automatic differentiation. The domain integral is evaluated numerically using the collocation points distributed throughout the computational domain. The corresponding energy loss function is defined as Equation 13.

$$\mathcal{L}_{energy} = J(A) \tag{13}$$

2.5. Training Procedure and Network Architecture

Both the residual-based and energy-based PINN formulations employ the same neural network architecture to ensure a fair comparison between the two training strategies. A fully connected feed-forward neural network is used to approximate the magnetic vector potential throughout the computational domain.

The network takes the spatial coordinates (x,y) as inputs and produces the magnetic vector potential A(x,y) as output. Hyperbolic tangent (tanh) activation functions are used in all hidden layers due to their smooth differentiability and suitability for solving partial differential equations. The architecture consists of four hidden layers containing 25, 150, 10, and 5 neurons, respectively.

Training points are divided into two groups: interior collocation points and boundary points. Interior collocation points are used to enforce the governing physical constraints, whereas boundary points are employed to satisfy the prescribed Dirichlet boundary conditions.

The network parameters are optimized using the Adam optimizer. During each training iteration, automatic differentiation is employed to evaluate the spatial derivatives required by the residual-based and energy-based formulations. The optimization process continues until convergence of the total loss function is achieved.

To enable a direct comparison between the proposed approaches, identical computational domains, boundary conditions, neural network architectures, optimizer settings, and training datasets are used for both formulations. Therefore, any differences in prediction accuracy and convergence behavior can be attributed solely to the selected physics-informed training strategy.

3 EXPERIMENTAL RESULTS

This section presents the numerical results obtained using the proposed residual-based and energy-based PINN formulations. The performance of both approaches is evaluated by comparing the predicted magnetic vector potential and magnetic field distributions with the reference FDA solution. To ensure a fair comparison, identical computational domains, boundary conditions, and neural network architectures are employed for both PINN models.

3.1. Residual-Based PINN Results

Figure 3 presents a comparison between the reference FDA solution and the residual-based PINN solution in terms of the magnetic vector potential, magnetic flux density magnitude, and magnetic flux lines. As shown first line of the Figure 3, the residual-based PINN successfully captures the overall distribution of the magnetic vector potential generated by the current-carrying coil. The maximum potential values are observed near the coil region, while the potential gradually decreases toward the outer boundaries. The contour patterns obtained from the PINN model are generally consistent with those produced by the FDA solution.

The magnetic flux density distributions as shown in second line of the Figure 3, further demonstrate that the residual-based PINN is capable of reproducing the main characteristics of the magnetic field. In particular, the highest magnetic flux density values are concentrated around the coil, and the overall field topology agrees well with the FDA results. Similarly, the magnetic flux lines illustrated in third line of the Figure 3 exhibit the expected closed-loop behavior around the current source. Although slight distortions can be observed in some regions, the overall flux-line structure predicted by the PINN remains physically consistent.

To provide a more detailed comparison, one-dimensional cross-sectional profiles extracted at different horizontal locations are presented in Figure 4. The left column compares the magnetic vector potential distributions, whereas the right column shows the magnetic flux density magnitude distributions. For the magnetic vector potential, noticeable deviations between the FDA and PINN solutions are observed at all investigated cross-sections. Although the residual-based PINN correctly predicts the general shape of the potential distribution, it systematically underestimates the peak values, particularly near the center of the domain where the magnetic field is strongest.

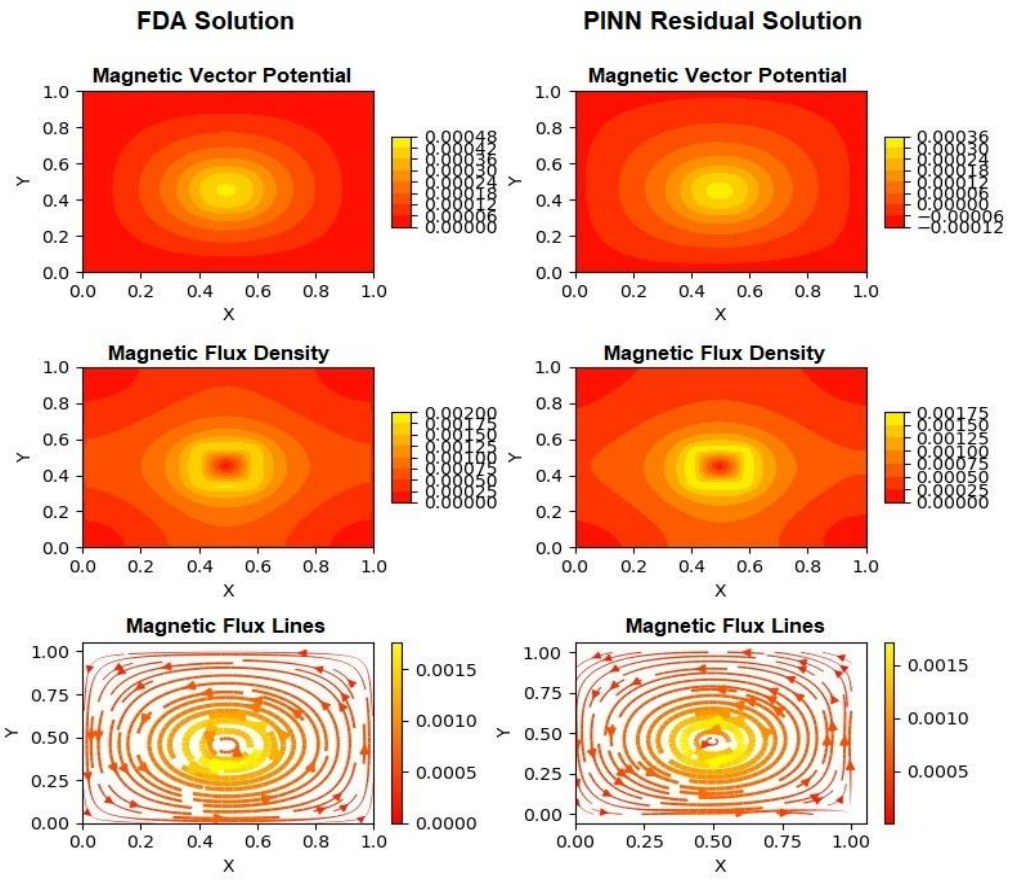


Figure 8: *Comparison of the FDA reference solution and the residual-based PINN solution. The magnetic vector potential, magnetic flux density magnitude, and magnetic flux lines obtained by the PINN show good agreement with the FDA results, indicating that the proposed model successfully captures the main characteristics of the magnetic field distribution.*

In contrast, the magnetic flux density profiles exhibit significantly better agreement with the FDA reference solution. The residual-based PINN accurately reproduces both the locations and magnitudes of the magnetic flux density peaks for the sections at y=0.45, y = 0.40, y = 0.30, and y=0.20. Minor discrepancies are observed near the boundaries and around the peak regions; however, the overall agreement remains satisfactory. These results indicate that the residual-based PINN is able to capture the spatial variation of the magnetic field more accurately than the magnetic vector potential itself.

Overall, the residual-based PINN successfully reconstructs the magnetic field distribution and reproduces the main physical characteristics of the FDA reference solution. However, the observed deviations in the magnetic vector potential profiles suggest that the residual minimization strategy may require additional training effort or alternative loss formulations to achieve higher accuracy in the solution field.

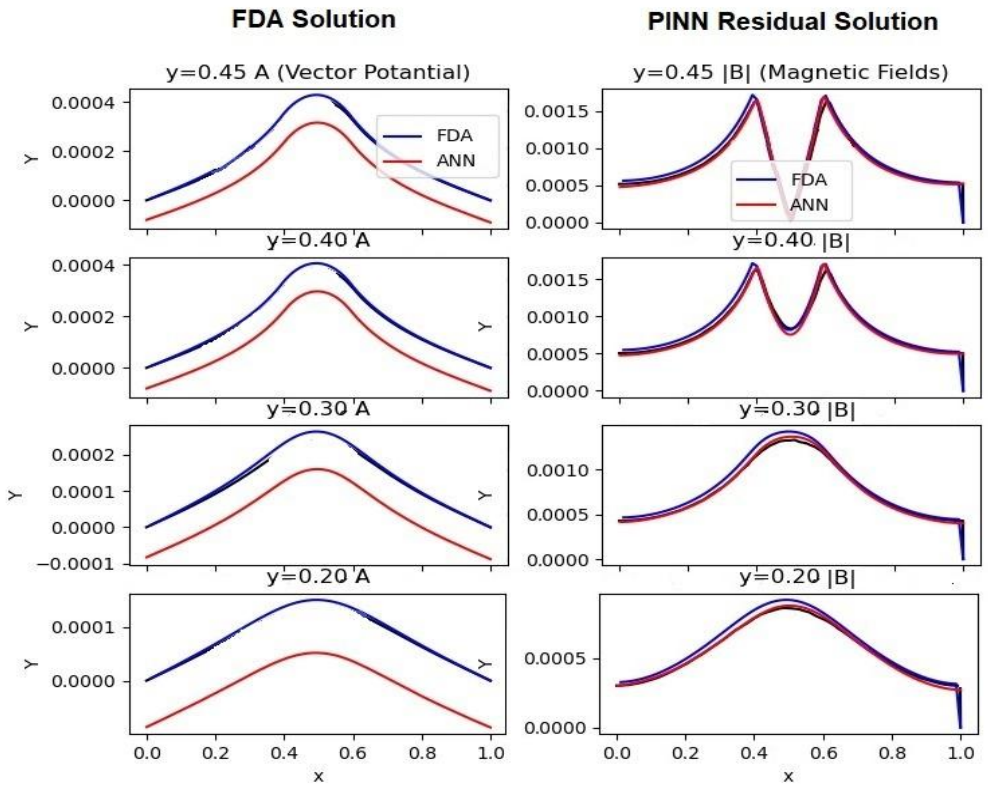


Figure 9: *Comparison of the magnetic vector potential and magnetic flux density profiles obtained from the FDA and residual-based PINN models at selected cross-sections. The residual-based PINN provides good agreement with the FDA solution, particularly for the magnetic flux density profiles.*

3.2. Energy-Based PINN Results

The performance of the energy-based PINN formulation was evaluated by comparing its predictions with the FDA reference solution. Figure 5 presents the contour plots of the magnetic vector potential, magnetic flux density magnitude, and magnetic flux lines obtained from both approaches. The energy-based PINN successfully reproduces the overall magnetic field distribution and preserves the main physical characteristics of the FDA solution. The contour patterns of the magnetic vector potential and magnetic flux density exhibit a high degree of similarity, indicating that the variational formulation accurately captures the minimum-energy state of the system.

The magnetic flux lines predicted by the energy-based PINN also show excellent agreement with the FDA results. The streamline patterns remain smooth throughout the computational domain and correctly represent the circulation of the magnetic field around the current-carrying coil. Compared with the residual-based formulation, fewer local distortions can be observed in the predicted flux-line distribution.

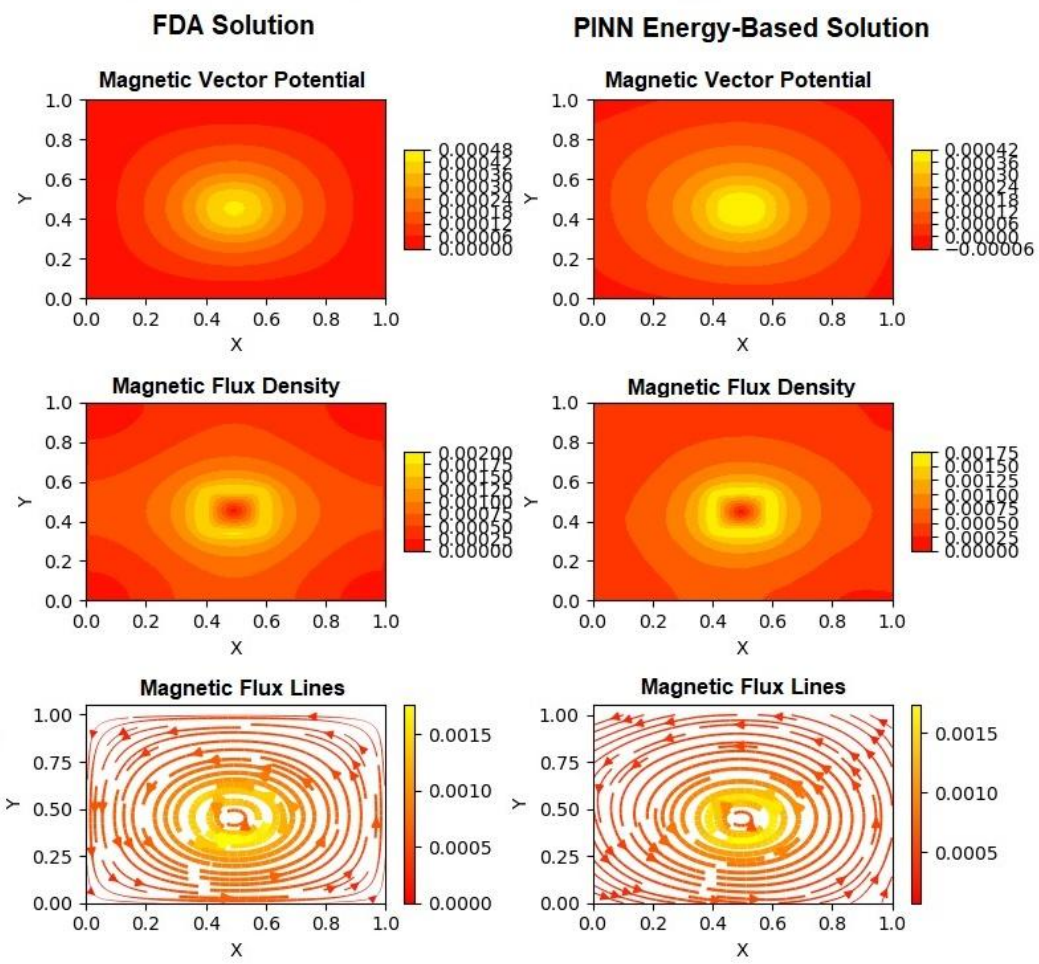


Figure 10: *Comparison of the FDA reference solution and the energy-based PINN solution in terms of the magnetic vector potential, magnetic flux density magnitude, and magnetic flux lines.*

To further assess the accuracy of the proposed model, one-dimensional cross-sectional profiles are compared in Figure 6. The magnetic vector potential profiles predicted by the energy-based PINN closely follow the FDA reference solution at all investigated sections. In contrast to the residual-based formulation, the differences in peak values are significantly reduced, and the overall agreement is improved across the entire domain.

A similar trend can be observed for the magnetic flux density magnitude profiles. The energy-based PINN accurately reproduces both the locations and amplitudes of the magnetic field peaks. Although minor discrepancies remain near the boundaries and around the maximum field regions, the predicted profiles exhibit a closer match to the FDA solution than those obtained using the residual-based approach.

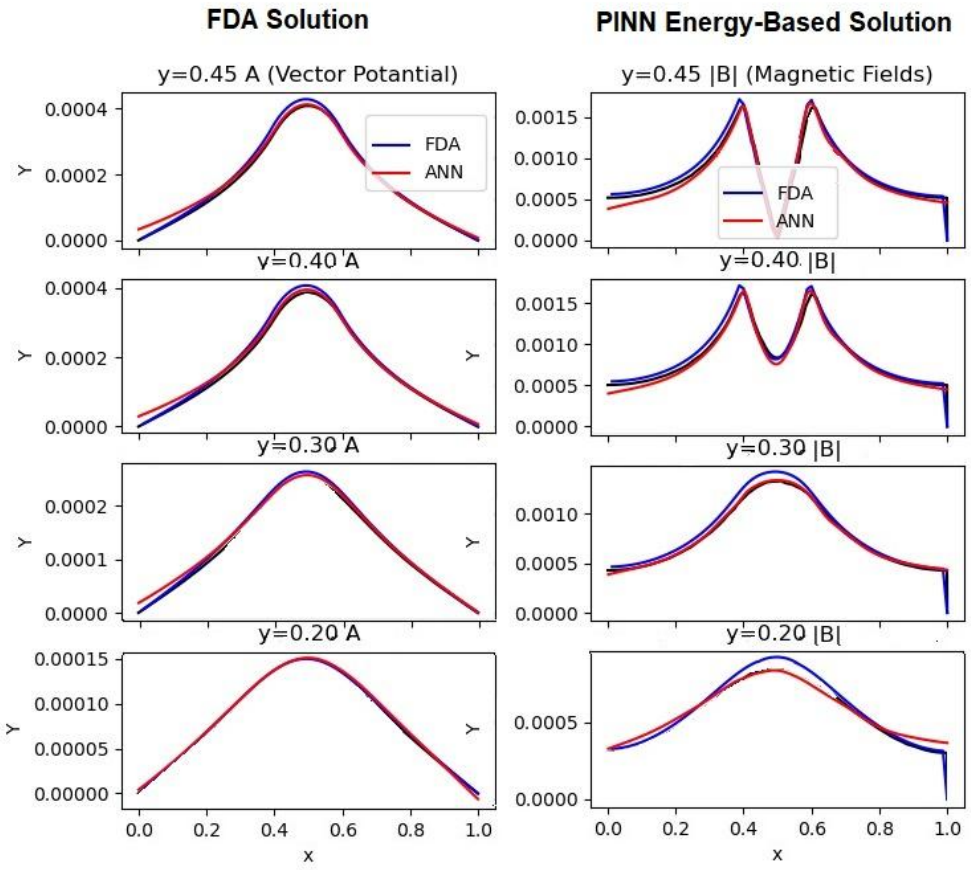


Figure 11: *Cross-sectional comparison of the magnetic vector potential and magnetic flux density magnitude obtained from the FDA and energy-based PINN models at different horizontal locations within the computational domain.*

Overall, the energy-based PINN formulation demonstrates superior agreement with the FDA reference solution for both the magnetic vector potential and magnetic flux density distributions. These results indicate that the variational energy minimization strategy provides a more effective learning framework for the considered magnetostatic problem and leads to improved prediction accuracy compared with the residual-based PINN formulation.

4 CONCLUSION

In this study, two Physics-Informed Neural Network (PINN) formulations, namely a residual-based approach and an energy-based approach, were developed for modeling two-dimensional magnetic field distributions in a Cartesian coordinate system. Both methods were formulated using the magnetic vector potential representation of Maxwell's equations and validated against a Finite Difference Analysis (FDA) reference solution.

The numerical results demonstrated that both PINN formulations were capable of reproducing the overall magnetic field distribution generated by the current-carrying coil. The contour plots, magnetic flux density distributions, and magnetic flux lines obtained from the PINN models showed good agreement with the FDA solution. However, noticeable differences were observed in the accuracy of the predicted magnetic vector potential profiles.

Among the investigated approaches, the energy-based PINN formulation provided the closest agreement with the FDA reference solution. The variational energy minimization strategy produced more accurate magnetic vector potential distributions and improved agreement in the cross-sectional field profiles. In contrast, the residual-based formulation exhibited larger deviations, particularly in regions where the magnetic vector potential reached its maximum values.

Overall, the results indicate that variational energy-based learning provides an effective and physically consistent alternative to conventional residual minimization for magnetostatic field modeling. Future work will focus on extending the proposed framework to more complex electromagnetic configurations involving heterogeneous materials, irregular geometries, and coupled multiphysics problems

REFERENCES

Baldan, M. a. (2021). Solving 1D non-linear magneto quasi-static Maxwell's equations using neural networks. *IET Science, Measurement \& Technology*, s. 204-217.

Chapra, S. C. (2015). *Numerical Methods for Engineers.* McGraw-Hill.

E, W. a. (2018). The Deep Ritz Method: A Deep Learning-Based Numerical Algorithm for Solving Variational Problems. *Communications in Mathematics and Statistics*, s. 1-12.

Hou, S. a. (2024). Physics-informed neural network for simulating magnetic field of coaxial magnetic gear. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, s. 108302.

Jackson, J. D. (1999). *Classical Electrodynamics.* Wiley.

Jin, J.-M. (2015). *The finite element method in electromagnetics.* John Wiley \& Sons.

Jin, J.-M. (2015). *Theory and computation of electromagnetic fields.* John Wiley and Sons.

Jin, J.-M. (2015). *Theory and Computation of Electromagnetic Fields.* Wiley.

Kansa, E. J. (1990). Multiquadrics—A scattered data approximation scheme with applications to computational fluid-dynamics—II solutions to parabolic, hyperbolic and elliptic partial differential equations. *Computers \& mathematics with applications*, s. 147--161.

Karniadakis, G. E. (2021). Physics-informed machine learning. *Nature Reviews Physics*, s. 422--440.

Khan, A. a. (2022). Physics Informed Neural Networks for Electromagnetic Analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*, s. 1-4.

Kuczmann, M. a. (2009). *The Finite Element Method in Magnetics.* Akadémiai Kiadó.

Monk, P. (2003). *Finite element methods for Maxwell's equations.* Oxford university press.

Nikitenko, G. a. (2020). Method of Calculating Magnetic System Using Finite Difference Method. *Engineering for Rural Development*, s. 1373-1380.

Raissi, M. a. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational physics*, s. 686--707.

Sadiku, M. N. (2001). *Elements of Electromagnetics.* Oxford university press New York.

Sadiku, M. N. (2015). *Numerical Techniques in Electromagnetics with MATLAB.* CRC Press.

Taflove, A. a.-M. (2005). Computational electromagnetics: the finite-difference time-domain method. *The Electrical Engineering Handbook*, s. 629-670.

Yee, K. (1966). Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, s. 302--307.

Zhao, P. N. (2012). The Application of FDM in Solving Problem of Electromagnetic Field. *Advanced Materials Research*, s. 331-335.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Otomotiv Koltuk Isıtma Sistemleri ve Performans Faktörleri

Kemal Can YARPUZOĞLU[1]

Abstract

In the automotive industry, user comfort and perceived quality have become increasingly important criteria influencing vehicle preference. In this context, vehicle seat heating systems stand out as one of the key features that enhance driver and passenger comfort, particularly under cold climate conditions. Seat heating systems not only provide thermal comfort but also contribute significantly to interior ergonomics, energy efficiency, and overall user satisfaction. Today, these systems are offered as standard or optional equipment in many vehicle segments and have evolved considerably in parallel with advancements in automotive technologies. When the historical development of seat heating technology is examined, it can be observed that early applications were based on simple resistive wire structures, which have gradually evolved into more sophisticated systems incorporating advanced control units, multi-level heating strategies, and safety algorithms. In modern vehicles, seat heating systems consist of an integrated structure including heating pads, temperature sensors, control modules, and in-vehicle communication systems. The materials used in these systems also play a critical role in terms of performance, durability, and safety. In particular, conductive wire or carbon-based heating elements, insulation layers, textile carrier surfaces, and connection components directly affect system efficiency and reliability. This study examines the role of vehicle seat heating systems within automotive comfort technologies and analyzes their historical development, structural components, and material characteristics from a technical perspective. In addition, the advantages of different heating technologies, their impact on system design, and performance criteria in automotive applications are evaluated. The study aims to provide a technical perspective that supports the design and development processes of automotive seat heating systems.

Keywords: Vehicle Seat Heating Systems, Seat Heating, Seat Comfort, Tempearture Control, Seat Electric & Electronic Systems

[1] Mühendislik Uzmanı, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0006-9170-6691

GİRİŞ

Otomotiv endüstrisinde kullanıcı beklentileri son yıllarda önemli ölçüde değişim göstermiştir. Geçmişte araç seçiminde motor performansı, dayanıklılık ve yakıt tüketimi ön plandayken, günümüzde konfor sistemleri de kullanıcı tercihlerini belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır. Özellikle premium araç segmentinde başlayan konfor odaklı teknolojiler zaman içerisinde daha geniş araç sınıflarına yayılmıştır (ISO, 2006; SAE International, t.y.). Bu gelişmeler doğrultusunda araç koltuk ısıtma sistemleri, modern otomobillerin önemli donanımlarından biri haline gelmiştir.

Koltuk ısıtma sistemleri temel olarak elektrik enerjisinin direnç üzerinden ısı enerjisine dönüştürülmesi prensibi ile çalışmaktadır (Robert Bosch GmbH, 2018). Kullanıcı tarafından seçilen sıcaklık seviyesine göre kontrol edilen bu sistemler, düşük ortam sıcaklıklarında sürücü ve yolcuya termal konfor sağlamaktadır. Özellikle deri kaplı koltuk yüzeylerinde düşük sıcaklıklarda hissedilen soğuk temas etkisinin azaltılması açısından koltuk ısıtma sistemleri önemli avantaj sunmaktadır.

Günümüzde koltuk ısıtma sistemleri yalnızca konfor amacıyla değil, enerji verimliliği açısından da değerlendirilmektedir. Elektrikli araçların yaygınlaşması ile birlikte kabin ısıtma sistemlerinin enerji tüketimi kritik hale gelmiştir. Tüm kabin havasını ısıtmak yerine doğrudan kullanıcı temas bölgelerinin ısıtılması daha düşük enerji tüketimi sağlayabilmektedir (Stellantis, t.y.; Adient, t.y.). Bu nedenle koltuk ısıtma sistemleri elektrikli araç mimarilerinde daha önemli bir konuma gelmiştir.

Koltuk ısıtma performansı; kullanılan ısıtıcı tel yapısı, pad geometrisi, sensör tipi, kontrol algoritması ve elektriksel bağlantı yapıları gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Ayrıca güvenlik gereksinimleri nedeniyle sıcaklık kontrolünün doğru şekilde yönetilmesi kritik öneme sahiptir. Aşırı sıcaklık oluşumu hem kullanıcı konforunu azaltmakta hem de güvenlik riskleri oluşturabilmektedir.

Bu çalışmada araç koltuk ısıtma sistemlerinin temel bileşenleri, çalışma prensipleri ve performansı etkileyen temel faktörler incelenmiştir. Ayrıca modern otomotiv elektroniğinde kullanılan farklı kontrol mimarileri teknik açıdan değerlendirilmiştir.

YÖNTEM

Bu çalışmada araç koltuk ısıtma sistemleri teknik literatür, otomotiv uygulamaları ve mevcut sistem mimarileri üzerinden incelenmiştir. Çalışma kapsamında farklı OEM ve tedarikçi yapılarında kullanılan koltuk ısıtma sistemleri değerlendirilmiş, sistemlerin ortak çalışma prensipleri analiz edilmiştir.

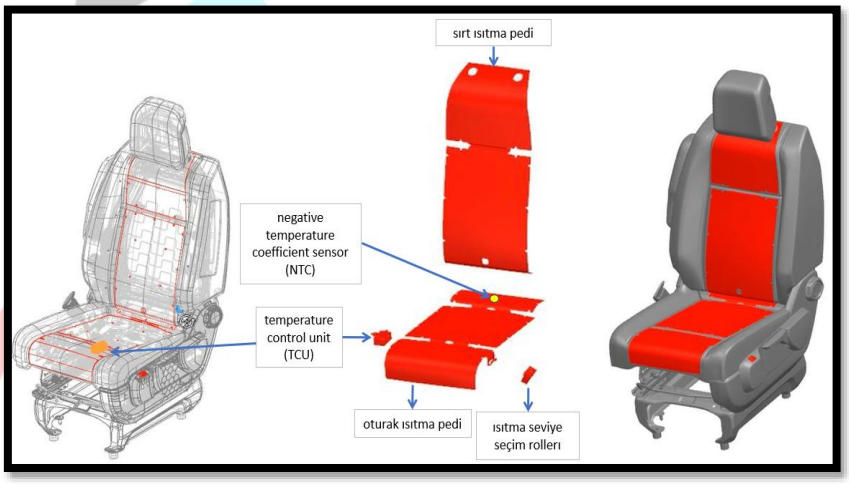
Öncelikle koltuk ısıtma sistemlerinin temel bileşenleri belirlenmiş ve bu bileşenlerin sistem performansına etkileri araştırılmıştır. Daha sonra ısıtıcı pad yapıları, tel tipleri, sensör sistemleri ve kontrol modülleri teknik açıdan karşılaştırılmıştır.

Çalışmada ayrıca elektriksel bağlantı tiplerinin toplam direnç ve güç dağılımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elektriksel analizlerde temel direnç ve güç denklemleri kullanılmıştır.

Koltuk ısıtma sistemlerinin değerlendirilmesinde aşağıdaki kriterler dikkate alınmıştır:

- Termal performans
- Homojen sıcaklık dağılımı
- Enerji tüketimi
- Elektriksel güvenlik
- Dayanıklılık
- Kullanıcı konforu
- Sistem maliyeti
- Elektronik kontrol kabiliyeti

1. Araç Koltuk Isıtma Sistemlerinin Yapısı ve Çalışma Prensibi



Şekil 1- NTC ve TCU'lu bir koltuk ısıtma sistemi elemanları ve yerleşimi

1.1. Koltuk Isıtma Sistemi Bileşenleri

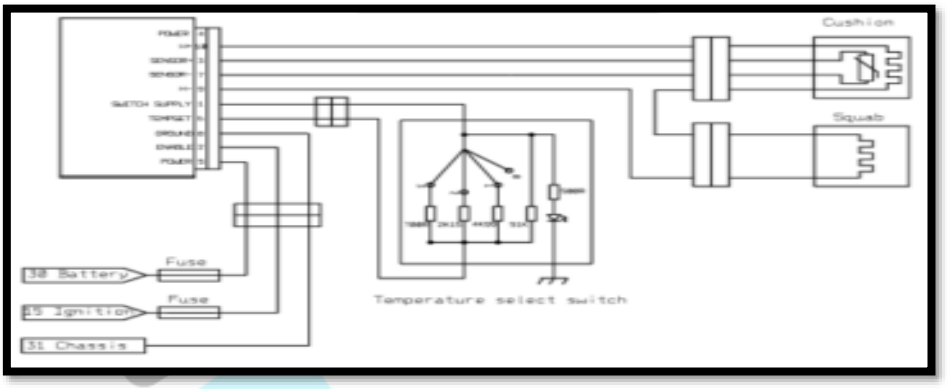
Bir araç koltuk ısıtma sistemi temel olarak aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

- Isıtıcı pad
- Elektrik kablo tesisatı
- Konnektörler
- Sensörler
- Kontrol modülleri
- Kullanıcı kontrol arayüzü
- Güç besleme devresi

Isıtıcı pad sistemin temel ısı üretici elemanıdır. Bu yapı içerisinde direnç telleri veya karbon bazlı iletken elemanlar bulunmaktadır (AEW Automotive, t.y.). Elektrik akımı geçtiğinde direnç nedeniyle ısı oluşmaktadır.

Sensörler sıcaklık geri beslemesini sağlayarak sistemin güvenli çalışmasına katkıda bulunmaktadır. Kontrol modülü ise kullanıcı isteğine göre sistemin çalışma seviyesini yönetmektedir.

1.2. Genel Çalışma Prensibi



Şekil 2- NTC ve TCU'lu bir koltuk ısıtma devre şeması

Koltuk ısıtma sistemleri Joule ısıtma prensibi ile çalışmaktadır. Elektrik akımının direnç üzerinden geçmesi sonucu elektrik enerjisi ısı enerjisine dönüşmektedir.

- Sistem gücü: $P=I^2 \cdot R$
- Alternatif güç: $P= V^2/R$

Burada:

- P: Güç
- I: Akım
- R: Direnç
- V: Gerilim

Toplam direnç değeri düştükçe sistemin çektiği akım artmakta ve daha yüksek ısı oluşmaktadır. Ancak yüksek akım değerleri kablo kesiti, sigorta boyutu ve enerji tüketimi açısından sınırlamalar oluşturmaktadır.

Modern sistemlerde sıcaklık kontrolü genellikle PWM (Pulse Width Modulation) yöntemi ile gerçekleştirilmektedir (Robert Bosch GmbH, 2018; SAE International, t.y.). PWM kontrolü sayesinde sistem sürekli aç-kapa yapmak yerine belirli görev çevrimlerinde çalıştırılarak daha hassas sıcaklık kontrolü sağlanmaktadır.

2. Koltuk Isıtma Performansını Etkileyen Temel Faktörler

2.1. Isıtıcı Pad Tipleri

2.1.1. Kullanılan Tel Tipleri ve Özellikleri

Koltuk ısıtma sistemlerinde kullanılan tel tipi sistem performansını doğrudan etkilemektedir. En yaygın kullanılan yapılar şunlardır:

Bakır alaşımlı teller

Nikel alaşımlı teller

Karbon fiber yapılar

Paslanmaz çelik teller

Tablo1- *Tel tipleri ve özellikleri*

Isıtıcı Tipi	Yapı Özelliği	Avantajları	Dezavantajları	Termal Performans	Mekanik Dayanım	Enerji Verimliliği	Maliyet Seviyesi	Tipik Kullanım Alanı
Bakır Alaşım	Yüksek elektrik iletkenliği	Düşük maliyet, hızlı ısınma, kolay üretim	Tekrarlı bükülmelerde yorulma ve kırılma riski, lokal sıcaklık yoğunlaşması oluşabilir	Yüksek ilk ısınma performansı	Orta	Orta	Düşük	Giriş ve orta segment araçlar
Nikel Alaşım	Yüksek sıcaklık dayanımı	Stabil direnç karakteristiği, yüksek sıcaklık dayanımı, uzun ömür	Daha düşük iletkenlik, daha yüksek maliyet	Stabil ve kontrollü ısı üretimi	Yüksek	Orta-Yüksek	Orta	Premium koltuk ısıtma sistemleri
Karbon Fiber	Karbon bazlı iletken fiber veya film yapı	Homojen sıcaklık dağılımı, yüksek esneklik, düşük kalınlık	Üretim maliyetinin yüksek olması, bağlantı bölgelerinde hassasiyet	Çok homojen yüzey sıcaklığı	Çok Yüksek	Yüksek	Yüksek	Elektrikli ve premium araçlar
Paslanmaz Çelik Mikro	İnce paslanmaz çelik filament	Korozyon dayanımı, uzun ömür, yüksek mekanik dayanım	Isınma hızının daha düşük olması	Orta	Çok Yüksek	Orta	Orta	Ticari araçlar ve ağır kullanım koşulları

Bakır alaşımlı teller düşük maliyet ve yüksek iletkenlik avantajı sunmaktadır. Ancak uzun süreli mekanik yüklemelerde kırılma riski oluşabilmektedir.

Karbon fiber yapılar daha homojen sıcaklık dağılımı sağlayabilmekte ve esnek yapıları sayesinde dayanıklılık avantajı sunmaktadır (ISI Elektrik, 2026).

2.1.2. Kullanılan Pad Örtü Tipleri ve Özellikleri

Pad örtü malzemeleri yalnızca mekanik taşıyıcı görev görmemekte, aynı zamanda termal performansı da etkilemektedir.

Kullanılan temel yüzey yapıları şunlardır:

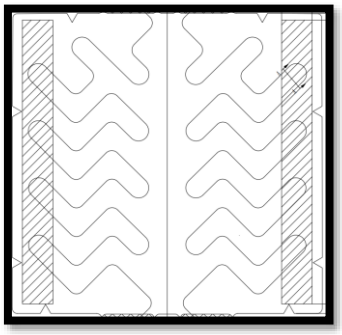
- Nonwoven yüzeyler
- Keçe yapılar
- Tekstil taşıyıcı kumaşlar
- Laminasyonlu yapılar

Bu malzemelerin seçiminde aşağıdaki kriterler önemlidir:

- Isıl iletkenlik
- Alev dayanımı
- Esneklik
- Nem dayanımı
- Mekanik dayanım
- Uzun ömür performansı

Pad örtüsünün çok kalın olması ısı transferini azaltırken, çok ince olması ise kullanıcı tarafından sıcaklık bölgelerinin hissedilmesine neden olabilmektedir.

2.1.3. Isıtma Tellerinin Döşendiği Desen Biçimleri ve Isıtma Bölgeleri



Şekil 3- Bir oturak ısıtma pedi üzerindeki zig-zag şablona sahip ısıtma tellerinin ve yapışkan filmin yerleşimi

Isıtma tellerinin koltuk yüzeyi üzerindeki dağılımı sıcaklık homojenliği açısından kritik öneme sahiptir.

Yaygın kullanılan yerleşim biçimleri şunlardır:

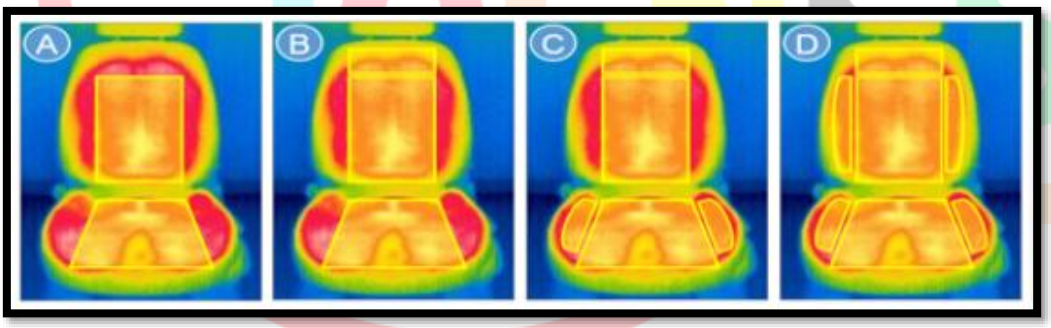
Paralel hat yapısı

Zig-zag yapı

Spiral dağılım

Bölgesel yoğunlaştırılmış yapı

Yan bolster bölgeleri (bkz. şekil 4 - model c ve d), oturma merkezi ve sırt bölgesi için farklı yoğunluklarda tel dağılımı uygulanabilmektedir.



Şekil 4- *Koltuk üzerinde ısıtılan bölgelerin yerleri*

Hatalı desen geometrisi aşağıdaki problemlere neden olabilmektedir:

Hot spot oluşumu

Düzensiz sıcaklık dağılımı

Lokal aşırı ısınma

Kullanıcı konforunun azalması

2.2. NTC ve Termostat Tipleri

2.2.1. NTC Çalışma Biçimi, Pozisyonu ve Önemi

NTC sensörler sıcaklık arttıkça direnç değeri azalan sensörlerdir. Koltuk sıcaklığının sürekli ölçülmesini sağlayarak kontrol modülüne geri besleme sağlamaktadır.

NTC davranışı aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir:

NTC sensör konumu sistem performansı açısından oldukça önemlidir. Sensörün kullanıcı temas bölgesine çok yakın yerleştirilmesi durumunda sıcaklık kontrolü daha hassas yapılabilmektedir.

Yanlış sensör konumlandırması aşağıdaki problemlere neden olabilir:

Geç sıcaklık algısı

Aşırı sıcaklık oluşumu

Yetersiz ısıtma

Kararsız kontrol davranışı

2.2.2. Termostat Çalışma Biçimi ve Konumlandırması

Termostat sistemleri genellikle güvenlik amaçlı kullanılan aç-kapa kontrollü elemanlardır. Belirli bir sıcaklığa ulaşıldığında devreyi açarak aşırı ısınmayı önlemektedir.

Bimetal termostatlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapılarda sıcaklık arttığında iki farklı metalin genleşme farkı nedeniyle kontak açılmaktadır.

Termostatlar genellikle kritik sıcaklık bölgelerine yakın konumlandırılmaktadır. Modern sistemlerde ana sıcaklık kontrolü NTC üzerinden gerçekleştirilirken termostat yapıları ek güvenlik elemanı olarak kullanılmaktadır.

2.3. Kontrol Sistemleri ve Elektronik Mimariler

2.3.1. TSU/TCU Kontrollü Sistemler

Eski nesil koltuk ısıtma sistemlerinde bağımsız kontrol modülleri kullanılmaktadır. Bu yapılarda TSU veya TCU modülleri sıcaklık kontrolünü doğrudan gerçekleştirmektedir.

Bu sistemlerin avantajları:

Basit yapı

Düşük maliyet

Kolay entegrasyon

Dezavantajları ise:

Sınırlı diagnostik

Düşük yazılım esnekliği

Enerji optimizasyonunun sınırlı olmasıdır

2.3.2. HCM/HCU Kontrollü Sistemler

Modern araçlarda koltuk sistemleri merkezi kontrol modülleri üzerinden yönetilmektedir.

HCM (Heated Control Module) veya HCU (Heating Control Unit) yapıları aşağıdaki avantajları sağlamaktadır (Adient, t.y.; Stellantis, t.y.):

CAN haberleşme entegrasyonu

- Gelişmiş arıza teşhisi
- PWM kontrollü hassas sıcaklık yönetimi
- Enerji optimizasyonu
- Kullanıcı profili yönetimi

Elektrikli araçlarda enerji yönetimi kritik olduğu için akıllı kontrol sistemleri daha fazla önem kazanmaktadır.

3. ELEKTRİKSEL BAĞLANTILAR VE TOPLAM DİRENÇ YAPILARI

3.1. Genel Elektriksel Bağlantı Tipleri

Koltuk ısıtma sistemlerinde seri ve paralel bağlantılar kullanılmaktadır.

Seri Devreler: Toplam direnç, tüm dirençlerin toplamına eşittir:

$$R_{toplam} = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n$$

Burada:

R_{toplam}: Toplam devre direnci

R_1, R_2, R_3: Devredeki direnç elemanları

Seri bağlantılarda toplam direnç arttığı için devreden geçen akım azalmakta ve sistemin toplam güç tüketimi düşmektedir.

Paralel Devreler: Toplam direnç aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$\frac{1}{R_{toplam}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

İki direnç için sadeleştirilmiş form:

$$R_{toplam} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

Paralel bağlantılarda toplam direnç düşmekte ve sistem daha yüksek akım çekebilmektedir. Bu durum daha hızlı ısınma avantajı sağlarken enerji tüketimini artırabilmektedir.

Paralel yapılarda akım dağılımı daha dengeli gerçekleştirilebilmekte ve bölgesel ısıtma stratejileri uygulanabilmektedir. Ancak kablolama ve kontrol yapısının daha karmaşık hale gelmesi sistem maliyetini artırabilmektedir.

3.2. Toplam Direnç ve Sistem Performansı

Toplam direnç değeri sistem performansını doğrudan etkilemektedir.

Düşük direnç:

Daha yüksek akım

Daha hızlı ısınma

Daha yüksek enerji tüketimi

Yüksek direnç:

Daha düşük akım

Daha düşük sıcaklık üretimi

Daha düşük enerji tüketimi

Bu nedenle optimum direnç tasarımı kullanıcı konforu ve enerji yönetimi açısından kritik öneme sahiptir.

Kablo kesiti ve konnektör dayanımı da yüksek akım taşıma kapasitesine uygun seçilmelidir. Aksi halde lokal ısınmalar ve bağlantı problemleri oluşabilmektedir.

Sonuç

Araç koltuk ısıtma sistemleri modern otomotiv konfor teknolojilerinin önemli bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Günümüzde bu sistemler yalnızca kullanıcı konforunu artırmakla kalmamakta, aynı zamanda enerji verimliliği açısından da önemli avantajlar sağlamaktadır.

Çalışma kapsamında yapılan incelemeler sonucunda koltuk ısıtma performansının yalnızca ısıtıcı tel özelliklerine bağlı olmadığı görülmüştür. Pad geometrisi, tel dağılımı, sensör konumu, kontrol algoritması ve elektriksel bağlantı yapıları sistem performansını doğrudan etkilemektedir.

Özellikle NTC sensör konumlandırmasının sıcaklık kontrol hassasiyeti açısından kritik öneme sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca modern HCM/HCU kontrollü sistemlerin enerji yönetimi, diagnostik yetenekler ve kullanıcı deneyimi açısından geleneksel sistemlere göre önemli avantajlar sunduğu görülmüştür.

Elektrikli araçların yaygınlaşması ile birlikte düşük enerji tüketimli ve yüksek verimli koltuk ısıtma sistemlerinin önemi daha da artacaktır. Gelecekte karbon bazlı akıllı yüzeyler, bölgesel ısıtma teknolojileri ve yapay zekâ destekli termal yönetim sistemlerinin otomotiv koltuk teknolojilerinde yaygınlaşması beklenmektedir (SAE International, t.y.; ISO, 2006).

KAYNAKÇA

Adient. (t.y.). *Seat comfort and thermal management applications*. Technical Publications.

AEW Automotive. (t.y.). *Seat heating applications*.

ISI Elektrik. (2026). *Heating wires*. Erişim tarihi: 6 Mayıs 2026.

International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14505-2: Ergonomics of the thermal environment — Evaluation of thermal environments in vehicles — Part 2: Determination of equivalent temperature*. ISO.

Robert Bosch GmbH. (2018). *Automotive handbook* (10th ed.). Wiley.

SAE International. (t.y.). *Automotive seat comfort and thermal management studies*. SAE Technical Papers.

Stellantis. (t.y.). *Vehicle seat comfort and thermal management applications*. Technical Publications.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Toward Sustainable Materials: PCL/PEG-Based Biocomposite Films with Sepiolite Clay and *Pelargonium graveolens* Essential Oil

Büşra MUTLU[1]

Abstract

The increasing demand for environmentally sustainable materials has stimulated research into biodegradable polymer composites incorporating natural additives. In this study, poly(ε-caprolactone) (PCL)/poly(ethylene glycol) (PEG)-based films containing sepiolite (Sep) and *Pelargonium graveolens* essential oil were prepared by solution casting. The effects of these additives on the physical and optical, morphological, surface, and structural properties of the films were investigated. Scanning electron microscopy (SEM) analysis showed that Sep promoted a more uniform film structure, while essential oil caused slight surface irregularities. Contact angle measurements indicated that the additives altered the wettability of the films. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and X-ray diffraction (XRD) analyses confirmed the incorporation of Sep and essential oil into the polymer matrix and suggested interactions among the film components. In addition, the presence of Sep and essential oil influenced the visual appearance of the films and led to composition-dependent variations in thickness and color parameters. These modifications demonstrate the ability of natural additives to tailor the overall performance of PCL/PEG-based materials. The developed biocomposite films exhibited enhanced functional characteristics and may serve as promising candidates for sustainable multifunctional polymer systems. These findings highlight the potential of the developed biocomposite films as sustainable multifunctional material systems for advanced polymer-based applications.

Keywords: Biocomposite films, Poly(ε-caprolactone) (PCL), Sepiolite clay, Essential oil, Sustainable materials.

[1] Dr, Bursa Technical University, Central Research Laboratory, Orcıd: 0000-0002-9946-6729

INTRODUCTION

The growing interest in sustainable material development and environmentally conscious design strategies has increased research on biodegradable polymers. The incorporation of natural additives and reinforcing materials into biodegradable polymer matrices has become an effective approach to tailor structural and functional properties while improving material performance (Olonisakin vd., 2025; Samir vd., 2022)

Poly(ε-caprolactone) (PCL) is a biodegradable aliphatic polyester widely investigated due to its excellent processability, flexibility, biocompatibility, and relatively low melting temperature (Ntrivala vd., 2025). However, the use of neat PCL is limited by its hydrophobic nature, low tensile strength and slow degradation behavior. Therefore, blending PCL with hydrophilic polymers or incorporating suitable fillers has been widely explored to improve its properties (Saifullah vd., 2024). Poly(ethylene glycol) (PEG) is commonly combined with PCL owing to its hydrophilic character and good compatibility with polymer systems. The addition of PEG can modify surface characteristics, flexibility, and structural organization, contributing to improved material performance (Ghalia ve Alhanish, 2023).

On the other hand, naturally occurring mineral fillers have received increasing interest as reinforcing components in polymer composites. Sepiolite (Sep) is a hydrated magnesium silicate clay mineral characterized by its fibrous morphology, high specific surface area, porous structure, and adsorption capability. These characteristics enable Sep to act as an effective reinforcing agent by improving dispersion behavior, structural integrity, and interfacial interactions within polymer matrices. Moreover, the incorporation of clay minerals into biodegradable polymers has been reported to influence morphology, crystallinity, surface properties, and barrier-related characteristics, making them attractive for the development of advanced composite systems (Horiuchi vd., 2024). In addition to inorganic reinforcing agents, natural bioactive compounds have also been increasingly incorporated into polymer systems to introduce functional characteristics and enhance material performance. Among these compounds, plant-derived essential oils have gained attention as renewable additives due to their rich chemical composition and diverse biological activities (Mutlu, 2026). *Pelargonium graveolens* essential oil, commonly known as geranium essential oil, contains various bioactive constituents including citronellol, geraniol, and linalool. Beyond its natural origin, this essential oil has been investigated for its antioxidant, antimicrobial, and surface-modifying potential (Dos Santos vd., 2024; Dzamic vd., 2014). The incorporation of essential oils into polymer matrices may affect intermolecular interactions and consequently alter the morphological, structural, and physical characteristics of the materials. However, their volatile nature and limited compatibility with polymer matrices may influence film homogeneity and material stability, highlighting the need for systematic investigation.

Although numerous studies have reported biodegradable polymer systems containing either clay minerals or essential oils separately, investigations involving the simultaneous incorporation of Sep and *Pelargonium graveolens* essential oil into PCL/PEG matrices remain limited. The combined use of these additives may provide complementary effects through the reinforcing capability of Sep and the functional contribution of essential oil while maintaining the sustainability aspect of the material system. Therefore, the present study aimed to develop

PCL/PEG-based biocomposite films containing Sep and *Pelargonium graveolens* essential oil using the solution casting technique. The influence of these additives on film morphology, surface behavior, structural organization, and physical characteristics was systematically evaluated through SEM, contact angle measurements, FTIR, XRD, thickness analysis, and color measurements. The findings are expected to contribute to the design of environmentally friendly composite materials with tunable properties for sustainable material applications.

MATERIAL AND METHODS

Materials

Poly(ε-caprolactone) (PCL, Mw ≈ 80,000 g/mol) was purchased from Thermo Scientific and used as the main polymer matrix material. Poly(ethylene glycol) (PEG, Mw = 2000 g/mol) was obtained from Sigma-Aldrich. Sepiolite clay (Sep) was commercially supplied and used as an inorganic reinforcing filler without further purification. Pelargonium graveolens essential oil (geranium essential oil) was obtained from a local producer (Bursa, Türkiye) and used as a natural functional additive. Chloroform was employed as the solvent for film preparation. All materials were used as received without additional treatment.

Film Preparation

PCL/PEG-based biocomposite films loaded with Sep and essential oil were produced by a solution casting technique. Briefly, 3.60 g of PCL was dissolved in 50 mL of chloroform under continuous magnetic stirring at ambient temperature until a clear solution was obtained. Subsequently, PEG (0.40 g) was introduced into the PCL solution and stirring was maintained until complete dissolution. For Sep-containing formulations, the desired amount of clay was first dispersed in 2–5 mL of chloroform to improve particle distribution and reduce aggregation. The suspension was then ultrasonicated for 20–30 min before being incorporated into the PCL/PEG solution. After obtaining a homogeneous polymer mixture, Sep dispersion was added under continuous stirring. Essential oil was subsequently introduced at a concentration of 1 wt.% based on the total polymer content, followed by further mixing to ensure uniform distribution. The resulting casting solutions were transferred into Petri dishes (20 cm diameter) and allowed to dry under controlled conditions. To achieve gradual solvent removal and minimize film defects, the dishes were partially covered during the initial stage of drying. After complete evaporation of the solvent, the films were peeled from the dishes and conditioned prior to characterization. Sep contents of 0.020, 0.060, and 0.080 g were employed, while the essential oil concentration was maintained constant in all oil-containing formulations to evaluate the influence of Sep loading on film properties.

Characterization of Films

Thickness Measurement

Film thickness was determined using a digital micrometer (Mitutoyo, Model 293-821, Japan). Measurements were taken at five randomly selected locations on each specimen, and the mean value was used for further evaluation.

Color Analysis

The color characteristics of the films were assessed with a colorimeter (X-Rite Ci7800). The parameters L* (lightness), a* (red–green axis), and b* (yellow–blue axis) were recorded. Additionally, the total color difference (ΔE*), whiteness index (WI), and yellowness index (YI) were calculated to evaluate the effect of sepiolite and *Pelargonium graveolens* essential oil on the visual properties of the films.

Scanning Electron Microscopy (SEM)

The surface characteristics of the films were investigated using a field-emission scanning electron microscope (FESEM, Gemini 300, Zeiss, Germany). Prior to imaging, samples were coated with a conductive layer to improve image quality and reduce charging effects. Micrographs were collected at a magnification of 500× and 2000× using an accelerating voltage of 5 kV.

Contact Angle Measurements

Surface wettability was characterized by static contact angle measurements using a contact angle analyzer (Attension Theta Flex, Biolin Scientific, Sweden). Distilled water served as the probe liquid and measurements were performed at different points on the film surface using the sessile drop technique. Reported values correspond to the average of at least three independent measurements.

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

The chemical composition of the films and potential intermolecular interactions were examined by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR, Nicolet iS50, Thermo Scientific, USA). Spectra were collected over the range of 4000–650 cm^{-1} with a spectral resolution of 4 cm^{-1}, using 32 scans for each sample.

X-ray Diffraction (XRD)

The crystalline features of the films were analyzed using an X-ray diffractometer (Bruker AXS D8 Advance, Germany) equipped with Cu Kα radiation (λ = 1.5406 Å). Data were acquired at 40 kV and 40 mA over a 2θ range of 10–60°, with a step size of 0.02°.

RESULTS AND DISCUSSION

Thickness Measurement

Film thickness is one of the key physical properties influencing the functional performance of polymeric materials. The thickness values of PCL-based films are presented in Table 1.

The thickness of the films increased gradually from 116 ± 0.02 µm for neat PCL to 127 ± 0.01 µm for the PCL/PEG/Oil/Sep film. The slight increase observed after PEG incorporation may be attributed to changes in chain packing and film-forming behavior, while the further increase in thickness following the addition of essential oil and Sep is likely related to the incorporation of additional solid and liquid components into the polymer matrix. Despite these variations, all films exhibited relatively uniform thickness values, indicating good control over the film preparation process.

Table 1 *– Thickness and optical properties of PCL-based films.*

Sample Code	Thickness (µm)	L*	a*	b*	WI	YI
PCL	116 ± 0.02	91.82	0.53	1.02	75.58	2.44
PCL-PEG	118 ± 0.02	87.89	0.43	0.73	68.31	1.87
PCL-PEG/Oil	121 ± 0.02	85.39	0.16	1.71	58.29	3.73
PCL-PEG/Oil/Sep	127 ± 0.02	83.47	0.64	3.37	46.02	7.69

Color Analysis

Color is an important optical property of polymeric films, as it influences visual appearance, material uniformity, and potential application performance (Agate vd., 2023). Therefore, the color parameters of the PCL-based films were evaluated to determine the effect of PEG, Pelargonium graveolens essential oil, and Sep incorporation on the optical characteristics of the films. The color parameters of the PCL-based films are presented in Table 1.

Neat PCL exhibited the highest lightness (L*) value, indicating a relatively bright and transparent appearance. The incorporation of PEG resulted in a slight decrease in L*, suggesting a modest reduction in film brightness. A further decrease in L* was observed after the addition of Pelargonium graveolens essential oil and Sep, indicating progressively darker films. This behavior may be attributed to increased light scattering within the polymer matrix and the intrinsic color of the incorporated additives. The a* values remained close to zero for all formulations, indicating that the films did not exhibit pronounced red or green coloration. In contrast, the b* values increased with the incorporation of essential oil and especially Sep, revealing a shift toward a more yellow appearance. This trend was also reflected in the yellowness index (YI), which increased from 2.44 for neat PCL to 7.69 for the PCL/PEG/Oil/Sep film. The increase in yellowness may be associated with the natural color of the essential oil and the presence of mineral filler particles within the matrix. Similarly, the whiteness index (WI) decreased from 75.58 to 46.02 with the incorporation of PEG, essential oil, and Sep, indicating a gradual reduction in film whiteness. The combined decrease in WI and increase in YI suggest that the additives altered the optical appearance of the films without causing severe discoloration.

The results demonstrate that the incorporation of essential oil and Sep slightly darkened the films and promoted a yellowish hue, while maintaining a visually homogeneous appearance.

Scanning Electron Microscopy (SEM)

The surface morphology of the PCL-based films was examined by SEM, and the representative micrographs are presented in Figure 1. The SEM images demonstrated that the incorporation of PEG, essential oil, and Sep significantly affected the surface characteristics and structural organization of the films.

As shown in Figure 1, neat PCL exhibited a smooth, dense, and homogeneous surface without visible defects or phase separation, indicating the formation of a continuous polymer matrix. At higher magnification, slight directional patterns related to solvent evaporation were observed. The incorporation of PEG significantly changed the film morphology. PCL/PEG films showed numerous uniformly distributed pores, suggesting partial phase separation between hydrophobic PCL and hydrophilic PEG during solvent evaporation. These pores increased the surface heterogeneity of the films. PCL/PEG/Oil films also exhibited porous structures; however, the pores were smaller and more uniformly distributed than those of PCL/PEG. This result suggests that Pelargonium graveolens essential oil improved matrix homogeneity and reduced the size of PEG-related voids. No large aggregates or severe defects were detected, indicating good compatibility between the oil and polymer matrix. PCL/PEG/Oil/Sep films exhibited a denser and more compact structure with the disappearance of most pores. The surface became more continuous and organized, indicating good dispersion of Sep within the polymer matrix. However, some localized microcracks were observed, which may be attributed to increased matrix rigidity and stress concentration caused by the incorporation of the clay particles. Despite the presence of these cracks, no significant clay agglomeration was detected.

These findings suggest that PEG increased surface porosity, whereas the incorporation of essential oil reduced pore size and improved morphological uniformity. The combined addition of essential oil and Sep produced a more compact microstructure, suggesting enhanced matrix cohesion and improved interfacial compatibility (Yu vd., 2011).

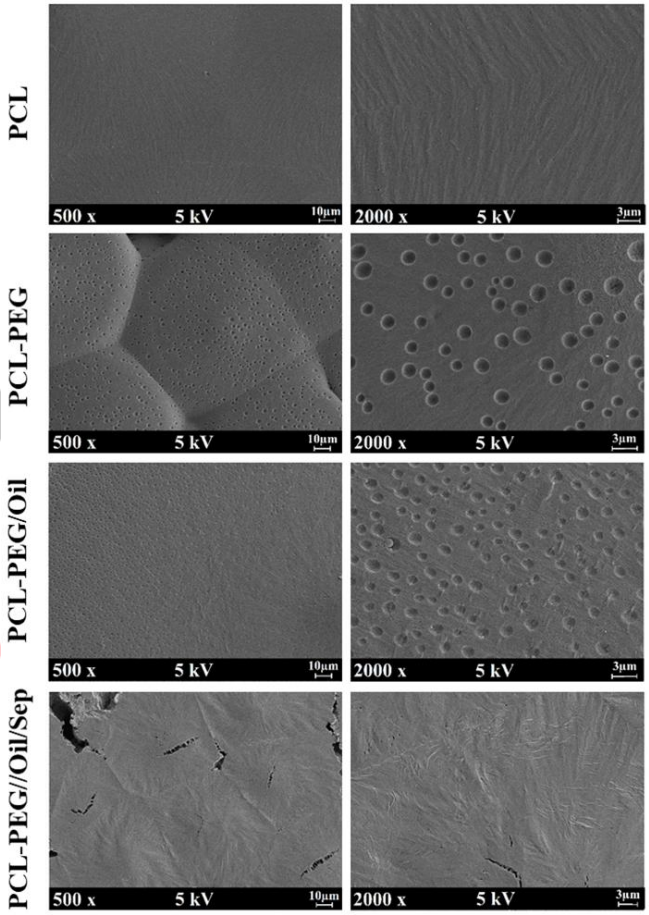


Figure 1: SEM micrographs of PCL-based films.

The surface wettability of the films was evaluated by contact angle measurements, and the results are presented in Figure 2.

Neat PCL exhibited the highest contact angle value (77.64 ± 0.89°), reflecting the relatively hydrophobic nature of the polymer. The incorporation of PEG significantly reduced the contact angle to 51.65 ± 0.85°, indicating an increase in surface hydrophilicity due to the presence of hydrophilic ether groups in PEG (Tiwari vd., 2017). The lowest contact angle was observed for the PCL/PEG/Oil film (43.06 ± 2.52°), suggesting that the incorporation of Pelargonium graveolens essential oil enhanced the wettability of the film surface, consistent with previous studies reporting that essential oils can modify the surface properties and wetting behavior of polymer-based films (Atarés ve Chiralt, 2016). Upon the addition of Sep, the contact angle increased to 56.89 ± 1.88°. Although this value remained lower than that of neat PCL, the increase compared with the PCL/PEG/Oil film indicates a partial reduction in surface hydrophilicity. This behavior may be associated with the formation of a denser and more compact structure, as observed in the SEM micrographs, which could reduce the accessibility of hydrophilic groups at the film surface (Horiuchi vd., 2024).

These results demonstrate that PEG and essential oil enhanced the hydrophilic character of the films, whereas Sep partially restored hydrophobicity by increasing matrix compactness and reducing the accessibility of hydrophilic groups at the film surface.

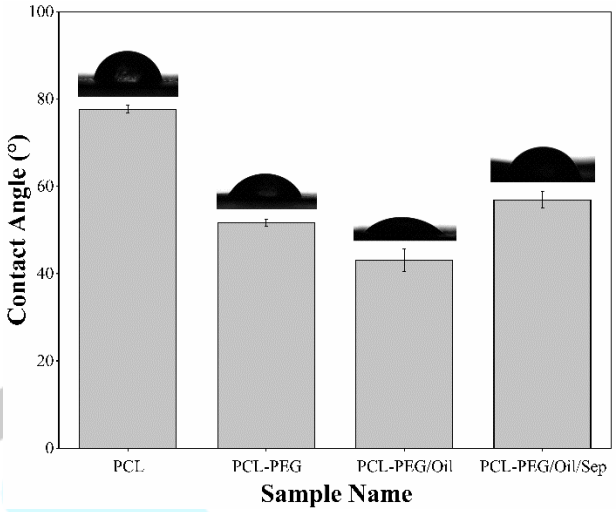


Figure 2: Contact angle results of PCL-based films.

The XRD patterns of PCL-based films are presented in Figure 3.

As can be seen in Figure 3, neat PCL exhibited characteristic diffraction peaks at approximately 21.4° and 23.7° (2θ), corresponding to the crystalline planes of PCL, confirming its semicrystalline nature. The incorporation of PEG did not introduce new diffraction peaks but slightly modified the intensity of the characteristic PCL reflections, indicating interactions between the blend components while preserving the crystalline structure of PCL. The PCL/PEG/Oil film exhibited higher peak intensities in the 21–24° region, suggesting changes in the structural organization of the polymer matrix following essential oil incorporation. The addition of Sep further modified the diffraction profile. The PCL/PEG/Oil/Sep film retained the characteristic peaks of PCL, indicating that the crystalline structure of the polymer matrix was preserved after filler incorporation. Moreover, a slight increase in the intensity of the diffraction peaks was observed, suggesting improved structural organization and possible nucleating effects of Sep on the polymer matrix. No distinct diffraction peaks attributable to Sep were clearly detected, which may indicate good dispersion of the clay within the matrix and/or overlap with the characteristic peaks of the polymer components. Similar observations have been reported for polymer–clay nanocomposites, where clay incorporation does not substantially alter the crystalline structure of the polymer matrix and highly dispersed clay phases may exhibit weak or indistinguishable diffraction signals due to intercalation and good dispersion within the polymer network (Hoidy vd., 2010).

The XRD results suggest that the incorporation of essential oil and Sep did not alter the crystalline structure of PCL but influenced the degree of structural ordering within the films. The increased diffraction intensity observed for the modified formulations indicates enhanced crystallinity and intermolecular interactions among the film components.

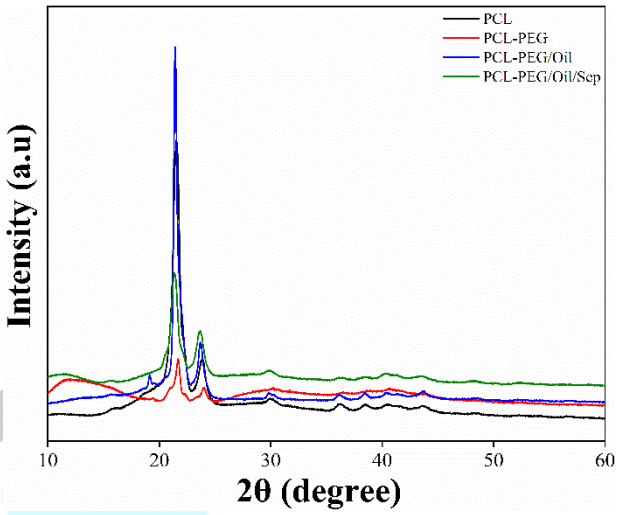


Figure 3: XRD diffractograms of PCL-based films.

The chemical structures of the PCL-based films were investigated by FTIR spectroscopy, and the resulting spectra are presented in Figure 4.

Neat PCL exhibited characteristic absorption bands at approximately 2940 and 2865 cm^{-1}, corresponding to the asymmetric and symmetric stretching vibrations of $–CH_2$ groups, respectively. The strong absorption band observed around 1720 cm^{-1} was assigned to the stretching vibration of ester carbonyl (C=O) groups, while the bands located in the 1290–1160 cm^{-1} region were associated with C–O and C–O–C stretching vibrations characteristic of the PCL structure (Hoidy vd., 2010)(Fukushima vd., 2010). The incorporation of PEG did not lead to the appearance of new absorption bands, indicating that no new covalent bonds were formed within the polymer matrix. However, slight changes in band intensity and broadening were observed, suggesting intermolecular interactions between PCL and PEG. Similar behavior was maintained after the incorporation of Pelargonium graveolens essential oil and Sep, confirming that the fundamental chemical structure of PCL remained unchanged. A closer examination of the fingerprint region (1800–800 cm^{-1}) revealed minor variations in the intensity and shape of several bands, particularly those associated with ester and ether functionalities. These changes may be attributed to physical interactions, such as hydrogen bonding and dipole–dipole interactions, among PCL, PEG, essential oil constituents, and Sep particles. No additional peaks attributable to new chemical species were detected, indicating that the additives were incorporated into the polymer matrix without altering its chemical backbone, consistent with previous observations reported for polymer–clay nanocomposites (Hoidy vd., 2010).

The FTIR results suggest good compatibility among the film components and confirm that the modifications mainly affected intermolecular interactions rather than the primary chemical structure of the PCL matrix.

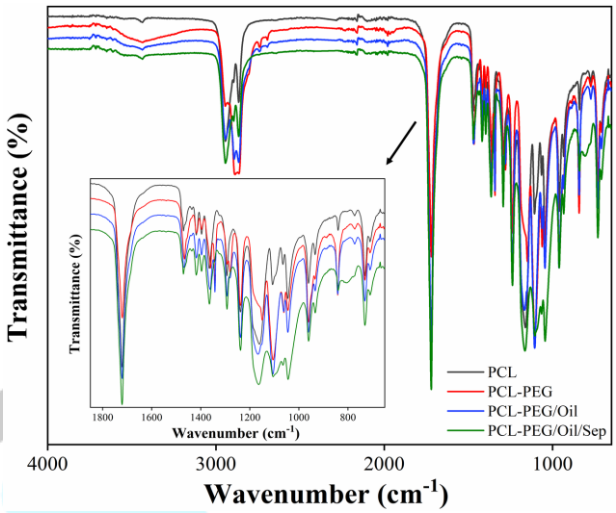


Figure. 4: FTIR spectra of PCL-based films.

Taken together, the results demonstrate that the incorporation of PEG, *Pelargonium graveolens* essential oil, and Sep influenced the thickness, optical appearance, surface wettability, morphology, and structural organization of the films while preserving the characteristic chemical structure of the PCL matrix.

CONCLUSION

PCL-based composite films containing PEG, *Pelargonium graveolens* essential oil, and Sep were successfully prepared by solution casting. The incorporation of the additives slightly increased film thickness and altered the optical properties of the films, resulting in lower lightness and whiteness values and higher yellowness. SEM analysis showed that PEG promoted pore formation, while essential oil and Sep improved the homogeneity and compactness of the film structure. Contact angle measurements revealed that PEG and essential oil increased surface wettability, whereas Sep partially reduced this effect. XRD results confirmed that the characteristic crystalline structure of PCL was preserved after the incorporation of PEG, essential oil, and Sep. FTIR analysis further demonstrated that no new chemical bonds were formed and that the additives interacted mainly through physical interactions.The combined incorporation of essential oil and Sep effectively modified the surface, morphological, optical, and structural properties of PCL-based films without altering the chemical structure of the polymer matrix. These findings demonstrate that the developed films have potential for sustainable polymer-based material applications.

REFERENCES

Agate, S., Williams, A., Dougherty, J., Velev, O. D., & Pal, L. (2023). Polymer color intelligence: effect of materials, instruments, and measurement techniques–a review. *ACS Omega, 8*(26), 23257–23270.

Atarés, L., & Chiralt, A. (2016). Essential oils as additives in biodegradable films and coatings for active food packaging. *Trends in Food Science & Technology, 48*, 51–62.

Dos Santos, F. N., Fonseca, L. M., Jansen-Alves, C., Crizel, R. L., Pires, J. B., Kroning, I. S., de Souza, J. F., Fajardo, A. R., Lopes, G. V., & Dias, A. R. G. (2024). Antimicrobial activity of geranium (*Pelargonium graveolens*) essential oil and its encapsulation in carioca bean starch ultrafine fibers by electrospinning. *International Journal of Biological Macromolecules, 265*, 130953.

Dzamic, A. M., Sokovic, M. D., Ristic, M. S., Grujic, S. M., Mileski, K. S., & Marin, P. D. (2014). Chemical composition, antifungal and antioxidant activity of *Pelargonium graveolens* essential oil. *Journal of Applied Pharmaceutical Science, 4*(3), 1–5.

Fukushima, K., Tabuani, D., Abbate, C., Arena, M., & Ferreri, L. (2010). Effect of sepiolite on the biodegradation of poly(lactic acid) and polycaprolactone. *Polymer Degradation and Stability, 95*(10), 2049–2056.

Ghalia, M. A., & Alhanish, A. (2023). Mechanical and biodegradability of porous PCL/PEG copolymer-reinforced cellulose nanofibers for soft tissue engineering applications. *Medical Engineering & Physics, 120*, 104055.

Hoidy, W. H., Al-Mulla, E. A. J., & Al-Janabi, K. W. (2010). Mechanical and thermal properties of PLLA/PCL modified clay nanocomposites. *Journal of Polymers and the Environment, 18*(4), 608–616.

Horiuchi, L. N., de Melo Barbosa, R., Azevedo, J. B., Garcia-Villen, F., Viseras, C., & Fialho, R. L. L. (2024). Eco-friendly composite materials of polybutylene succinate with clay minerals, lignin and canabrava fiber. *Applied Clay Science, 262*, 107606.

Mutlu, B. (2026). Freeze–thaw-induced physically cross-linked poly(vinyl alcohol)/alginate hydrogels incorporating silver-doped zinc oxide and clove oil. *Biopolymers, 117*(3), e70098.

Ntrivala, M. A., Pitsavas, A. C., Lazaridou, K., Baziakou, Z., Karavasili, D., Papadimitriou, M., Ntagkopoulou, C., Balla, E., & Bikiaris, D. N. (2025). Polycaprolactone (PCL): the biodegradable polyester shaping the future of materials–a review on synthesis, properties, biodegradation, applications and future perspectives. *European Polymer Journal, 234*, 114033.

Olonisakin, K., Mohanty, A. K., Thimmanagari, M., & Misra, M. (2025). Recent advances in biodegradable polymer blends and their biocomposites: a comprehensive review. *Green Chemistry, 27*, 11656–11704.

Saifullah, A., Chacko, N. G., Dhakal, H. N., Khan, S. H., Sarker, F., & Zhang, Z. (2024). Valorisation of agricultural residue biomass date palm fibre in dry-blended polycaprolactone

(PCL) biocomposites for sustainable packaging applications. *Waste and Biomass Valorization, 15*(10), 5805–5817.

Samir, A., Ashour, F. H., Hakim, A. A. A., & Bassyouni, M. (2022). Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. *npj Materials Degradation, 6*(1), 68.

Tiwari, A. P., Joshi, M. K., Lee, J., Maharjan, B., Ko, S. W., Park, C. H., & Kim, C. S. (2017). Heterogeneous electrospun polycaprolactone/polyethylene glycol membranes with improved wettability, biocompatibility, and mineralization. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 520*, 105–113.

Yu, Y., Qi, S., Zhan, J., Wu, Z., Yang, X., & Wu, D. (2011). Polyimide/sepiolite nanocomposite films: preparation, morphology and properties. *Materials Research Bulletin, 46*(10), 1593–1599.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

A corrosion problem about Fe & Al Contamination on AISI 304 Stainless Steel Parts in Automotive Industry

Merve VATANSEVER[1]
Giancarlo MARCHIARO[2]
Gürkan YILMAZOGLU[3]
Uğur UZEL[4]

Abstract

Stainless steels are widely used in the automotive industry due to their high mechanical strength, aesthetic appearance, and superior corrosion resistance. AISI 304 stainless steel grade is commonly preferred for trim components and decorative applications in the interior and exterior car body. Their lightweight properties contribute significantly to fuel efficiency and vehicle performance. Despite the high corrosion resistance of stainless steel, the presence of ferrous and non-ferrous particles can lead to the formation of corrosion products, known as rouging. This study investigates the rouging phenomenon in AISI 304 trim components resulting from iron and aluminum contamination under different scenarios. To simulate real production conditions, suspension burs and metallic dust were used as iron contamination sources, while polishing paste was utilized as the aluminum contamination source. Contaminated samples were subjected to neutral salt spray testing according to ASTM B117 standard. Various chemicals were used for cleaning the exposed parts, and their effectiveness was evaluated using a salt spray resistance test. Surface morphologies were analyzed using Scanning Electron Microscopy (SEM), and corrosion products were characterized by Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX). The components were also left under atmospheric conditions to simulate natural weathering, and their corrosion behavior was observed. The findings of this study demonstrate the critical importance of contamination control and effective surface cleaning procedures in automotive manufacturing environments.

Keywords: stainless steel, AISI 304, rouging, natural salt spray, SEM-EDX

[1] Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş, Orcıd: 0000-0002-3723-5589
[2] Stellantis
[3] Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş, Orcıd: 0000-0002-1811-7827
[4] Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş, Orcıd: 0000-0001-5819-6841

INTRODUCTION

Stainless steel grades are widely used in the automotive industry for their high strength, durability, and corrosion resistance. These properties make them ideal for critical components such as exhaust systems and structural parts. The lightweight nature of stainless steel contributes to improved fuel efficiency and vehicle performance. Additionally, the lustrous, sleek, and modern appearance of 304 stainless steel provides aesthetic opportunities for both exterior and interior automotive components (Podder & Bhanja, 2013:731).

Despite stainless steel's high corrosion resistance, the presence of ferrous and non-ferrous particles can lead to the formation of corrosion products, including oxides, which can manifest as orange, brown, red, or black on the surface. This phenomenon, known as rouging, can be caused by machine tools and surface finishing equipment that have previously contacted steel parts, as well as improper assembly conditions (Gonzalez, 2012:1). Rouging is generally observed in the food and pharmaceutical industry because of the usage of stainless steel-grade tanks and apparatus. The picture in Figure 1 represents the roughing in the pharma industry clearly.

Figure 1: *Sanitary pump casing and impeller (Gonzalez, 2012).*

There is currently no standard specifically designed for rouging. The closest approach to classify rouging has been proposed by Tverberg, in which rouging is divided into three categories depending on its source: (I) externally sourced contaminants-Fe, Al, etc., (II) in-situ oxidation of non-passive surfaces, and (III) the formation of black oxide rouging due to thermal oxidation. In addition, the ISPE guideline provides a useful reference defining the general framework and assessment of the rouging phenomenon (Frantsen et al., 2003:4).

In this study, AISI 304 trim components were used to simulate rouging resulting from iron and aluminum contamination under different scenarios. Suspension part burr and dust served as the iron source, while polishing paste was used as the aluminum source. The components were subjected to a natural salt spray test in accordance with ASTM B117. Red rust formation was observed within hours.

The corrosion particles were analyzed using Scanning Electron Microscopy (SEM), and the corrosion products in the surface craters were identified through SEM-EDX analysis as iron-oxide. Polishing paste also remained aluminum and iron oxide inside the craters and caused

red rust. Various chemicals were employed for the cleaning of the exposed parts, and their effectiveness was evaluated using a salt spray resistance test. The components were also left under atmospheric conditions to simulate natural weathering, and their corrosion behavior was observed.

EXPERIMENTAL PROCEDURE

Materials

The material studied in this study consisted of AISI 304 grade stainless steel trim parts, supplied by well known stainless steel supplier company. The chemical composition of stainless steel is presented in Table 1.

Table 1- *AISI 304 chemical composition*

	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)
AISI 304	0,03 max.	2,00 max.	1,00 max.	0,045 max.	0,03 max.	18/20	8/10,5

Method

To investigate the effects of Fe and Al contamination, AISI 304 trim components were deliberately exposed to sources of iron and aluminum. Iron-based sources included suspension component burrs and iron dust, whilst aluminum-based sources included polishing paste. The contaminated samples were subjected to a salt spray corrosion resistance test in accordance with the ASTM B117 standard to simulate harsh automotive service conditions. Scanning Electron Microscopy (SEM) combined with Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) was used to examine the morphology and composition of the corrosion products formed on the surface.

The effectiveness of different cleaning chemicals in removing contaminants and restoring corrosion resistance was evaluated by subjecting the cleaned parts to a salt spray test again and comparing the resulting corrosion rates.

In addition, some samples were exposed to atmospheric environmental conditions to simulate real-world usage conditions and to observe how corrosion progressed over time.

Mechanism of Rouging

Rouging is characterized by the appearance of colored corrosion products (orange, brown, red, or black) due to the formation of iron oxides and hydroxides on the stainless-steel surface. The contamination acts as a cathodic or anodic site, breaking down the passive film and allowing aggressive species (such as chlorides from salt spray) to penetrate and initiate corrosion. The effect is exacerbated by surface defects or improper cleaning, which can leave residual contaminants embedded in the surface.

RESULTS & DISCUSSION

Corrosion Behavior of Contaminated AISI 304

During ASTM B117 salt spray tests, the formation of red rust was observed within a short period of time on contaminated samples; it was found that corrosion initiation occurred

more rapidly. Figure 1 shows the red rust spots distributions on the AISI 304 trim part after 12 hours. This indicates that the passive chromium oxide layer on the surface has been compromised and the local corrosion mechanism has been activated.

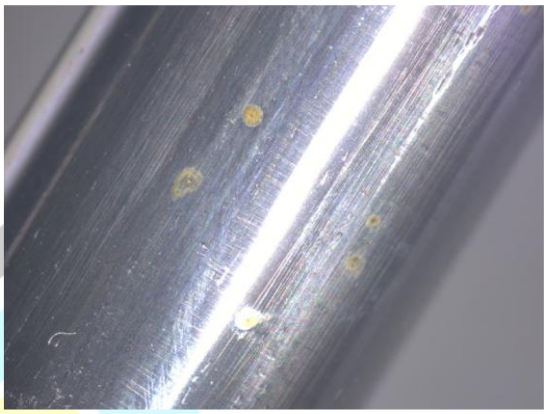


Figure2: *12 hours corrosion test result of iron and aluminum contaminated AISI 304*

The literature indicates that the rouging phenomenon occurs primarily because of the destabilization of the passive layer. According to the study of Corrosion of Stainless Steels, damage to the protective chromium oxide layer in stainless steels accelerates the formation of iron-based oxides and leads to the development of localized corrosion areas. Similarly, in a study conducted by Sandle, it was noted that rouging formation occurs particularly in areas where surface passivation has been compromised and progresses through the re-precipitation of iron oxides (Sandle, 2015: 5-6). Figure 2 shows filled and unfilled craters which were created using machine tools (lathes, mills, chuck jaws, etc.) and have been contaminated with inorganic impurities.

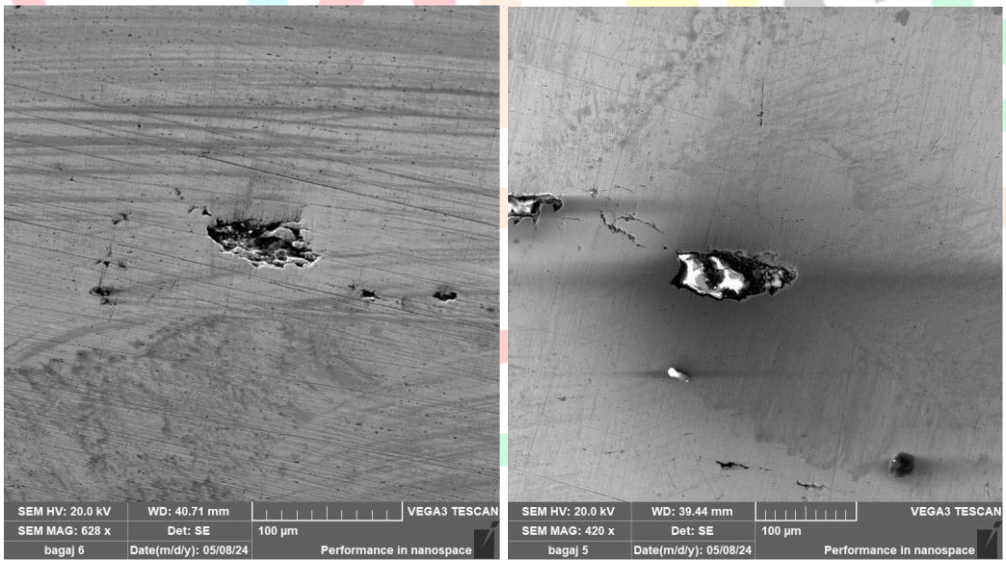


Figure3: *Not filled and filled craters zones on the surface*

Furthermore, it was stated that surface roughness, metallic particle contamination, welding defects and grinding residues accelerate the formation of rouging (Sandle, 2015: 5-6). SEM analysis showed the presence of iron-oxide in the surface craters, confirming the occurrence of rouging. SEM-EDX analysis further identified the corrosion products as iron-oxide and aluminum-oxide. Figure 3 shows iron oxide contamination.

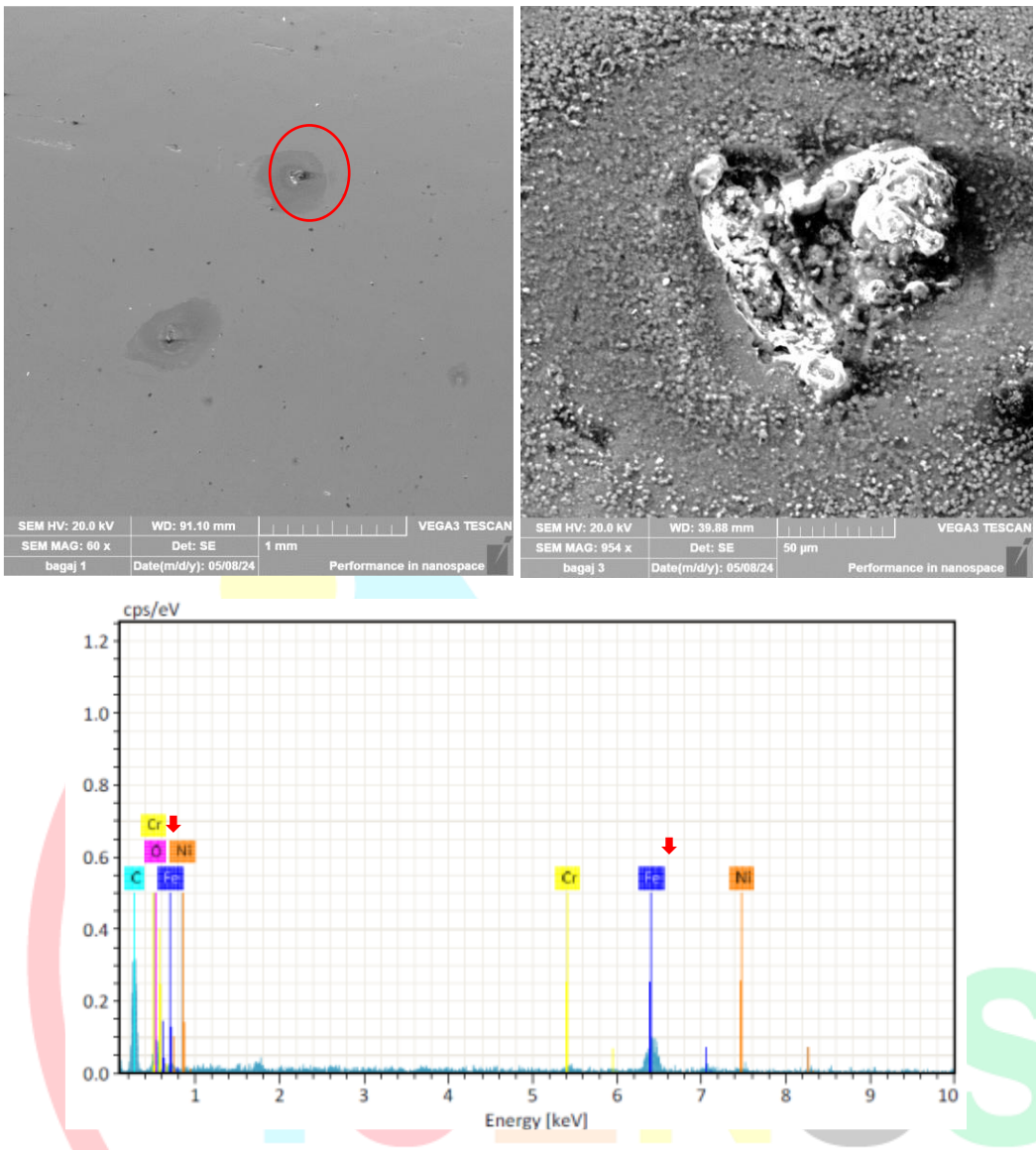


Figure4: *Iron oxide contamination SEM-EDX analysis*

Aluminum oxide is an abrasive widely used in the manufacturing industry for grinding, sand blasting and polishing of stainless steel. However, incorrect use of these products or failure to remove them completely from the surface after processing can lead to serious surface defects. These particles adhering to the surface disrupt the passive chromium oxide layer of the stainless steel, causing a micro-galvanic cell to form between the stainless steel and the adhered aluminum in the presence of an electrolyte (moisture), which accelerates pitting corrosion and rusting (Solaracks, nd). Figure 4, 5 and 6 shows that aluminum oxide contamination found in the surface of AISI 304 part.

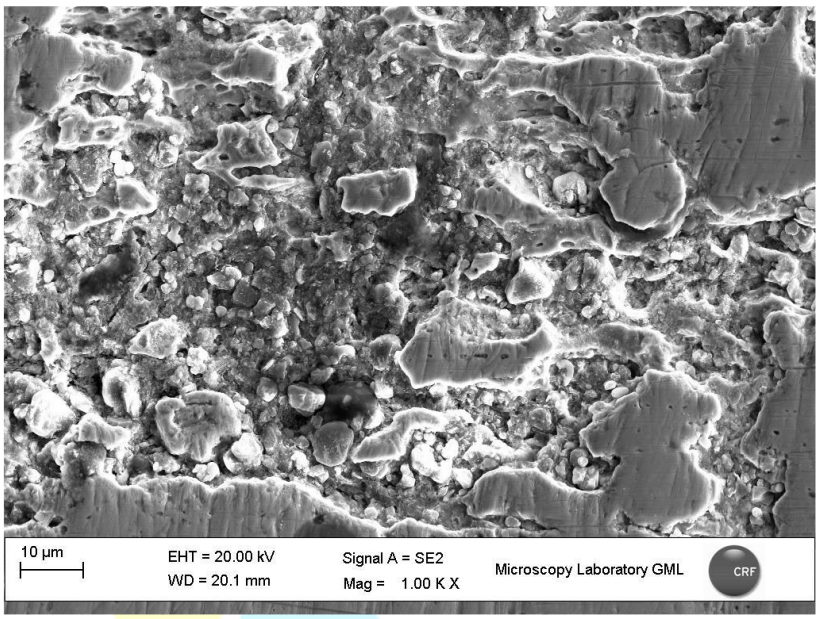


Figure5: Aluminum oxide particles on the AISI 304 surface

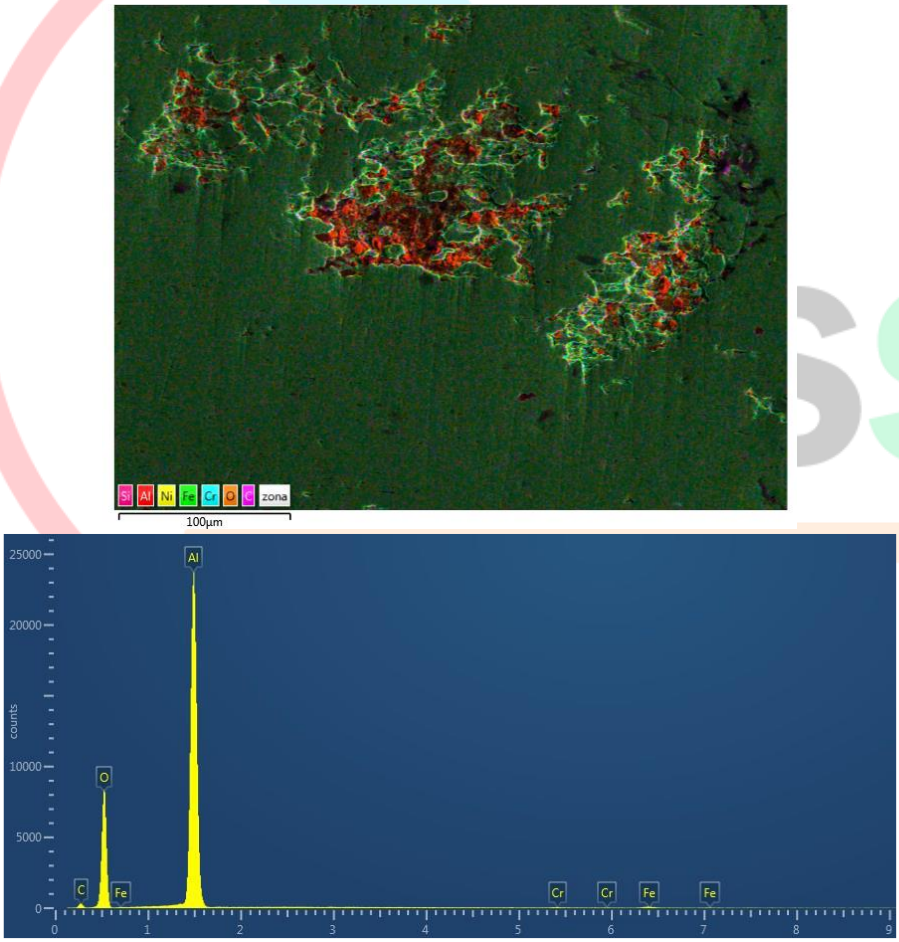


Figure6: *Aluminum oxide particles on the AISI 304 surface*

Effectiveness of Cleaning Methods

After parts were exposed to iron dust and aluminum paste, they were subjected to a 24-hour salt spray test according to ASTM B71. 8 different chemicals were used for cleaning the

surface and remove the oxide particles inside of the crates of the surface after 24 hours exposure. Summary of the affects of each chemicals cleaning performance given in Table 2. It was found that chemically cleaning contaminated parts prior to subjecting them to a salt spray test significantly increased corrosion resistance, as evidenced by the reduced formation of rust in subsequent tests. This finding once again highlighted the importance of proper surface preparation and decontamination in maintaining the integrity of automotive components made from stainless steel.

Table 2- *Different chemicals corrosion rating after 24h salt spray test*

Chemicals	%Corrosion rate (before)	%Corrosion rate (after)
Diesel Fluid	%100	%90
Gasoline	%100	%90
WD-40	%100	%80
Cif Kitchen Cleaner	%100	%0
Standard Paste Polish	%100	%5
Würth Cleaner	%100	%0
Market Product-Lime and Rust Remover	%100	%0
Vinegar + Lemon +Salt	%100	%25

1. Natural Weathering Test Results

Natural weathering is a method widely used to assess the long-term performance of materials under real-world environmental conditions. This method is employed to investigate the effects of environmental factors—such as temperature fluctuations, humidity, rain, air pollution, ultraviolet radiation and atmospheric pollutants—on material surfaces. It is also noted in the literature that natural weathering tests, when evaluated in conjunction with accelerated laboratory tests, contribute to a more accurate analysis of corrosion behavior under real-world service conditions. It is recognized as a significant method for determining oxidation, surface degradation and atmospheric corrosion mechanisms that may occur on stainless steel surfaces. Within the scope of this study, the contaminated samples were left exposed to the outdoor environment under natural atmospheric conditions for two years, with periodic inspections carried out every six months. In the examinations carried out, no rouging formation or oxide-based corrosion was observed on the cleaned samples. This result demonstrates that appropriate

surface cleaning and decontamination processes are of critical importance for the long-term atmospheric resistance of AISI 304 stainless steel components.

CONCLUSION

This study demonstrates the susceptibility of AISI 304 stainless steel trim components to rouging when contaminated with iron and aluminum particles. The neutral salt spray test and SEM analysis provided valuable insights into the corrosion mechanisms and the effectiveness of cleaning chemicals. The presence of iron particles caused localized corrosion to initiate by creating anodic properties on the surface. Aluminum residues, on the other hand, accelerate this process, leading to a more aggressive corrosion mechanism. The findings indicate that contamination control is critical during production and assembly processes. Selecting appropriate cleaning methods and maintaining control over processes will significantly reduce the risk of corrosion.

On the other hand, this study contributes to literature as one of the few studies examining the formation of rouging on AISI 304 stainless steel trim components in the automotive sector. In the literature, the rouging problem is predominantly associated with high-purity water and steam systems in the pharmaceutical industry. However, this study demonstrates that iron and aluminum contamination arising from automotive production and assembly processes can trigger similar rouging mechanisms. In this respect, the study demonstrates that the rouging phenomenon is not limited to pharmaceutical systems alone but may also observed in automotive manufacturing processes where stainless-steel surfaces are exposed to metallic contamination.

REFERENCES

Saha Podder, A., & Bhanja, A. (2013). Applications of Stainless Steel in Automobile Industry. Advanced Materials Research, 794, 731–740. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.794.731

Gonzalez, M. M. (2012). Rouge: The intrinsic phenomenon in stainless steel. Pharmaceutical Engineering, 32(4). Retrieved from https://www.bpe-technology.com/system/download/Rouging%20in%20Stainless%20Steel%20%28Pharmaceutical%20Engineering%202012%29.pdf.3d0d924a8ca6f7b5969a6eaea9bf27aa

Mathiesen, T., & Frantsen, J. E. (2007). Rouging of stainless steel in WFI systems: Examples and present understanding. In CORROSION 2007 Conference Proceedings. NACE International. https://doi.org/10.5006/C2007-07193

Sandle, T. (2015). *The rouging effect in pharmaceutical water systems: Causes and strategies for prevention*. *Journal of GXP Compliance, 19*(1), 1–10.

Solaracks. (n.d.). *Galvanic corrosion between stainless steel 304 and aluminum alloy*.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Influence of Fabric Structure on Color, Gloss and Hardness in Automotive Textiles

Burcu GÜL[1]

Abstract

This study investigates the relationship between fabric texture and the color, gloss, and hardness measurements of fabrics used in the automotive industry, produced with yarns of the same color. For this purpose, samples with the same color code and material type were utilized, and the influence of texture on color and gloss was examined following testing. In addition, hardness measurements were conducted, and the relationship between texture variation and hardness was evaluated for fabrics composed of the same material. To ensure consistency, all measurements were performed under controlled laboratory conditions using validated testing methods. Color differences were measured using instrumental methods, while gloss values were assessed at specified measurement angles to characterize surface reflectance. The study highlights that even when the same raw material is used, small differences in fabric construction parameters, such as surface pattern, may significantly affect the perception of quality and the overall visual appearance in automotive interior applications. These results provide valuable insights for optimizing surface structure and design choices in the automotive industry, discussing new approaches to enhance both the aesthetic and functional qualities of automotive products. Furthermore, this research may contribute to future material development processes by supporting manufacturers in selecting fabric structures that provide both improved performance characteristics and enhanced customer satisfaction.

Keywords: fabric, texture, gloss, color, hardness

[1] Uzman, Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş, Malzeme Mühendisliği Yöneticiliği, burcu.gul@tofas.com.tr, Orcıd: 0009-0005-9350-8093

INTRODUCTION

In recent years, wrapped components used in automotive interior trim have had a significant impact on customer perception, particularly from a visual standpoint. The fabrics used in these wrapped parts may be composed of different materials or exhibit variations in color and surface morphology. These characteristics are largely shaped by evolving design trends and customer preferences.

In automotive interiors, textile materials are commonly applied to components such as door panels, armrests, and center consoles. These areas are considered high-traffic zones, as they are frequently touched and exposed to repeated user interaction throughout the vehicle's service life. Consequently, the materials used in these applications are expected to maintain their visual appearance and tactile properties under continuous mechanical stress and wear. In addition to aesthetic considerations, durability and long-term performance are critical factors in material selection. Therefore, understanding the relationship between material characteristics and perceived quality is essential for the development of robust interior trim solutions. While color and texture influence aesthetic perception, hardness represents a physically measurable parameter affecting material performance.

Beyond visual attributes, the tactile properties of interior trim fabrics play a significant role in the overall user experience. In particular, the perceived in-vehicle comfort is closely associated with factors such as surface hardness and haptic response. Therefore, the integration of aesthetic requirements with functional performance criteria necessitates a systematic and balanced design approach. Moreover, variations arising from material selection and manufacturing processes can directly influence the final product performance as well as customer satisfaction. Consequently, a comprehensive evaluation of the visual properties of fabrics is essential for achieving robust design, ensuring product quality, and enhancing perceived value in automotive interior trim applications.

MATERIAL AND METHOD

2.1. Definitions of Color, Gloss and Texture

Color refers to the visual perception based on the electromagnetic spectrum. Color perception is associated with an object’s light absorption, reflection, and emission properties (The University of Waikato, 2012). Color refers to the visual perception based on the electromagnetic spectrum. Color perception is associated with an object’s light absorption, reflection, and emission properties. The perceived color depends on the spectral sensitivity of cone cells in the retina as well as the characteristics of the illumination source. In addition, surrounding conditions may also influence color perception, making it a context-dependent attribute rather than a purely material property. Therefore, color evaluation under standardized daylight conditions is generally considered to provide the most reliable assessment of perceived color.

Gloss is defined as the degree to which a surface reflects light, and it is commonly used to describe whether a surface appears shiny or matte. Higher gloss values correspond to more specular (shiny) surfaces, whereas lower values indicate a more matte appearance. Accurate gloss evaluation primarily depends on surface flatness. Smooth surfaces tend to produce higher

gloss readings due to more uniform and directed light reflection. In contrast, rough surfaces scatter incoming light in multiple directions, leading to increased diffusion and reduced gloss levels [Kaynak ve Bocaoğlu, 2025].

Texture depth refers to the extent to which pores, indentations, or protrusions extend across a surface. Optical 3D measurement devices quantify texture depth in microns. Components are analyzed both in terms of surface morphology and numerical values. Texture depth plays a critical role in determining the tactile perception and perceived quality of a surface, particularly in interior trim applications. It is also closely related to light scattering behavior, which influences the visual appearance of gloss and roughness. Variations in texture depth may arise from material composition and processing parameters, making its control essential for ensuring consistent surface quality.

2.2 Definitions of Hardness of Textiles

Hardness measurements of the textile samples were performed using a PU device. The probe of the instrument was placed on the surface, and hardness values were recorded in millimeters. Measurements were carried out under controlled conditions to ensure consistency and repeatability. This method allows for a quantitative evaluation of surface resistance by providing standardized and comparable data across samples.

Figure 1. *Sonohard Ultrasonic Hardness Tester (Bilginoğlu Endüstri, 2026)*

MEASUREMENTS

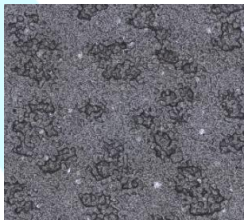
In the first study, samples with identical color and comparable texture depth, but differing surface morphologies were investigated. Due to variations in texture type, light scattering and refraction were also affected, resulting in differences in L* values. As texture depth increases, light scattering becomes more significant, resulting in a reduction in gloss values. Consequently, the L* value decreases proportionally. The findings obtained are presented in Table 1.

Table 1. *Material Type and Measurements of Texture Depth, Color, Gloss and Hardness Values*

Texture	Color code	Material Type	Texture Depth	L*	a*	b*	Gloss	Hardness
A	X	Vynil	120 µm	25,04	-0,13	-0,68	0,9 GU	0,84-0,87 H
B	X	Vynil	130 µm	24,66	-0,12	-0,74	0,6 GU	0,90-0,94 H

As shown in Table 2, the surface morphologies of the two samples differ significantly. Variations induced by the structure influence light refraction. Consequently, even when the same colorant is used, differences are observed in both gloss and the L* values of the colour.

Table 2. *Surface Structure and Images of Sample A and B*

Sample	Surface Structure
A	
B	

In the subsequent study, samples with the same color and material composition but different grain depths were examined. To maintain a consistent surface morphology, the selected samples were chosen to have similar grain form. Similar to the findings of the previous study, variations in texture depth resulted in noticeable differences in gloss and lightness–darkness (L*) values. As the grain depth increased, gloss values tended to decrease due to enhanced light scattering on the surface. Correspondingly, changes in the optical properties of the surface also influenced the perceived brightness of the samples. The structural rigidity of the grain also appeared to play a role in the observed optical differences.

Table 3. *Material Type and Measurements of Texture Depth, Color, Gloss and Hardness Values*

Texture	Color code	Material Type	Texture Depth	L*	a*	b*	Gloss	Hardness
C	Y	Vynil	97 µm	24,78	-0,03	-0,56	1,5 GU	0,67-0,71 H
D	Y	Vynil	131 µm	24,39	-0,02	-0,61	1,0 GU	0,55-0,59 H
E	Y	Vynil	95 µm	24,51	-0,06	-0,41	1,2 GU	0,49-0,54 H

The results indicated that the hardness values were not significantly influenced by either texture type or grain depth. Variations in surface morphology did not produce a measurable effect on the mechanical hardness of the samples. This finding suggests that the hardness property remained relatively stable despite differences in surface pattern characteristics.

CONCLUSION

In the automotive industry, color, gloss, texture, and hardness tests are commonly performed for the approval of textile-wrapped components. In this context, the present study investigated the influence of different grain types on color, gloss, and hardness properties of textile samples sharing the same color but exhibiting different surface morphologies. The obtained results indicate that texture depth plays a significant role in determining the visual appearance and surface characteristics of the material. The findings demonstrated that even when identical color raw materials were used, variations in surface type led to noticeable changes in optical properties. This effect is primarily attributed to differences in light scattering and refraction on the surface. As texture depth increases, light is refracted at larger angles, resulting in a decrease in gloss values and, consequently a reduction in lightness (L*) values. Furthermore, it was observed that gloss variations may also occur due to differences in surface morphology, even when texture depths are relatively similar. The hardness values of the fabric samples were also measured using a hardness testing device. Overall, no significant relationship was found between surface characteristics and hardness values. Instead, hardness was found to be mainly dependent on the material and yarn types of the samples.

REFERENCES

Bilginoğlu Endüstri, “SONOHARD Ultrasonik Hardness Tester.”. Available: https://www.bilginoglu-endustri.com.tr/sonohard-ultrasonic-hardness-tester, 01.06.2026.

Kaynak, B. ve Bacıoğlu, A. (2025 February 27). *FİZ201" DALGALAR'LABORATUVARI.* Hacettepe Üniversitesi. https://yunus.hacettepe.edu.tr/~bacioglu/Dersler/FI%CC%87Z201/fiz201ders2b.pdf

THE UNIVERSITY OF WAIKATO (2012). “*Colours Of Light”,* https://www.sciencelearn.org.nz/resources/47-colours-of-light, 01.06.2026

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Comparison of clustering algorithms to construct data-adaptive network design for regional gravity field modeling via SRBFs

Raşit Uluğ[1,2]

Abstract

The accuracy of regional gravity modelling using radial basis functions (RBFs) strongly depends on the configuration of the RBF network, which is defined by the spatial locations and distribution of the RBF centers. Although clustering algorithms are primarily developed to group data based on their similarities, they can also be used to construct data-adaptive RBF networks. Previous studies have applied several clustering algorithms for this purpose, including the k-means clustering algorithm combined with a modified Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique (ISODATA), known as k-SRBF, the Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (HDBSCAN), Mean-shift clustering, and the Balanced Iterative Reducing and Clustering using Hierarchies (BIRCH) algorithm. However, a comprehensive comparison of these algorithms for RBF network construction has not yet been reported. In this study, these algorithms are evaluated in terms of computational efficiency and algorithmic complexity for constructing data-adaptive RBF networks. The results show that both the k-SRBF and HDBSCAN methods require additional computational effort due to post-processing steps, although HDBSCAN is slightly faster than k-SRBF. The Mean-shift algorithm is considerably faster and requires only one parameter, the window size. However, the resulting network is highly sensitive to this parameter; numerical experiments indicate that a small change of 0.01° in window size can lead to variations of approximately 66–83% in the number of RBF centers. The BIRCH algorithm demonstrates significant advantages in terms of clustering speed and its ability to handle large datasets. By condensing data into a compact summary structure during an initial scan, it reduces input/output costs and allows efficient in-memory processing. Numerical tests show that BIRCH can construct RBF networks within seconds, making it the most suitable algorithm among those evaluated. Additionally, the Basic Sequential Algorithmic Scheme (BSAS) also shows promising performance and is suggested as a potential alternative for further investigation.

Keywords: Regional Gravity Field, Radial Basis Functions, Clustering, Data-Adaptive Network Design

[1] Dr. Arş. Gör., Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği, Orcıd: 0000-0002-2671-228X
[2] Dr. Arş. Gör., Atatürk Üniversitesi, Pasinler Meslek Yüksekokulu, Harita ve Kadastro Programı, Orcıd: 0000-0002-2671-228X

Introduction

The gravity field of the Earth is directly related to the distribution of masses within the planet. Accurate modelling of the Earth's gravity field at both regional and global scales is therefore essential for understanding and analyzing the complex internal structure of the Earth. In addition, since gravity fields control the distribution of water masses, highly accurate gravity field models play a critical role in climate studies, particularly in investigations of sea level rise and mass redistribution processes (Wu et al., 2019). Furthermore, regional gravity models are fundamental for establishing the relationship between mathematical (ellipsoidal) and physical (orthometric) height systems. They also contribute to improved understanding of both static and dynamic geophysical processes, including tectonic deformation and mass transport mechanisms.

Spherical harmonic (SH) functions are widely used for representing the Earth's gravity field at the global scale. However, they are not well suited for regional gravity field modelling because they lack localization in the spatial domain (Bentel et al., 2013). Since terrestrial, marine, and airborne gravity measurements providing high-frequency gravity signals are typically collected over limited spatial regions, modelling techniques that allow spatial localization are required to achieve high-resolution regional gravity field models. Among the available approaches, spherical radial basis functions (SRBFs) have gained considerable attention in recent decades. Their popularity stems from their ability to provide localization in both spatial and spectral domains, as well as their conceptual simplicity and compatibility with various gravity field functionals (Klees et al., 2008).

Several types of SRBF kernels have been proposed and applied in gravity field modelling. These include the point mass kernel (Barthelmes, 1986; Claessens et al., 2001; Dampney, 1969; Lehmann, 1993), radial multipoles (Marchenko, 1998, 2016) (Marchenko 1998; Marchenko et al. 2001), Poisson wavelets (Chambodut et al., 2005; Panet et al., 2006; Ulug & Karslıoglu, 2022a; Wu et al., 2017a, 2017b) and spherical splines (Lieb, 2017; Liu, 2023; Schmidt et al., 2005). The accuracy of regional gravity field models estimated using SRBFs depends strongly on several key parameters: (1) the SRBF network, defined by the number and spatial distribution of SRBF centers; (2) the bandwidth (or depth) of the SRBFs; and (3) the minimum and maximum degrees of the spectral expansion.

Among these parameters, the configuration of the SRBF network plays a particularly critical role in determining the accuracy and efficiency of the resulting gravity field model. Therefore, several methodologies have been proposed to determine optimal SRBF network configurations and bandwidth parameters. One notable approach is the k-SRBF method introduced by Ulug & Karslıoglu, (2022b) which constructs a data-adaptive SRBF network using the k-means clustering algorithm. The k-SRBF methodology requires four parameters for network construction: an initial candidate network, the minimum spherical distance between SRBF centers, the maximum spherical distance between an SRBF center and its associated data points, and the minimum number of observations per cluster. Subsequently, an improved version of this approach (improved k-SRBF) was proposed by Ulug & Karslıoglu (2022a) which reduces the required parameters to a single value, namely the minimum spherical distance between SRBF centers. Although this improvement simplifies parameter selection, the method still requires considerable computational time due to a necessary post-processing step

during network construction. To mitigate this limitation, F. Zhang et al. (2024) proposed the use of the Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (HDBSCAN) algorithm, reporting approximately 12.5% reduction in computation time during network design.

More generally, clustering algorithms can be effectively used to construct data-adaptive RBF networks. Although clustering techniques are primarily designed to group data points according to similarity measures, they can also serve as an efficient tool for determining optimal RBF center locations and spatial distributions. Various clustering algorithms have been applied for this purpose, including k-means with a modified Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique (ISODATA) referred to as k-SRBF, Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (HDBSCAN), Mean-shift clustering (Derpanis, 2005), and the Balanced Iterative Reducing and Clustering using Hierarchies (BIRCH) algorithm (T. Zhang et al., 1996). However, despite their potential advantages, a systematic comparison of these algorithms for constructing data-adaptive RBF networks has not yet been thoroughly investigated.

In this study, we evaluate several clustering algorithms with respect to their computational efficiency and algorithmic complexity in order to establish an optimal data-adaptive RBF network design. In particular, we propose a new methodology based on the Balanced Iterative Reducing and Clustering using Hierarchies (BIRCH) algorithm (T. Zhang et al., 1996). Compared with traditional clustering approaches such as k-means, the BIRCH algorithm requires less memory and is capable of clustering very large datasets efficiently. Its efficiency stems from its ability to condense data into a compact summary structure during an initial scan, which significantly reduces input/output costs and enables efficient in-memory processing. Moreover, the clustering procedure in BIRCH is performed based on the distance between cluster centroids, which can be directly utilized to define SRBF center locations. This property eliminates the need for additional post-processing steps, thereby reducing both computational time and algorithmic complexity.

Furthermore, we investigate additional clustering algorithms to determine whether alternative approaches may also be suitable for RBF network construction. Among the examined methods, the Basic Sequential Algorithmic Scheme (BSAS) demonstrates promising performance, yielding results comparable to BIRCH in terms of both computational speed and modelling accuracy. Therefore, BSAS is also suggested as a potential alternative that merits further investigation for the development of efficient data-adaptive SRBF networks.

Clustering Algorithms

This section presents the fundamental concepts and key differences among the clustering algorithms considered in this study, providing a clearer understanding for selecting an appropriate algorithm for network design.

k-Means Clustering

The k-means clustering algorithm (MacQueen, 1967) is a widely used unsupervised learning method that partitions a dataset into k clusters by minimizing the variance within each cluster. The algorithm starts with an initial set of k randomly selected cluster centers (centroids). Each observation is assigned to the nearest centroid according to the squared Euclidean

distance, and the centroid of each cluster is then updated as the mean of all observations belonging to that cluster. This assignment–update procedure is repeated iteratively until the cluster centers stabilize and no further changes occur. Because the centroids correspond to the spatial average of the observations within each cluster, the resulting cluster distribution reflects the spatial density of the data and therefore provides a data-adaptive representation of the observation set.

In the context of regional gravity field modelling using spherical radial basis functions (SRBFs), the k-means algorithm is employed to construct a data-adaptive network of SRBF centers. Specifically, the centroids obtained from the clustering process are interpreted as candidate locations for SRBF centers. Areas with dense observations naturally produce more clusters and therefore more SRBF centers, whereas sparse-data regions contain fewer centers, allowing the network to adapt to the heterogeneous spatial distribution of gravity observations. However, a limitation of the standard k-means approach is that the number of clusters k must be specified in advance, and different choices of k lead to different network configurations. To overcome this limitation, the centroids produced by k-means can be further refined through a post-processing procedure inspired by the ISODATA algorithm, which iteratively splits clusters based on predefined criteria such as the minimum spherical distance between centers and the minimum number of observations within each cluster. This procedure enables the construction of an SRBF network that is better adapted to the spatial distribution of gravity data while avoiding over- or under-parameterization of the model.

HDBSCAN

The Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (HDBSCAN) algorithm is an advanced density-based clustering method that extends the traditional DBSCAN approach by incorporating hierarchical clustering and stability-based cluster selection. Unlike centroid-based algorithms such as k-means, HDBSCAN identifies clusters based on the density of data points and can automatically detect clusters of varying shapes and densities while also identifying noise points. The algorithm operates by defining a *mutual reachability distance*, which combines the core distance of data points with their pairwise distances, allowing the construction of a density-based graph. A minimum spanning tree of this graph is then generated and transformed into a hierarchical cluster tree, from which the most stable clusters are extracted according to a user-defined parameter specifying the minimum number of samples in a cluster.

In the context of regional gravity field modelling using spherical radial basis functions (SRBFs), the HDBSCAN algorithm can be employed to construct a data-adaptive SRBF network by assigning the centers of SRBFs to the centroids of clusters obtained from the density-based clustering process (F. Zhang et al., 2024). Because HDBSCAN considers the local density of observations, it naturally produces more cluster centers in regions with dense data coverage and fewer centers in sparsely sampled areas, enabling the SRBF network to adapt to the spatial distribution of gravity observations. After determining the horizontal positions of the SRBF centers through clustering, additional procedures such as bandwidth optimization (e.g., using the generalized cross-validation technique) are applied to determine the depth or bandwidth of each SRBF. Furthermore, to avoid excessive clustering in dense regions or overly large clusters in sparse regions, post-processing steps such as merging clusters that are too close

together and splitting clusters with large spatial extent can be introduced. This strategy ensures a balanced SRBF network design that maintains modelling accuracy while reducing the risk of overfitting and improving computational efficiency.

Mean-Shift clustering

The Mean Shift clustering algorithm is a non-parametric and density-based unsupervised learning method originally introduced by Fukunaga & Hostetler (1975). The fundamental idea of the algorithm is to identify the modes (local maxima) of the underlying data density distribution. Unlike centroid-based clustering algorithms such as k-means, Mean Shift does not require the number of clusters to be specified in advance. Instead, it iteratively shifts candidate cluster centers toward regions with higher data density by computing the weighted mean of neighboring observations within a predefined window. During each iteration, the cluster center is updated until convergence is reached, i.e., until the shift between consecutive positions becomes negligible. The clustering result strongly depends on the window size parameter (bandwidth), which controls the neighborhood used to estimate the local density and therefore directly influences the number and spatial distribution of the final clusters.

In the context of regional gravity field modeling using spherical radial basis functions (SRBFs), this algorithm has been proposed to construct a data-adaptive SRBF network by determining both the number and horizontal positions of SRBF centers directly from the spatial distribution of gravity observations (Uluğ, 2025). In the methodology proposed in the referenced study, the cluster centers obtained from the Mean Shift algorithm are directly adopted as SRBF centers, resulting in a network that naturally adapts to the density of the observations. Regions with dense gravity measurements produce a higher number of SRBF centers, while sparse areas contain fewer centers, and no centers are placed in regions without observations. After establishing the SRBF network, the optimal depth of each basis function is estimated using the generalized cross-validation (GCV) technique, while the upper and lower bounds of the depth are determined based on the empirical signal covariance function and the selected window size. The study demonstrates through numerical experiments that the Mean Shift algorithm provides an efficient and practical approach for SRBF network design because it requires only a single parameter (the window size) and eliminates the need for post-processing steps required by some other clustering-based approaches.

BIRCH algorithm

The Balanced Iterative Reducing and Clustering using Hierarchies (BIRCH) algorithm is a hierarchical clustering method specifically designed for efficiently processing very large datasets. The algorithm incrementally summarizes the dataset by constructing a compact tree structure called a Clustering Feature (CF) tree, which stores statistical summaries of data points rather than the raw observations. Each CF entry is defined by three components: the number of data points in the cluster (M), the linear sum of the data points (LS), and the squared sum of the data points (SS). These statistics allow the algorithm to represent clusters efficiently and update them dynamically as new data points are inserted. By organizing the dataset into hierarchical sub-clusters before performing the final clustering stage, BIRCH significantly reduces computational cost and memory requirements compared to many traditional clustering algorithms.

In the context of regional gravity field modeling using spherical radial basis functions (SRBFs), the study proposes a novel methodology in which the sub-cluster centers generated by the BIRCH algorithm are directly used as the centers of SRBFs, thereby constructing a data-adaptive network design (Ulug, 2025). Since clustering is performed using the spatial coordinates of gravity observations, the resulting SRBF centers naturally follow the spatial distribution of the data, leading to a higher density of basis functions in areas with dense observations and fewer basis functions in sparse regions. Unlike previously proposed clustering-based methods such as k-means and HDBSCAN, which require additional post-processing steps to determine the final SRBF network, the BIRCH-based approach eliminates this requirement by directly utilizing the sub-cluster centers. This significantly reduces both computational complexity and processing time. Furthermore, the study demonstrates through numerical experiments that the BIRCH algorithm can construct the SRBF network in only a few seconds even for large datasets, saving more than 95% of the computational time compared with earlier approaches while maintaining comparable modeling accuracy.

Comparison of algorithms

At the highest level, all four manuscripts share the same scientific motivation: in SRBF modelling, accuracy depends strongly on the network design, meaning the number and horizontal positions of the SRBF centers. All four methods use clustering not for classification in the usual machine-learning sense, but as a practical mechanism to place SRBF centers where the data density is high and to avoid wasting basis functions in poorly observed regions. In that sense, all four methods move away from rigid homogeneous grids toward data-adaptive basis placement. Their main differences are not in the gravity-field theory itself, but in the network-generation logic, parameterization burden, and computational efficiency.

The k-SRBF methodology is the most foundational of the four because it established the clustering-based SRBF network idea in a clear and geodetically motivated way. Its key contribution was to show that k-means centroids can be turned into SRBF centers, but only after a modified ISODATA-style post-processing step that splits and refines clusters according to geometric criteria. In the (Ulug & Karslıoglu, 2022a), the authors explicitly state that standard k-means alone is not enough, because the required number of clusters k is not known in advance and different k values would produce different candidate networks. To resolve this, they begin from a candidate network and iteratively split clusters using user-defined criteria such as minimum spacing between centers and minimum points per cluster. This makes the method geodetically meaningful, but also makes it algorithmically more involved than plain k-means. In other words, k-SRBF is not just “run k-means once”; it is a hybrid clustering + heuristic refinement framework.

From a complexity standpoint, k-SRBF is the most cumbersome among the four manuscripts. That does not mean it is weak scientifically; on the contrary, it is a strong reference method. But the paper itself makes clear that the methodology requires multiple stages: candidate centroid generation, iterative splitting, checking user-defined criteria, bandwidth determination by GCV within the radius of impact area. The method also originally involved several user-defined parameters, and later work tried to reduce these. This complexity is one reason subsequent studies targeted it as the benchmark to improve upon. F. Zhang et al. (2024)directly notes that the earlier k-SRBF strategy often results in a relatively large number

of SRBFs and requires more computation, while Ulug (2025) explicitly uses k-SRBF's approximate runtime of about 235 s as the main time benchmark.

Numerically, however, k-SRBF performs well. In the Ulug & Karslıoglu (2022a), the method was tested extensively in both the Colorado and Auvergne regions, with additional experiments for combining terrestrial and airborne data. The paper reports that well-chosen user criteria can improve the condition number of the normal equations so that regularization is not always needed. It also reports competitive quasi-geoid accuracy compared with prior SRBF-based studies while using fewer SRBF centers. In Colorado, the later BIRCH paper cites the improved k-SRBF result as roughly 5198 SRBFs, 2.5 mGal RMS at gravity-disturbance control points, and 1.6 cm STD at height-anomaly control points, which is an important reference because later algorithms compare themselves against these values.

The modified HDBSCAN methodology is best understood as an attempt to preserve the adaptive logic of k-SRBF while reducing the time burden and parameter dependence. HDBSCAN is inherently attractive because it is density-based and hierarchical; unlike k-means, it does not require the number of clusters to be fixed beforehand. Instead, it uses the minimum number of samples in a cluster and a mutual-reachability distance framework to discover stable clusters. For SRBF network design, this is conceptually appealing because gravity observations are often heterogeneously distributed, and density-based methods can respond to that heterogeneity more naturally than centroid-only methods. The HDBSCAN paper still concludes, though, that direct clustering output is not sufficient for SRBF design: dense areas can generate too many centers, while large sparse regions may be represented too coarsely. For that reason, the authors add post-processing by merging and splitting, meaning that the method is faster than k-SRBF but is still not fully free of extra refinement steps.

In terms of parameterization, HDBSCAN is lighter than k-SRBF but not as simple in practice as it first appears. The base algorithm requires the minimum number of samples per cluster, but the modified SRBF implementation also uses geometric thresholds for merging and splitting, specifically minimum and maximum spherical-distance criteria. So although HDBSCAN is often presented as more automatic than k-means, in this SRBF context it still becomes a semi-heuristic method. Computationally, its advantage is real but moderate rather than transformative. The paper reports that compared with the earlier (Ulug & Karslıoglu, 2022a) strategy, the modified HDBSCAN network produced 3928 SRBF centers in Auvergne, which is 84.2% of the SRBF count of the previous method, and reduced center-determination time from 232.917 s to 203.679 s, a saving of 12.5%. That is useful, but it is still the same order of magnitude as k-SRBF.

Accuracy-wise, HDBSCAN is strong. In the Auvergne test, it reported about 1.58 mGal gravity-anomaly accuracy and about 0.03 m height-anomaly accuracy. The paper stresses that its precision is essentially consistent with the earlier clustering-based method while using fewer SRBFs and slightly less time. So HDBSCAN's role in this literature is important: it demonstrates that one can trim the network and shorten runtime without sacrificing accuracy much. But it does not yet solve the deeper methodological issue that the SRBF network still needs a post-processing logic layered on top of the clustering result.

The Mean Shift methodology moves in a different direction. Instead of relying on a clustering algorithm that requires either a fixed cluster count or a density-tree post-processing

structure, it uses a nonparametric mode-seeking approach. This is attractive because the number of clusters does not need to be specified in advance, and the resulting cluster centers can be used directly as SRBF centers. That is a major conceptual simplification relative to k-SRBF and HDBSCAN. The manuscript explicitly frames this as the first use of Mean Shift for SRBF network design and emphasizes that avoiding post-processing can simultaneously reduce algorithmic complexity and network-construction effort. In that sense, Mean Shift is more elegant than the earlier methods.

However, Mean Shift shifts the difficulty from "number of clusters" to "window size" or bandwidth. The paper makes this point very strongly. It reports that even a 0.01° change in bandwidth can drastically alter the number of SRBFs and the final network geometry. Specifically, in the Colorado tests, the SRBF count was 10,213 for $bandwidht = 0.02°$, 5583 for $bandwidht = 0.03°$ and 3371 for $bandwidht = 0.04°$ The paper further notes that a 0.01° change caused approximately 83% and 66% changes in the number of SRBFs, depending on the comparison. This is perhaps the clearest evidence among all four studies that Mean Shift is powerful but highly sensitive to its governing parameter. The method requires only one main network-design parameter, which is attractive, but that parameter is extremely influential and lacks a solid theoretical selection rule.

Its numerical performance reflects that sensitivity. In Colorado, the best results were obtained at $bandwidht = 0.02°$ with about 2.18 mGal RMS at gravity-disturbance control points and 1.46 cm at height-anomaly control points. For $bandwidht = 0.03°$ the results remained very good at 2.67 mGal RMS and 1.87 cm, and the condition number improved enough that regularization was no longer necessary. For $bandwidht = 0.04°$ performance degraded clearly to 5.77 mGal RMS and 3.57 cm. So Mean Shift can match or even slightly improve on previous clustering-based SRBF accuracies, but only if the bandwidth is chosen very carefully. This makes it appealing for controlled experiments and for researchers who can afford some empirical tuning, but less robust as a turnkey solution.

The BIRCH methodology appears to be the strongest all-around compromise in the set of manuscripts. Conceptually, its advantage comes from the fact that it does not cluster the raw dataset directly in the same way as k-means or HDBSCAN. Instead, it builds a Clustering Feature tree, compressing the data into sub-clusters characterized by counts and summary statistics. For large spatial datasets, that compression is the crucial reason it scales so efficiently. The BIRCH paper explicitly exploits another geodetically important idea: because the objective is not final "global clustering" in the machine-learning sense, the last BIRCH stage that requires a prescribed number of clusters can be skipped. This reduces the method to essentially two parameters, but the paper shows that only one of them really matters in practice: the threshold. The branching factor has relatively minor influence once the threshold is appropriate.

This is where BIRCH clearly surpasses the earlier methods. In both Auvergne and Colorado, the paper shows that SRBF centers remain data-adaptive, with denser center placement where observations are dense and fewer centers where observations are sparse. But unlike Mean Shift, the sensitivity to the secondary parameter is small; and unlike k-SRBF and HDBSCAN, there is no mandatory post-processing stage after clustering to make the network usable. The runtime result is striking: the BIRCH paper reports that constructing the SRBF network took less than 10 s for each test, compared with about 235 s for k-SRBF and 204 s for

HDBSCAN, corresponding to more than 95% time savings in network establishment. That is not a marginal speed-up; it changes the practical workflow, because threshold testing becomes cheap enough to do repeatedly.

Its numerical accuracy is also strong. In Colorado, the best BIRCH cases around $threshold = 0.02°$ gave roughly 2.33–2.35 mGal RMS at gravity-disturbance control points and 1.51–1.60 cm at height-anomaly control points. At $threshold = 0.03°$ and BF = 100, the results were still excellent, at 2.63 mGal RMS and 1.58 cm, while using 4355 SRBFs and keeping the condition number below the critical numerical threshold. That is why the paper recommends $threshold = 0.03°$ and BF = 100 as a practical balance: the best result is only about 0.3 mGal better, but the chosen setting is numerically safer and still highly accurate. The paper also points out that compared with the earlier Colorado reference using 5198 SRBFs, BIRCH achieved essentially the same accuracy with 16% fewer centers.

So, if these manuscripts are compared as a progression, the story is quite coherent. k-SRBF is the methodological breakthrough that proved clustering can be used for SRBF network design and can produce accurate, condition-aware models. HDBSCAN improved the flexibility of cluster discovery and trimmed time and center count, but still relied on post-processing. Mean Shift eliminated the need to predefine cluster count and removed explicit post-processing, but replaced that with strong sensitivity to its window-size parameter. BIRCH appears to offer the best operational balance: it preserves data adaptivity, requires little parameter tuning beyond the threshold, has only weak sensitivity to the branching factor, avoids the post-processing burden, and is dramatically faster than the others while retaining comparable accuracy.

New algorithm suggestion

The Basic Sequential Algorithmic Scheme (BSAS) is one of the earliest and simplest clustering algorithms developed for unsupervised pattern classification. Originally proposed by Tou & Gonzalez (1974), BSAS follows a sequential clustering strategy, where data points are processed one by one and assigned to existing clusters based on a predefined similarity criterion. Unlike many conventional clustering algorithms, BSAS does not require iterative optimization procedures. Instead, it builds clusters incrementally as new data points are examined.

The algorithm begins by assigning the first data point to the first cluster. For each subsequent data point, the distance between the point and the centroids of the existing clusters is computed. If the minimum distance is smaller than a predefined threshold parameter, the point is assigned to the nearest cluster and the cluster centroid is updated accordingly. Otherwise, a new cluster is created, provided that the maximum allowed number of clusters has not been reached. This sequential decision process continues until all data points have been processed. As a result, the final clusters depend on the distance threshold and the order in which the observations are presented.

One of the major advantages of BSAS is its computational simplicity and efficiency. Since the algorithm processes each observation only once and does not require repeated iterations over the dataset, its computational complexity is relatively low compared to many other clustering algorithms. This characteristic makes BSAS particularly attractive for

applications involving large geospatial datasets, such as gravity observations used in regional gravity field modeling.

In the context of constructing data-adaptive RBF networks, BSAS offers several important advantages. First, the cluster centers obtained from the algorithm can be directly interpreted as candidate RBF centers, enabling the spatial distribution of the basis functions to adapt naturally to the density of observations. Regions with dense measurements tend to produce more clusters, while sparse regions generate fewer clusters, which leads to a balanced and efficient representation of the gravity field. Second, the algorithm requires only a small number of parameters, primarily the distance threshold that controls the minimum spacing between cluster centers. This parameter can be directly related to the desired spatial resolution of the RBF network.

Another advantage is that BSAS does not require complex post-processing steps to determine the final network structure. The sequential nature of the algorithm inherently enforces a minimum separation between cluster centers, which helps prevent excessive overlap between neighboring RBFs and reduces the risk of over-parameterization. These characteristics make BSAS a promising alternative for constructing RBF networks, particularly when computational efficiency and scalability are critical considerations.

Conclusion

The configuration of the radial basis function (RBF) network plays a critical role in determining the accuracy and efficiency of regional gravity field modelling. In particular, the number and spatial distribution of RBF centers directly influence how well the model represents the underlying gravity signal. Therefore, constructing a data-adaptive RBF network that reflects the spatial distribution of observations is essential for obtaining reliable regional gravity field models.

In this study, several clustering algorithms that can be used for RBF network construction were investigated and compared in terms of their computational efficiency, algorithmic complexity, and practical applicability. The examined methods include the k-means-based k-SRBF approach, HDBSCAN, Mean-shift clustering, BIRCH, and the Basic Sequential Algorithmic Scheme (BSAS). The analysis shows that the k-SRBF and HDBSCAN approaches can produce reliable RBF networks; however, both methods require additional post-processing procedures to refine the network structure, which increases the overall computational cost. Although HDBSCAN provides a moderate improvement in computation time compared with k-SRBF, its algorithmic workflow remains relatively complex.

The Mean-shift algorithm offers a simpler alternative since it does not require the number of clusters to be specified in advance and requires only a single parameter, namely the window size. Nevertheless, the numerical experiments demonstrate that the resulting RBF network is highly sensitive to this parameter. Even small variations in the window size can significantly alter the number and distribution of RBF centers, which may affect the stability of the final model.

Among the evaluated algorithms, the BIRCH method demonstrates the most favorable balance between computational efficiency and network quality. By summarizing the dataset into a compact clustering feature tree, BIRCH significantly reduces computational complexity

and memory usage, allowing large datasets to be processed efficiently. Numerical tests show that BIRCH can construct an RBF network within seconds while maintaining comparable modelling accuracy.

In addition, the BSAS algorithm was examined as a potential alternative clustering approach. Due to its sequential structure and low computational complexity, BSAS can efficiently generate data-adaptive RBF networks with performance comparable to BIRCH. Therefore, BSAS represents a promising method for future research.

Overall, the results indicate that clustering-based approaches provide an effective framework for constructing data-adaptive RBF networks. Among the investigated methods, BIRCH and BSAS appear to be the most suitable candidates for efficient and scalable RBF network design in regional gravity field modelling. Future studies may focus on further optimization of these algorithms and their integration with advanced SRBF parameter selection strategies to further improve modelling accuracy and computational performance.

References

Barthelmes, F. (1986). Untersuchungen zur Approximation des äußeren Gravitationsfeldes der Erde durch Punktmassen mit optimierten Positionen. [Dissertion, Dissertion, Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde 92 Zentralinstitut für Physik der Erde. Potsdam: Akademie der Wissenschaften der DDR]. In *Zentralinstituts Physik der Erde*. http://adsabs.harvard.edu/abs/1986VeZPE..92.....B

Bentel, K., Schmidt, M., & Gerlach, C. (2013). Different radial basis functions and their applicability for regional gravity field representation on the sphere. *GEM - International Journal on Geomathematics*, *4*(1), 67–96. https://doi.org/10.1007/s13137-012-0046-1

Chambodut, A., Panet, I., Mandea, M., Diament, M., Holschneider, M., & Jamet, O. (2005). Wavelet frames: An alternative to spherical harmonic representation of potential fields. *Geophysical Journal International*, *163*(3), 875–899. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02754.x

Claessens, S., Featherstone, W., & Barthelmes, F. (2001). Experiences with Point-Mass Gravity Field Modelling in the Perth Region, Western Australia. *Geomatics Research Australasia*, *75*, 53–86. http://hdl.handle.net/20.500.11937/31745

Dampney, C. N. G. (1969). THE EQUIVALENT SOURCE TECHNIQUE. *GEOPHYSICS*, *34*(1), 39–53. https://doi.org/10.1190/1.1439996

Derpanis, K. G. (2005). Mean shift clustering. *Lecture Notes*, *32*(1–4), 16.

Fukunaga, K., & Hostetler, L. (1975). The estimation of the gradient of a density function, with applications in pattern recognition. *IEEE Transactions on Information Theory*, *21*(1), 32–40. https://doi.org/10.1109/TIT.1975.1055330

Klees, R., Tenzer, R., Prutkin, I., & Wittwer, T. (2008). A data-driven approach to local gravity field modelling using spherical radial basis functions. *Journal of Geodesy*, *82*(8), 457–471. https://doi.org/10.1007/s00190-007-0196-3

Lehmann, R. (1993). The method of free-positioned point masses - geoid studies on the Gulf of Bothnia. *Bulletin Géodésique*, *67*(1), 31–40. https://doi.org/10.1007/BF00807295

Lieb, V. (2017). *Enhanced regional gravity field modeling from the combination of real data via Multi-Resolution Representation*. (March), 193. https://doi.org/10.1093/aje/kwq200

Liu, Q. (2023). *Regional gravity field refinement for geoid height modeling based on the combination of data from various observation techniques* (Number 896).

MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, *1*(14), 281–297.

Marchenko, A. N. (1998). *Parameterization of the Earth's gravity field: point and line singularities*. Lviv Astronomical and Geodetical Society.

Marchenko, A. N. (2016). *A classification of reproducing kernels according to their functional and physical significance*. (June 1998).

Panet, I., Chambodut, A., Diament, M., Holschneider, M., & Jamet, O. (2006). New insights on intraplate volcanism in French Polynesia from wavelet analysis of GRACE, CHAMP, and sea surface data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *111*(9). https://doi.org/10.1029/2005JB004141

Schmidt, M., Fabert, O., & Shum, C. K. (2005). On the estimation of a multi-resolution representation of the gravity field based on spherical harmonics and wavelets. *Journal of Geodynamics*, *39*(5), 512–526. https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.04.007

Tou, J. T., & Gonzalez, R. C. (1974). Pattern recognition principles. *Pattern Recognition Principles by Tou*, 40001.

Ulug, R. (2025). Implementation of the BIRCH algorithm to construct a data-adaptive network design for regional gravity field modeling via SRBF. *Earth Science Informatics*, *18*(2). https://doi.org/10.1007/s12145-025-01712-4

Uluğ, R. (2025). Ortalama kaydırma algoritması kullanarak küresel radyal tabanlı fonksiyonlar ile bölgesel gravite modellemeleri için veri uyarlamalı ağ tasarımı. *Journal of Geodesy and Geoinformation*, *12*(1), 20–31. https://doi.org/10.9733/jgg.2025r0002.t

Ulug, R., & Karslıoglu, M. O. (2022a). A new data-adaptive network design methodology based on the k-means clustering and modified ISODATA algorithm for regional gravity field modeling via spherical radial basis functions. *Journal of Geodesy*, *96*(11), 91. https://doi.org/10.1007/s00190-022-01681-2

Ulug, R., & Karslıoglu, M. O. (2022b). SRBF_Soft: a Python-based open-source software for regional gravity field modeling using spherical radial basis functions based on the data-adaptive network design methodology. *Earth Science Informatics*, *15*(2), 1341–1353. https://doi.org/10.1007/s12145-022-00790-y

Wu, Y., Abulaitijiang, A., Featherstone, W. E., McCubbine, J. C., & Andersen, O. B. (2019). Coastal gravity field refinement by combining airborne and ground-based data. *Journal of Geodesy*, *93*(12), 2569–2584. https://doi.org/10.1007/s00190-019-01320-3

Wu, Y., Luo, Z., Chen, W., & Chen, Y. (2017a). High-resolution regional gravity field recovery from Poisson wavelets using heterogeneous observational techniques 6. Geodesy. *Earth, Planets and Space*, *69*(1). https://doi.org/10.1186/s40623-017-0618-2

Wu, Y., Luo, Z., Chen, W., & Chen, Y. (2017b). High-resolution regional gravity field recovery from Poisson wavelets using heterogeneous observational techniques 6. Geodesy. *Earth, Planets and Space*, *69*(1), 34. https://doi.org/10.1186/s40623-017-0618-2

Zhang, F., Liu, H., & Wen, H. (2024). A data-adaptive network design for the regional gravity field modelling using spherical radial basis functions. *Geodesy and Geodynamics*, (April), 1–8. https://doi.org/10.1016/j.geog.2024.04.001

Zhang, T., Ramakrishnan, R., & Livny, M. (1996). BIRCH. *ACM SIGMOD Record*, *25*(2), 103–114. https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1009783824328

6thInternational
Congress of Engineering and
Natural Sciences

Design and Numerical Investigation of a Full Germanium Metalens at 850 nm

Şeyma YENER[1]
Ekin ASLAN[2,3]

Abstract

Metalenses have attracted significant attention in recent years as planar optical components capable of controlling electromagnetic waves using subwavelength structures. In this study, a fully germanium-based metalens operating at a wavelength of 850 nm was designed and numerically investigated. Unit-cell analyses were performed using the Rigorous Coupled-Wave Analysis method, and suitable nanopillar geometries providing the desired phase and transmission characteristics were obtained. Using the resulting phase library, the metalens arrangement was constructed and the full structure was analyzed using the Finite Difference Time Domain method. Although a certain level of phase control was achieved in the simulation results, several factors limiting the focusing efficiency were observed. In particular, transmission losses of the germanium material in the 850 nm near-infrared region, phase discontinuities, and near-field interactions between adjacent nanopillars negatively affected the overall performance. The study reveals the design limitations of germanium-based metalenses in the near-infrared region and aims to contribute to future optimization studies.

Keywords: Metalens, Metasurface, Germanium, Nanophotonics, Near-Infrared Optics.

1M.Sc. Student, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kayseri University, Kayseri, Türkiye. Orcid:0009-0009-9224-6959.
2Assoc. Prof. Dr. Ekin Aslan, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kayseri University, Kayseri, Türkiye. Orcid:0000-0003-0933-7796.
3National Nanotechnology Research Center (UNAM) and Institute of Materials Science and Nanotechnology, Bilkent University, 06800 Ankara, Türkiye.

INTRODUCTION

In recent years, metasurface-based optical structures have attracted significant attention due to their ability to provide planar alternatives to conventional bulky optical components. The capability of controlling the phase, amplitude, and polarization properties of electromagnetic waves using subwavelength nanostructures has enabled significant advances in applications such as metalenses, holographic surfaces, and beam steering devices. In particular, metalens structures contribute to the development of compact optical systems by reducing the large volume and geometric limitations associated with conventional lenses.

Dielectric metalenses have gained considerable interest in recent years because they exhibit lower optical losses compared to conventional plasmonic metasurfaces. Owing to their operating principles based on electric and magnetic Mie resonances, dielectric metasurface structures can provide high efficiency, making high-refractive-index dielectric materials attractive candidates for metalens designs (Koshelev & Kivshar, 2021). Ge has emerged as an important semiconductor material for metasurface and metalens studies due to its high refractive index, Complementary Metal–Oxide–Semiconductor (CMOS) compatibility, and strong electromagnetic field confinement in the infrared region (Aslan, 2021; Marris-Morini, 2018). Furthermore, the integration capability of Ge-based structures into photonic systems offers significant advantages for optical communication and infrared applications (Marris-Morini, 2018).

In the literature, Ge-based metalens structures have been reported to exhibit successful performance particularly in the mid- and long-wave infrared regions (Wang et al., 2019; Song et al., 2021). In near-infrared studies, Ge nanoresonators were shown to support strong magnetic dipole resonances and enhanced electromagnetic field confinement (Aslan, 2021). In addition, Aslan and Aslan (2026) presented a Ge-based metalens operating at the 1550 nm telecommunication wavelength, analyzed using Rigorous Coupled-Wave Analysis (RCWA) and Finite Difference Time Domain (FDTD) methods. In that study, the phase and transmission characteristics of Ge-nanopillars were investigated, a phase library providing full phase coverage was constructed, and a focusing efficiency of 78.6% was achieved. However, it was also reported that absorption losses and near-field interactions in the near-infrared region could limit the performance of Ge-based metalenses. Moreover, the focal shift effect in metalens structures was shown to be directly related to the numerical aperture and metasurface geometry (Ali et al., 2024). Although the 850 nm wavelength is an important operating region for optical communication and Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL)-based fiber-optic applications, the absorption losses and near-field interactions of Ge in this region pose significant challenges for metalens design.

In this study, a fully Ge-based metalens operating at a wavelength of 850 nm was designed and numerically analyzed. Most previous studies on Ge-based metalenses have focused on the mid- and long-wave infrared regions, while investigations at shorter near-infrared wavelengths such as 850 nm remain limited. Unit cell optimization was performed using the RCWA method, and a complete metalens arrangement was constructed based on the obtained phase library. Subsequently, the structure was analyzed using the FDTD method and its focusing performance was evaluated. The results reveal the major limitations encountered in Ge-based metalens designs and provide insights for future optimization studies.

METALENS DESIGN METHODOLOGY

In the design process of the proposed metalens structure, a single unit cell was first analyzed. The unit cell shown in Fig. 1(a) consists of a cylindrical Ge-nanopillar embedded in an air environment. Ge material defined using the optical constants corresponding to the 850 nm wavelength was selected for both the nanopillar and the substrate. The unit cell period was fixed at 450 nm along both the x- and y-directions. The structure was excited under normal incidence using an x-linearly polarized plane wave at the wavelength of 850 nm.

The RCWA method was employed to determine the optical response of the nanopillar geometry. In this analysis, the nanopillar radius (r) was swept from 50 nm to 200 nm with 5 nm increments, while the nanopillar height (h) was swept from 50 nm to 1000 nm with 25 nm increments. For each radius and height combination, the transmission and reflection coefficients of the zeroth diffraction order were calculated. The transmission power (T), reflection power (R), and absorption value (A) were obtained using the expressions $(T=|S_T|^2)$, $(R=|S_R|^2)$, and $(A=1-T-R)$, respectively. Here, (S_T) and (S_R) represent the transmission and reflection coefficients, respectively. The phase response was determined by extracting the phase of the zeroth-order transmission coefficient. Consequently, transmission, phase, absorption, and reflection maps were generated for each nanopillar geometry.

The transmission map of the nanopillar geometries is presented in Fig. 1(b). The transmission map exhibits characteristic resonance patterns where high transmission efficiency is achieved at specific geometric configurations. Fig. 1(c) illustrates the phase distribution as a function of nanopillar radius and height. It was observed that the phase response varies depending on the geometrical parameters and that an approximate 0-2π phase coverage can be achieved within certain regions. However, the phase variation was not completely continuous, and abrupt phase transitions were observed in some regions. The absorption and reflection maps are shown in Fig. 1(d) and Fig. 1(e), respectively. In particular, absorption losses of the Ge material increased at larger radius values, leading to reduced transmission performance. Furthermore, the increase in reflection values for certain geometries indicates that a significant portion of the energy losses originates from reflection mechanisms.

The RCWA results obtained were used as the primary dataset for constructing the phase library employed in the metalens design. Using this phase library, the required phase profile of a full Ge-metalens operating at 850 nm with a focal length of 100 µm was determined.

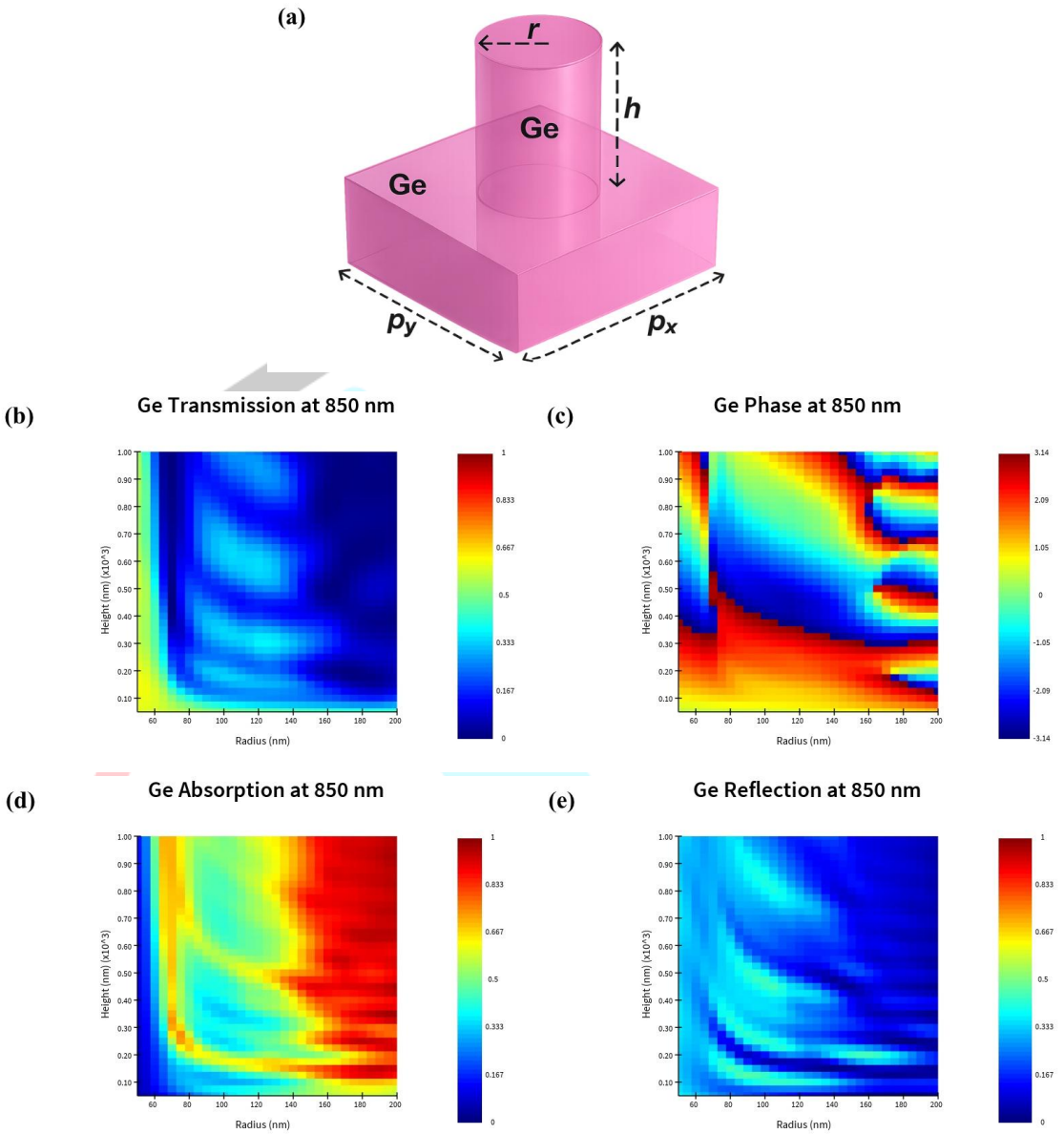


FIGURE 1. (a) Unit cell geometry of the proposed Ge-based metalens and the vectors indicate the incident electromagnetic field configuration. (b) Simulated transmission map, (c) phase-shift map, (d) absorption map, and (e) reflection map as a function of the height and radius of the Ge-nanopillar at 850nm wavelength.

FULL LENS DESIGN

The transmission, reflection, absorption, and phase maps obtained from the RCWA analyses were comprehensively evaluated to determine the appropriate nanopillar geometries for the metalens design. Considering phase continuity, transmission performance, and fabrication feasibility, a fixed nanopillar height of 700 nm was selected. Subsequently, to construct the phase library, nine different nanopillar radius values of 130 nm, 135 nm, 140 nm, 145 nm, 150 nm, 155 nm, 160 nm, 165 nm, and 170 nm were chosen. Each selected radius value was associated with a specific phase response, thereby establishing a discrete phase library for the proposed metalens structure.

The target phase profile of the metalens was defined to emulate a spherical wavefront capable of producing constructive interference at the focal point. For this purpose, the required phase distribution across the metalens surface was calculated using the following expression:

$$\varphi(x,y)=\frac{2\pi}{\lambda_d}\left(F-\sqrt{x^2+y^2+F^2}\right) \quad (1)$$

Here, λ_d represents the operating wavelength, (F) denotes the focal length, and (x) and (y) correspond to the cell coordinates on the metalens surface. The calculated phase profile was wrapped into the 0-2π range to obtain the target phase map. Subsequently, using the discrete phase library obtained from the RCWA analyses, the nanopillar geometry providing the closest phase response to the target phase value was assigned to each unit-cell position. In this manner, the required wavefront modulation was achieved to focus the incident plane wave at the designed focal distance.

Subsequently, using the discrete phase library, nanopillar geometries corresponding to the closest phase values of the target phase profile were assigned to each cell location. As a result, a full square-shaped Ge-metalens with a side length of 31.5 μm and a focal length of 100 μm was constructed. The designed structure was subsequently analyzed using the FDTD method to investigate the focal spot intensity and focusing efficiency at an operating wavelength of 850 nm.

RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 2(a) presents the calculated target phase profile of the proposed metalens structure. The phase distribution varies continuously across the metalens aperture in order to emulate a spherical wavefront. Due to the phase wrapping within the 0-2π range, abrupt phase discontinuities can be observed at specific positions. This phase distribution defines the target wavefront required to focus the incident plane wave at the designed focal distance through constructive interference.

The phase and transmission responses corresponding to the selected Ge-nanopillar radii are presented in Fig. 2(b). It can be observed that the phase response varies monotonically with increasing nanopillar radius and that an approximate 0-2π phase coverage is achieved within the selected radius range. This behavior enables the use of different radius values as discrete phase levels in the metalens design. However, a noticeable decrease in transmission values was observed with increasing radius. In particular, the transmission performance deteriorates at larger radius values due to the absorption losses and resonant behavior of the Ge material. Therefore, an optimization trade-off between phase coverage and transmission performance arises in the metalens design process.

In this study, nine different nanopillar radii within the range of 130–170 nm were employed in order to maintain phase continuity as effectively as possible. Each radius value was assigned to the metalens surface according to its corresponding phase response, thereby

enabling an approximate realization of the target phase profile using discrete meta-atoms.

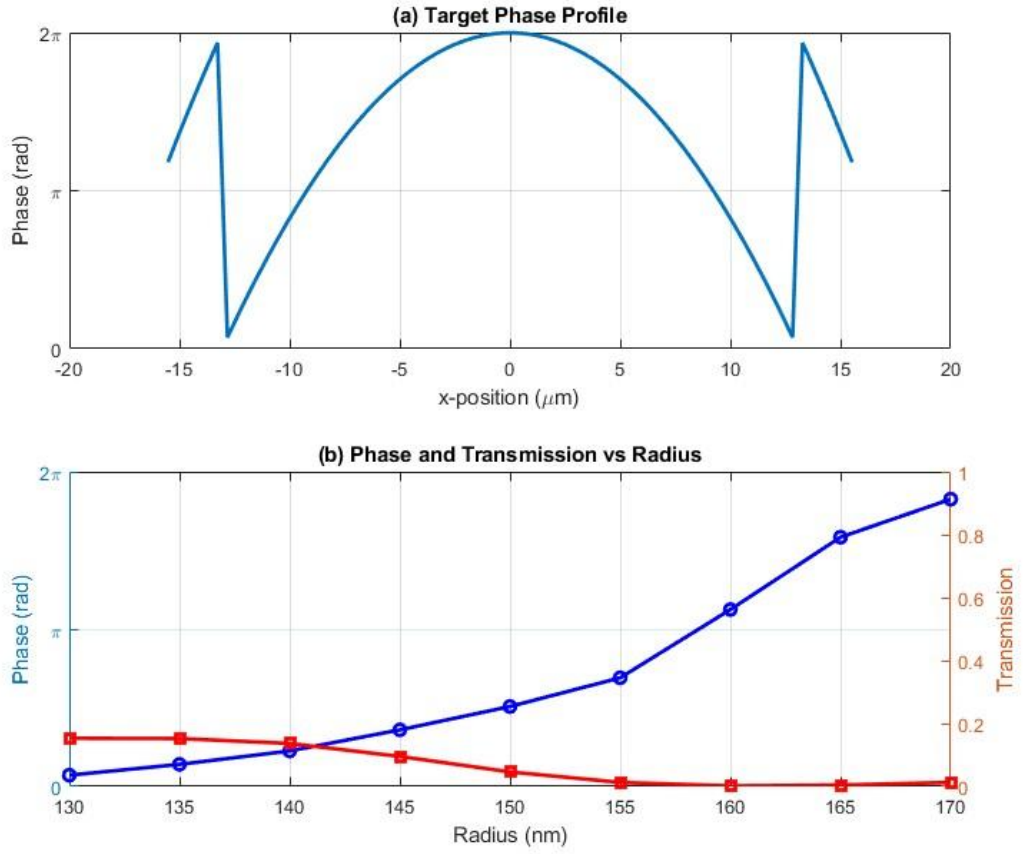


FIGURE 2. (a) Calculated target phase profile of the proposed Ge-metalens at 850 nm wavelength. (b) Phase and transmission responses of the selected Ge-nanopillars used for constructing the discrete phase library.

The designed full Ge-metalens was arranged according to the target phase profile, as illustrated in Fig. 3(a), and its focusing performance was analyzed using the Finite Difference Time Domain (FDTD) method. The far-field electric field distributions were investigated in the x-z and x-y planes by applying a far-field transformation. The ($|E|^2$) distribution in the x-z plane presented in Fig. 3(b) demonstrates that the metalens structure is capable of focusing the incident plane wave within the approximate region of (z = 90-100 μm). The obtained focal position is generally consistent with the designed focal length of 100 μm. However, side-lobe formations and a certain level of field scattering were observed around the focal region.

The x-y electric field intensity distributions at the planes of (z = 100 μm) and (z = 90 μm) are presented in Fig. 3(c) and Fig. 3(d), respectively. In both planes, a concentrated focal spot was observed near the center of the structure. Nevertheless, ring-like interference patterns and side lobes appeared around the focal spot. This behavior originates from the inability to achieve ideal phase continuity throughout the metalens structure. Since only nine discrete phase levels were employed in this study, the continuous representation of the target phase profile was limited, resulting in phase discretization errors.

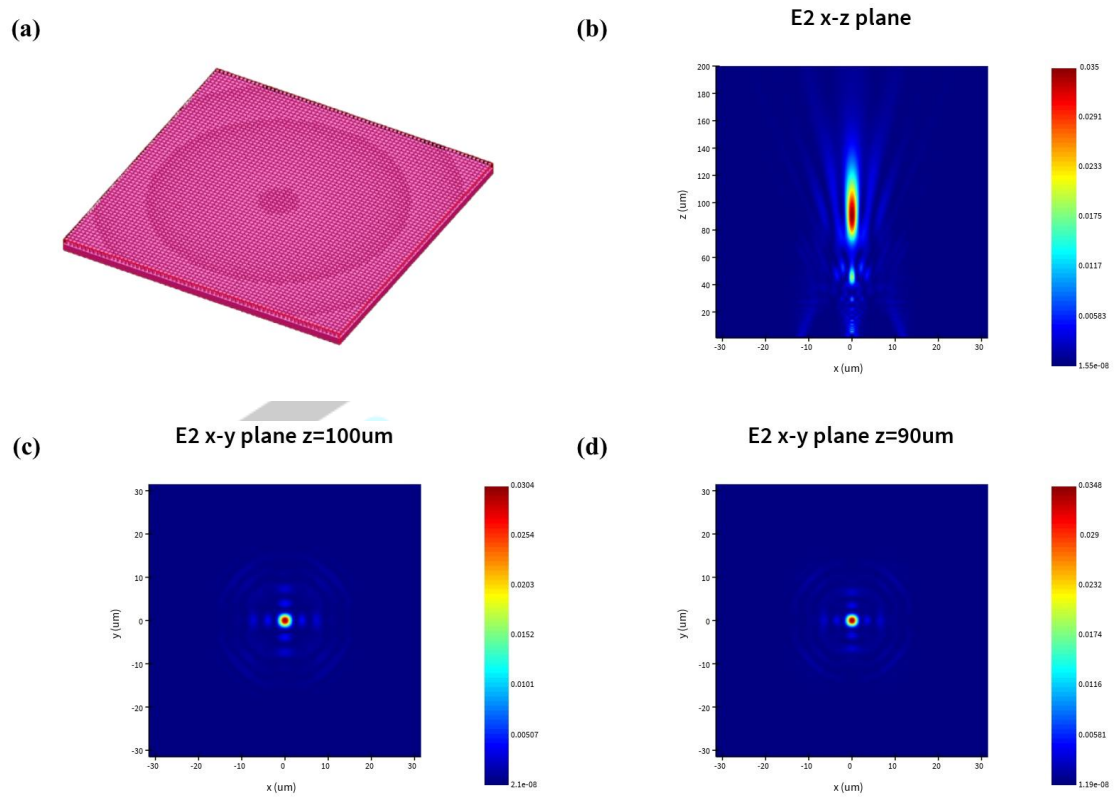


FIGURE 3. (a) Full square-shaped Ge-metalens structure designed using the discrete phase library at 850 nm wavelength. (b) Far-field $(|E|^2)$ *intensity distribution in the x-z plane obtained from the FDTD analysis, demonstrating the focusing behavior of the proposed metalens. (c) Normalized electric field intensity distribution in the x-y plane at (z = 100μm). (d) Normalized electric field intensity distribution in the x-y plane at (z = 90μm).*

In addition, the absorption losses of the Ge material in the 850 nm near-infrared region, near-field coupling effects between adjacent nanopillar structures, and low transmission values observed for certain geometries were identified as the primary factors limiting the focusing performance. In particular, the close placement of high-refractive-index Ge-nanopillars increased the electromagnetic interactions between neighboring meta-atoms, resulting in deviations from the ideal independent unit-cell approximation. Consequently, additional interference patterns and irregularities in the energy distribution were observed around the focal region. Furthermore, the small radius increments and high aspect-ratio values may introduce additional fabrication challenges for Ge-nanopillar structures during the manufacturing process.

The focusing characteristics of the metalens structure were quantitatively evaluated using the electric field intensity distribution at the focal plane. According to the normalized intensity profile presented in Fig. 4, the maximum field intensity was obtained approximately at the position of (x, y) = (0.063μm, -0.063μm). This result indicates that the focal spot is formed very close to the optical axis. FWHM values calculated along the x- and y-directions were found to be 2.146 μm and 2.146 μm, respectively. The similar FWHM values indicate that the focal spot exhibits an approximately symmetric distribution.

The approximate focusing efficiency was calculated using the ratio of the optical power within the integration region defined around the focal spot to the total optical power. As a result of this analysis, the approximate focusing efficiency was obtained as 31.83%. However, the

side lobes and ring-like interference patterns observed around the focal spot indicate that the optical energy could not be perfectly concentrated within the focal region. The primary reasons for this behavior include phase discontinuities caused by discrete phase levels, absorption losses of the Ge material at 850 nm, low transmission values, and near-field coupling effects between adjacent nanopillars.

Moreover, the inability of the nine discrete phase levels used in this study to continuously represent the target phase profile resulted in phase discretization errors. In particular, the reduction in transmission performance at larger radius values negatively affected the energy distribution across the metalens aperture and increased the side-lobe levels. In addition, the high aspect-ratio values and small radius variations of the Ge-nanopillars were identified as important parameters that may introduce additional fabrication challenges during the manufacturing process.

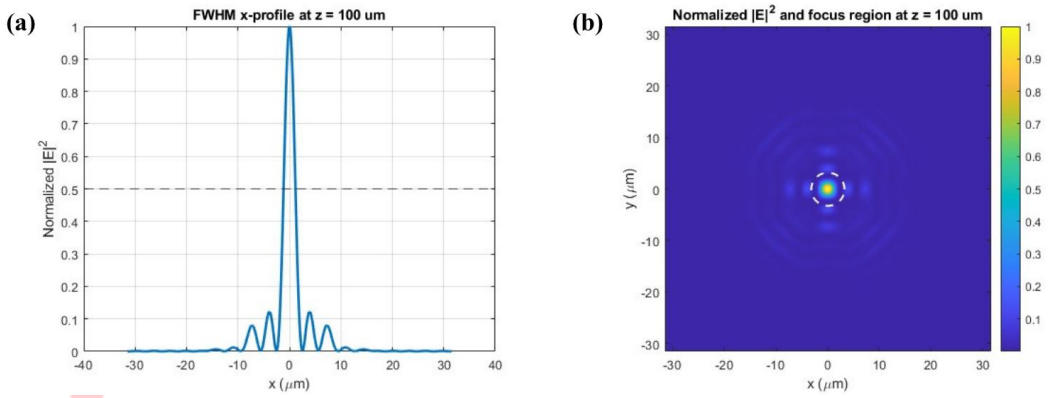


FIGURE 4. (a) Normalized ($|E|^2$) intensity profile along the x-direction at the focal plane of (z = 100μm), used for the extraction of the FWHM. (b) Normalized electric field intensity distribution and focus integration region at the focal plane, illustrating the focal spot characteristics and approximate focusing efficiency of the proposed Ge-metalens.

Nevertheless, the obtained results demonstrate that a fully Ge-based metalens operating at the 850 nm wavelength can successfully achieve the fundamental focusing behavior. The designed structure produced a distinct focal spot in a region close to the target focal length, thereby demonstrating the feasibility of Ge-based metasurface structures for near-infrared applications. In future studies, improving the focusing efficiency by employing higher phase resolution, optimized nanopillar geometries, different period values, and lower-loss material models will be targeted.

CONCLUSION

In this study, a fully Ge-based metalens operating at the wavelength of 850 nm was designed and numerically analyzed. Unit-cell optimization was carried out using the RCWA method, and a discrete phase library was constructed using the obtained phase and transmission data. Subsequently, the complete metalens arrangement was generated based on this phase library, and the structure was investigated using the FDTD method.

The simulation results demonstrated that the designed metalens structure was capable of successfully focusing the incident wave within a region close to the target focal distance. The calculated focusing efficiency of 31.83% reflects the inherent challenges at the 850 nm wavelength, while the FWHM at the focal plane was approximately 2.146 μm. However, side

lobes, interference patterns, and energy scattering were observed around the focal region. The primary reasons for these effects include the absorption losses of the Ge material in the 850 nm near-infrared region, low transmission values, phase discontinuities caused by discrete phase levels, and near-field coupling effects between adjacent nanopillars.

The obtained results indicate that Ge-based metasurface structures possess promising potential for near-infrared applications. The demonstration of a distinct focal spot validates the feasibility of fully Ge-based metalenses in this spectrum, even under significant optimization challenges. In future studies, the performance of the metalens is expected to be improved by employing phase libraries with higher phase resolution, optimized nanopillar geometries, different period values, and lower-loss material models.

Acknowledgement

This study was supported by Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under the Grant Number 121E518. The authors thank to TUBITAK for their supports. The authors would like to thank Erdem Aslan, Erciyes University, for providing access to the Ansys Lumerical simulation software license used in this study.

REFERENCES

Koshelev, K., & Kivshar, Y. (2021). Dielectric resonant metaphotonics. *ACS Photonics, 8*(1), 102–112.

Aslan, E. (2021). Germanium hollow nanodisk resonator for magnetic dipole decay rate enhancement in near-infrared. *Microwave and Optical Technology Letters, 63*(1), 279–285.

Marris-Morini, D. (2018). Germanium-based integrated photonics from near- to mid-infrared applications. *Nanophotonics, 7*(11), 1781–1793.

Wang, A., Chen, Z., & Dan, Y. (2019). Planar metalenses in the mid-infrared. *AIP Advances, 9*(8), 085327.

Song, N., Xu, N., Shan, D., Zhao, Y., Gao, J., Tang, Y., Sun, Q., Chen, X., Wang, Y., & Feng, X. (2021). Broadband achromatic metasurfaces for longwave infrared applications. *Nanomaterials, 11*(10), 2760.

Aslan, E., & Aslan, E. (2026). Efficient focusing with a germanium-based metalens at fiber-optic telecom wavelength. *IEEE Access, 14*, 60402–60409.

Ali, F., Yazdaanpanah, R., & Aksu, S. (2024). Tackling the focal shift effect for metalenses. *Journal of Optics, 26*(7), 075103.

6thInternational
Congress of Engineering and
Natural Sciences

Otomotiv Koltuk Kılıflarında Gizli Bağlantı Yöntemi

Mehmet ÖZKAN[1]

Abstract

In the automotive industry, interior comfort, safety, and aesthetics are highly dependent on the design of seat systems. Seat covers, as a critical component of these systems, serve not only as an aesthetic layer but also play an important role in maintaining seat ergonomics, ensuring durability over long-term use, and supporting passenger safety. The proper and stable attachment of the seat cover to the seat structure directly affects product performance by preventing loosening, wrinkling, and deformation over time. In this context, “tiedown” and “hidden tiedown” fastening solutions are fundamental technical approaches used to secure seat covers to the seat frame and foam structure. Traditional tiedown methods involve visible fastening elements such as wires, clips, or plastic retainers, offering advantages in terms of manufacturing simplicity and cost-effectiveness. However, increasing demand for improved aesthetics, surface quality, and advanced production technologies have led to the development of hidden fastening solutions. Hidden tiedown systems conceal the attachment elements beneath the surface, providing a cleaner appearance while ensuring a more uniform fit of the seat cover. This study examines the importance of seat cover systems in automotive interior design and compares tiedown and hidden tiedown solutions. Furthermore, the material properties of components such as wires, plastic clips, textile reinforcements, and fastening elements are evaluated in terms of manufacturing, durability, and design advantages. The aim is to contribute to the development of more efficient, aesthetic, and durable seat cover attachment solutions in automotive applications.

Keywords: Seat trim cover, fastening systems, hidden tiedown, tiedown, automotive interior design

[1] Mühendislik Uzmanı, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası AŞ, Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0000-0347-7400

GİRİŞ

Otomotiv endüstrisi, kullanıcı beklentilerinin hızla değiştiği ve teknolojik gelişmelerin sürekli olarak tasarım süreçlerine entegre edildiği dinamik bir sektördür. Araç iç mekân tasarımında konfor, güvenlik ve estetik gibi faktörler kullanıcı deneyimini doğrudan etkileyen temel unsurlar arasında yer almaktadır. Bu bağlamda araç koltukları, sürücü ve yolcuların araçla en yoğun temas kurduğu bileşenler arasında yer almakta ve iç mekân ergonomisinin en önemli parçalarından biri olarak kabul edilmektedir (Fischer, 2015).

Günümüzde araç koltuklarının performansı yalnızca taşıyıcı iskelet yapısı ve sünger geometrisi ile belirlenmemekte, aynı zamanda koltuk yüzeyini oluşturan kaplama sisteminin tasarımı ve montaj yöntemi ile de yakından ilişkilidir. Koltuk kılıfı, koltuğun ergonomik formunun korunması, yüzey dayanımının artırılması ve estetik görünümün sağlanması açısından kritik bir rol oynamaktadır (Park & Kim, 2017).

Koltuk kılıfının, koltuk yapısıyla uyumlu bir şekilde sabitlenmesi; yüzey geometrisinin korunması, kırışıklıkların engellenmesi ve uzun süreli kullanım sürecinde oluşabilecek deformasyonların azaltılması açısından kritik bir tasarım unsurudur. Bu doğrultuda, otomotiv koltuk üretiminde farklı koltuk kılıfı bağlantı teknolojileri geliştirilmiştir. Bu teknolojiler arasında tiedown ve gizli tiedown sistemleri, en yaygın tercih edilen sabitleme yöntemleri arasında bulunmaktadır.

Bu çalışmada koltuk kılıf bağlantı sistemleri, gizli bağlantı yöntemi, çalışma prensipleri ve performansı etkileyen temel faktörler incelenmiştir.

KAPSAM VE ARAŞTIRMA METODU

Bu çalışmanın amacı araç koltuk kılıf sistemlerinin otomotiv iç mekân tasarımındaki rolünü incelemek ve koltuk kılıfının koltuk yapısına bağlanmasında kullanılan tiedown ve hidden tiedown bağlantı yöntemlerini teknik açıdan değerlendirmektir.

Araştırmada nitel araştırma yöntemi benimsenmiş olup literatür incelemesi temel araştırma yöntemi olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda otomotiv koltuk sistemleri, koltuk kılıfı üretim teknolojileri ve bağlantı sistemleri üzerine yayımlanmış akademik çalışmalar, teknik raporlar ve sektör dokümanları irdelenmiştir.

Araştırmanın ikinci aşamasında tiedown ve hidden tiedown sistemlerinde kullanılan bağlantı elemanlarının yapısal özellikleri ve malzeme türleri analiz edilmiştir. Bu kapsamda metal tel elemanlar, plastik klipsler ve tekstil takviye bileşenlerinin yapısal karakteristik özellikleri, montaj metadolojisi ve üretim verimliliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Araştırmanın Teorik Çerçevesi

Araç koltukları otomobil endüstrisinde güvenlik, konfor ve estetik açılardan önemli bir rol oynar. Güvenlik, kritik bir faktör olup, koltukların sağlam bir yapıya sahip olması ve çarpışma durumlarında yolcuları koruyacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Aynı zamanda, konfor da sürücü ve yolcuların uzun süreli kullanımlarda rahat bir deneyim yaşamalarını sağlamak adına dikkate alınmalıdır. Ergonomik destek, uygun dolgunluk ve kumaş seçimi gibi faktörler konforun temel unsurları arasında yer alırken, estetik ise aracın iç mekân tasarımında önemli bir görsel unsurdur.

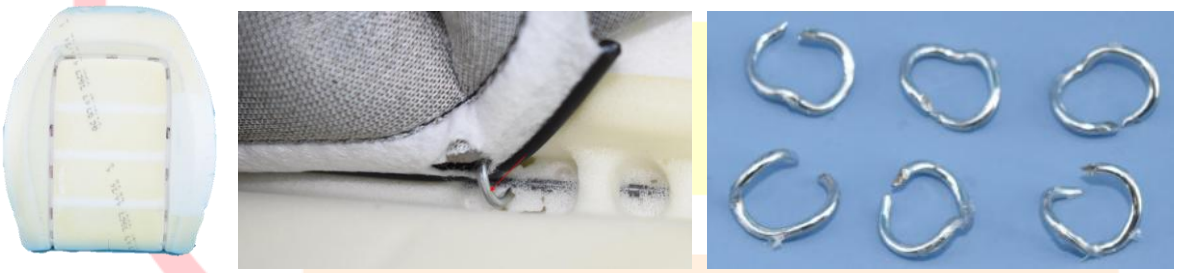
Koltuk kılıfları, ergonomik konfor ve iç mekân estetiği açısından kullanıcı deneyimi üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Uygun materyal ve tasarım seçimi, kullanıcıya yüksek dokunsal (taktil) konfor ve biyomekanik destek sağlarken; iç mekânın kişiselleştirilmesi yoluyla görsel algıyı güçlendirerek araca özgün bir estetik değer katmaktadır. Ayrıca bu bileşenler, primer koltuk yüzeylerinin fiziksel aşınma ve çevresel faktörlere karşı korunmasını sağlayarak, sürdürülebilir bakım ve temizlik süreçlerinde operasyonel avantajlar sunmaktadır

Koltuk kılıflarının tasarımı ve üretim süreci özenli bir şekilde planlanmalıdır. Kaliteli malzemelerin kullanılması ve dikişlerin sağlam bir şekilde yapılması, kılıfların dayanıklılığını artırır ve uzun ömürlü olmalarını sağlar. Üretim sürecinde, ölçümler hassas bir şekilde alınmalı ve kesim işlemleri titizlikle gerçekleştirilmelidir. Son olarak, koltuk kılıflarının koltuğa giydirilme süreci de önemlidir. Doğru şekilde yapılan montaj, kılıfların düzgün ve gergin bir şekilde oturmasını sağlar, böylece kullanım esnasında kayma veya kırışıklık gibi problemlerin önüne geçer.

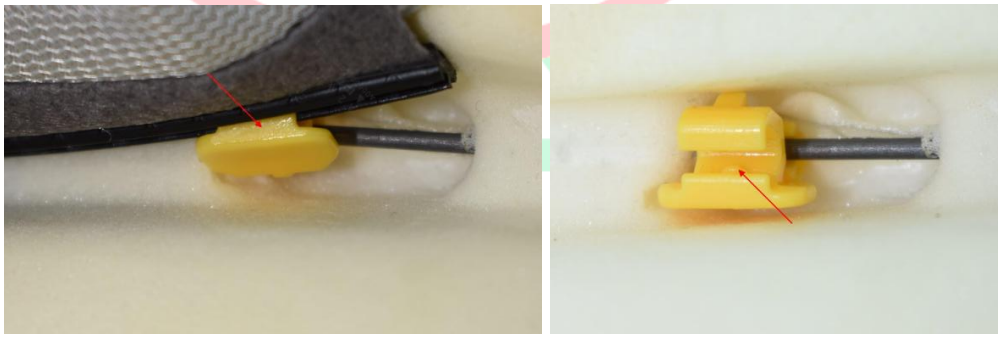
Özet olarak otomotiv koltuk ve döşeme sistemlerinde güvenlik, konfor ve estetik disiplinlerinin senkronizasyonu stratejik bir zorunluluktur. Bu doğrultuda, kılıf sabitleme teknolojileri, sistemin operasyonel dayanıklılığını ve kullanıcı deneyimini belirleyen temel birer mühendislik unsuru olarak değerlendirilmelidir.

Geleneksel Tiedown Sistemleri

Geleneksel tiedown sistemleri otomotiv koltuk üretiminde uzun yıllardır kullanılan temel bağlantı yöntemlerinden biridir. Bu sistemlerde koltuk kılıfı genellikle sünger yapısı içerisine yerleştirilen metal tel elemanlar ve hog ring bağlantıları aracılığıyla sabitlenmektedir.



Şekil 1- *Koltuk süngeri ve kılıf tiedown hog ring bağlantısı*



Şekil 2- *Koltuk süngeri ve kılıf tiedown clips bağlantısı*

Geleneksel tiedown bağlantı yöntemin başlıca avantajları şunlardır:

Düşük üretim maliyeti

Yüksek mekanik dayanım

Montaj sürecinde güvenilir bağlantı sağlaması

Ancak bu sistemlerin dezavantajları arasında bağlantı elemanlarının bazı durumlarda koltuk yüzeyinde iz oluşturabilmesi ve estetik açıdan sınırlı tasarım esnekliği sunması yer almaktadır.

Gizli Tiedown (Hidden Tiedown) Sistemleri

Gizli (Hidden) tiedown sistemleri, bağlantı elemanlarının koltuk yüzeyinde görünürlüğünü azaltmayı amaçlayan daha gelişmiş bağlantı çözümleridir. Bu sistemlerde bağlantı elemanları genellikle koltuk süngerinin iç kısmında veya özel tasarlanmış bağlantı kanalları içerisinde konumlandırılmaktadır. Koltuk yüzeyinden dışarıdan görünmeyen, gizli bağlantı elemanlarının genel adıdır.

Gizli tiedown sistemlerinin avantajları şunlardır:

Daha yüksek yüzey estetiği

Daha homojen koltuk yüzey formu

Premium iç mekân tasarımına katkı

Ancak bu avantajların yanında bu sistemlerin üretim sürecinde daha karmaşık montaj yöntemleri gerektirmesi ve bazı durumlarda üretim maliyetini arttırması dezavantaj olarak değerlendirilmektedir.

Temel Görev

Koltuk kılıfını yerinde tutmak

Sünger ve kılıf arasında güçlü bağlantı sağlamak

Estetik görünümü bozmadan bağlantıyı desteklemek

Montaj sırasında kolaylık ve hizalama kolaylığı sunmak

Üretim Avantajları

Pekçok geleneksel trim baplantılarının elimine edilmesi

Üretim sürecini basitleştirme potansiyeli (örneğin Magna FreeForm gibi sistemlerde)

Daha hızlı koltuk kılıf giydirme montajı

Dikiş, klips, metal tel gibi dış bağlantıların azaltılmasıyla montaj hatalarının düşmesi

Montaj sonrası yüzeyde “görünmez” yani estetik etki azaltımı

Kullanım Alanları ve Tipleri

Gizli tiedown uygulamaları genellikle şu alanlarda kullanılır:

Koltuk merkez kumaş bütünlüğünün sağlanması

Koltuk arka yüzey hatlarını tutturma

Köşe ve kıvrımlı (Radius) bölgelerde koltuk kılıfını forma uygun şekilde sabitleme

Sünger ile kılıf arasındaki gerginliği dağıtma

Başlıca tipleri:

Fleece profile tie-downs: Kumaş benzeri flanşlara sahip, kanal içine takılarak tutunma sağlayan yapılar

Wire tie-downs: İçi tel ile güçlendirilmiş tutucular

Floating bead tie-downs: Kanal içinde hareket edebilen, daha esnek bağlamalar

Şekil 3- *Geleneksel tiedown görseli*

1.1.1.1. Malzeme Yapıları

Geleneksel tiedown ve gizli tiedown sistemlerinde kullanılan temel malzemeler şunlardır:

- Çelik tel elemanlar (listing wire)
- Plastik klips ve sabitleyiciler
- Tekstil takviye şeritleri
- Elastomer bağlantı elemanları

Bu malzemelerin seçiminde mekanik dayanım, esneklik, üretim uygunluğu ve uzun süreli kullanım performansı önemli kriterler olarak değerlendirilmektedir.

Şekil 4- *Gizli Tiedown uygulaması ile üretilen koltuk görseli*

SONUÇ

Sonuç olarak, araç koltuk kılıf sistemleri otomotiv iç mekân tasarımında hem işlevsel hem de estetik açıdan önemli bir yere sahiptir. Koltuk kılıfının koltuk yapısına uygun ve doğru şekilde sabitlenmesi; yüzey formunun korunması, kullanım sırasında meydana gelebilecek deformasyonların azaltılması ve uzun süreli performansın sağlanması açısından tiedown seçimini kritik bir tasarım kriteri hâline getirmektedir.

Geleneksel tiedown sistemleri üretim kolaylığı ve düşük maliyet avantajları nedeniyle otomotiv koltuk üretiminde yaygın olarak kullanılmaya devam ettiği görülmektedir. Bununla birlikte günümüzde artan estetik beklentiler ve iç mekân kalite standartlarının yükselmesi, geleneksel tiedown yerine gizli tiedown gibi daha gelişmiş bağlantı çözümlerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Gizli tiedown bağlantısının özellikle koltuk kılıflarında merkez kumaş desen bütünlüğünün yakalanmasına hizmet ettiği görülmekle beraber, tasarım ekiplerinin estetik beklentileri doğrultusunda kullanımı öne çıkmaktadır.

Gelecekte artan tasarım ve kalite beklentileriyle birlikte, araç koltuk kılıf sistemlerinde daha hafif, dayanıklı ve estetik bağlantı çözümlerinin geliştirilmesinde yeni malzeme teknolojileri ve yenilikçi üretim yöntemlerinin önemli rol oynayacağı öngörülmektedir. Bu kapsamda gizli bağlantı çözümlerinin de gelişimini sürdürerek otomotiv koltuk tasarımında daha yaygın şekilde kullanılacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

Bae, J., Lee, S., & Kim, H. (2018). Automotive seat design and manufacturing technology. *International Journal of Automotive Technology*.

Coba Plastics. (2026). *Automotive tie down products*. Erişim tarihi: 24 Nisan 2026.

Fischer, K. (2015). *Automotive seating: Design, materials and manufacturing*. SAE International.

Magna International. (2019). *Magna introduces FreeForm seat trim technology*. Erişim tarihi: 30 Nisan 2026.

Park, S., & Kim, Y. (2017). Evaluation of seat cover attachment methods in automotive seat systems. *Journal of Mechanical Design and Engineering*.

Automotive tie down range and types. (t.y.).

YKK Americas. (2026). *Seat fasteners*. Erişim tarihi: 22 Nisan 2026.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Muğla/Fethiye Koşullarında PV Destekli Sera Isıtması İçin Saatlik Isıtma Talebi ve Fotovoltaik Üretim Eşleşmesinin Değerlendirilmesi

Dilşah ONUŞ[1]
Volkan Ramazan AKKAYA[2]

Abstract

This study evaluates the feasibility of photovoltaic (PV)-assisted greenhouse heating under Muğla/Fethiye climatic conditions by focusing on the hourly matching between heating demand and PV electricity generation rather than relying solely on annual energy balances. In Mediterranean greenhouse production, high daytime solar irradiation coincides with a critical heating demand that mainly occurs during winter nights, creating a clear temporal asymmetry between energy generation and consumption. To quantify this mismatch, a zero-dimensional thermal energy balance model with hourly resolution was developed for a representative tomato greenhouse with a floor area of 1000 m². The calculated hourly heating load was then matched with a grid-interactive, battery-free PV system under electric resistance heating and air-source heat pump scenarios.

The simulation results show that the annual net heating demand of the reference greenhouse is 289,775 kWh, corresponding to 289.8 kWh/m²-year, with a peak heating load of 223.0 kW. Although the integrated 50 kWp PV system generates 79,017 kWh of electricity annually, only 3,627 kWh/year of the 98,594 kWh/year electrical heating demand in the PV-assisted heat pump scenario can be directly met by PV generation within the same hourly intervals. Accordingly, the PV self-consumption ratio remains at 4.6%, while the hourly PV coverage of the electrical heating demand is only 3.7%. The findings quantify the expected temporal mismatch between PV generation and greenhouse heating demand for the specific Muğla/Fethiye case and indicate that hourly matching indicators should be used as key decision metrics in preliminary feasibility assessments of battery-free PV-assisted greenhouse heating systems.

Keywords: PV-assisted greenhouse heating, hourly energy matching, heat pump, greenhouse energy balance, Muğla.

[1] Master's student, Mugla Sitki Kocman University, Institute of Science, Energy Systems Engineering, Orcıd: 0009-0005-6485-9652
[2] Assistant Professor, Mugla Sitki Kocman University,, Institute of Science, Energy Systems Engineering, Orcıd: 0000-0002-5052-8554

1. GİRİŞ

Örtü altı yetiştiricilik, dış iklim koşullarının üretim üzerindeki sınırlayıcı etkisini azaltarak yıl boyunca daha kontrollü ve daha yüksek katma değerli üretim yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte sera içinde sıcaklık, nem ve havalandırma gibi değişkenlerin ürün gelişimi açısından uygun aralıklarda tutulabilmesi önemli bir enerji girdisi gerektirir. Özellikle kış aylarında ve gece saatlerinde dış ortam sıcaklığının düşmesi, seralarda ısıtma talebini artırmakta ve enerji maliyetini işletme ekonomisinin belirleyici unsurlarından biri haline getirmektedir (Kendirli ve Çakmak, 2010; 98; Canakci vd., 2013;485; Ahamed vd., 2018:12).

Akdeniz iklim kuşağındaki seralar, soğuk iklim bölgelerindeki seralara kıyasla daha elverişli dış koşullara sahip olsa da bu durum ısıtma gereksiniminin ortadan kalktığı anlamına gelmemektedir. Kış gecelerinde sera iç sıcaklığının ürün gelişimi için gerekli eşiklerin altına düşmesi, üreticileri ısıtma yapmaya zorlamaktadır. Bu bağlamda Muğla/Fethiye gibi güneş enerjisi potansiyeli yüksek ve örtü altı üretimin yaygın olduğu bölgeler, PV destekli sera ısıtması açısından önemli bir uygulama alanı sunmaktadır.

PV sistemlerinin sera ısıtmasına katkısı çoğu zaman yıllık enerji üretimi ve yıllık enerji tüketimi arasındaki fark üzerinden değerlendirilmektedir. Ancak PV üretimi doğal olarak gündüz saatlerinde ortaya çıkarken, sera ısıtma yükü çoğunlukla kış ve gece saatlerinde yoğunlaşmaktadır. Bu nedenle yıllık toplam enerji dengesi, bataryasız sistemlerde gerçek işletme davranışını açıklamakta yetersiz kalabilir. Türkiye'de tarımsal sera için ısı pompası entegreli PV-rüzgar sistemlerini saatlik düzeyde inceleyen Özcan vd. (2024) de yük ve üretim profillerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Literatürde PV üretimi ile ısıtma talebi arasındaki zamansal uyumsuzluk bilinen bir olgudur; bu çalışmanın katkısı, söz konusu uyumsuzluğun Muğla/Fethiye koşullarındaki nicel büyüklüğünü temsilî bir sera modeli üzerinden saatlik çözünürlükte ortaya koymaktır.

Bu amaçla çalışmada, 1000 m² taban alanına sahip temsilî bir domates serası için saatlik ısıtma yükü hesaplanmış; 50 kWp kapasiteli PV sistemin üretimi aynı zaman ekseninde modellenmiş ve bataryasız, şebeke etkileşimli bir sistem sınırı içinde elektrikli dirençli ısıtma ile hava kaynaklı ısı pompası senaryoları karşılaştırılmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı ve Referans Sera

Çalışma alanı olarak Muğla ilinin Fethiye koşullarını temsil eden bir nokta esas alınmıştır. Bölge, hem örtü altı üretim faaliyetlerinin yoğunluğu hem de güneş enerjisi potansiyeli nedeniyle PV destekli sera ısıtması açısından uygun bir ön fizibilite örneği sunmaktadır. Meteorolojik veri seti, Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi tarafından sunulan PVGIS veri tabanından elde edilen saatlik tipik meteorolojik yıl verileri kullanılarak oluşturulmuştur (Joint Research Centre, 2026). Dış hava sıcaklığı ve güneş ışınımı verileri, sera ısıtma yükü ve PV üretim hesabı için ortak zaman eksenine oturtulmuştur.

Referans sera modeli 1000 m² taban alanına sahip temsilî bir domates serası olarak tanımlanmıştır. Modelde sera taban alanı, örtü alanı, iç hacim, örtü ısı geçirme katsayısı, ışınım geçirgenliği, hava değişim sayısı ve gece/gündüz sıcaklık set değerleri sabit kabul edilmiştir.

Bu yaklaşım, ayrıntılı mikroiklim çözümü yerine enerji eşleşmesini görünür kılan, izlenebilir ve hızlı çalışan bir ön değerlendirme modeli oluşturmayı amaçlamaktadır.

2.2. Sera Isıtma Yükü Modeli

Seranın saatlik ısıtma talebi, sıfır boyutlu bir enerji dengesi yaklaşımıyla hesaplanmıştır. Model, sera içindeki yatay veya düşey sıcaklık farklılıklarını ayrıntılı biçimde çözmemekte; belirlenen iç ortam sıcaklığını korumak için gerekli net ısıtma enerjisine odaklanmaktadır. Saatlik net ısıtma yükü aşağıdaki genel bağıntıyla ifade edilmiştir:

$$Q_{ısıtma,t} = maks(0, Q_{örtü,t} + Q_{hava,t} - Q_{güneş,t})$$

Burada net ısıtma yükü, örtü kaynaklı ısı kaybı, hava değişimi/infiltrasyon kaynaklı duyulur ısı kaybı ve faydalı güneş kazancının saatlik dengesiyle hesaplanmıştır. Örtü kaybı, örtü ısı geçirme katsayısı, dış ortamla temas eden örtü alanı ve iç-dış sıcaklık farkı üzerinden şu şekilde ifade edilmiştir:

$$Q_{örtü,t} = U \cdot A_{örtü} \cdot maks(0, T_{iç,t} - T_{dış,t})$$

Hava değişimi/infiltrasyon yükü ise saatlik hava değişim sayısına bağlı duyulur ısı kaybı olarak modele dahil edilmiştir:

$$Q_{hava,t} = \rho_{hava} \cdot V \cdot (ACH/3600) \cdot c_p \cdot maks(0, T_{iç,t} - T_{dış,t})$$

Güneş kazancı, saatlik ışınım verisi ve sera taban alanı üzerinden basitleştirilmiş faydalı kazanç katsayısı ile temsil edilmiştir:

$$Q_{güneş,t} = G_t \cdot A_{taban} \cdot \tau_{güneş} \cdot \eta_s \cdot SF$$

Modelde latent ısı, ürün transpirasyonu ve ayrıntılı nem dengesi ana hesaplamaya dahil edilmemiştir. Bu sınırlandırma, çalışmanın bataryasız PV destekli ısıtma sistemlerinde saatlik enerji eşleşmesini değerlendirme amacına uygun olarak yapılmıştır.

2.3. PV Üretim ve Elektrikli Isıtma Senaryoları

PV elektrik üretimi, saatlik iklim verileri kullanılarak NREL PySAM/PVWatts altyapısı ile hesaplanmıştır (Dobos, 2014; National Renewable Energy Laboratory, 2026). Referans PV sistemi 50 kWp kurulu güce sahip, güney yönelimli ve sabit eğimli bir sistem olarak modellenmiştir. PV sistemi serayı doğrudan ısıtan bir termal sistem olarak değil, elektrikli ısıtma teknolojilerini besleyen bir güç kaynağı olarak ele alınmıştır.

İki elektrikli ısıtma senaryosu değerlendirilmiştir. İlk senaryoda elektrikli dirençli ısıtma kullanılmış ve elektriksel ısıtma talebi yaklaşık olarak termal yükle eşit kabul edilmiştir. İkinci senaryoda hava kaynaklı ısı pompası kullanılmış ve termal yük, COP katsayısı üzerinden elektrik talebine dönüştürülmüştür.

Bu çalışmada sistem bataryasız ve şebeke etkileşimli olarak kurgulanmıştır. Dolayısıyla PV üretiminin aynı saatteki ısıtma elektrik talebini karşılayan kısmı öz tüketim, talebi aşan kısmı fazla üretim, eksik kalan kısım ise şebekeden alınan elektrik olarak tanımlanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

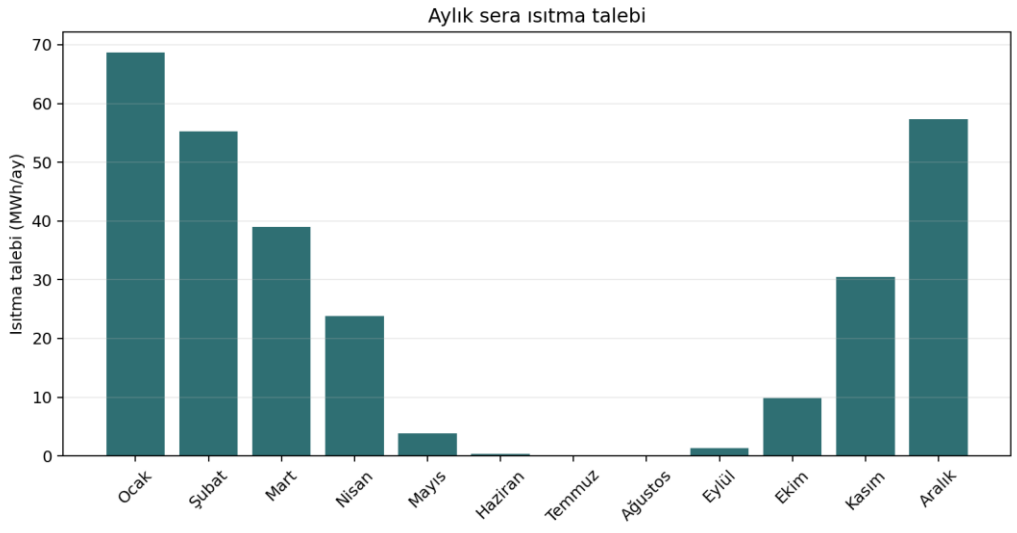
3.1. Referans Sera Isıtma Yükü

Referans sera modeli için yıllık net ısıtma talebi 289.775 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu değer, 1000 m² taban alanı için 289,8 kWh/m²-yıl düzeyinde bir özgül ısıtma talebine karşılık gelmektedir. Pik ısıtma yükü 223,0 kW, alan başına pik yük ise 223,0 W/m² olarak bulunmuştur. Yıl içinde pozitif ısıtma yükü oluşan saat sayısı 3.770 saat/yıl, en yüksek günlük ısıtma talebi ise 3.179 kWh/gün olarak hesaplanmıştır. Bu temel göstergeler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1 - Referans sera ısıtma yükü temel göstergeleri

Gösterge	Değer
Yıllık toplam ısıtma talebi (kWh/yıl)	289.775
Alan başına yıllık ısıtma talebi (kWh/m²-yıl)	289,8
Pik ısıtma yükü (kW)	223,0
Alan başına pik yük (W/m²)	223,0
Isıtma yükü oluşan saat sayısı (saat/yıl)	3.770
En yüksek günlük ısıtma talebi (kWh/gün)	3.179

Isıtma yükünün bileşenleri incelendiğinde, yıllık örtü kaybı 358.498 kWh/yıl, infiltrasyon kaybı ise 52.790 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Böylece yıllık brüt kayıp 411.288 kWh/yıl seviyesine ulaşmıştır. Potansiyel faydalı güneş kazancı yıllık toplamda yüksek olmasına rağmen, ısıtma ihtiyacının bulunduğu saatlerle çakışan güneş kazancı 121.512 kWh/yıl düzeyinde kalmış ve brüt kaybın yaklaşık %29,5'ini dengelemiştir. Bu durum, bölgedeki yüksek güneş enerjisi potansiyelinin gece ve kış saatlerindeki ısıtma ihtiyacını otomatik olarak ortadan kaldırmadığını göstermektedir. Aylık ısıtma talebi dağılımı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1 - Aylık toplam ısıtma talebi dağılımı

3.2. PV Üretimi ve Saatlik Eşleşme

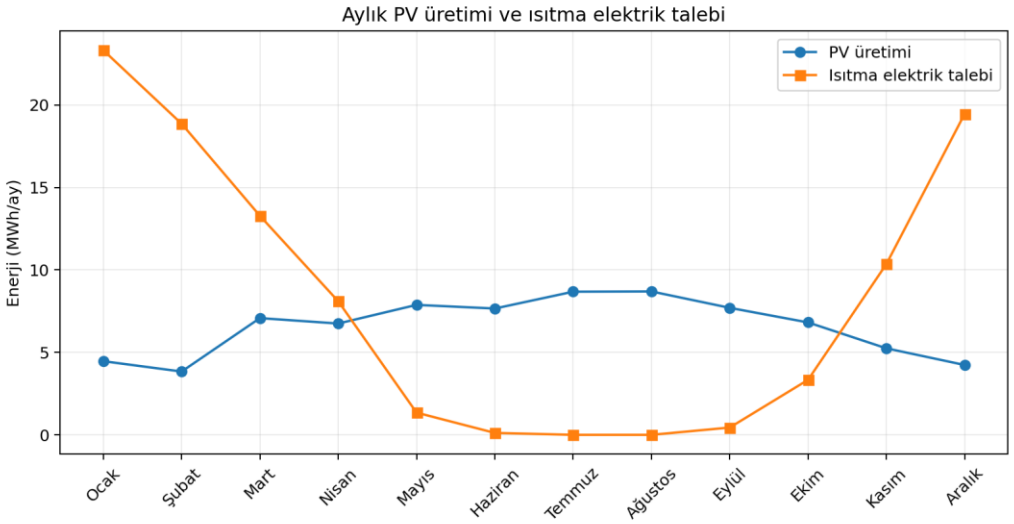
50 kWp kapasiteli referans PV sistemi yıllık 79.017 kWh elektrik üretmiştir. PV destekli ısı pompası senaryosunda yıllık elektrikli ısıtma talebi 98.594 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Yıllık toplamlar karşılaştırıldığında PV üretimi, ısı pompası elektrik talebine yakın görünmektedir. Ancak saatlik eşleşme hesabı, bu iki büyüklüğün aynı zamanlarda ortaya çıkmadığını göstermiştir.

PV + ısı pompası senaryosunda PV üretiminin yalnızca 3.627 kWh/yıl'lık kısmı aynı saatlerde ısıtma elektrik talebi tarafından doğrudan tüketilebilmiştir. Buna göre PV öz tüketim oranı %4,6, ısıtma elektrik talebinin saatlik PV ile karşılanma oranı ise %3,7 olarak hesaplanmıştır. Aynı senaryoda şebekeden alınan elektrik 94.967 kWh/yıl, şebekeye verilen fazla PV üretimi ise 75.391 kWh/yıl olmuştur. Bu göstergeler Tablo 2'de sunulmuştur.

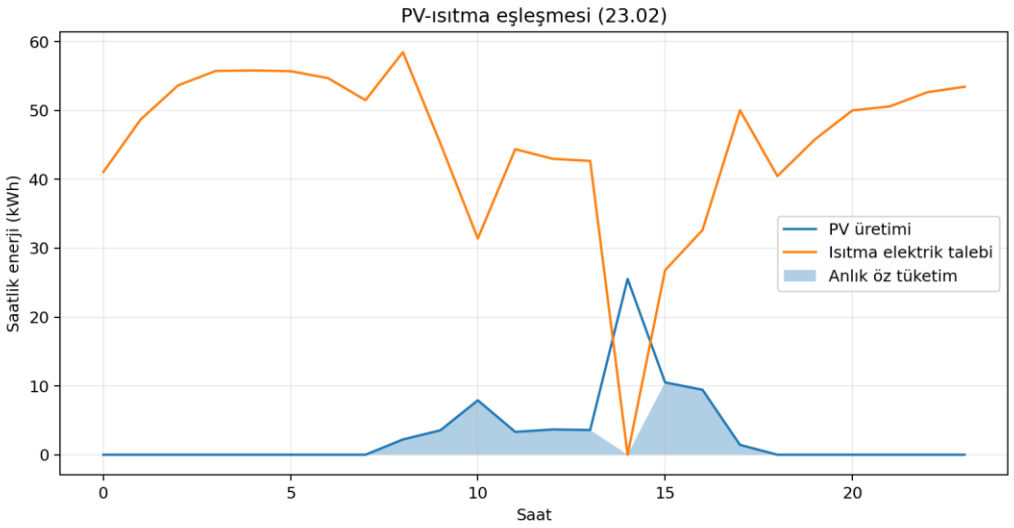
Tablo 2 - PV üretimi ve saatlik eşleşme göstergeleri

Gösterge	Değer
Kurulu PV kapasitesi (kWp)	50,0
Yıllık PV üretimi (kWh/yıl)	79.017
Isıtma sistemi elektrik talebi (kWh/yıl)	98.594
Anlık öz tüketim (kWh/yıl)	3.627
Öz tüketim oranı (%)	4,6
Şebekeden alınan elektrik (kWh/yıl)	94.967
Şebekeye verilen fazla üretim (kWh/yıl)	75.391
Saatlik yük-üretim eşleşme oranı (%)	3,7

Bu sonuç, yıllık PV üretimi ile yıllık elektrikli ısıtma talebinin birbirine yakın olmasının bataryasız sistemlerde yeterli bir fizibilite göstergesi olmadığını ortaya koymaktadır. PV üretimi esas olarak gündüz saatlerinde oluşmakta, buna karşılık ısıtma yükü özellikle gece ve sabah erken saatlerde yoğunlaşmaktadır. Bu nedenle PV kapasitesinin büyütülmesi, şebeke etkileşimi, depolama veya talep tarafı iyileştirmeleriyle birlikte ele alınmadığında sınırlı bir doğrudan ısıtma katkısı sağlayabilmektedir. Aylık toplam karşılaştırma Şekil 2'de, tipik kış günü saatlik eşleşmesi ise Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2 - Aylık PV üretimi ve ısıtma elektrik talebi karşılaştırması



Şekil 3 - Tipik kış gününde PV üretimi ve ısıtma elektrik talebinin saatlik eşleşmesi

3.3. Elektrikli Dirençli Isıtma ve Isı Pompası Senaryoları

Elektrikli dirençli ısıtma ve ısı pompası senaryoları, aynı PV üretim profili altında karşılaştırılmıştır. Elektrikli dirençli ısıtma senaryosunda ısıtma elektrik talebi 295.781 kWh/yıl seviyesine çıkmış, şebekeden alınan elektrik 291.463 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, bataryasız PV sisteminin elektrikli dirençli ısıtma gibi yüksek elektrik talebi oluşturan bir sistemle birlikte kullanıldığında sera ısıtmasını doğrudan karşılamakta yetersiz kaldığını göstermektedir.

Isı pompası senaryosunda ise aynı termal yük, COP etkisiyle 98.594 kWh/yıl düzeyinde elektrik talebine dönüşmüştür. Böylece şebekeden alınan elektrik 94.967 kWh/yıl seviyesine gerilemiştir. Ancak saatlik eşleşme oranının düşük kalması, ısı pompasının elektrik talebini azaltmasına rağmen PV üretiminin aynı saatlerde kullanılabilirliğini tek başına çözemediğini göstermektedir.

Yıllık teknik senaryo karşılaştırması Tablo 3'te sunulmuştur. Elektrikli dirençli ısıtma senaryosu yüksek elektrik talebi nedeniyle şebeke alış miktarını belirgin biçimde artırmaktadır. Isı pompası senaryosu ise aynı termal yükü daha düşük elektrik talebiyle karşılayabilmekte, ancak PV üretiminin saatlik kullanılabilirliğini tek başına çözememektedir. Bu nedenle bataryasız PV destekli sera ısıtmasında PV kapasitesi, ısı pompası performansı ve talep tarafı iyileştirmeleri birlikte değerlendirilmelidir.

Tablo 3 - Teknik senaryo karşılaştırması

Gösterge	**Fosil yakıt**	**PV + dirençli**	**PV + ısı pompası**
Isıtma yükü (kWh/yıl)	289.775	295.781	295.781
Elektrik/yakıt girdisi (kWh/yıl)	340.912 yakıt	295.781 elektrik	98.594 elektrik
PV üretimi (kWh/yıl)	-	79.017	79.017
Anlık öz tüketim (kWh/yıl)	-	4.318	3.627
Şebekeden alınan elektrik (kWh/yıl)	-	291.463	94.967
Şebekeye verilen fazla üretim (kWh/yıl)	-	74.699	75.391

4. SONUÇ

Bu çalışmada Muğla/Fethiye koşullarında temsilî bir domates serası için PV destekli sera ısıtmasının saatlik yük-üretim eşleşmesi değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, PV üretimi ile sera ısıtma talebi arasındaki zamansal uyumsuzluğun literatürde beklenen bir durum olmakla birlikte, yerel koşullar ve seçilen sistem sınırı altında oldukça yüksek büyüklüğe ulaşabildiğini göstermektedir.

Referans sera için yıllık net ısıtma talebi 289.775 kWh/yıl, pik ısıtma yükü ise 223,0 kW olarak hesaplanmıştır. 50 kWp PV sistemi yıllık 79.017 kWh elektrik üretmesine rağmen, PV + ısı pompası senaryosunda 98.594 kWh/yıl olan elektrikli ısıtma talebinin yalnızca 3.627 kWh/yıl'lık kısmı aynı saatlerde PV üretimiyle doğrudan karşılanabilmiştir. Bu sonuç, yıllık enerji bilançosunun bataryasız PV destekli sera ısıtması için tek başına yeterli bir karar ölçütü olmadığını göstermektedir.

Çalışmanın sonuçları üç temel çıkarıma işaret etmektedir. İlk olarak, PV destekli sera ısıtması değerlendirilirken saatlik eşleşme göstergeleri mutlaka raporlanmalıdır. İkinci olarak, ısı pompası kullanımı elektrik talebini önemli ölçüde azaltmakla birlikte, PV üretim saatleri ile ısıtma talep saatleri arasındaki uyumsuzluğu tek başına ortadan kaldırmamaktadır. Üçüncü olarak, sera kabuğunun iyileştirilmesi ve ısıtma yükünün azaltılması, PV kapasitesini artırmak kadar önemli bir tasarım stratejisidir.

Bu çalışma bir ön fizibilite ve modelleme bildirisi niteliğindedir. Gelecek çalışmalarda gerçek sera ölçümleriyle model doğrulaması yapılması, farklı panel alan oranlarının ürün ışık gereksinimiyle birlikte değerlendirilmesi, ısıl depolama veya batarya seçeneklerinin modele eklenmesi ve ekonomik göstergelerin güncel tarife/yatırım maliyeti verileriyle yeniden hesaplanması önerilmektedir.

Kaynakça

Ahamed, M. S., Guo, H. ve Tanino, K. (2018). Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosystems Engineering*, *178*, 9-33. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017

Canakci, M., Emekli, N. Y., Bilgin, S. ve Caglayan, N. (2013). Heating requirement and its costs in greenhouse structures: A case study for Mediterranean region of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *24*, 483-490.

Dobos, A. P. (2014). *PVWatts version 5 manual*. National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-6A20-62641.

Joint Research Centre. (2026). *Photovoltaic geographical information system (PVGIS)*. European Commission.

Kendirli, B. ve Çakmak, B. (2010). Yenilenebilir enerji kaynaklarının sera ısıtmasında kullanımı. *Ankara Üniversitesi Çevrebilimleri Dergisi*, *2*(1), 95-103.

National Renewable Energy Laboratory. (2026). *System Advisor Model (SAM) and PySAM documentation*. NREL.

Özcan, Z., Bilir, L. ve Caglar, B. (2024). Modelling and analysis of heat pump integrated photovoltaics-wind systems for an agricultural greenhouse in Turkey. *Applied Thermal Engineering*, *248*, 123364. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123364

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Impact of Accelerated Weathering on Mechanical Behavior of Sheet Molding Compound Panels

Selvi Naz ÇETİN[1]
Çağrı ÇALIŞKAN [2]

Abstract

Sheet Molding Compound (SMC) panels are widely used in automotive applications due to their high stiffness, dimensional stability, corrosion resistance, and suitability for complex geometries. In exterior applications, SMC components are generally preferred with painted surfaces because they are directly exposed to sunlight and environmental aging conditions. However, depending on vehicle geometry and component position, the inner surfaces of SMC panels may also be partially exposed to sunlight during service life. This partial UV exposure may affect not only visual appearance but also the long-term mechanical performance of the material.

In this study, the effect of xenon aging on the mechanical properties of an automotive SMC panel was investigated. Specimens were subjected to an interior trim xenon aging cycle for four weeks. Samples were removed weekly and characterized by tensile, flexural, and notched Izod impact tests.

The results showed that xenon aging caused a gradual reduction in the mechanical performance of the SMC material. After four weeks of exposure, tensile elongation at break decreased from 1.9% to 1.3%, while notched Izod impact strength decreased from 134 kJ/m² to 92 kJ/m². Flexural strength also decreased significantly from 184.2 MPa to 119.3 MPa. In contrast, tensile and flexural modulus values showed relatively moderate changes, indicating that the material partially retained its stiffness while its toughness and damage tolerance decreased.

Overall, the findings indicate that xenon aging may increase the brittleness of SMC panels and reduce their resistance to impact and flexural loading. Therefore, mechanical characterization after accelerated UV exposure is important for evaluating the long-term durability of SMC components used in automotive applications.

Keywords: SMC panel, xenon aging, UV exposure, automotive composites, mechanical properties, tensile test, flexural test, Izod impact strength.

[1] "Malzeme Mühendisliği, Tofas Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge, selvi.nazcetin@tofas.com.tr
[2] Malzeme Mühendisliği, Tofas Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge, Cagri.Caliskan@tofas.com.tr

1. Introduction

The automotive industry increasingly uses polymer-based composite materials to reduce vehicle weight and improve corrosion resistance. Among these materials, Sheet Molding Compound (SMC) is one of the most commonly used thermoset composite systems for semi-structural and exterior body applications. SMC materials typically consist of an unsaturated polyester or vinyl ester resin matrix, glass fiber reinforcement, mineral fillers, additives, and curing agents. This composition provides a combination of high stiffness, good dimensional stability and surface quality.

In automotive applications, SMC is preferred especially for large body panels, exterior closures, semi-structural panels, underhood components, and other parts where dimensional stability and corrosion resistance are important. Compared with metallic alternatives, SMC can offer weight reduction while maintaining sufficient mechanical performance. However, as with all polymer-based materials, long-term durability under environmental aging conditions remains a critical design and validation requirement.

Exterior automotive components are continuously exposed to sunlight, temperature changes, humidity, and other environmental effects during service life. Ultraviolet radiation can trigger chemical and physical degradation mechanisms in polymeric materials. These mechanisms may include chain scission, oxidation, microcracking, embrittlement, and matrix-fiber interface weakening. In composite materials such as SMC, degradation may occur not only in the polymer matrix but also at the interface between the resin and glass fibers. Therefore, UV exposure may affect both the visual appearance and the mechanical properties of the component.

For exterior SMC panels, the outer surface is generally painted to improve appearance and provide protection against environmental aging. Nevertheless, depending on vehicle geometry, mounting position, and service conditions, the inner surface of the panel may also be partially exposed to sunlight. Although this exposure is generally less severe than direct exterior exposure, it may still influence material performance over time. In particular, partial sunlight exposure may cause surface degradation, stiffness changes, reduction in elongation, and loss of impact resistance. These effects are important for automotive validation because the component is expected to maintain its mechanical integrity throughout the vehicle lifetime.

Accelerated xenon aging tests are widely used to simulate the effect of sunlight exposure in a controlled laboratory environment. In automotive applications, xenon aging is commonly used for assessing color change, gloss retention, surface degradation, and long-term performance of interior and exterior components. However, mechanical characterization after aging is also necessary when the component may be subjected to functional loads during service life.

The objective of this study is to investigate the effect of accelerated xenon aging on the mechanical performance of an automotive SMC panel. For this purpose, specimens were exposed to an interior trim xenon aging cycle for four weeks. Samples were removed at weekly intervals and tested by tensile, flexural, and notched Izod impact methods. The mechanical results were compared with the initial condition in order to evaluate the influence of UV exposure on stiffness, strength, elongation, and impact resistance.

2. Materials and Methods

2.1 Material

The investigated material was an automotive Class A Sheet Molding Compound (SMC) material used for a vehicle body panel application. The material was selected for an application where surface quality, dimensional stability, corrosion resistance, and mechanical performance are required. The material contains 28% glass fibre reinforcement with a nominal fibre length of 25 mm. This reinforcement structure provides the high stiffness level expected from SMC materials.

2.2 Specimen Preparation

Test specimens were prepared from the SMC panel by considering the required dimensions of the relevant mechanical test standards. Care was taken to obtain representative samples from the panel and to avoid visibly damaged or defective regions. Since SMC is a discontinuous fiber-reinforced composite, local fiber distribution and cutting direction may influence the measured values. Therefore, the same sampling logic was followed for all aging durations in order to make the results comparable.

The prepared specimens were divided into five groups: initial condition, Week 1, Week 2, Week 3, and Week 4. The initial group was tested without xenon exposure, while the remaining groups were exposed to accelerated xenon aging and removed weekly for mechanical characterization.

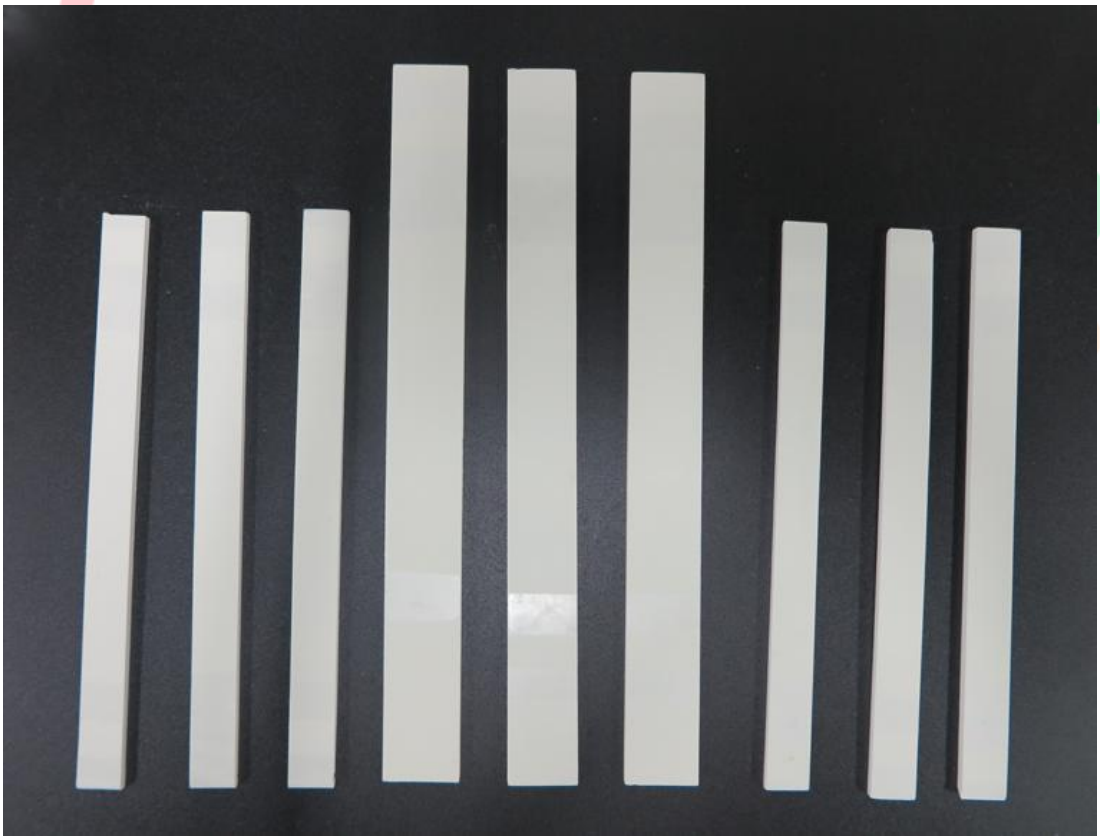


Figure 12Tensile, Flexural and Izod Samples

2.3 Xenon Aging Procedure

Accelerated xenon aging was performed according to the SAE J2412 method, which defines controlled irradiance xenon-arc exposure conditions for automotive interior trim components. This method was selected because the investigated surface is not a fully exterior painted surface but an inner surface that may experience partial sunlight exposure during vehicle service life.

The total exposure duration was 33 days. Samples were removed from the xenon chamber at weekly intervals to follow the aging progression step by step. The exposure plan is given in Table 1.

Condition	Exposure (kj/m^2)	Description
Initial Cond.	0	Reference samples without xenon aging
Week 1	262	Samples removed after first week
Week 2	524	Samples removed after second week
Week 3	786	Samples removed after third week
Week 4	1048	Samples removed after fourth week

Table 1 : *Xenon Aging Exposure Plan*

The purpose of this aging approach was not only to compare the initial and final conditions, but also to observe whether the degradation behavior was gradual or sudden. After each exposure period, specimens were conditioned under laboratory conditions before mechanical testing.

2.4 Mechanical Testing

Mechanical characterization was carried out by tensile, flexural, and notched Izod impact tests. These tests were selected because they represent different mechanical responses of the material: tensile loading, bending resistance, and impact energy absorption.

Tensile tests were performed according to ISO 527. Tensile modulus, tensile strength at maximum load, and elongation at break were evaluated. These results were used to understand the effect of xenon aging on stiffness, load-bearing capability, and deformation capacity.

Flexural tests were performed according to ISO 178. Flexural modulus and flexural strength were measured in order to evaluate bending performance. This is particularly important for automotive panels because bending-type loads may occur during handling, assembly, and service.

Notched Izod impact tests were performed according to ISO 180/A. This test was used to evaluate impact resistance and notch sensitivity. Since impact performance is highly sensitive to embrittlement, it was considered a critical indicator for understanding the effect of UV-related degradation on the SMC material.

3. Results and Discussion

3.1 Tensile Properties

Property	Unit	Initial	Week 1	Week 2	Week 3	Week 4
Tensile modulus	MPa	9862.9	10118.4	8521.2	8120.3	8002.7
Tensile elongation at break	%	1.9	1.8	1.4	1.4	1.3
Tensile strength at maximum load	MPa	88.4	103.5	86.4	82.2	81.8

***Table 2**: Tensile properties of SMC panel before and after xenon aging.*

After four weeks of xenon aging, tensile modulus decreased from 9862.9 MPa to 8002.7 MPa, corresponding to an approximate reduction of 18.9%. Tensile elongation at break decreased from 1.9% to 1.3%, showing a reduction of 31.6%. This decrease indicates that the material became more brittle after exposure. Tensile strength showed a temporary increase after the first week, but then decreased to 81.8 MPa at Week 4. Overall, tensile results show that xenon aging had a stronger effect on elongation than on tensile strength.

3.2 Flexural Properties

Property	Unit	Initial	Week 1	Week 2	Week 3	Week 4
Flexural modulus	MPa	11790.5	12488.2	11783.1	11791.8	10867.8
Flexural strength	MPa	184.2	171.6	116.3	127.4	119.3

***Table 3:** Flexural properties of SMC panel before and after xenon aging.*

Flexural modulus remained relatively stable during the first three weeks and decreased slightly at Week 4. The final value represents an approximate reduction of 7.8% compared with the initial condition. In contrast, flexural strength decreased significantly from 184.2 MPa to 119.3 MPa, corresponding to a reduction of 35.2%. This result suggests that the material largely retained its bending stiffness but lost a considerable part of its resistance to bending failure. Since flexural loading is sensitive to surface defects and microcracks, UV-related surface degradation may have contributed to the strength reduction.

3.3 Notched Izod Impact Strength

Property	Unit	Initial	Week 1	Week 2	Week 3	Week 4
Notched Izod impact strength	**kJ/m²**	**134**	**130**	**130**	**109**	**92**

***Table 4:** Notched Izod impact strength of SMC panel before and after xenon aging.*

Notched Izod impact strength decreased from 134 kJ/m² to 92 kJ/m² after four weeks of xenon exposure. This corresponds to an approximate reduction of 31.3%. The first two weeks showed limited change, while a clearer decrease was observed after Week 3. This trend indicates

that the aged material became less capable of absorbing impact energy and more sensitive to crack initiation and propagation.

4. Conclusion

In this study, the effect of accelerated xenon aging on the mechanical properties of an automotive Sheet Molding Compound panel was investigated. Specimens were exposed to an interior trim xenon aging cycle for four weeks, and samples were removed weekly for tensile, flexural, and notched Izod impact testing.

The following conclusions can be drawn from the study:

Xenon aging caused a reduction in the mechanical performance of the SMC material, especially in properties related to ductility, toughness, and damage tolerance.

Tensile elongation at break decreased from 1.9% to 1.3% after four weeks, indicating increased brittleness of the SMC material.

Flexural strength decreased significantly from 184.2 MPa to 119.3 MPa, showing that the aged material had reduced resistance to bending loads.

Notched Izod impact strength decreased from 134 kJ/m² to 92 kJ/m², indicating lower impact energy absorption capability after aging.

Tensile and flexural modulus values showed relatively moderate changes compared with strength and impact properties. This indicates that the material partially retained its stiffness but became more sensitive to fracture and impact damage.

The results demonstrate that accelerated xenon aging can increase the brittleness of SMC panels even when stiffness retention is relatively high.

Mechanical characterization after xenon aging is important for evaluating the long-term durability of automotive SMC components, especially when inner surfaces may be partially exposed to sunlight during service life.

Overall, the study confirms that UV exposure should not be evaluated only from a visual appearance perspective. For SMC panels used in automotive applications, the influence of xenon aging on mechanical performance must also be considered in order to ensure long-term durability and component reliability.

References

[1] SAE International, SAE J2412: Accelerated Exposure of Automotive Interior Trim Components Using a Controlled Irradiance Xenon-Arc Apparatus, SAE International, Warrendale, PA.

[2] ISO 527, Plastics — Determination of tensile properties, International Organization for Standardization.

[3] ISO 178, Plastics — Determination of flexural properties, International Organization for Standardization.

[4] ISO 180, Plastics — Determination of Izod impact strength, International Organization for Standardization.

[5] P. Dumont, L. Orgéas, D. Favier, P. Pizette, C. Venet, Sheet Molding Compounds, Wiley Encyclopedia of Composites, 2012.

[6] M. A. Laribi, S. Tamboura, P. Davies, F. Jacquemin, Sheet Molding Compound Automotive Component: Multi-Scale Experimental Analysis and Mechanical Behaviour of Short Fiber-Reinforced Composite, Advanced Composite Materials, 2020.

[7] S. Tamboura, M. A. Laribi, P. Davies, F. Jacquemin, On the Mechanical Properties and Damage Mechanisms of Short Fiber Reinforced Composite Submitted to Hydrothermal Aging: Application to Sheet Molding Compound Composite, Composite Structures, 2022.

[8] M. Kardos, Improving the Paintability of Sheet Molding Compounds for Automotive Applications, Doctoral Dissertation, Technische Universität Dresden, 2022.

[9] A. Asadi, M. Miller, R. J. Moon, K. Kalaitzidou, Lightweight Sheet Molding Compound Composites Containing Cellulose Nanocrystals, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017.

[10] K. Klipstein, Advances in Molded-in-Color, UV-Stable Composites for Automotive Applications, SPE Automotive Composites Conference & Exhibition, 2022.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Determination of Thermal Decomposition Kinetics and Thermodynamic Parameters of Shoe Manufacturing Industry Wastes by the Coats-Redfern Method

Gülce ÇAKMAN[1]

Abstract

Shoe manufacturing generates heterogeneous solid wastes that currently lack efficient valorization pathways. This study investigated the thermal decomposition behavior, pyrolysis kinetics, and thermodynamic parameters of two distinct shoe waste fractions (salpa waste and waste leather) obtained from an industrial facility in Samsun, Turkey. Thermogravimetric analysis (TGA) was performed under nitrogen atmosphere at a heating rate of 40 °C/min from 30 to 800 °C. The decomposition profiles for both fractions revealed two distinct stages: moisture release below 200 °C, and intensive pyrolysis between 300 and 550 °C. Maximum mass-loss rates occurred at 375 °C for salpa waste and 387 °C for waste leather. Kinetic parameters were determined by applying eleven solid-state reaction models within the Coats-Redfern integral method. Among all models tested, the second-order reaction model yielded the best linear fit for both samples (R^2 = 0.9994 for salpa waste; R^2 = 0.9973 for waste leather), with activation energies of 137 and 88 kJ/mol, respectively. The activation energies reflected the more complex, multi-component nature of the salpa waste fraction. Thermodynamic analysis revealed endothermic enthalpy changes (ΔH = 132 kJ/mol for salpa waste; 83 kJ/mol for waste leather), positive Gibbs free energy values indicating an energy barrier, and negative entropy changes consistent with a well-ordered activated complex. These results establish the thermal conversion necessary for designing pyrolysis reactors aimed at converting shoe waste into alternative liquid fuels.

Keywords: Shoe waste, thermogravimetric analysis, Coats-Redfern method, pyrolysis kinetics, thermodynamic parameters.

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, gulce.cakman@omu.edu.tr, Orcıd: 0000-0002-3202-3202[1]

Giriş (Introduction)

Küresel ayakkabı üretimi yılda yaklaşık 25 milyar çift düzeyine ulaşmış olup Türkiye, bu pazardaki önemli konumunu sürdürmektedir. Türkiye İhracatçılar Meclisi verilerine göre Türk ayakkabı sektörü, Avrupa ayakkabı ithalatındaki yaklaşık %16'lık payıyla kıtanın önde gelen tedarikçileri arasında yer almaktadır (TİM, 2023). Bu yüksek üretim hacmi, yılda on binin üzerinde ton katı atık oluşumuna yol açmaktadır ancak atıkların büyük bölümünü oluşturan deri, etilen-vinil asetat (EVA) köpük, sentetik kauçuk ve tekstil karışımları, mevcut geri dönüşüm altyapısıyla değerlendirilememekte ve depolama sahalarına yönlendirilmektedir. Bu durum hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından ciddi bir sorun oluşturmaktadır.

Polimerik atıkların pirolizi, fosil yakıtlara alternatif olabilecek sıvı, gaz ve katı yakıtlar üretmesi bakımından son yıllarda giderek artan bir ilgi görmektedir (Mangesh vd., 2020). Piroliz ürünlerinin kalitesi ve verimi büyük ölçüde hammaddenin termal bozunma davranışına bağlıdır. Bu nedenle çeşitli polimer atıklarının termogravimetrik analizle (TGA) incelenmesi ve elde edilen kinetik parametrelerin reaktör tasarımına aktarılması yaygın bir araştırma yaklaşımı haline gelmiştir (Vyazovkin vd., 2011).

Lastik pirolizi üzerine kapsamlı çalışmalar mevcuttur (Islam vd., 2008; Mar-Juárez vd., 2026; Wen vd., 2026), polimer bozunması incelenmiş (Wu vd., 2014) ve biyokütle atıklarının TGA/kinetik analizleri gerçekleştirilmiştir (Ceylan ve Kazan, 2015). Bununla birlikte, gerçek sanayi koşullarından elde edilen karışık ayakkabı atıklarını konu alan termal kinetik çalışmalar oldukça sınırlı kalmaktadır. Bu boşluk, söz konusu malzemelerin farklı polimerik bileşenlerden oluşması ve bu heterojenliğin bozunma mekanizmasının karmaşık olmasından kaynaklanmaktadır.

Bu çalışma, bir ayakkabı üretim tesisinden elde edilen iki farklı atık fraksiyonunun (salpa ve deri atıkları) TGA eğrilerini, Coats-Redfern integral yöntemi kapsamında 11 farklı reaksiyon modeli çerçevesinde analiz etmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın özgün katkısı; gerçek sanayi atığı kullanımı, geniş model karşılaştırma kapsamı ve aktivasyon enerjisiyle birlikte entalpi, Gibbs serbest enerjisi ve entropi parametrelerinin her iki numune için eş zamanlı hesaplanmasıdır. Bu veriler, ilerleyen aşamada gerçekleştirilecek olan piroliz deneyleri ve pirolitik sıvının yakıt özellikleri değerlendirmesi için temel girdi sağlayacaktır.

Materyal ve Yöntem (Materials and Methods)

Numune Hazırlığı

Numuneler (Salpa ve deri atıkları), Samsun ilinde faaliyet gösteren bir ayakkabı üretim tesisinden temin edilmiştir. Her iki numune de analiz öncesinde oda sıcaklığında kurutulmuş, öğütülmüş ve 1 mm altında elekle standart boyuta getirilmiştir.

Termogravimetrik Analiz

Termal bozunma davranışı TG analizi (Shimadzu) kullanılarak belirlenmiştir. Deneyler; 30'dan 800 °C'ye kadar, 40 °C/dak ısıtma hızıyla ve inert atmosfer sağlamak amacıyla 50 mL/dak akış hızındaki saf azot ortamında gerçekleştirilmiştir. Model uyarlama yöntemi Coats-Redfern yaklaşımını kullanarak kinetik bilgiler elde etmek için tek bir ısıtma hızı seçilmiştir.

Örneklerin başlangıç kütlesi yaklaşık 10-12 mg olarak ayarlanmıştır. TGA ve türevsel termogravimetri (DTG) eğrileri, bozunma basamaklarının belirlenmesinde kullanılmıştır.

Coats-Redfern Kinetik Analizi

Kinetik parametreler, Coats ve Redfern tarafından geliştirilen integral yöntem esas alınarak hesaplanmıştır. Bu yöntemde izotermik olmayan TGA verisine doğrusal regresyon uygulanır. İlgili denklem şu şekilde ifade edilmektedir:

$$ln\left[\frac{g(x)}{T^2}\right] = ln\left(\frac{AR}{\beta E_a}\right) - \frac{E_a}{RT} \quad (2.1)$$

Burada α dönüşüm derecesini, T mutlak sıcaklığı (K), A pre-eksponansiyel faktörü (dak^{-1}), R evrensel gaz sabitini (8,314 J mol^{-1} K^{-1}), β ısıtma hızını (40 °C/dak) ve Ea aktivasyon enerjisini (J/mol) temsil etmektedir. g(x) integral reaksiyon modeli fonksiyonudur. ln[g(x)/T^2]'nin 1/T'ye karşı çizilmesiyle elde edilen doğrunun eğiminden Ea, kesim noktasından ise A hesaplanmıştır. Analizde iki çekirdeklenme modeli (Nuc 1.5, Nuc 2.0), 0., 1., 1.5. ve 2. derece reaksiyon modelleri, üç difüzyon modeli (D1, D2, D3 a-Jander) ile iki geometrik (silindirik, küresel) model olmak üzere toplam 11 farklı model test edilmiştir (Vyazovkin vd., 2011).

Çizelge 2.1. Reaksiyon model fonksiyonları (Sahu vd., 2026)

MODEL	İSIM	REAKSIYON İSMI	f(x)	g(x)
1	Kimyasal Reaksiyon	n=0	1	X
2	Kimyasal Reaksiyon	n=1	1-x	-ln(1-x)
3	Kimyasal Reaksiyon	n=1,5	$[(1–x)]^{3/2}$	$6(1-x)^{-1/2}$
4	Kimyasal Reaksiyon	n=2	$(1-x)^2$	$(1-x)^{-1}-1$
5	Avrami-Erofeev Denklemi	Çekirdeklenme ve büyüme (n = 1,5)	$3(1–x)\,[-\ln(1–x)]^{2/3}$	$[-\ln(1-x)]^{2/3}$
6	Avrami-Erofeev Denklemi	Çekirdeklenme ve büyüme (n = 2)	$2(1–x)\,[-\ln(1–x)]^{1/2}$	$[-\ln(1-x)]^{1/2}$
7	Difüzyon Modeli	Tek boyutlu difüzyon, 1D	$1/2x$	x^2
8	Difüzyon Modeli	İki boyutlu difüzyon, 2D	$-[\ln(1–x)]^{-1}$	$x + (1-x)\ln(1-x)$
9	Anti-Jander Denklemi	Üç boyutlu difüzyon, 3D	$1{,}5(1+a)^{2/3}[(1+a)^{1/3}–1]^{-1}$	$[(1+x)^{1/3}-1]^2$
10	Geometrik Model	Geometrik büzülme (silindir)	$2(1–x)^{1/2}$	$1-(1-x)^{1/2}$
11	Geometrik Model	Geometrik büzülme (küresel)	$3(1–x)^{2/3}$	$1-(1-x)^{1/3}$

Termodinamik Parametre Hesabı

En iyi uyum gösteren model için entalpi değişimi (ΔH), Gibbs serbest enerjisi değişimi (ΔG) ve entropi değişimi (ΔS) sırasıyla aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır (Ceylan ve Kazan, 2015).

$$\Delta H = E_\alpha - R \times T \quad (2.2)$$

$$\Delta G = E_\alpha + R \times T_m \times \ln\left(\frac{K_b \times T_m}{h \times A}\right) \quad (2.3)$$

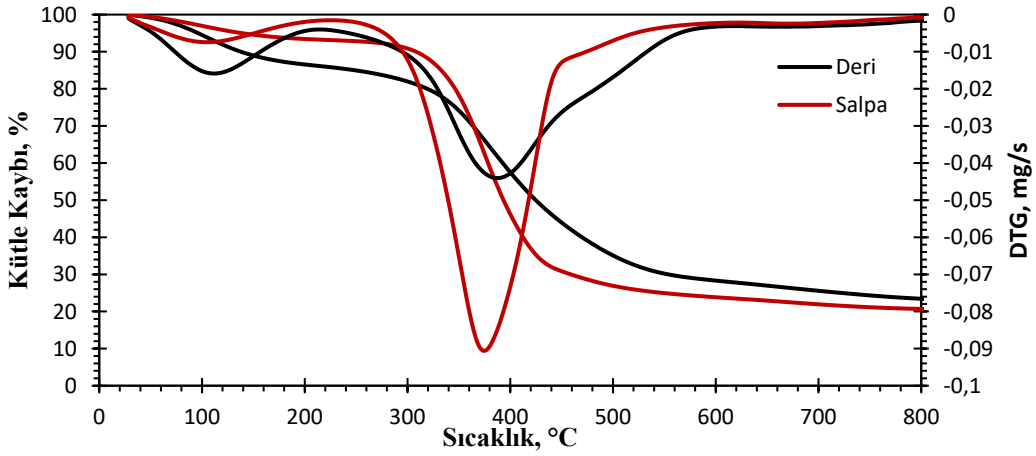
$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T_m} \qquad (2.4)$$

Burada T_m maksimum bozunma hızına karşılık gelen sıcaklık (K), k_b Boltzmann sabiti ($1{,}381 \times 10^{-23}$ J/K) ve h Planck sabiti ($6{,}626 \times 10^{-34}$ J·s)'dir.

Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

TGA/DTG Analizi

Her iki numunenin TGA eğrileri iki bozunma basamağı sergilemiştir. Salpa atığı numunesinde 200 °C altında kütle kaybı yaklaşık %5 ile nem uzaklaşmasını göstermekte, 300-500 °C aralığında (piroliz bölgesinde) ise polimer bozunması ~ %62 kütle kaybına yol açmaktadır. Maksimum bozunma hızı T_m = 375,0 °C'de elde edilmiş, 800 °C'deki kalıntı miktarı yaklaşık %20,7 olarak belirlenmiştir. Deri atığı numunesi için benzer aşamalar gözlemlenmiş, bununla birlikte 310-540 °C aralığındaki polimer bozunması ~ %52 düzeyinde kalmıştır. Deri atığı numunesinin maksimum bozunma hızı T_m = 387,8 °C'de gerçekleşmiş ve 800 °C kalıntısı ~ %23,3 olarak bulunmuştur. Deri atığı numunesinin daha yüksek kauçuk içeriği nedeniyle T_m değerinin salpa atığına göre yaklaşık 13 °C daha yüksek olması ve kalıntı miktarının fazla bulunması beklenen bir sonuçtur.



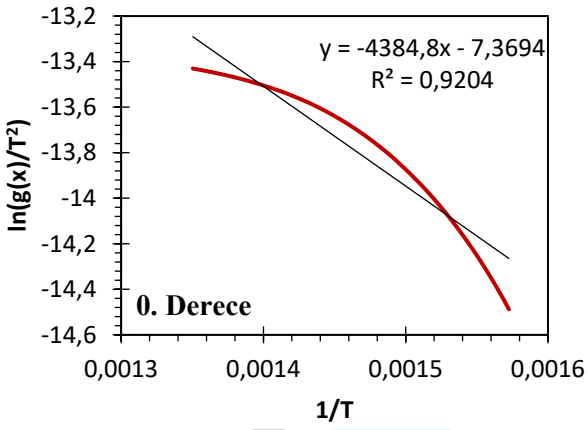
Şekil 3.1. *Deri ve Salpa atığı numunelerin termogramı*

Coats-Redfern Kinetik Sonuçları

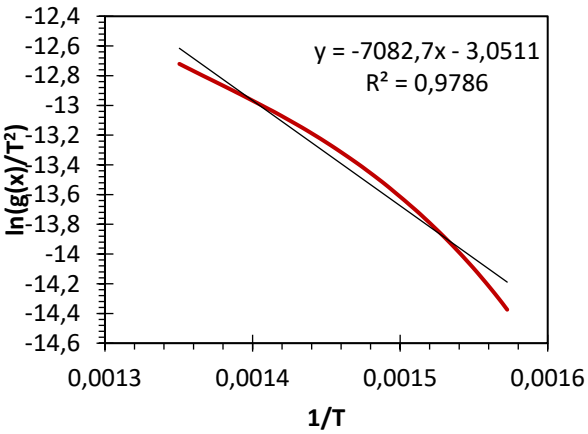
On bir farklı Coats-Redfern modelinin grafikleri Çizelge 3.1'de sunulmaktadır. Her iki numune için de en yüksek R^2 değeri 2. derece reaksiyon modeli tarafından elde edilmiştir: deri atığı için R^2 = 0,9973 ve salpa atığı içinse R^2 = 0,9994. Bu sonuç, bozunma mekanizmasının ikinci dereceden bir bimoleküler reaksiyonla ya da yüzey alan tükenimine bağlı bir oran azalması süreciyle tutarlı olduğunu göstermektedir.

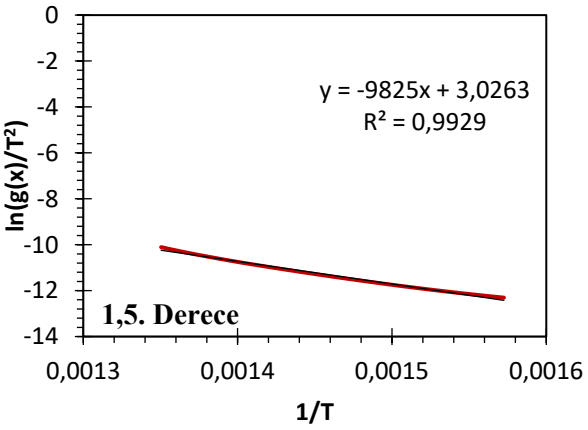
Salpa atığı numunesinin aktivasyon enerjisi (137,76 kJ/mol), deri atığı numunesine (88,84 kJ/mol) kıyasla belirgin biçimde yüksektir. Bu fark, salpa atığının karışık polimerik yapısından kaynaklanmaktadır: salpa atıklarındaki EVA ve tekstil gibi farklı ısıl kararlılığa sahip bileşenlerin varlığı, daha yüksek bir enerji bariyerinin aşılmasını gerektirmektedir. Deri

atığının kauçuk ağırlıklı bileşimi ise daha homojen bir bozunma mekanizması sunarak daha düşük aktivasyon enerjisine sahiptir.

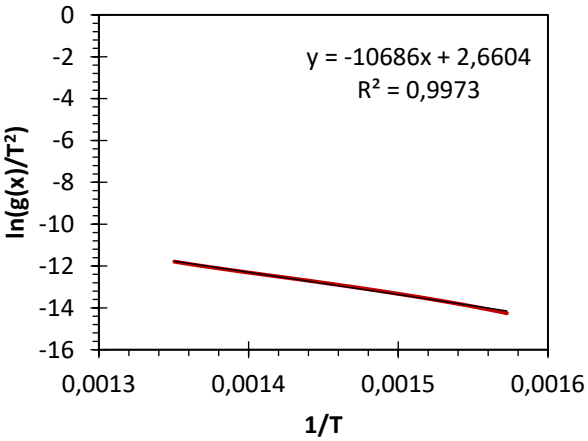


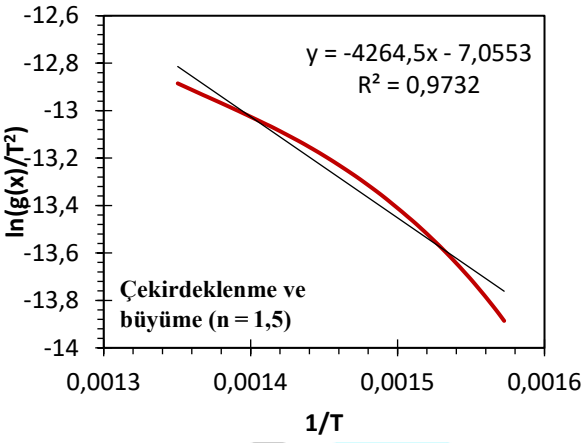
1. Derece

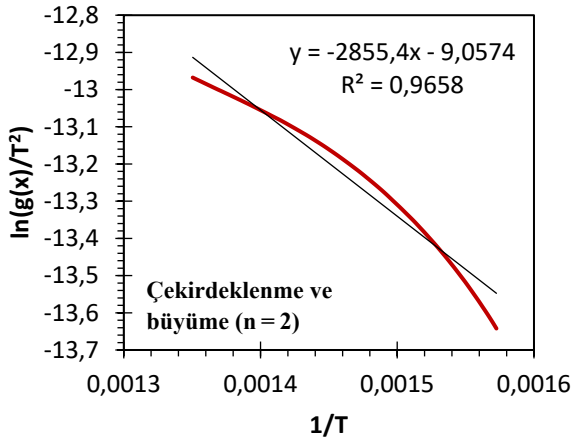


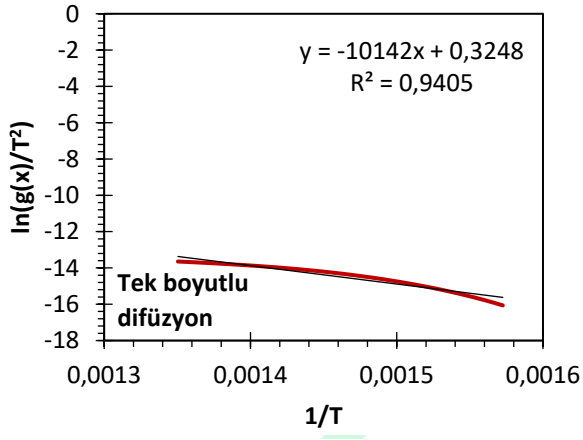


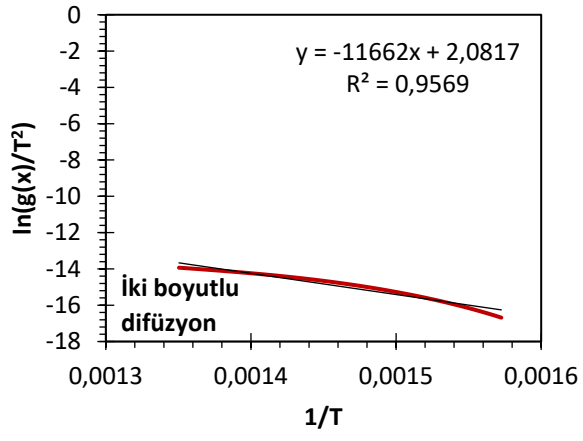
2. Derece

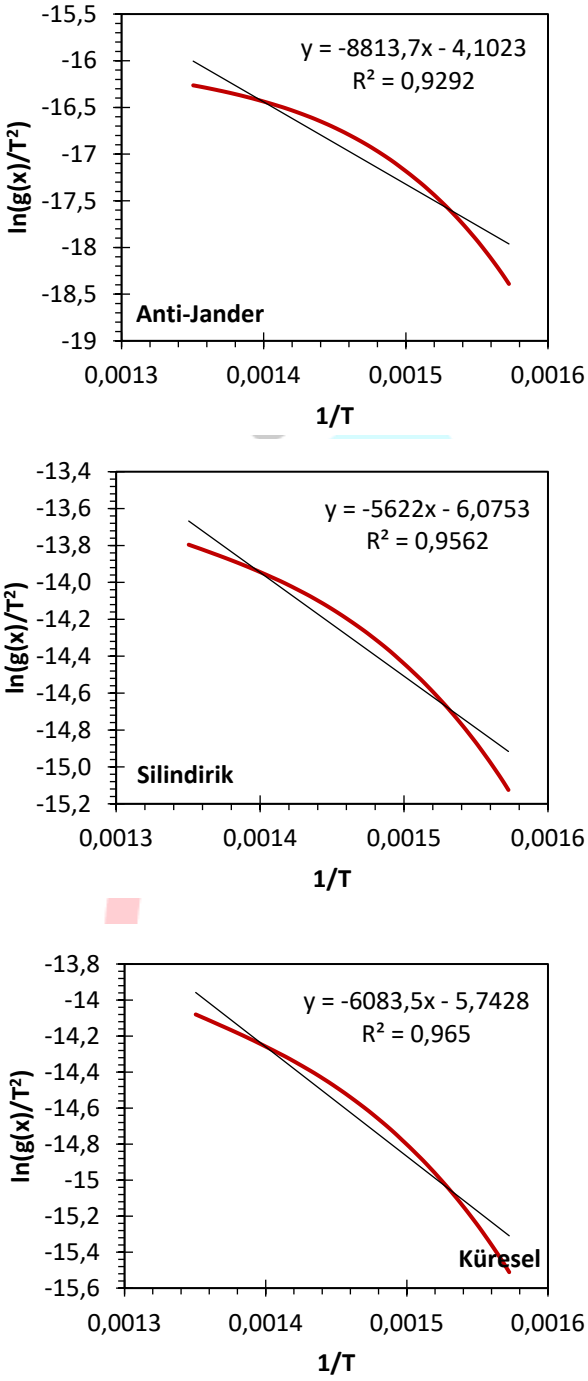



y = -4264,5x - 7,0553
R² = 0,9732
Çekirdeklenme ve büyüme (n = 1,5)
ln(g(x)/T²)
1/T
-12,6
-12,8
-13
-13,2
-13,4
-13,6
-13,8
-14
0,0013
0,0014
0,0015
0,0016

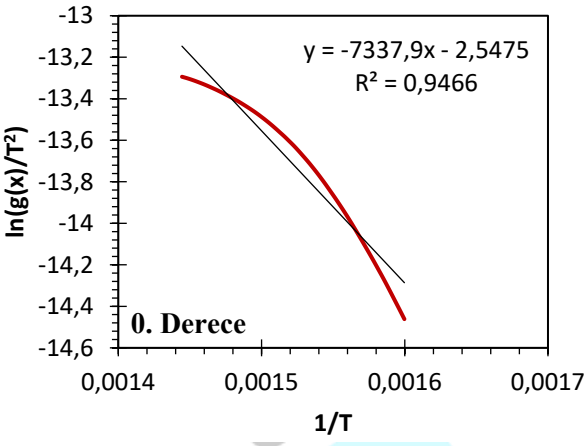

y = -2855,4x - 9,0574
R² = 0,9658
Çekirdeklenme ve büyüme (n = 2)
ln(g(x)/T²)
1/T
-12,8
-12,9
-13
-13,1
-13,2
-13,3
-13,4
-13,5
-13,6
-13,7
0,0013
0,0014
0,0015
0,0016


y = -10142x + 0,3248
R² = 0,9405
Tek boyutlu difüzyon
ln(g(x)/T²)
1/T
0
-2
-4
-6
-8
-10
-12
-14
-16
-18
0,0013
0,0014
0,0015
0,0016

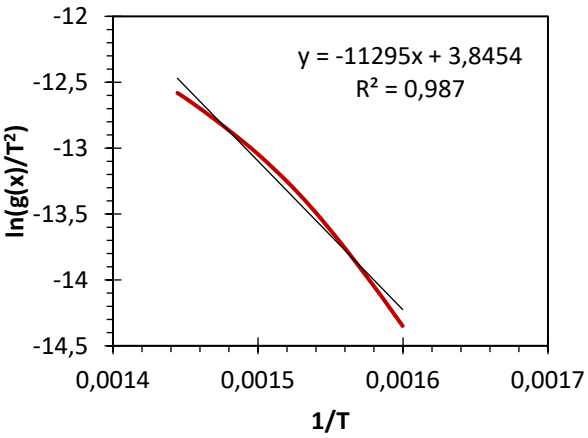

y = -11662x + 2,0817
R² = 0,9569
İki boyutlu difüzyon
ln(g(x)/T²)
1/T
0
-2
-4
-6
-8
-10
-12
-14
-16
-18
0,0013
0,0014
0,0015
0,0016

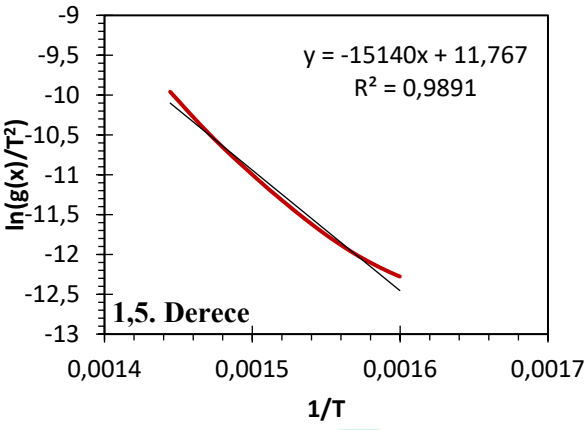


Şekil 3.2. *Deri atığı numunesinin kinetik model grafikleri*

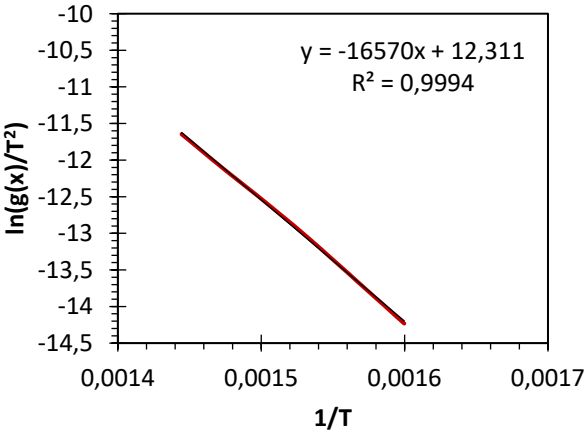


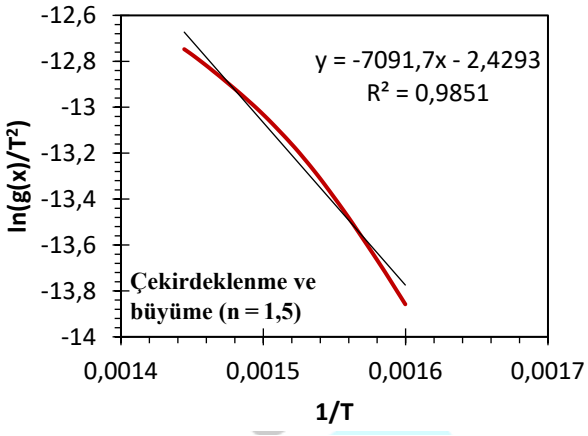
1. Derece



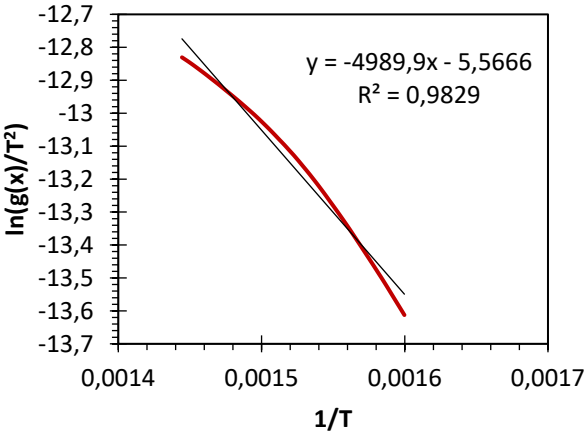


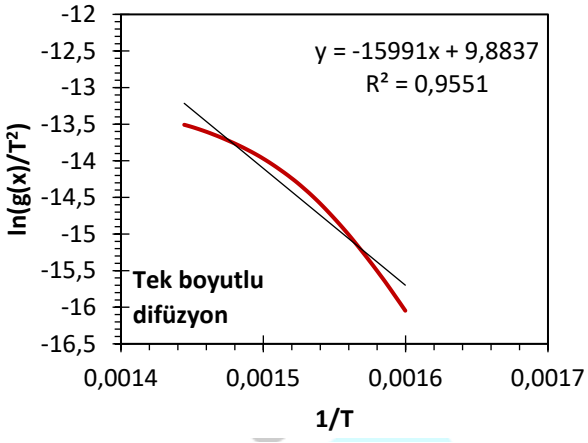
2. Derece



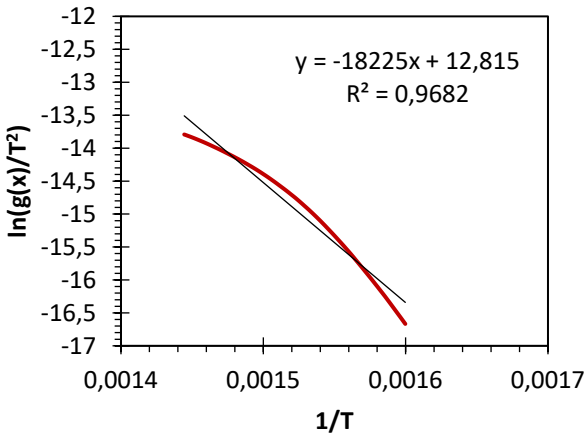


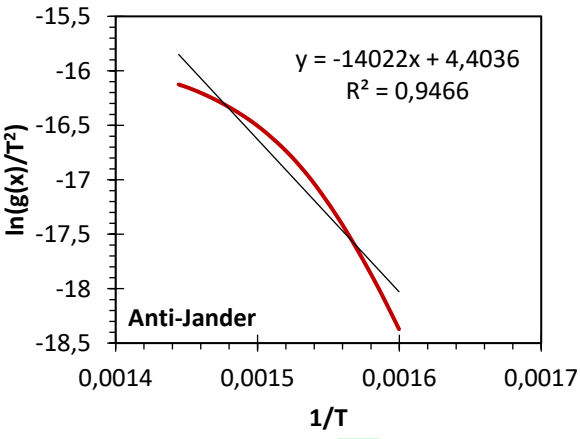
Çekirdeklenme ve büyüme (n = 2)



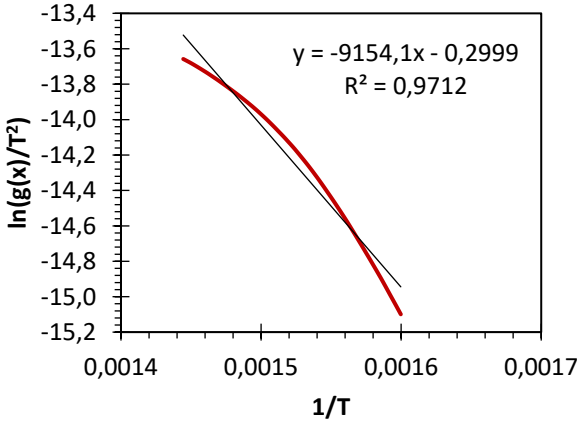


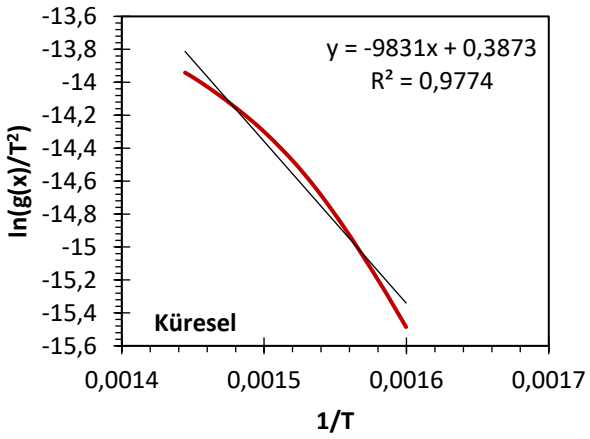
İki boyutlu
difüzyon





Silindirik





Şekil 3.3. *Salpa atığı numunesinin kinetik model grafikleri*

3.3. Termodinamik Parametreler

2. derece model için hesaplanan termodinamik parametreler Çizelge 3.1'de özetlenmiştir. Her iki numune için pozitif ΔH değerleri, piroliz sürecinin endotermik karakterini doğrulamaktadır. Salpa atığı numunesinin entalpi değeri (ΔH = 132,37 kJ/mol), deri atığı numunesinin entalpi değerinden (ΔH = 83,35 kJ/mol) yaklaşık %59 daha yüksektir, bu da karışık polimer içeriğinin bağ kırılması için daha fazla enerji gerektirdiğini göstermektedir.

Pozitif Gibb's Enerji (ΔG) değerleri (Salpa atığı için 184,18; deri atığı için 191,73 kJ/mol), pirolizin kendiliğinden gerçekleşmediğini ve dış enerji girişi gerektirdiğini göstermektedir. Negatif entropi (ΔS) değerleri, aktive kompleksin reaktantlara kıyasla daha organize bir yapıya sahip olduğuna işaret etmektedir; bu durum, tek aşamalı ve difüzyon kısıtlaması içermeyen bir bozunma mekanizmasıyla uyumludur. Deri atıklarının ΔS değerinin salpa atığı numunesine göre daha negatif olması (−163,97 J/molK), kauçuk ağırlıklı bileşende aktive edilmiş kompleksin çok daha sıkı bir yapısal düzene sahip olduğuna işaret etmekte ve bozunma mekanizmasının daha belirleyici olduğunu göstermektedir.

Çizelge 3.1. *Salpa ve deri atığı numunelerinin aktivasyon enerjisi, entalpi (ΔH), Gibbs serbest enerjisi (ΔG) ve entropi (ΔS) değerleri*

	SALPA ATIĞI	**DERI ATIĞI**
Ea (kJ/mol)	137,76	88,84
ΔH (kJ/mol)	132,37	83,35
ΔG (kJ/mol)	184,18	191,73
ΔS (J/mol)	-79,92	-163,97

Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, gerçek ayakkabı üretim sanayi atığından elde edilen iki farklı fraksiyonun (Salpa ve deri atıkları) termal bozunma kinetiği ve termodinamik parametreleri, TGA verileri üzerinde Coats-Redfern integral yöntemi uygulanarak belirlenmiştir. Her iki numune de iki bozunma basamağı sergilemiş; salpa atığı için maksimum bozunma hızı 375,0 °C, deri atığı için ise 387,8 °C'de gözlemlenmiştir. Bu değerler piroliz reaktörü için uygun çalışma sıcaklık koşullarını göstermektedir. Test edilen 11 farklı Coats-Redfern modeli arasında 2. derece reaksiyon modeli, salpa atığı için R^2 = 0,9994 ve deri atığı içinse R^2 = 0,9973 ile en yüksek doğrusal uyumu sağlamış; bu durum her iki atık için de bimoleküler/yüzey tüketimi temelli bir bozunma mekanizmasına işaret etmektedir. Salpa atığı numunesinin aktivasyon enerjisi (137,76 kJ/mol), deri atığına göre (88,84 kJ/mol) belirgin biçimde daha yüksektir; bu fark, karışık polimerik bileşen yapısının kinetik davranışa yansımasını ortaya koymaktadır. Termodinamik analiz, her iki fraksiyonun da endotermik (ΔH > 0) ve dış enerji gerektiren (ΔG > 0) bir bozunma sürecine sahip olduğunu göstermiş; negatif entropi (ΔS) değerleri ise organize yapıda aktive komplekslerin oluştuğuna kanıt sunmaktadır.

Kaynakça

Ceylan, S. ve Kazan, D. (2015). Pyrolysis kinetics and thermal characteristics of microalgae Nannochloropsis oculata and Tetraselmis sp. Bioresource Technology, 187, 1-5. doi: 10.1016/j.biortech.2015.03.081

Coats, A. W. ve Redfern, J. P. (1964). Kinetic parameters from thermogravimetric data. Nature, 201(4914), 68-69. doi: 10.1038/201068a0

Islam, M. R., Haniu, H. ve Beg, M. R. A. (2008). Liquid fuels and chemicals from pyrolysis of motorcycle tire waste: Product yields, compositions and related fuel properties. Fuel, 87(13-14), 3112-3122. doi: 10.1016/j.fuel.2008.04.036

Mangesh, V. L., Padmanabhan, S., Tamizhdurai, P. ve Ramesh, A. (2020). Experimental investigation to identify the type of waste plastic pyrolysis oil suitable for conversion to diesel engine fuel. Journal of Cleaner Production, 246, 119066. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119066

Mar-Juárez, E., Chavarría-Escamilla, H. G., Lugo-Carpinteyro, E., & de Jesús Ortega-García, F. (2026). Statistical Modeling of Waste Tire Pyrolysis via Design of Experiments and Comprehensive Product Characterization. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 107871.

Sahu, R. K., & Gangil, S. (2026). Thermo-kinetic modeling and thermo-catalytic conversion of rice husk into activated porous carbon via Coats Redfern approach. Biomass and Bioenergy, 207, 108798.

TİM (2023). Sektörel ihracat istatistikleri — Deri ve deri mamulleri. Türkiye İhracatçılar Meclisi. Erişim tarihi: 10 Nisan 2025, https://www.tim.org.tr

Vyazovkin, S., Burnham, A. K., Criado, J. M., Pérez-Maqueda, L. A., Popescu, C. ve Sbirrazzuoli, N. (2011). ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data. Thermochimica Acta, 520(1-2), 1-19. doi: 10.1016/j.tca.2011.03.034

Wen, Y., Yang, H., Zhong, M., Zhang, Z., Yang, J., Yao, M., ... & Jin, L. (2026). Investigation on the interaction mechanism during co-pyrolysis of waste tire and coal for resource recovery and fossil carbon reduction. Fuel, 422, 139202.

Wu, J., Chen, T., Luo, X., Han, D., Wang, Z. ve Wu, J. (2014). TG/FTIR analysis on co-pyrolysis behavior of PE, PVC and PS. Waste Management, 34(3), 676-682. doi: 10.1016/j.wasman.2013.12.005

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Sığır Islahında Genomik Seleksiyon: Mevcut Durum, Yöntem ve Gelecek Perspektifleri

Eda TAYFUR[1]

Abstract

For decades, traditional cattle breeding programs have relied on phenotypic records and progeny testing methods. However, in species with long generation intervals like cattle, these methods entail several disadvantages, including high costs, significant time investment, and limited genetic progress for lowly heritable traits such as fertility and disease resistance. Over the past two decades, advancements in molecular genetics and bioinformatics have ushered in the era of "Genomic Selection" (GS) in the livestock sector. Genomic selection is based on estimating Genomic Estimated Breeding Values (GEBV) at an early age using genome-wide Single Nucleotide Polymorphism (SNP) panels, well before the animals' phenotypic performances or progeny outcomes are manifested. With the integration of this method, the generation interval in cattle breeding has been radically shortened, selection accuracy has increased, and remarkable genetic progress has been achieved, particularly for hard-to-measure traits such as mastitis resistance, residual feed intake, and longevity. Nevertheless, the accuracy of genomic prediction models (e.g., GBLUP, Bayesian variants) directly depends on the size of the reference population, the genetic architecture of the breed, and the continuous updating of reference phenotypes. Within the scope of this paper, the operational mechanisms of genomic selection in cattle breeding, its current global and national applications, economic advantages, and ongoing optimization challenges are evaluated in light of recent literature. In conclusion, genomic selection is likely to be the most powerful and indispensable tool of modern cattle breeding for achieving sustainable and profitable animal production.

Keywords: Cattle Breeding, Genomic Selection, SNP, GEBV, Genetic Gain.

[1] PhD Student, Atatürk University, Department of Animal Science, edatayfur2@gmail.com, Orcıd: 0000-0002-0162-1322

GİRİŞ

Sığır ıslah çalışmaları, artan hayvansal protein ihtiyacını karşılamak amacıyla, uzun yıllar boyunca fenotipik kayıtlara ve soy kütüğü bilgilerine dayalı olarak Tahmini Damızlık Değeri (Estimated Breeding Value/ EBV) hesaplamalarıyla yürütülmüştür (Brito vd., 2025); ("CRISPR in Agriculture", t.y.) . Geleneksel seleksiyon yaklaşımlarında, özellikle süt verimi gibi yalnızca tek bir eşeyde gözlemlenen ve yaşamın geç evrelerinde ortaya çıkan kantitatif karakterlerin geliştirilmesi için En İyi Doğrusal Sapmasız Tahmin (Best Linear Unbiased Prediction- BLUP) yöntemleri altın standart kabul edilmiştir (Say & Altun, 2021);(Boktar, 2025). BLUP modeli; sürü, yıl, mevsim veya yönetim uygulamaları gibi çevre kaynaklı etkileri düzenlerken, popülasyon içi genetik varyasyon gibi rastgele etkileri ve soyağacı ilişkilerini hesaba katarak güvenilir damızlık değer tespiti yapılmasına olanak tanır (Boktar, 2025). Ancak, bu modelin doğruluğu fenotipik verilerin mevcudiyetine ve kalitesine bağlıdır (Boktar, 2025); (Say & Altun, 2021).

Geleneksel ıslah programlarında damızlığı seçmek amacıyla kullanılan bir diğer yaygın yöntem, Yavru Kontrolü (Progeny Testing- PT), yüksek doğruluk oranına sahip olmasına rağmen çok yavaş işleyen bir süreçtir (Say & Altun, 2021). Suni tohumlama gibi biyoteknolojik yöntemlerle tek bir boğadan binlerce yavru elde edilerek sürü içi genetik ilerleme hızı %90'ın üzerine çıkarılabilse de döl kontrolü süreçlerinin tamamlanması oldukça maliyetlidir (Say & Altun, 2021). Elit bir boğanın damızlık değerinin kızlarının laktasyon verimleriyle taranması ortalama 4,5 ila 5 yıl sürmekte, bazı durumlarda bu süre 8 ila 10 yıla kadar uzamaktadır (Weicks-Webmaster, 2025a). Bu durum generasyonlar arası süreyi (nesil aralığını) uzatmakta, hayvancılık işletmelerinin uzun vadeli yatırım kararlarını geciktirmekte ve yıllık genetik ilerleme hızını sınırlandırmaktadır (*CDCB - Genomic Effect*, t.y); (Weicks-Webmaster, 2025b).

Bu kısıtlamaları aşmak amacıyla Meuwissen ve ark. (2001) tarafından ortaya konulan genomik seleksiyon yöntemi, hayvan ıslahında devrim niteliğinde bir dönüm noktası oluşturmuştur(Say & Altun, 2021). Genomik seleksiyon, tüm genomu kapsayan yoğun moleküler markerlerin kullanılmasıyla, aday hayvanların damızlık değerlerinin doğrudan DNA profillerine dayalı olarak tahmin edilmesini sağlayan istatistiksel bir yöntemdir (Say & Altun, 2021) . Genomik seleksiyonun temelini, her iki cinsiyetteki genç bireylerden (1-2 aylık yaşta) alınan biyolojik örnekler (kan, kıl, sperma vb.) vasıtasıyla DNA tabanlı damızlık değer tahminlerinin yapılması oluşturur (Louella, 2024). Bu sayede adayların verim performansları henüz kendilerinde veya yavrularında gözlemlenmeden önce tahmin edilebilmekte, böylece klasik döl kontrolündeki uzun bekleme süreleri ortadan kalkmaktadır (Say & Altun, 2021); (Weicks-Webmaster, 2025c)

YÖNTEM

Genomik seleksiyon tekniği, sığır genomunun dizilenmesi ve bu genomdaki Tek Nükleotid Polimorfizmlerinin (Single Nucleotide Polymorphism- SNP) yoğun keşiflerine dayanır (Say & Altun, 2021). Sığırda 30 çift kromozom bulunmakta ve bu kromozomlar üzerinde ebeveynlerden yavrulara aktarılan yaklaşık 3 milyar nükleotid çifti yer almaktadır (Özbeyaz & Kocakaya, 2011). Ve bu nükleotid dizilerinin içinde tek bir nükleotid değişikliği içeren genetik bir varyant türü olan SNP'ler bulunmaktadır.

Popülasyonkısaca şu adımları içerir; Genomik Damızlık Değerlerini (GDD / Genomic Estimated Breeding Value- GEBV) hesaplamak için öncelikle SNP'leri belirlenmiş referans bir popülasyon oluşturulur (Say & Altun, 2021). Referans, damızlık için aday hayvanların oluşturduğu grup, bu referans popülasyon ile örtüştürülür ve SNP tespiti için genotiplenir. Sonuçların değerlendirilmesiyle GDD hesaplanır (Say & Altun, 2021).

Bu hesaplamanın doğruluğu, kullanılan genotipleme çiplerinin yoğunluğuna ve kalitesine doğrudan bağlıdır (Say & Altun, 2021); (Özbeyaz & Kocakaya, 2011). Geçmiş yıllarda kullanılan Affymetrix 10K SNP çipleri genomik seleksiyon çalışmaları için yetersiz kaldığından, zamanla daha yüksek yoğunluklu çipler geliştirilmiştir (Özbeyaz & Kocakaya, 2011). Süt sığırcılığı endüstrisinde Illumina firması tarafından tescillenen "Bovine SNP 50K" çipi, 2009 yılında uygun sayılabilecek bir maliyetle piyasaya sunularak, bir süre standart bir araç olarak kullanılmıştır (Özbeyaz & Kocakaya, 2011) (Say & Altun, 2021). Günümüzde ise genomun daha detaylı taranması amacıyla 800K (yüksek yoğunluklu) SNP çiplerinden ve tam genom dizileme (Whole-Genome Sequencing) verilerinden yararlanılmaktadır (Say & Altun, 2021); (Li, 2024).

Genomik veri tabanlarında yer alan SNP markerlerinin seçimi ve kalite kontrolü, Değer tahimini doğruluğu açısından kritik öneme sahiptir (Esrafili Taze Kand Mohammaddiyeh vd., 2023a). Bu süreçte kullanılan temel SNP seçim kriterleri şunlardır (Esrafili Taze Kand Mohammaddiyeh vd., 2023b).:

Soyağacı uyumsuzluğunun %5'ten az olması,

Okuma oranının en az %90 seviyesinde bulunması,

Minör alel frekansının %2'den büyük olması,

Hardy-Weinberg dengesinden sapma olasılığının ($p<0.0001$) kontrol edilmesidir.

Genomik seleksiyon, genom boyunca yer alan SNP'lerin, kantitatif karakter lokusları (Quantitative Trait Locus/ QTL) ile yakın konumlandığı ve birlikte kalıtılarak Bağlantı Dengesizliği (Linkage Disequilibrium- LD) içerisinde olduğu varsayımına dayanır. (Esrafili Taze Kand Mohammaddiyeh vd., 2023a); (Özbeyaz & Kocakaya, 2011). Bağlantı Dengesizliği (LD), populasyonda beklenen münferit frekanslardan sapan bir gen kombinasyonunun belli allellerinin rastgele olmayan dağılımlarıdır (Özbeyaz & Kocakaya, 2011). Asıl ölçülebilir fenotipik karakter lokusu, QTL dizilerinin yerleri, tam olarak belirlenemez ancak QTL lokusları ile tam bağlantı halinde bulunan SNP'leri içeren büyük lokuslar kolaylıkla tespit edilebilmektedir (Özbeyaz & Kocakaya, 2011). Örneğin, süt sığırlarında yağ oranını ve verimini önemli ölçüde etkileyen ünlü *DGAT1* geni, "Bovine SNP 50K" çipi tarafından kolaylıkla tanımlanabilmekte ve genç boğalarda yağ oranı tahmininde %70 ve üzerinde bir güvenilirlik sağlamaktadır (Özbeyaz & Kocakaya, 2011). Et sığırlarında ise ticari olarak sunulan moleküler değer tahmin kitleri; yemden yararlanma, kas içi mermerleşme (marbling) ve et gevrekliği üzerinde etkili olan 56 adet markeri tarayarak yüksek performanslı damızlıkların doğumdan itibaren seçilmesine imkân tanımaktadır.

Elde edilen SNP verilerinden genomik değerin tahmin edilmesi için 3 yöntem kullanılmaktadır: En küçük kareler yöntemi (Least Squares), geleneksel ıslah çalışmalarında da sıklıkla kullanılan BLUP yöntemi ve Bayesian Estimatition (Bayes) (Özbeyaz & Kocakaya, 2011).

3- BULGULAR

3.1 Genomik Seleksiyonun Küresel Süt Sığırcılığına Sağladığı Somut Avantajlar

Genomik seleksiyonun sığır yetiştiriciliğine getirdiği en büyük avantaj, yıllık genetik ilerleme hızını teorik ve pratik olarak iki katına çıkarmasıdır (Weicks-Webmaster, 2025c); (*CDCB - Genomic Effect*, t.y.); (Wiggans & Carrillo, 2022). Islah denklemine göre genetik ilerleme; seleksiyon yoğunluğu, tahmin doğruluğu ve eklemeli genetik varyasyonun çarpımının, generasyon aralığına bölünmesiyle hesaplanır (*CDCB - Genomic Effect*, t.y.). Genomik seleksiyon, nesil aralığını yıl seviyesinden ay seviyesine indirerek payda değerini küçültmekte, aynı zamanda damızlık adaylarının taranma yoğunluğunu artırarak, yıllık genetik ilerlemeyi katlamaktadır (*CDCB - Genomic Effect*, t.y.; Weicks-Webmaster, 2025c).

Amerika Birleşik Devletleri (ABD) süt sığırı endüstrisi, genomik seleksiyonun küresel çapta en hızlı entegre edildiği ekosistem olmuştur (*CDCB - Genomic Effect*, t.y.; Weicks-Webmaster, 2025c). ABD Tarım Bakanlığı (USDA) tarafından 2008 yılında gayriresmi olarak yayınlanan genomik değerlendirmeler, 2009 yılında Holstein (Siyah Alaca), Jersey ve İsviçre Esmeri (Brown Swiss) ırkları için resmi hale getirilmiştir (Özbeyaz & Kocakaya, 2011). ABD Holstein popülasyonunda genomik seleksiyonun uygulanmasıyla, üretim özellikleri için yıllık genetik ilerleme hızı tam iki katına çıkmıştır (*CDCB - Genomic Effect*, t.y.). Sütçü boğaların döl kontrolü yapılmadan sadece DNA profillerine dayanarak suni tohumlamada kullanılma oranı 2021 yılında %71 seviyesine ulaşmıştır (*CDCB - Genomic Effect*, t.y.). Bu süreçte genotiplendirilen hayvan sayısı yurt içi ve yurt dışı katılımlarla hızla artmış; 2022 yılında 6,5 milyon başı aşmış , 2025 yılı verilerine göre ise yalnızca ABD veri tabanlarında taranan dişi oranı %93 olmak üzere toplamda 10 milyon başın üzerine çıkmıştır (Weicks-Webmaster, 2025c); (Brito vd., 2025).

Günümüzde sığırlarda 50'den fazla karakter için genomik değerlendirme yapılabilmektedir (*CDCB - Genomic Effect*, t.y.; Wiggans & Carrillo, 2022). Geleneksel döl kontrolüyle ıslahı çok zor olan düşük kalıtım dereceli fonksiyonel karakterler ve sağlık özellikleri, genomik seleksiyon sayesinde ıslah indekslerine başarıyla entegre edilmiştir. (Brito vd., 2025); (*CDCB - Genomic Effect*, t.y.); (Weicks-Webmaster, 2025b).

Tablo 1- *Islah indeksine eklenen karakter özellikleri*

Karakter Grubu	Islah İndeksine Eklenen Özellikler	Eklenme / Güncellenme Yılı	Islah Açısından Önemi
Uzun Ömürlülük	Üretken Ömür (Productive Life), Düve Canlı Kalma Oranı (Heifer Livability), İnek Canlı Kalma Oranı (Cow Livability) [6].	2020 (Düve Canlı Kalma Oranı eklendi) [6].	Hayvanın sürüde kalma süresini artırarak amortisman maliyetlerini düşürür. [1, 6].
Döl Verimi	Kızların Gebelik Oranı (DPR), İnek Konsept Oranı (CCR), Düve Konsept Oranı, Gestasyon Süresi, Erken İlk Buzağılama [6].	2019 (Erken İlk Buzağılama eklendi) [6].	Buzağılama aralığını optimize ederek sürü ikame verimliliğini artırır. [6, 13].
Sağlık ve Direnç	Soluk Borusu Yer Değiştirmesi (Displaced Abomasum), Ketozis, Mastitis, Metritis, Süt Humması (Hypocalcemia), Plasenta Tutunamaması [6].	2018 (Sağlık özellikleri indekse girdi) [6].	Tedavi ve veteriner masraflarını düşürür, antibiyotik kullanımını azaltır. [6, 16].
Yem Verimliliği	Tasarruf Edilen Yem (Feed Saved)- Canlı Ağırlık Kompoziti ve Kalan Yem Tüketimi (RFI) kombinasyonu [6].	2020 (Yem Tasarrufu eklendi) [6].	Süt üretim maliyetlerinin fazlasını oluşturan yem girdisini düşürür [7].

Söz konusu ekonomik çıktılar olduğunda, Avrupa'daki (örneğin Almanya) damızlık birliklerinin verilerine göre kurgulanan simülasyon modelleri baz alınırsa, tohumlamaların en az %20 'sinin genomik olarak test edilmiş genç boğalarla yapılması durumunda, döl kontrolünün tamamen terk edilmesi şartıyla, işletmelerde inek başına elde edilen net iskontolu karın 2,59 kata kadar artabileceğini göstermektedir (König vd., 2009).

3. 2 Etçi Sığır Islahı, Kombine Irk Dinamikleri ve Besi Ekonomisi

Genomik seleksiyon süt sığırcılığında çok hızlı bir şekilde tabana yayılmış olsa da etçi sığır endüstrisinde bu adaptasyon süreci daha yavaş ve zorlu olmuştur (Li, 2024); (Berry vd., 2016); (Esrafili Taze Kand Mohammaddiyeh vd., 2023b); (Berry vd., 2016).Bunun temel nedenleri, etçi sığırcılığın daha düşük kâr marjıyla çalışması, teknolojik gelişimlere adaptasyon oranlarının düşüklüğü ve sektörel yapının farklılığıdır (Berry vd., 2016). Süt sığırcılığında küresel düzeyde tek bir ırk (Holstein) baskın durumdayken ve etkin popülasyon boyutu oldukça sınırlıyken (N_e<100); etçi sığırcılıkta çok sayıda saf İngiliz ve Avrupa kökenli Taurine ırklar (Angus, Hereford, Limuzin, Şarole), tropikal çevreye uyumlu *Bos indicus* hatları (Nellore, Brahman) ile çeşitli kompozit/melez ırklar (Brangus, Braford, Senepol, Bonsmara, Montana) bir arada kullanılmaktadır (Berry vd., 2016). Taurine (*Bos taurus*) ve Indicine (*Bos indicus*) sığırları arasındaki genomik farklılıklar, tek bir ırk için geliştirilen GDD tahmin denklemlerinin diğer ırklarda veya melezlerde kullanıldığında doğruluğunun sıfıra yaklaşmasına, hatta negatif korelasyon göstermesine neden olmaktadır(Esrafili Taze Kand Mohammaddiyeh vd., 2023b); (Berry vd., 2016). Ayrıca etçi sığırcılıkta suni tohumlama kullanımının düşüklüğü, sürüler arasındaki genetik bağlantıyı ve akrabalık derecelerini zayıflatmaktadır (Berry vd., 2016);

(Esrafili Taze Kand Mohammaddiyeh vd., 2023b). Bu durum, genomik seleksiyon uygulamalarında her ırk için özel ve daha büyük referans popülasyonlarının kurulmasını zorunlu hale getirmektedir (Berry vd., 2016).

Etçi sığırlar için yapılan genomik seleksiyon referans popülasyonu çalışmalarında, tek adımlı genomik BLUP (Single-step GBLUP/ssGBLUP) yöntemi en pratik çözüm olarak öne çıkmaktadır (Esrafili Taze Kand Mohammaddiyeh vd., 2023b). ssGBLUP yöntemi, soyağacı ilişkilerini (A matrisi) ve genomik ilişkileri (G matrisi) tek bir birleşik matriste harmanlayarak, genotiplemesi yapılmamış fakat fenotipi kaydedilmiş ticari hayvanların da değerlendirmeye dahil edilmesine ve referans populasyonunun genişlemesine olanak tanır (Esrafili Taze Kand Mohammaddiyeh vd., 2023b). Hoze ve arkadaşlarının çalışması, birden fazla ırkı kapsayan bir referans popülasyonu kullanmanın, tek ırklı bir referans grubuna güvenmeye kıyasla tahminlerin doğruluğunda %2,9'luk bir iyileşmeye yol açtığını göstermektedir (Jin vd., 2024).

Etçi sığırların karkas özelliklerinin genomik tahmin doğruluğunu artırmak için de araştırmalar yapılmıştır. Ancak, genomik seleksiyon ve BLUP yönteminin bu alanda tahmin doğruluğunu arttırmadaki rolü sınırlı bulunmuştur (Zhou vd., 2025). Takeda ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmanın sonuçlarına göre karkas özelliklerini genomik seleksiyonu tabi tutabilmek için 7000-11000 hayvanlık bir referans popülasyonu gerekmektedir (Takeda vd., 2021).

Bununla birlikte, entegre safkan ve ticari besi sistemlerinde 30 yıllık kümülatif net bugünkü değer (CNPV) analizleri; genomik bilginin (örneğin 25K SNP panelleri) ve ticari fenotiplerin sisteme eklenmesinin genetik ilerleme hızını artırarak yıllık bazda baş başına 11,91 dolarlık bir kazanç sağladığını, ancak genotipleme ve veri toplama maliyetlerinin yüksekliği sebebiyle yatırımların geri dönüş süresini 12 yıldan 18-19 yıla kadar uzatabildiğini göstermektedir (Buchanan vd., 2018).

3.3 Türkiye'de Sığır Islahında Genomik Seleksiyon

Türkiye, hayvancılık sektöründe dışa bağımlılığı azaltmak, yerli damızlık boğa ihtiyacını karşılamak ve ülke şartlarına uyum sağlamış sığır popülasyonları geliştirmek amacıyla genomik seleksiyon çalışmalarını stratejik bir düzeye taşımıştır (*GENOMİK TEST MERKEZİ*, t.y.) . Bu vizyonun operasyonel merkezi, Ankara Mamak'ta yer alan Lalahan Uluslararası Hayvancılık Araştırma ve Eğitim Merkezi Müdürlüğü bünyesinde faaliyete geçirilen Genomik Test Merkezi Laboratuvarı'dır (*GENOMİK TEST MERKEZİ*, t.y.).

Genomik Test Merkezi Laboratuvarı'nda, sığır, keçi ve diğer çiftlik hayvanlarından elde edilen materyaller, SNP genotiplendirme micro-array teknolojisi kullanılarak hayvanların genomik haritaları çıkarılmaktadır (*GENOMİK TEST MERKEZİ*, t.y.).

Bu laboratuvarda yürütülen en önemli ulusal ıslah çalışması, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü (TAGEM), Hayvancılık Genel Müdürlüğü (HAYGEM) ve Türkiye Damızlık Sığır Yetiştiricileri Merkez Birliği (TDSYMB) iş birliğiyle yürütülen Siyah Alaca ve Simental Sığırlarda Genomik Damızlık Değer Tespiti (GDD) Projesi'dir (*GENOMİK TEST MERKEZİ*, t.y.); (*Genomik Seleksiyon Projesi – Bursa İli Damızlık Sığır Yetiştiricileri Birliği*, t.y.). 2017 yılında Siyah Alaca (Holstein) ırkı sığırlarla başlayan bu projenin devamı ve Simental ırkına da başarıyla uygulanması 2022-2024 (ve 2025 yılı uzantılı) dönemde hayata geçirilmiştir (*Genomik Seleksiyon Projesi – Bursa İli Damızlık Sığır Yetiştiricileri Birliği*, t.y.).

Bu kapsamda suni tohumlama üretim merkezlerinde bulunan boğaların genomik testlerinin yapılması ve damızlık değerlerinin hesaplanması amacıyla üretim merkezleri ile TDSYMB arasında resmi protokoller imzalanmıştır (*HAYGEM "Ülkesel Genomik Seleksiyon Projesini" hayata geçiriyor.*, t.y.). Ayrıca, Ankara Keçisi'nde "Genomik Damızlık Değer Tespiti" çalışmaları da aynı merkez bünyesinde yürütülmektedir (*GENOMİK TEST MERKEZİ*, t.y.).

Saha entegrasyonunu hızlandırmak ve yetiştiricileri teşvik etmek amacıyla Tarım ve Orman Bakanlığı, genomik test yaptıran işletmelere yönelik doğrudan buzağı desteklemesi uygulamaktadır (*TEBLİĞ - İZMİR İLİ DAMIZLIK KOYUN KEÇİ YETİŞTİRİCİLERİ BİRLİĞİ*, t.y.). Resmi tebliğler doğrultusunda belirlenen güncel genomik test destekleme şartları şunlardır (*TEBLİĞ - İZMİR İLİ DAMIZLIK KOYUN KEÇİ YETİŞTİRİCİLERİ BİRLİĞİ*, t.y.).;

Buzağının doğduğu işletmenin, ilgili yılın ocak ayında belirlenen soy kütüğü sınıflandırmasına göre A veya B sınıfı olması gerekmektedir.

Buzağının kendi damızlık kütüğü sınıfının da benzer şekilde A veya B sınıfı olması şarttır [30].

Test edilecek buzağının ırkı Siyah-Alaca (Holstein) olmalıdır.

Genomik değer tespiti (numune alımı ve analiz süreci), buzağı henüz doğduğu işletmeden ayrılmadan önce gerçekleştirilmelidir.

Desteklemelerin adil dağıtımı ve bütçe sınırları çerçevesinde, tek bir işletmede yıllık en fazla 100 baş buzağı için genomik test destekleme ödemesi yapılmaktadır.

Genomik Seleksiyon ülkemiz için yeni bir saha olup, günümüzde bu alanda sınırlı çalışmalar yürütülmektedir.

SONUÇ

3.1 Gelecek Perspektifleri: Yapay Zekâ ve CRISPR/Cas9

Genomik seleksiyon teknolojisi, mevcut doğrusal istatistiksel modellerin sınırlarını aşarak yapay zekâ algoritmaları ve Kümelenmiş Düzenli Aralıklarla Sıralanmış Kısa Palindromik Tekrarlar/ CRISPR ile ilişkili protein 9 (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats /CRISPR/Cas9) genom düzenleme tekniği ile entegre olmaktadır (Boktar, 2025); (Xue vd., 2022); (*Application of Gene Editing Technology in Livestock: Progress, Challenges, and Future Perspectives*, t.y.).

3.1.1 Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi Entegrasyonu

Geleneksel GBLUP modelleri, tüm SNP'lerin genom boyunca doğrusal ve eklemeli etkilere sahip olduğunu varsayar; bu durum dominantlık, epistasi ve gen-çevre etkileşimleri gibi doğrusal olmayan karmaşık genetik mekanizmaların ıskalanmasına yol açar (Chai vd., 2026); (Hay, 2024); (Zheng vd., 2025). Makine Öğrenimi (ML) ve Derin Öğrenme (DL) mimarileri (Rastgele Orman- RF, Destek Vektör Regresyonu- SVR, Çekirdek Ridge Regresyonu- KRR, Çok Katmanlı Perceptronlar- MLP ve Evrişimli Sinir Ağları- CNN), yüksek boyutlu SNP verilerini modellemede ve doğrusal olmayan genetik etkileri yakalamada üstün esneklik sunmaktadır (Chai vd., 2026); (Hay, 2024); (Pedrosa vd., 2024).

Sığırlarda ve diğer çiftlik hayvanlarında yürütülen karşılaştırmalı çalışmalarda, makine öğrenimi yöntemlerinin tahmin doğruluğu açısından geleneksel yöntemlere kıyasla önemli kazanımlar sağladığı bildirilmiştir (Xue vd., 2022);(Zheng vd., 2025). 5 katlı çapraz doğrulama (cross-validation) çalışmalarında makine öğrenimi algoritmaları; klasik GBLUP modelinin doğruluğunu %19,3, ssGBLUP modelini %15 ve Bayes modellerini %20,8 oranında iyileştirmiştir (Xue vd., 2022). Özellikle Adaboost.R2_KRR algoritması, genç bireylerin damızlık değer tahminlerinde en yüksek performansı göstermiştir (Xue vd., 2022). ML modellerinde parametrelerin ince ayarının yapılması (hyperparameter tuning), tahmin doğruluğunu varsayılan ayarlara kıyasla %14,3 ila %21,8 oranında artırmaktadır (Xue vd., 2022).

Çin'de yürütülen ve 16.122 başlık Holstein referans popülasyonunu kapsayan araştırmalarda, Bayes modelinin en yüksek tahmin doğruluğuna (0.625) ulaştığı, SVR (0.755), KRR (0.743) ve derin öğrenme tabanlı DPAnet (0.741) modellerinin ise tip özellikleri gibi karmaşık dış görünüş karakterlerinde ilk üç sırayı paylaştığı belirlenmiştir (Zheng vd., 2025). Ancak, bu gelişmiş yapay zekâ modelleri, klasik GBLUP modeline göre ortalama 6 kat daha fazla hesaplama süresi gerektirmekte ve genotiplemesi yapılmamış akrabaların değerlendirilmesinde ciddi zorluklar barındırmaktadır (Zheng vd., 2025); (Pedrosa vd., 2024). Bu nedenle, ticari ıslah programlarında doğrusal modeller kararlılıkları ve hızları sebebiyle halen ana omurgayı oluşturmaktadır (Chai vd., 2026); (Zheng vd., 2025).

3.1.2 CRISPR/Cas9

CRISPR/Cas9 teknolojisi, sığırların genomunda hedef dışı (off-target) etki yaratmadan, tek bir nükleotit düzeyinde değişiklik yapılmasına, zararlı resesif genlerin susturulmasına (knock-out) veya başka bir ırktan istenen yararlı bir alelin melezleme engeli (linkage drag) olmadan aktarılmasına olanak tanır (Choi vd., 2025); (Camargo vd., t.y.); (Lee vd., 2020). Bu teknoloji, doğal seleksiyonla nesiller boyu sürecek olan frekans artışlarını tek bir generasyonda gerçekleştirebilmektedir (Boktar, 2025); (Choi vd., 2025); (Van Eenennaam & Young, 2019a).

Sığırlarda CRISPR/Cas9 ile gerçekleştirilen ve ticari kullanım/regülasyon onayı alan başlıca somut uygulamalar şunlardır (Choi vd., 2025); (*Gene Editing in Beef Cattle*, t.y.).:

Slick Hair (Kısa Kıl) Adaptasyonu: Sıcaklık stresine maruz kalan tropikal bölgelerdeki Avrupa kökenli sütçü sığırlar için prolaktin reseptörü genine yapılan müdahaleyle, yüksek termotoleransa sahip kısa kıllı "SLICK" sığır hatları geliştirilmiş ve Mart 2022'de ticari kullanım onayı almıştır (Choi vd., 2025);(Camargo vd., t.y.); (*Gene Editing in Beef Cattle*, t.y.).

Boynuzsuzluk (Polled) Entegrasyonu: Süt sığırcılığında hayvan refahını olumsuz etkileyen boynuz köreltme işlemine son vermek amacıyla, etçi sığırlardan alınan boynuzsuzluk aleli, sütçü Holstein boğaların genotipine başarıyla yerleştirilmiştir (Van Eenennaam & Young, 2019b); (*Gene Editing in Beef Cattle*, t.y.).

Miyostatin (MSTN) Susturulması: Kas gelişimini negatif yönlü denetleyen miyostatin geninin susturulmasıyla, etçi sığırlarda karkas et randımanı ve kas kütlesi radikal biçimde artırılmıştır (Choi vd., 2025); (*Gene Editing in Beef Cattle*, t.y.).

BVDV Direnci: Sığır Viral Diyare Virüsüne (Bovine Viral Diarrhea Virus/ BVDV) karşı duyarlılığı önemli ölçüde azaltılmış ilk genom düzenlemeli buzağı başarıyla üretilmiştir (*Gene Editing in Beef Cattle*, t.y.).

Genom düzenleme teknolojisi, geleneksel ıslah programlarının yerini alan bir alternatif değil; onları hızlandıran tamamlayıcı bir sinerjik araçtır (Camargo vd., t.y.); (Van Eenennaam & Young, 2019b). Genomik seleksiyon ile en yüksek GDD değerine sahip elit embriyolar seçilmekte, ardından bu embriyolara CRISPR/Cas9 ile hastalık direnci veya sıcaklık toleransı gibi tek gen karakterleri yerleştirilmektedir (Camargo vd., t.y.); (*Gene editing in livestock: promise, prospects and policy. | CABI Reviews*, t.y.). Bu süreçlerin ticari sahaya aktarılması için somatik hücre nükleer transferi (klonlama) veya in-vitro fertilizasyon (IVF) laboratuvarlarının kullanılması, üretilen embriyolardan biyopsi alınarak genomik değerlendirmelerin transfer öncesinde yapılması gerekmektedir (Camargo vd., t.y.); (*Frontiers | Genomic Selection and Use of Molecular Tools in Breeding Programs for Indigenous and Crossbred Cattle in Developing Countries: Current Status and Future Prospects*, t.y.). Matematiksel modellemeler, genomik seleksiyon ile CRISPR kombinasyonunun, 20 yıllık bir süre sonunda tek başına genomik seleksiyon uygulanan sürüye kıyasla genetik ilerleme hızını tam 4 kat artırabileceğini göstermektedir (Camargo vd., t.y.); (*Gene editing in livestock: promise, prospects and policy. | CABI Reviews*, t.y.).

3.2 Genel Değerlendirme ve Küresel Mevcut Durum

Genomik seleksiyon teknolojisi gelişmiş ülkelerde sığır endüstrisinin standart bir uygulaması haline gelmişken, küçük aile işletmelerinin ve kısıtlı bütçeli yetiştirici birliklerinin yoğunlukta olduğu gelişmekte olan ülkelerde farklı adaptasyon stratejileri uygulanmaktadır. [5, 41]. Gelişmekte olan ülkelerde kurulan referans popülasyonları genellikle daha küçük (500 ila 3.000 inek) ve çoğunlukla dişi hayvanlardan oluşmaktadır (*Frontiers | Genomic Selection and Use of Molecular Tools in Breeding Programs for Indigenous and Crossbred Cattle in Developing Countries: Current Status and Future Prospects*, t.y.). Bu ülkeler, yurt dışından ithal edilen elit dondurulmuş spermaların (genomik olarak onaylanmış yabancı boğaların) kendi yerel popülasyonlarında kullanılmasından büyük ölçüde fayda sağlamaktadır (*Frontiers | Genomic Selection and Use of Molecular Tools in Breeding Programs for Indigenous and Crossbred Cattle in Developing Countries: Current Status and Future Prospects*, t.y.). Ayrıca, genomik seleksiyonda kullanılan yüksek yoğunluklu çiplerin yüksek maliyetini tolere edebilmek için, genç hayvanların düşük yoğunluklu ucuz çiplerle taranması ve ardından biyoinformatik "imputation" (doldurma) yazılımlarıyla yüksek yoğunluklu çipler düzeyine yükseltilmesi stratejisi uygulanmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde yapılan çalışmalarda, imputation işlemlerinde %74 ila %99 arasında değişen son derece yüksek doğruluk oranları elde edilmiş olup, bu yaklaşım genomik seleksiyonun maliyet etkinliğini artırarak sahada uygulanabilirliğini kolaylaştırmaktadır (*Frontiers | Genomic Selection and Use of Molecular Tools in Breeding Programs for Indigenous and Crossbred Cattle in Developing Countries: Current Status and Future Prospects*, t.y.); (Berry vd., 2016).

KAYNAKLAR

Application of Gene Editing Technology in Livestock: Progress, Challenges, and Future Perspectives. (t.y.). Geliş tarihi 05 Haziran 2026, gönderen https://www.mdpi.com/2077-0472/15/20/2155

Berry, D. P., Garcia, J. F., & Garrick, D. J. (2016). Development and implementation of genomic predictions in beef cattle. *Animal Frontiers*, *6*(1), 32-38. https://doi.org/10.2527/af.2016-0005

Boktar, M. (2025). Revolutionizing Animal Breeding: Quantifying the Impact of Genomic Selection, CRISPR, and Artificial Intelligence on Animal Breeding. *Animal Reports*, *1*, 100-117. https://doi.org/10.64636/ar.22

Brito, L. F., Schinckel, A. P., & Rojas de Oliveira, H. (2025). Genomics and phenomics: Who will be the dairy cows of the future? *JDS Communications*, *6*(Suppl 1), S23-S30. https://doi.org/10.3168/jdsc.2025-0872

Buchanan, J. W., MacNeil, M. D., Raymond, R. C., Nilles, A. R., & Van Eenennaam, A. L. (2018). Comparison of economic returns among genetic evaluation strategies in a 2-tiered Charolais-sired beef cattle production system,. *Journal of Animal Science*, *96*(10), 4076-4086. https://doi.org/10.1093/jas/sky286

Camargo, L. S. A., Saraiva, N. Z., Oliveira, C. S., Carmickle, A., Lemos, D. R., Siqueira, L. G. B., & Denicol, A. C. (t.y.). Perspectives of gene editing for cattle farming in tropical and subtropical regions. *Animal Reproduction*, *19*(4), e20220108. https://doi.org/10.1590/1984-3143-AR2022-0108

CDCB - Genomic Effect. (t.y.). Geliş tarihi 05 Haziran 2026, gönderen https://uscdcb.com/genomic-impact/

Chai, H., Yang, Y., Wang, D., Ning, C., Zhang, X., Wang, W., Zhang, Q., Bao, H., & Tang, H. (2026). Comparative Accuracy of Machine Learning and GBLUP for Predicting Genomic Estimated Breeding Values in Chickens. *Genes*, *17*(3), 315. https://doi.org/10.3390/genes17030315

Choi, W., Lee, J., An, S., Wright, M., Deng, Z., & Lee, K. (2025). Advances and Challenges in Genome-Edited Livestock for Meat Production: A Review. *Meat and Muscle Biology*, *9*(1). https://doi.org/10.22175/mmb.20133

CRISPR in Agriculture. (t.y.). *Innovative Genomics Institute (IGI)*. Geliş tarihi 05 Haziran 2026, gönderen https://innovativegenomics.org/crisprpedia/crispr-in-agriculture/

Esrafili Taze Kand Mohammaddiyeh, M., Rafat, S. A., Shodja, J., Javanmard, A., & Esfandyari, H. (2023a). Selective genotyping to implement genomic selection in beef cattle breeding. *Frontiers in Genetics*, *14*, 1083106. https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1083106

Esrafili Taze Kand Mohammaddiyeh, M., Rafat, S. A., Shodja, J., Javanmard, A., & Esfandyari, H. (2023b). Selective genotyping to implement genomic selection in beef cattle breeding. *Frontiers in Genetics*, *14*. https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1083106

Frontiers | Genomic Selection and Use of Molecular Tools in Breeding Programs for Indigenous and Crossbred Cattle in Developing Countries: Current Status and Future Prospects. (t.y.). Geliş tarihi 05 Haziran 2026, gönderen https://www.frontiersin.org/journals/genetics/articles/10.3389/fgene.2018.00694/full

Gene editing in beef cattle. (t.y.). Beef Magazine. Geliş tarihi 05 Haziran 2026, gönderen https://www.beefmagazine.com/cattle-genetics/gene-editing-in-beef-cattle

Gene editing in livestock: Promise, prospects and policy. | CABI Reviews. (t.y.). Geliş tarihi 05 Haziran 2026, gönderen https://www.cabidigitallibrary.org/doi/abs/10.1079/PAVSNNR201813027

Genomik Seleksiyon Projesi – Bursa İli Damızlık Sığır Yetiştiricileri Birliği. (t.y.). Geliş tarihi 05 Haziran 2026, gönderen https://www.bursadsyb.org.tr/genomik-seleksiyon-projesi/

GENOMİK TEST MERKEZİ. (t.y.). Geliş tarihi 05 Haziran 2026, gönderen https://arastirma.tarimorman.gov.tr/lalahanhmae/Menu/130/Genomik-Test-Merkezi

Hay, E. H. (2024). Machine Learning for the Genomic Prediction of Growth Traits in a Composite Beef Cattle Population. *Animals : an Open Access Journal from MDPI*, *14*(20), 3014. https://doi.org/10.3390/ani14203014

HAYGEM "Ülkesel Genomik Seleksiyon Projesini" hayata geçiriyor. (t.y.). Geliş tarihi 05 Haziran 2026, gönderen https://www.tarimorman.gov.tr/HAYGEM/Haber/193/Haygem-Ulkesel-Genomik-Seleksiyon-Projesini-Hayata-Geciriyor

Jin, L., Xu, L., Jin, H., Zhao, S., Jia, Y., Li, J., & Hua, J. (2024). Accuracy of Genomic Predictions Cross Populations with Different Linkage Disequilibrium Patterns. *Genes*, *15*(11), 1419. https://doi.org/10.3390/genes15111419

König, S., Simianer, H., & Willam, A. (2009). Economic evaluation of genomic breeding programs. *Journal of Dairy Science*, *92*(1), 382-391. https://doi.org/10.3168/jds.2008-1310

Lee, K., Uh, K., & Farrell, K. (2020). Current progress of genome editing in livestock. *Theriogenology*, *150*, 229-235. https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.01.036

Li, J. (2024). Impact of Genomic Selection on Fertility Traits in Beef Cattle. *International Journal of Molecular Zoology*, *14*(0). https://animalscipublisher.com/index.php/ijmz/article/view/3848

Louella. (2024, Ağustos 27). Talking Genomics: The Benefits of Genomic Selection. *Neogen Australasia: Solutions for Livestock & Food Safety*. https://neogenaustralasia.com.au/talking-genomics-benefits-of-genomic-selection/

Özbeyaz, C., & Kocakaya, A. (2011). SÜT SIĞIRLARINDA GENOMİK DEĞERLENDİRME (DERLEME). *Lalahan Hayvancılık Araştırma Enstitüsü Dergisi*, *51*(2), 93-104.

Pedrosa, V. B., Chen, S.-Y., Gloria, L. S., Doucette, J. S., Boerman, J. P., Rosa, G. J. M., & Brito, L. F. (2024). Machine learning methods for genomic prediction of cow behavioral traits measured by automatic milking systems in North American Holstein cattle. *Journal of Dairy Science*, *107*(7), 4758-4771. https://doi.org/10.3168/jds.2023-24082

Say, E., & Altun, E. (2021). Sığırlarda Genomik Seleksiyon. *International Journal of Eastern Mediterranean Agricultural Research*, *4*(1), 60-67.

Takeda, M., Inoue, K., Oyama, H., Uchiyama, K., Yoshinari, K., Sasago, N., Kojima, T., Kashima, M., Suzuki, H., Kamata, T., Kumagai, M., Takasugi, W., Aonuma, T., Soma, Y., Konno, S., Saito, T., Ishida, M., Muraki, E., Inoue, Y., … Uemoto, Y. (2021). Exploring the size of reference population for expected accuracy of genomic prediction using simulated and real data in Japanese Black cattle. *BMC Genomics*, *22*, 799. https://doi.org/10.1186/s12864-021-08121-z

TEBLİĞ - İZMİR İLİ DAMIZLIK KOYUN KEÇİ YETİŞTİRİCİLERİ BİRLİĞİ. (t.y.). TEBLİĞ - İZMİR İLİ DAMIZLIK KOYUN KEÇİ YETİŞTİRİCİLERİ BİRLİĞİ. Geliş tarihi 05 Haziran 2026, gönderen https://www.izmirkoyunkeci.com/kurumsal/teblig

Van Eenennaam, A. L., & Young, A. E. (2019a). Gene editing in livestock: Promise, prospects and policy. *CABI Reviews*, *2018*, 1-14. https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201813027

Van Eenennaam, A. L., & Young, A. E. (2019b). Gene editing in livestock: Promise, prospects and policy. *CABI Reviews*, *2018*, 1-14. https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201813027

Weicks-Webmaster. (2025a, Temmuz 3). Importance of Genomics for Genetic Improvement in Dairy Cows. *American Dairymen*. https://americandairymen.com/importance-of-genomics-for-genetic-improvement-in-dairy-cows/

Weicks-Webmaster. (2025b, Kasım 24). Importance of Genetic Selection in Dairy. *American Dairymen*. https://americandairymen.com/importance-of-genetic-selection-in-dairy-cattle/

Weicks-Webmaster. (2025c, Kasım 24). Importance of Genetic Selection in Dairy. *American Dairymen*. https://americandairymen.com/importance-of-genetic-selection-in-dairy-cattle/

Wiggans, G. R., & Carrillo, J. A. (2022). Genomic selection in United States dairy cattle. *Frontiers in Genetics*, *13*, 994466. https://doi.org/10.3389/fgene.2022.994466

Xue, W., Shi, S., Wang, G., Luo, W., Wei, X., Qiu, A., Luo, F., & Ding, X. (2022). Using machine learning to improve the accuracy of genomic prediction of reproduction traits in pigs. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, *13*. https://doi.org/10.1186/s40104-022-00708-0

Zheng, W., Zhang, Q., He, J., Han, B., Zhang, Q., & Sun, D. (2025). Comparative evaluation of SNP-weighted, Bayesian, and machine learning models for genomic prediction in Holstein cattle. *BMC Genomics*, *26*, 1037. https://doi.org/10.1186/s12864-025-12218-0

Zhou, L., Zhu, L., Chang, C., Ma, F., Liu, Z., Gu, M., Na, R., & Zhang, W. (2025). Weighted GBLUP in Simulated Beef Cattle Populations: Impact of Reference Population, Marker Density, and Heritability. *Animals*, *15*(8), 1118. https://doi.org/10.3390/ani15081118

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Women in Beekeeping: Challenges, Opportunities and Future Perspectives

Mustafa GÜNEŞDOĞDU[1]
İsmail Yaşhan BULUŞ[2]

Abstract

Beekeeping is an important agricultural activity that contributes significantly to biodiversity conservation, pollination services, and rural economies through the production of honey and other valuable bee products. Although agriculture is often perceived as a male-dominated sector, women make substantial contributions to agricultural production worldwide. However, women's participation in beekeeping remains limited due to various socio-economic, physical, and cultural barriers. In Türkiye, women represent a relatively small proportion of registered beekeepers despite the country's high apicultural potential. Factors limiting women's participation include the physical demands of migratory beekeeping, concerns related to safety in remote apiary locations, limited access to training and financial resources, and traditional gender roles. Increasing women's involvement in beekeeping could contribute significantly to rural development and economic sustainability. Women can play an important role, particularly in the production and value-added processing of non-traditional bee products such as royal jelly, pollen, propolis, bee venom, perga, and apilarnil. Supporting women through education, institutional incentives, cooperative structures, and marketing opportunities can strengthen both gender equality and the beekeeping sector.

Keywords: Beekeeping, beekeeper, gender equality, rural development, apiculture

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Muş Alparslan Üniversitesi, Hayvansal Üretim ve Teknolojileri Bölümü, Orcıd: https://orcid.org/0000-0003-2786-520X
[2] Dr. Öğr. Üyesi, Muş Alparslan Üniversitesi, Hayvansal Üretim ve Teknolojileri Bölümü, Orcıd: https://orcid.org/0000-0003-4418-588X

Introduction

Bees and other pollinator insects play a crucial role in maintaining the diversity and sustainability of both natural and cultivated plant ecosystems. Among pollinating insects, honey bees are considered one of the most effective groups due to their essential contribution to pollination services (Kearns et al., 1998; Klein et al., 2007; Güneşdoğdu and Akyol, 2019). Beekeeping is an important agricultural activity that produces valuable products such as honey, pollen, royal jelly, and propolis, which have been used by humans for many years because of their nutritional and pharmacological properties (Şahin et al., 2021; Gülbin Gökdemir and Güneşdoğdu, 2023). In addition to supplying products beneficial to human health, beekeeping contributes significantly to national economies through enhanced agricultural productivity resulting from pollination services (Güneşdoğdu and Akyol, 2019).

Beekeeping is practiced throughout Türkiye due to its favorable ecological conditions and its importance as a source of income, particularly in rural areas where employment opportunities are limited (Akyol and Korkmaz, 2005). Compared with other livestock production sectors, beekeeping is considered an attractive agricultural activity because it requires relatively low initial investment, is easier to manage on a small scale, and provides products with relatively long shelf life (Çelik and Turhan, 2014). A beekeeper is an individual who undertakes innovative initiatives, assumes risks, and actively contributes to apicultural production. For women, engagement in beekeeping represents not only an economic activity but also an opportunity to achieve financial independence, social participation, and personal empowerment. According to the Turkish Statistical Institute (TUIK), the employment rate of women in Türkiye is approximately 30%, whereas this figure is around 60% in European Union (EU) countries. This disparity indicates that many women working in rural agricultural sectors remain underrepresented, unregistered, or excluded from formal social security systems (Anonymous, 2021). Women's increasing participation in entrepreneurship reflects their efforts to challenge traditional gender roles and promote gender equality. Their greater visibility in sectors such as beekeeping is important for demonstrating that women can successfully contribute to and lead agricultural enterprises, thereby encouraging broader social acceptance of women's entrepreneurship (Ünsal, 2019).

Differences in Gender Participation in Beekeeping

The concept of women's entrepreneurship has been widely discussed in the literature due to the historical perception of entrepreneurship as a predominantly male domain. This perception is reinforced by male dominance in business environments, traditional role divisions between men and women, and the social expectation that family and professional responsibilities should remain separate (Ahl, 2006). Previous studies indicate that differences between male and female entrepreneurs are often associated with variables such as education level, age, income, access to resources, and social support networks. In beekeeping, these differences are reflected not in capability, but in access to opportunities, institutional support, and societal expectations. Women often face additional challenges when entering agricultural enterprises, yet they frequently demonstrate strong organizational skills, persistence, and innovative approaches to production and marketing. These characteristics create significant potential for women to contribute to the modernization and diversification of the beekeeping sector. The concept of gender extends beyond biological differences and refers to the socially

constructed roles, responsibilities, and expectations assigned to individuals based on sex (Nalbant and Korkmaz, 2019). These socially defined roles significantly influence women's participation in economic activities and often determine which occupations are considered socially acceptable for women. One of the most significant barriers affecting women's participation in agriculture is the persistence of traditional gender norms. These norms shape perceptions regarding suitable professions and leadership roles for women and men, often limiting women's access to decision-making positions, financial resources, technical education, and entrepreneurial opportunities (Örücü et al., 2007). As a result, women remain underrepresented in many sectors of agriculture despite their substantial contributions to rural production systems. Addressing gender inequality in agriculture requires institutional support, policy development, educational opportunities, and social awareness initiatives that promote equal participation and access to resources.

Women and Beekeeping in Türkiye

Beekeeping is practiced throughout Türkiye due to its diverse ecological conditions, rich floral resources, and varying geographical altitudes. Although honey production remains the most recognized output of the sector, numerous other valuable bee products, including pollen, perga, propolis, apilarnil, and bee venom, also offer important economic opportunities. Despite this potential, beekeeping is still widely perceived as a male-dominated agricultural activity. According to data from the Central Beekeepers Association of Türkiye, only 6.8% of the 123,643 registered members are women (Halifeoğlu and Esen, 2022). This low participation rate reflects multiple structural and social barriers. The primary challenges limiting women's participation include fear of bee stings, physical difficulties associated with transporting colonies and equipment, safety concerns in isolated rural areas, and limited access to social and technical support. Similar barriers have been reported in studies conducted in different countries, highlighting that women's limited participation in beekeeping is a global issue rather than a region-specific phenomenon (Taksi Deveciyan, 2023; Olana and Demrew, 2018; Mburu et al., 2017; Pocol and McDonough, 2015). However, women possess significant potential to contribute to sustainable apiculture, particularly in stationary beekeeping systems, value-added processing, niche bee product production, and digital marketing. Figure 1 illustrates the current and potential roles of women in sustainable beekeeping practices.

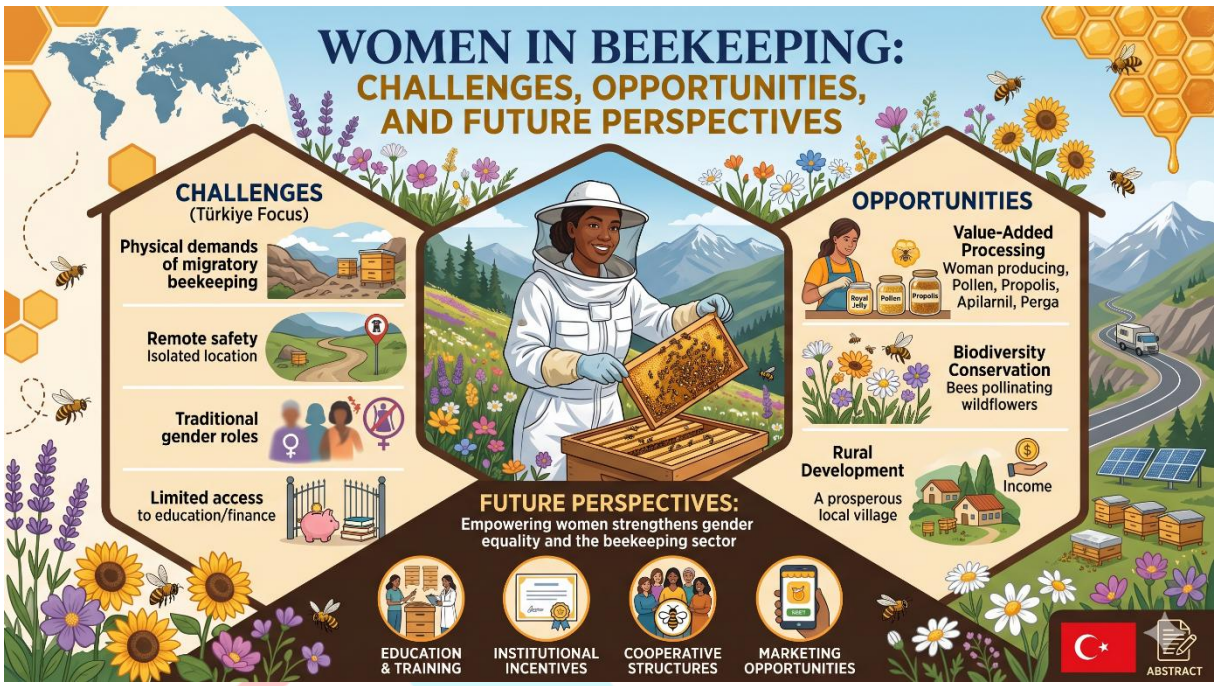


Figure 1. *Representation of Women in Beekeeping*

Future Perspectives for Women in Beekeeping

The future of women's participation in beekeeping depends on creating inclusive systems that facilitate access to education, financial support, cooperative structures, and technological innovation. Emerging opportunities such as precision beekeeping technologies, digital product marketing, cooperative-based production systems, and increasing consumer demand for specialized bee products offer important prospects for women entrepreneurs. Women can play a leading role in the production and commercialization of high-value products such as royal jelly, propolis-based cosmetics, medicinal bee products, and organic apicultural products. Strengthening women's representation in professional beekeeping organizations and promoting women-led beekeeping initiatives will contribute to both gender equality and the long-term sustainability of the apicultural sector.

Conclusion and Recommendations

Women have historically faced challenges in establishing themselves within the male-dominated beekeeping sector due to physical, social, and institutional barriers. Nevertheless, changing socio-economic conditions and growing awareness of gender equality are creating new opportunities for women in apiculture.

To increase women's participation and ensure long-term success, the following recommendations are proposed:

Expanding practical and technical beekeeping training programs for women

Encouraging innovation and continuous professional development

Starting with small-scale apiaries to build technical confidence and experience

Prioritizing stationary beekeeping systems where appropriate

Focusing on high-value bee products beyond honey and beeswax

Increasing access to governmental and institutional financial support

Promoting women-led cooperatives and knowledge-sharing networks

Strengthening digital marketing skills and online sales strategies

Greater participation of women in beekeeping will not only contribute to gender equality but will also enhance productivity, innovation, and sustainability in the apiculture sector.

References

Ahl, H. (2006). Why research on women entrepreneurs needs new directions. *Entrepreneurship Theory and Practice*, *30*(5), 595–621. https://doi.org/10.1111/j.1540-6520.2006.00138.x

Akyol, E., & Korkmaz, A. (2005). Biology of *Varroa destructor*, a honey bee (*Apis mellifera*) pest. *Uludag Bee Journal*, *5*, 122–127.

Çelik, Y., & Turhan, İ. (2014). Structural characteristics of beekeeping enterprises in Konya province. *Uludag Bee Journal*, *14*(1), 15–25.

Gülbin Gökdemir, F., & Güneşdoğdu, M. (2023). Investigation of the structure of beekeeping in Artvin province; Borcka example. *Kırşehir Ahi Evran University, Journal of the Institute of Natural and Applied Sciences*, *1*(2), 33–38.

Güneşdoğdu, M., & Akyol, E. (2019). A survey study to determine the sctructure of beekeeping in Adana province. *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology*, *7*(12), 2030–2037. https://doi.org/10.24925/turjaf.v7i12.2030-2037.2798

Halifeoğlu, M., & Esen, F. (2022). Local people's perspective on women's participation in working life and beekeeping sector, example of Bingöl province. *Fırat University Journal of Social Sciences*, *32*(3), 1141–1151. https://doi.org/10.32709/akususosbil.1023456 *(Not: Varsa bu makalenin güncel DOI numarasını kontrol edebilirsiniz).*

Kearns, C. A., Inouye, D. W., & Waser, N. M. (1998). Endangered mutualisms: The conservation of plant-pollinator interactions. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *29*(1), 83–112. https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.83

Klein, A. M., Vaissière, B. E., Cane, JH., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., & Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for World crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *274*(1608), 303–313. https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721

Mburu, P. D. M., Affognon, H., Irungu, P., Mburu, J., & Raina, S. (2017). Gender roles and constraints in beekeeping: A case from Kitui County, Kenya. *Bee World*, *94*(2), 54–59. https://doi.org/10.1080/0005772X.2017.1333276

Nalbant, F., & Korkmaz, T. (2019). Evaluation of gender equality in the context of Türkiye on the basis of feminist theory. *Artvin Çoruh University International Journal of Social Sciences*, *5*(2), 165–186. https://doi.org/10.31566/artsos.5.2.03

Olana, T., & Demrew, Z. (2018). The role of women in beekeeping activities and the contribution of bee-wax and honey production for livelihood improvement. *Livestock Research for Rural Development*, *30*(7), Article 118. http://www.lrrd.org/lrrd30/7/tades30118.html

Örücü, E., Kılıç, R., & Kılıç, T. (2007). Glass ceiling syndrome and barriers to advancement of women to senior managerial position: The example of Balikesir province. *Celal Bayar University I.I.B.F. Journal of Management and Economics*, *14*(2), 117–135.

Pocol, C. B., & McDonough, M. (2015). Women, apiculture, and development: Evaluating the impact of a beekeeping project on rural women's livelihoods. *Bulletin of the*

University of Agricultural Sciences & Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Horticulture, *72*(2), 350–358. https://doi.org/10.15835/buasvmcn-hort:11413

Şahin, A. E., Akdeniz, G., Şahin, P., & Alparslan, S. (2021). An online survey to determine breeding activities and main issues in Turkey's beekeeping enterprises. *Bee Studies*, *13*(2), 63–72. https://doi.org/10.48110/bstd.998495

Taksi Deveciyan, M. (2023). From heels to muddy plastic boots: Female entrepreneurship in male-dominated industries. *Istanbul University, Journal of Women's Studies*, *27*, 56–70. https://doi.org/10.26650/iujws.2023.1254321 *(Not: Derginin bu sayısı için ilgili DOI alanını kontrol edebilirsiniz).*

Turkish Statistical Institute. (2021). *Beekeeping statistics* (or specific dataset title). Retrieved March 2, 2024, from https://www.tuik.gov.tr/

Ünsal, P. (2019). Women entrepreneurs: Motivations, barriers and success factors. *Journal of Entrepreneurship Education*, *22*(6), 1–7.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Investigation of Carry-Over Component Strategy in Instrument Panel Architecture for Automotive Cockpit Development

Mesut Can DÖNDÜ[1]
Cem İÇİER[2]

Abstract

The instrument panel is one of the most complex subsystems in the automotive cockpit, integrating structural, functional, and aesthetic components within a highly constrained packaging environment. During new vehicle development projects, the reuse of carry-over components from previous platforms is widely adopted in order to reduce development time, engineering effort, and overall project cost. However, integrating carry-over components into a newly designed cockpit architecture introduces several engineering challenges related to packaging compatibility, structural integration, and system interfaces. This study investigates the implementation of carry-over component strategies in the instrument panel architecture of modern automotive cockpits. Particular attention is given to key cockpit components such as structural supports, trim elements, and functional modules that are frequently reused across vehicle programs. The research analyzes the engineering considerations required to integrate these components into new vehicle platforms while maintaining functional performance and meeting design constraints. The study evaluates the potential benefits and limitations of carry-over component utilization in terms of development efficiency, design flexibility, and system integration complexity. The findings highlight critical factors that influence the successful implementation of carry-over strategies within cockpit development processes. The results contribute to improved decision-making in early design phases and support more efficient development of automotive interior systems.

Keywords: Carry-Over Components, Instrument Panel, Cockpit Integration, Packaging Constraints, Automotive Interior Development.

[1] Researcher, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa, Türkiye, Orcıd: 0009-0005-9641-8579
[2] Researcher, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa, Türkiye, Orcıd: 0009-0007-0318-4297

1. INTRODUCTION

In today's automotive industry, new vehicle development processes are carried out within increasingly shorter timelines due to market competition, varying customer expectations, updated brand identities, and new regulatory requirements. This situation forces vehicle manufacturers to develop strategies aimed at reducing both engineering development time and project cost. Within this context, the reuse of previously developed and validated components in new vehicle projects has become one of the commonly preferred approaches in automotive development processes (Ulrich & Eppinger, 2016).

The instrument panel is considered a critical architectural structure that brings together multiple structural, functional, and aesthetic subsystems within the cockpit area. In this architecture, many subsystems such as the Cross Car Beam (CCB), HVAC module, steering column system, air ducts, front panel sheet metal interfaces, insulation components, glove box, mounting brackets, and load transfer regions are positioned within the same package volume. Although many of these components are not directly visible to customers, they have a direct influence on the positioning, mountability, perceived quality targets, and vehicle performance requirements of newly developed instrument panel aesthetic surfaces (Happian-Smith, 2001).

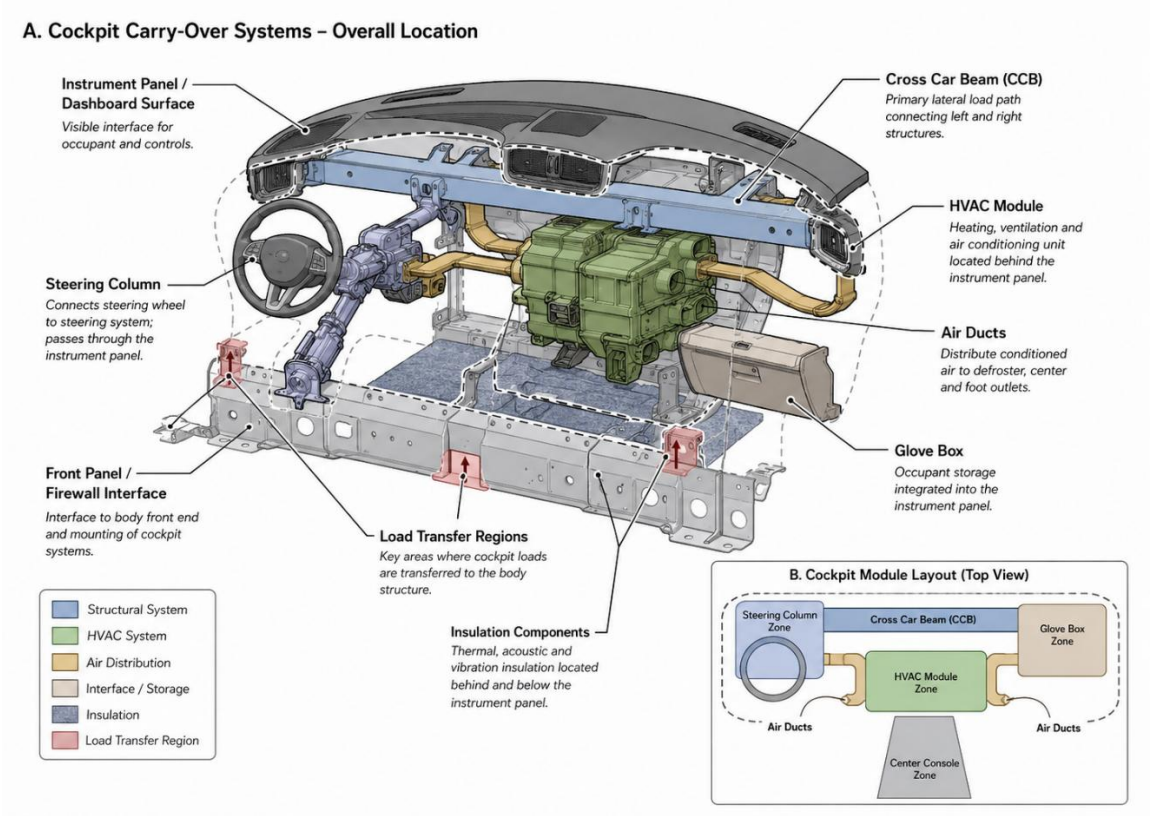


Figure 1. *General location relationship of instrument panel carry-over subsystems within the vehicle cockpit. The figure was schematically prepared by the authors to explain basic system relationships and does not contain design data from a specific vehicle platform.*

Carry-over strategies provide significant advantages especially for previously validated systems such as CCB structures, HVAC modules, steering column interfaces, and front panel sheet metal connections. Reusing such systems reduces the need for new component development, limits tooling investment, enables the use of supplier maturity, and helps optimize

the scope of validation activities. However, the carry-over approach should not be considered simply as transferring an existing component into a new project. New cockpit geometry, newly developed aesthetic surfaces, updated ergonomic targets, safety requirements, and package conditions may directly affect the integration capability of existing systems.

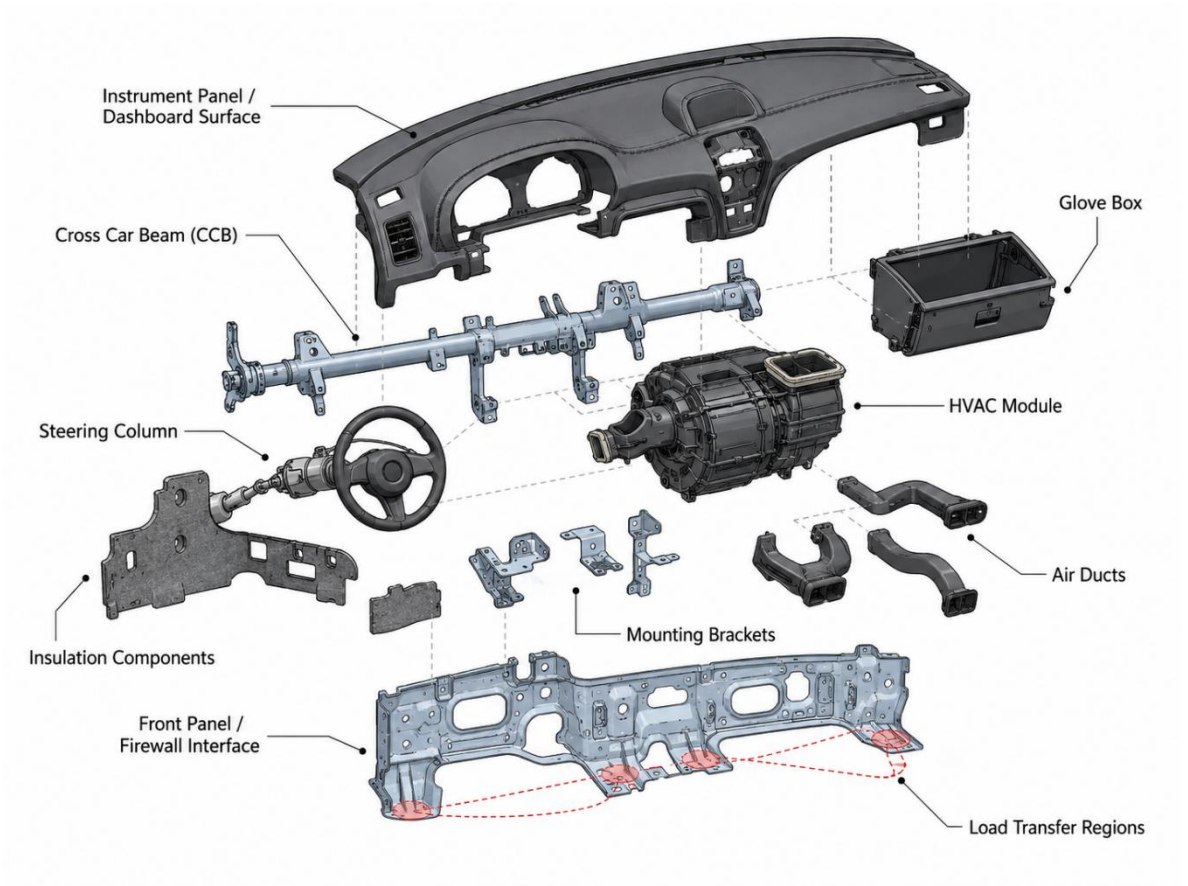


Figure 2. *Simplified exploded BOM representation of carry-over cockpit components. The figure was schematically prepared by the author to explain basic system relationships and does not contain design data from a specific vehicle platform.*

Virtual validation methods in automotive development processes contribute to identifying potential integration problems before the physical prototype stage. CAD-based package analyses, Digital Mock-Up (DMU) studies, tolerance evaluations, and mountability simulations support early-phase decisions regarding component compatibility, assembly feasibility, and system integration. Previous dashboard validation studies have also emphasized that packaging, GD&T, tolerance chain, and mountability analyses are essential parts of virtual validation processes before production release (Döndü & Eken, 2024).

The aim of this study is to examine the effects of carry-over component usage within instrument panel architecture on engineering validation processes and to evaluate the advantages and technical limitations of this approach in terms of development time, cost, validation scope, and system integration.

CARRY-OVER COMPONENTS IN INSTRUMENT PANEL ARCHITECTURE

Components evaluated as carry-over within instrument panel architecture are generally not directly visible to customers; however, they form the functional and structural basis of the

cockpit system. Even if these components are available for direct use in a new vehicle project, they should be re-evaluated together with surrounding components, vehicle body interfaces, aesthetic surfaces, and safety targets.

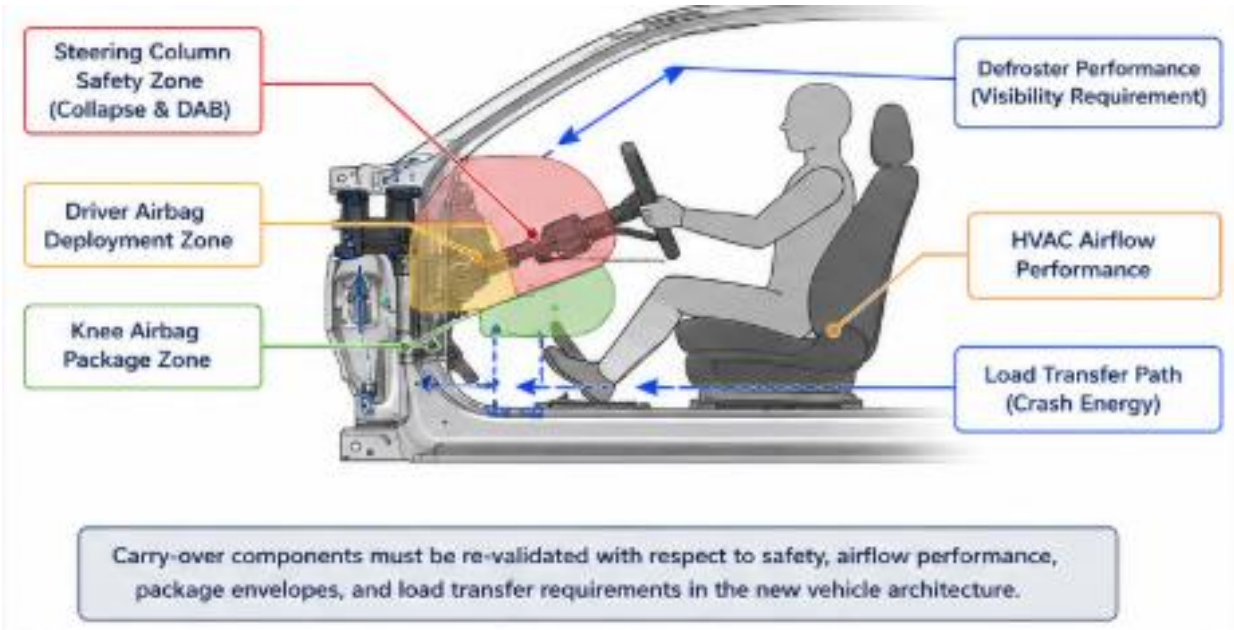


Figure 3. *Simplified schematic representation of carry-over cockpit component interfaces and validation requirements.The figure was schematically prepared by the author to explain basic system relationships and does not contain design data from a specific vehicle platform.*

The CCB is one of the main structural components of the cockpit system. It can provide reference points for the steering column, dashboard attachments, airbag regions, electronic module brackets, and certain HVAC interfaces. Therefore, when the CCB is considered as a carry-over component, not only its own geometry but also its body mounting points, load transfer paths, tolerance chain, and safety targets should be evaluated.

The HVAC module is one of the most critical functional systems directly affecting cockpit package space. The HVAC housing, air ducts, and defrost routing must be compatible with the new dashboard geometry. When newly developed aesthetic surfaces, center console layout, or glove box geometry change, the package space around the HVAC system may also be reshaped, limiting the feasibility of carry-over implementation.

The steering column system is a critical interface in terms of ergonomics and safety. Steering wheel position, driver seating position, pedal relationship, steering column collapse zone, and mounting geometries must be revalidated in the new vehicle architecture. Therefore, carry-over usage of the steering column system should be evaluated not only in terms of attachment compatibility but also together with driver package and crash performance.

Front panel sheet metal interfaces, insulation components, mounting brackets, and load transfer regions are also surrounding components that affect the success of the carry-over strategy. Although these parts are not always emphasized as individual components, they play an important role in cockpit mounting to the vehicle body, vibration behavior, thermal and acoustic insulation, assembly feasibility, and serviceability.

2. METHOD

This study was prepared based on virtual validation and system integration approaches used in OEM vehicle development processes. Within the scope of the study, the adaptation of structural and functional components that may be considered as carry-over within instrument panel architecture into new vehicle platforms was examined.

The evaluation process mainly considered CAD-based package analyses, DMU integration studies, geometric validation checks, tolerance chain evaluations, mountability analyses, and surrounding component interference controls. In addition, vehicle performance targets such as safety, NVH, ergonomics, serviceability, and manufacturability were also evaluated in terms of carry-over feasibility.

In this study, validation activities are not considered as a single analysis topic but as a system-level process. Even if a carry-over component has already completed its validation process in a previous project, different aesthetic surfaces, different package conditions, different body interfaces, or updated safety targets in the new vehicle architecture may create the need for revalidation.

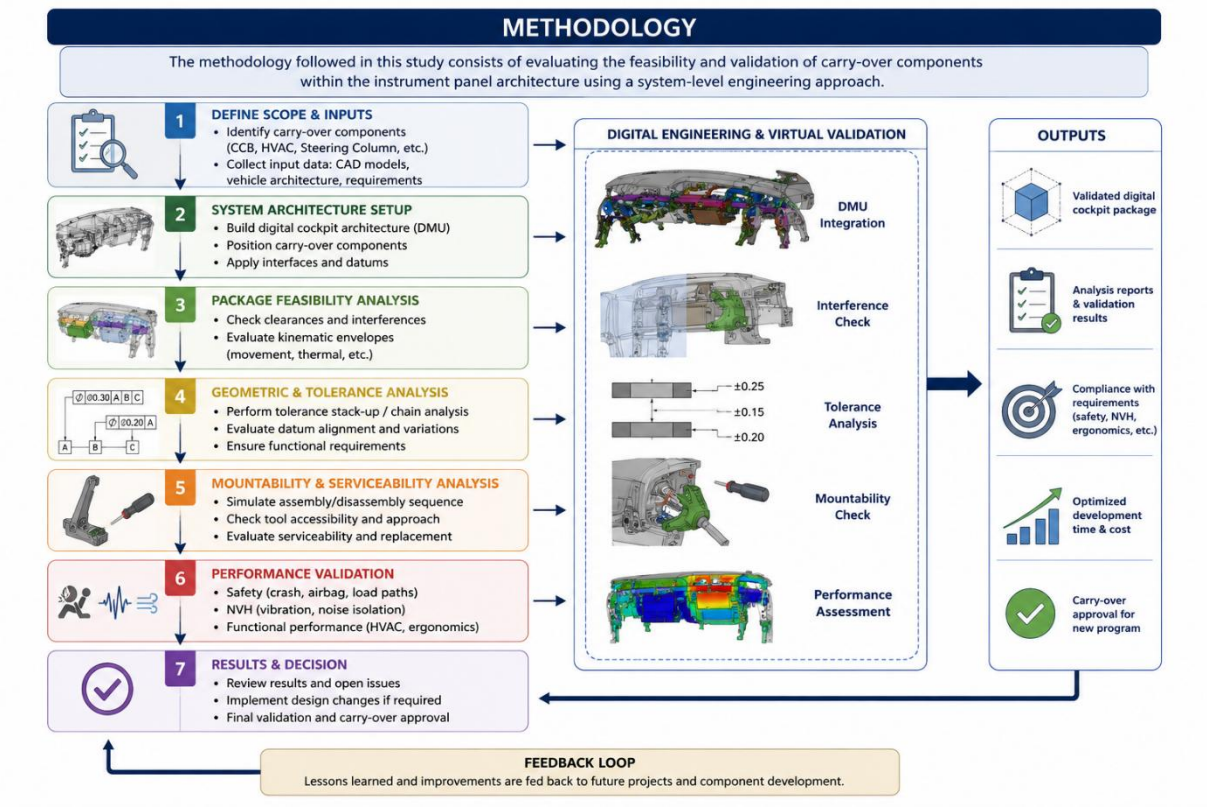


Figure 4. *Methodological workflow for validation of carry-over cockpit components.*

VALIDATION PROCESSES FOR CARRY-OVER COMPONENTS

The first evaluation area in the validation of carry-over components is package feasibility. Package analyses examine clearances between components and surrounding parts, interference conditions, mounting areas, and the effects of operational movements. Some components inside the vehicle may behave differently from their static nominal positions due to vibration, thermal expansion, airflow, or functional movement. Therefore, package controls should not be performed only over nominal CAD positions but should also consider operating conditions and assembly tolerances (Andersson Ericsdotter & Rosenkvist, 2016).

After package analyses, geometric validation and tolerance chain evaluations become important. The reference system of a carry-over component in the previous platform may not correspond exactly to the new vehicle architecture. Small geometric differences between CCB mounting points, steering column references, dashboard mounting surfaces, and body interfaces may cause gap/flush problems on newly developed aesthetic surfaces or assembly deviations. Therefore, tolerance chain analyses play a critical role in evaluating the feasibility of the carry-over strategy (Lindkvist & Söderberg, 2003).

Mountability analyses are used to evaluate the feasibility of the component during the assembly process. A component that appears suitable in terms of package in the CAD environment may not necessarily be feasible during assembly. Screw accessibility, tool approach direction, assembly axis, operator access, and possible interferences with previously assembled components should be evaluated at this stage. Especially for HVAC modules, steering column systems, and dashboard attachment regions, virtual validation of assembly and disassembly movements is important. Similar mountability principles were also evaluated in previous dashboard validation studies, where virtual disassembly was used as an approach for assessing assembly feasibility (Döndü & Eken, 2024).

Safety validation should be considered as a separate critical topic in the carry-over strategy. In new vehicle programs, frontal crash performance, steering column collapse behavior, knee-airbag package area, and load transfer paths may differ from the previous platform. This indicates that a previously validated component will not automatically provide the same performance in a new vehicle. Therefore, carry-over components should be re-evaluated at the system level in terms of safety targets.

NVH and ergonomic targets are also important factors affecting carry-over decisions. The position of insulation components, CCB attachment stiffness, HVAC module operating vibrations, steering column mounting regions, and the relationship between dashboard surfaces may influence cabin comfort. Similarly, steering wheel position, control accessibility, glove box usage, and air outlet routing should be rechecked from an ergonomic perspective (Pheasant, 1996).

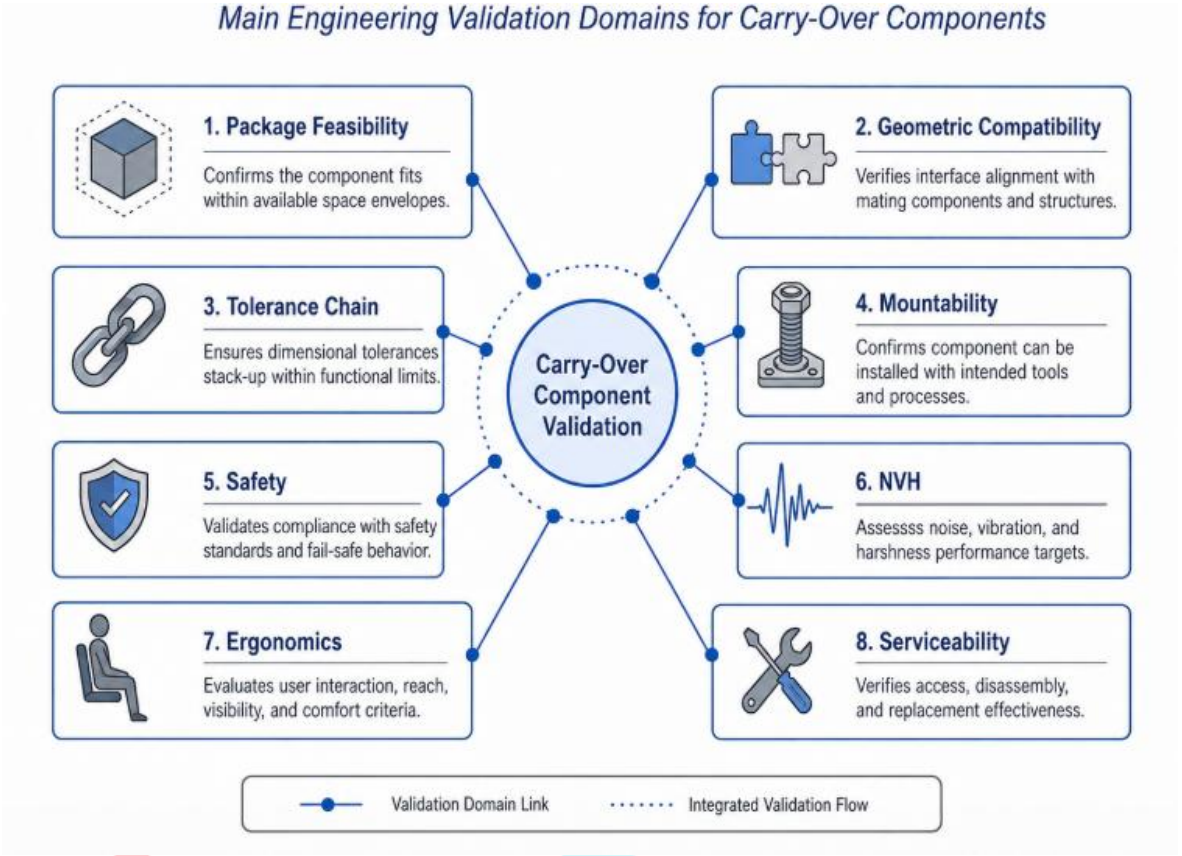


Figure 5. *Main engineering validation domains for carry-over components.*

EVALUATION IN TERMS OF TIME AND COST

One of the main advantages of the carry-over component strategy is its potential improvement in development time and cost. A completely new component development process includes multiple steps such as concept design, detailed design, prototype production, tooling investment, validation tests, supplier industrialization, and production maturity. In contrast, the carry-over approach uses existing design and previous validation knowledge; therefore, the validation scope can often be managed in a more focused manner compared to a fully new design.

However, this does not mean that carry-over components do not require validation. During adaptation to a new platform, package, assembly, tolerance, safety, NVH, and surrounding component relationships must be re-evaluated. Therefore, the time and cost advantage of the carry-over strategy can only be maintained if a proper early-phase feasibility study is performed. Otherwise, package problems, attachment mismatches, or aesthetic surface revisions detected in later project phases may eliminate the expected time advantage.

In this context, it is more appropriate to focus on the scope of validation activities rather than providing fixed project timing values. Completely new component development generally requires the full cycle of design, prototype, testing, and production preparation. Carry-over adaptation, on the other hand, focuses mainly on validating the compatibility of an existing system with a new architecture. Therefore, the carry-over approach can be considered an intermediate engineering model in which the design is not created from the beginning, but the integration is revalidated.

Figure 6. Conceptual comparison between new component development and carry-over adaptation.

3. DISCUSSION

Although carry-over strategies provide important advantages within instrument panel architecture, the success of this approach depends on the level at which the component can be reused. In some cases, the component geometry can be preserved directly, while in other cases only the main design principle or attachment concept can be carried over. The relationship between newly developed aesthetic surfaces and hidden infrastructure components is one of the most important factors determining carry-over feasibility.

Carry-over decisions should not be made only based on cost or timing advantages. The functional role of the component in the new vehicle architecture, its relationship with surrounding components, safety requirements, and assembly process should be evaluated together. Therefore, carry-over strategy should be addressed from a system engineering perspective during the early development phase (Pahl et al., 2007).

DMU and CAD-based validation processes play a critical role at this stage. Virtual analyses performed in the early phase enable the detection of potential incompatibilities before the physical prototype stage. Thus, late engineering changes can be reduced, the validation plan can be managed in a more controlled way, and project timing risks can be lowered.

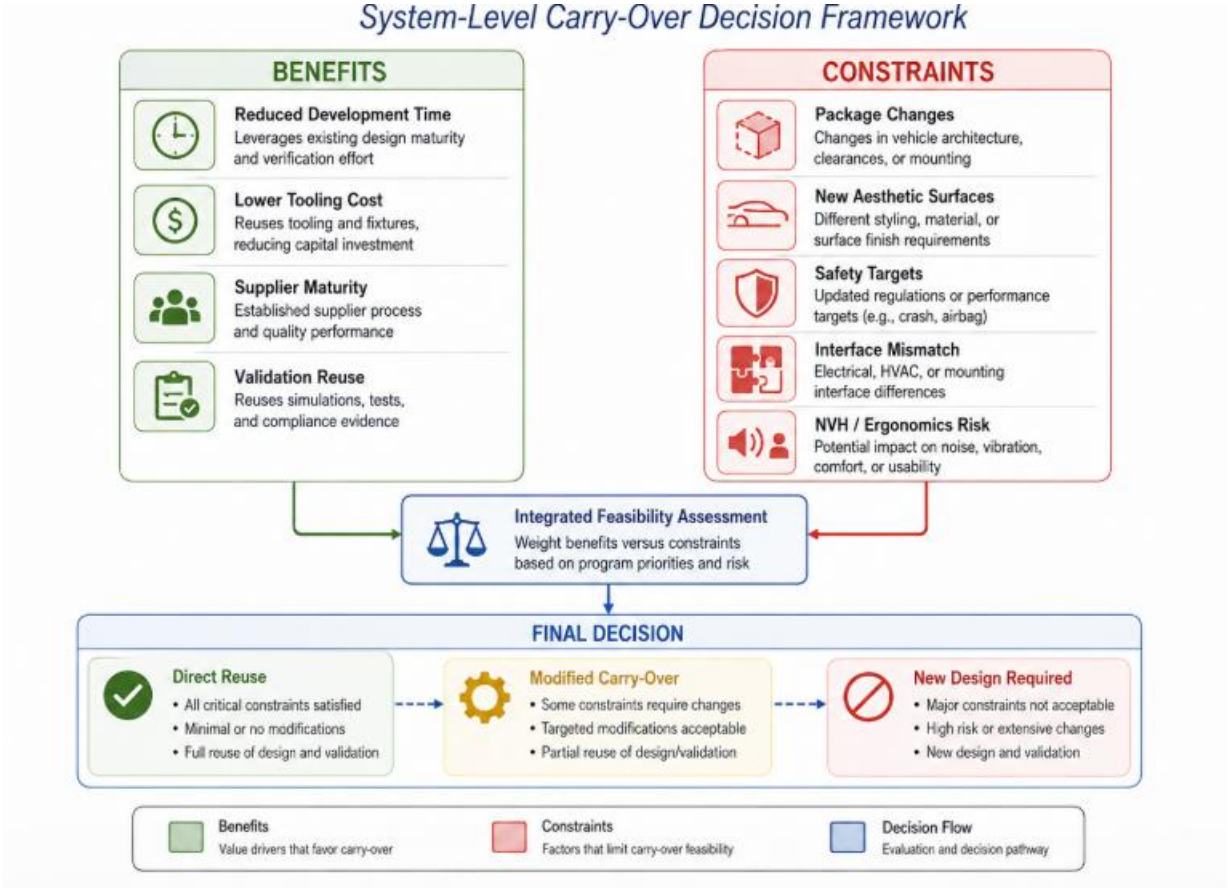


Figure 7. System-level carry-over decision framework.

CONCLUSION

This study investigated carry-over component strategies applied within instrument panel architecture during automotive cockpit development processes. The relationship between newly developed cockpit aesthetic surfaces and hidden infrastructure components such as the CCB, HVAC module, steering column system, air ducts, front panel sheet metal interfaces, insulation components, mounting brackets, and load transfer regions was evaluated.

The study showed that the carry-over strategy can provide important advantages in terms of development time, tooling investment, validation scope, and engineering workload. However, in order to maintain these advantages, carry-over components must be re-evaluated within the new vehicle architecture in terms of package feasibility, geometric compatibility, tolerance chain, mountability, safety, NVH, ergonomics, and serviceability.

As a result, carry-over component strategy should not be considered only as the transfer of existing parts into a new project. It is a system-level engineering process that must be managed together with new platform targets, new aesthetic surfaces, and updated performance requirements. Early-phase virtual validation activities and surrounding component compatibility analyses are critical for the successful implementation of this strategy.

References

Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2016). Product design and development. McGraw-Hill Education.

Happian-Smith, J. (Ed.). (2001). An introduction to modern vehicle design. Elsevier.

Döndü, M. C., & Eken, G. (2024). Bir binek araç torpidosunun 3D CAD modelinde tasarım doğrulama süreçleri. 4th International Congress of Engineering and Natural Sciences.

Andersson Ericsdotter, E., & Rosenkvist, E. (2016). A calculation model for packaging demand: Calculating the basis for investment for inbound packaging with the variable packaging per car at Volvo Cars.

Lindkvist, L., & Söderberg, R. (2003). Computer-aided tolerance chain and stability analysis. Journal of Engineering Design, 14(1), 17–39. https://doi.org/10.1080/0954482031000078117

Pheasant, S. (1996). Bodyspace: Anthropometry, ergonomics and the design of work. Taylor & Francis.

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H. (2007). Engineering design: A systematic approach. Springer.

Cho, N., & Tu, J. F. (2002). Quantitative circularity tolerance analysis and design for 2D precision assemblies. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42(13), 1391–1401.

6thInternational
Congress of Engineering and
Natural Sciences

Manufacturing Technologies for Automotive Interior Decorative Components: A Comparative Study

Cem İÇİER[1]
Mesut Can DÖNDÜ[2]
Mehmet Burak AKSU[3]

Abstract

Automotive interior components require high quality, durability, and cost-effective manufacturing solutions while meeting increasing design complexity and lightweight targets. Various decorative manufacturing technologies have been developed to satisfy these requirements in cockpit trim components. Among them, conventional wrapping, in-mold decoration (IMD), slush molding and back injection technologies are widely used in the production of interior decorative parts such as instrument panels, center consoles, and dashboard trims. This study presents a comparative analysis of these manufacturing technologies with respect to surface quality, design flexibility, production complexity, weight, and cost considerations. The fundamental process principles of each technology are first described, followed by an evaluation of their applicability to different types of cockpit components. Particular attention is given to back injection technology, which has recently gained importance for decorative trim parts due to its ability to integrate aesthetic surfaces with structural plastic substrates in a single manufacturing step. The advantages and limitations of each technology are discussed based on typical automotive interior applications. The results highlight the conditions under which each manufacturing method becomes preferable from both engineering and production perspectives. This study aims to provide a comprehensive overview of decorative manufacturing technologies used in automotive interiors and to support engineers in selecting appropriate production methods during the early design phase of cockpit components.

Keywords: Decorative Manufacturing Technologies, Automotive Interior Trim, Back Injection, Surface Quality, Cost Optimization

[1] Researcher, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa, Türkiye, Orcıd: 0009-0007-0318-4297
[2] Researcher, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa, Türkiye, Orcıd: 0009-0005-9641-8579
[3] Researcher, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa, Türkiye, Orcıd: 0009-0005-3728-9973

4. INTRODUCTION

In recent years, automotive interior design has become one of the key factors affecting customer satisfaction and vehicle competitiveness. Modern vehicle interiors are expected not only to meet functional requirements but also to provide high aesthetic quality, premium appearance, and enhanced user experience. Particularly in cockpit systems, components such as instrument panels, center consoles, door panels, and decorative trim parts involve intensive visual and tactile interaction with the user. Therefore, manufacturing technologies used in automotive interior trim components must simultaneously satisfy several engineering and design criteria including high surface quality, durability, lightweight performance, and cost efficiency. Furthermore, color combinations, surface textures, and decorative features used in vehicle interiors and exteriors are known to directly influence customer perception. Products perceived as aesthetically attractive play an important role in capturing customer attention and affecting purchasing decisions (Tovillo et al., 2024). For this reason, decorative manufacturing technologies are considered not only as production solutions but also as strategic elements contributing to perceived quality and overall user experience.

Today, automotive manufacturers utilize various decorative manufacturing technologies depending on vehicle segments and customer expectations. Among these technologies, In-Mold Decoration (IMD), mold-in-color & graining, painting technologies, pad printing, chrome coating, textile applications, back injection and wrapping methods are widely used in automotive interior components. Each technology offers different advantages and disadvantages in terms of manufacturing processes, surface quality, design flexibility, cost, production complexity, and sustainability.

With the increasing popularity of electric vehicles, lightweight targets, part integration, and sustainable manufacturing approaches have become more important. This situation has increased interest in advanced manufacturing technologies such as back injections, where decorative surfaces and structural plastic substrates can be integrated within a single manufacturing process. At the same time, low-cost solutions such as mold-in-color applications, as well as premium surface technologies like wrapping and chrome coating, continue to be widely used in automotive interiors.

In this study, commonly used decorative manufacturing technologies for automotive interior components are comparatively investigated. The fundamental manufacturing principles of these technologies are explained, their application areas in automotive interior trim components are evaluated, and the technologies are compared in terms of surface quality, cost, weight, design flexibility, manufacturing complexity and durability. The study aims to provide an engineering perspective for selecting appropriate decorative manufacturing technologies during the early design phase of automotive cockpit components.

2. AUTOMOTIVE DECORATIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES

2.1. In-Mold Decoration (IMD)

In-Mold Decoration (IMD) is an advanced manufacturing technology that combines plastic injection molding and decorative surface application within a single production step. In this method, a pre-printed and patterned decorative film is placed inside the injection mold, and

molten plastic material is subsequently injected into the cavity to create a permanent bond between the film and the plastic substrate. As a result, part production and surface decoration are achieved simultaneously. IMD technology has become increasingly important in the automotive industry, particularly by enabling compact and complex decorative designs that cannot easily be achieved with conventional manufacturing approaches (Hu & Nong, 2021).

In automotive interior trim applications, IMD technology is widely used in instrument panel bezels, center console components, HVAC control panels, door trims, steering wheel control surfaces, multimedia frames and decorative piano black surfaces. Through IMD technology, appearances such as wood grain, metallic surfaces, carbon fiber, or brushed aluminum can be achieved with relatively low manufacturing cost (Rong, 2021).

One of the primary reasons for the widespread use of IMD technology is its ability to provide high surface quality on complex three-dimensional geometries. In addition, IMD surfaces offer improved scratch resistance and chemical durability while reducing the need for secondary painting or coating operations. The integration of the decorative layer directly into the plastic substrate results in a longer-lasting structure compared to post-applied decorative methods such as conventional printing or painting. From an environmental perspective, IMD is also considered a more sustainable manufacturing method due to the reduction of solvent-based painting processes. Furthermore, high process repeatability and compatibility with automated mass production systems provide significant advantages for automotive manufacturers.

However, IMD technology also has several limitations. High tooling investment costs, the requirement for precise process parameter control and film alignment challenges are among the main manufacturing difficulties. In components with complex geometries, issues such as film wrinkling, air bubble formation, and local surface deformations may occur. Additionally, for low-volume production programs, the return period of tooling investment may become relatively long (Chen et al., 2025). Nevertheless, due to the advantages it offers in terms of aesthetic quality, durability, and process integration, IMD technology has become one of the most important decorative manufacturing methods used in modern automotive interior trim production.

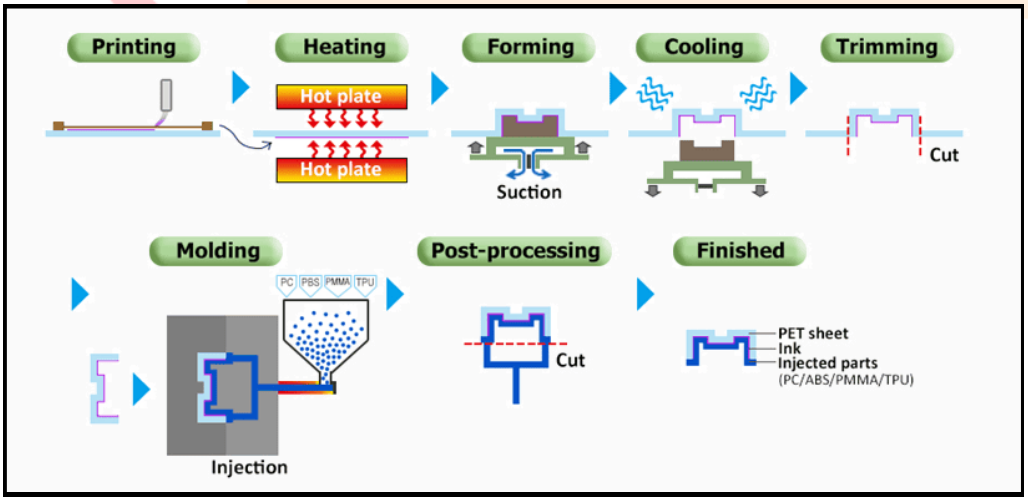


Figure 1- Schematic Representation of the In-Mold Decoration (IMD) Process Flow

Figure 2- Examples of Automotive Components Manufactured Using the IMD Process

2.2 Mold-in-Color & Graining

2.2.1 Mold-in-Color (MIC)

Mold-in-Color (MIC) technology is one of the decorative manufacturing methods in which the final color of the plastic component is obtained directly through the injection molding material itself. In this method, decorative surface appearance can be achieved without requiring additional painting or coating operations. Color pigments are pre-integrated into the plastic raw material, allowing the component to obtain its final surface appearance immediately after the injection molding process.

MIC technology is widely used particularly in high-volume automotive production, where cost optimization is a primary concern. By eliminating painting operations, additional manufacturing steps, paint booth investments and process times can be significantly reduced. Furthermore, technology offers environmental advantages by reducing volatile organic compounds (VOC) emissions.

This technology is generally preferred for lower dashboard components, glovebox assemblies, pillar trims, lower trim parts, and relatively less visible interior components. It provides a cost-effective solution, especially for low- and mid-segment vehicle applications.

One of the most important advantages of MIC technology is its manufacturing efficiency and process simplicity. The elimination of painting operations simplifies the production flow and improves the recyclability of plastic components. In addition, paint-related surface defects and process variations can be minimized.

However, the surface quality achieved with MIC applications may not reach the same premium level as advanced decorative technologies. Technology may be limited in applications requiring high gloss surfaces, special visual effects, or premium aesthetic expectations. Moreover, injection flow marks or weld lines on the surface may become directly visible depending on the geometry and molding conditions.

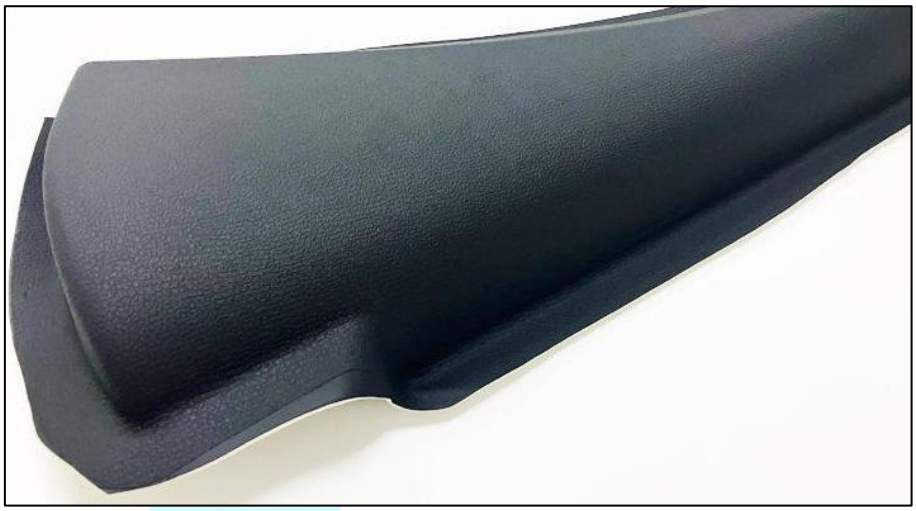


Figure 3- *Example of an Automotive Component Manufactured Using the Mold-in-Color (MIC) Process*

2.2.2 Graining Technologies

Graining technologies are decorative surface engineering methods used to create surface texture and tactile quality in automotive interior components. In these technologies, leather-like, geometric or customized texture patterns are engraved onto the mold surface and transferred to the injection of molded plastic component during production. As a result, plastic surfaces can achieve a more natural, premium, and aesthetically attractive appearance.

In automotive interiors, grain structure is considered an important parameter affecting perceived quality. Grain patterns are widely used especially on instrument panel upper surfaces, door trims, center console surfaces and various decorative trim components. Grain design directly influences surface appearance, gloss behavior, tactile feeling, and light reflection characteristics.

Graining technologies can be applied through different manufacturing methods. In conventional applications, texture is created on the mold surface using chemical etching processes, while laser texturing technologies have recently enabled the production of more precise and controlled grain structures. In addition, methods such as in-mold graining allow grain textures to be generated through decorative films or surface layers.

One of the major advantages of graining technologies is their ability to hide minor manufacturing defects on plastic surfaces. Flow marks, small scratches, and local surface waviness can become less visible due to the textured grain structure. Furthermore, grain applications improve the aesthetic quality of automotive interiors by enhancing premium surface perception.

However, the control of grain structures and surface harmony introduces important engineering requirements. The grain direction, depth, and surface appearance between adjacent components must remain visually consistent. Otherwise, visual quality issues may occur, particularly in cockpit systems where multiple trim components are assembled together. In addition, highly detailed and precise grain structures may increase mold manufacturing complexity and tooling cost.

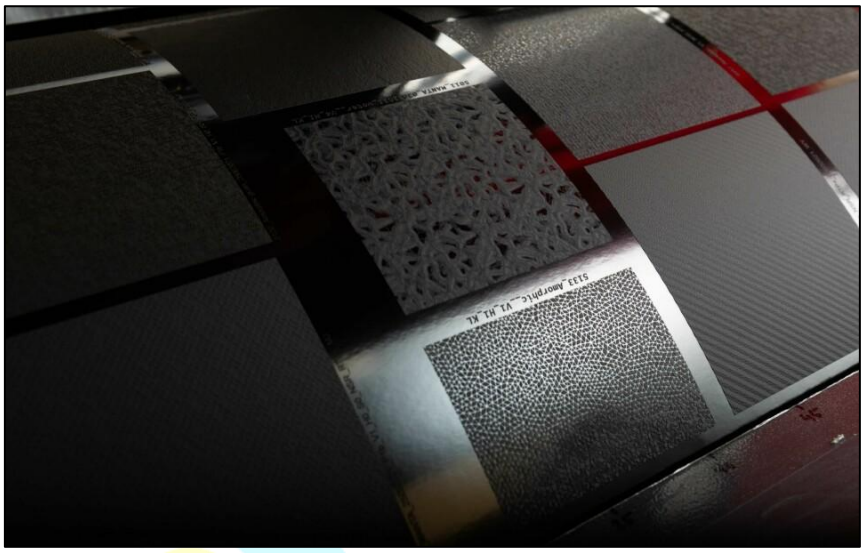


Figure 4- Examples of Different Grain Pattern Designs Used in Automotive Interior Components

2.4 Painting Technologies

In the automotive industry, post-molding painting processes are widely used to improve the aesthetic appearance of interior trim components, enhance surface durability, and strengthen brand perception. This process is generally applied to thermoplastic materials such as ABS, PC/ABS, PP and TPO through several sequential operations including surface cleaning, sanding, surface activation, primer application, base coat painting and clear coat finishing (Thomas et al., 2023). Painting operations are commonly performed using robotic spray systems within controlled paint booths, followed by curing processes in industrial ovens to achieve the required coating hardness and durability.

The primary reasons for the widespread use of painting technologies are their ability to provide high visual quality, multiple color and texture alternatives, UV resistance, and improved scratch performance. In automotive interiors, painting technologies are commonly used for instrument panel bezels, center console components, door trims, air vent surrounds, multimedia frames, and decorative trim surfaces. Through painting processes, components produced from the same injection mold can be customized according to different vehicle trim levels, thereby increasing design flexibility.

However, painting processes also involve several disadvantages. Since painting requires additional manufacturing operations, production time and overall manufacturing costs increase significantly. Inadequate surface preparation may result in quality issues such as peeling, cracking, orange peel appearance, or color inconsistency. Particularly for polypropylene-based plastics, low surface energy creates critical adhesion challenges for paint applications. In addition, volatile organic compound (VOC) emissions are considered a major environmental disadvantage, which has accelerated research on water-based coating systems and low-emission manufacturing processes (Kim, 2011).

As a result, post-molding painting processes remain one of the most important surface finishing methods used to improve aesthetic quality and perceived value in automotive interior trim components. Although the process introduces certain disadvantages in terms of cost and

manufacturing complexity, it continues to be widely preferred by automotive manufacturers due to the high surface quality, color diversity, and premium appearance it provides. Today, research and development activities are increasingly focused on environmentally friendly coating systems, robotic applications and low-energy curing technologies in line with sustainable manufacturing objectives.

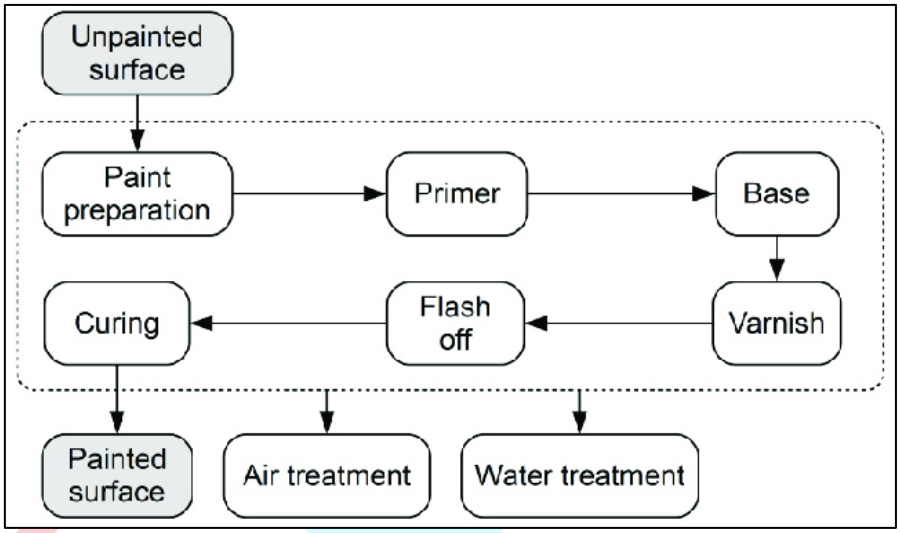


Figure 5-Paint Application Process FlowChart

Figure 6- Paint Application Process

2.5 Tampo Printing

Tampo printing, also known as pad printing, is an industrial printing process widely used for marking and decorating plastic components with three-dimensional and complex geometries. The process is based on transferring ink from an engraved printing plate onto the component surface using a silicone pad. Thanks to the flexible and elastic structure of the silicone pad, high-precision printing can be achieved even on non-flat, concave or convex surfaces (Kipphan, 2001). This characteristic makes the process highly advantageous for automotive interior trim parts with ergonomic and geometrically complex surfaces. In addition, tampo printing is compatible with various materials such as ABS, PC, PP, and coated plastic surfaces, which has led to its widespread use in the automotive industry.

In automotive interior applications, tampo printing is commonly used for HVAC control buttons, steering wheel switches, window control buttons, gear indicators, infotainment control

elements, airbag covers, and decorative trim components. One of the main reasons for the widespread use of this process is its ability to print small characters, symbols, and icons with high resolution and excellent repeatability. Furthermore, the use of special inks with high UV resistance, chemical durability, and abrasion resistance ensures long-term printing performance throughout the component's service life. Compatibility with mass production systems, low unit cost, and short cycle times also provide significant advantages for automotive manufacturers.

The main advantages of tampo printing include its ability to print on complex geometries, high fine-detail resolution, compatibility with different materials, and easy integration into automated manufacturing systems. In addition, the process is considered an economical solution due to its relatively low ink consumption and equipment cost. However, tampo printing also has several limitations. Registration problems may occur during multi-color printing operations, and maintaining print uniformity over large surface areas can become challenging (Smith, 2010). Moreover, adhesion problems may arise on plastics with low surface energy, requiring additional surface pretreatments such as flame or plasma treatment. VOC emissions from solvent-based inks are also considered an environmental disadvantage.

As a result, tampo printing remains an important decoration and marking technology capable of meeting both functional and aesthetic requirements in automotive interior plastic components. Its ability to provide high-quality printing on geometrically complex parts makes the process advantageous compared to alternative printing methods. Nevertheless, proper optimization of process parameters, correct ink and pad selection, and careful management of surface preparation operations are critical for maintaining consistent print quality. Today, with increasing expectations regarding user experience and visual quality in the automotive industry, the importance of tampo printing technology continues to grow.

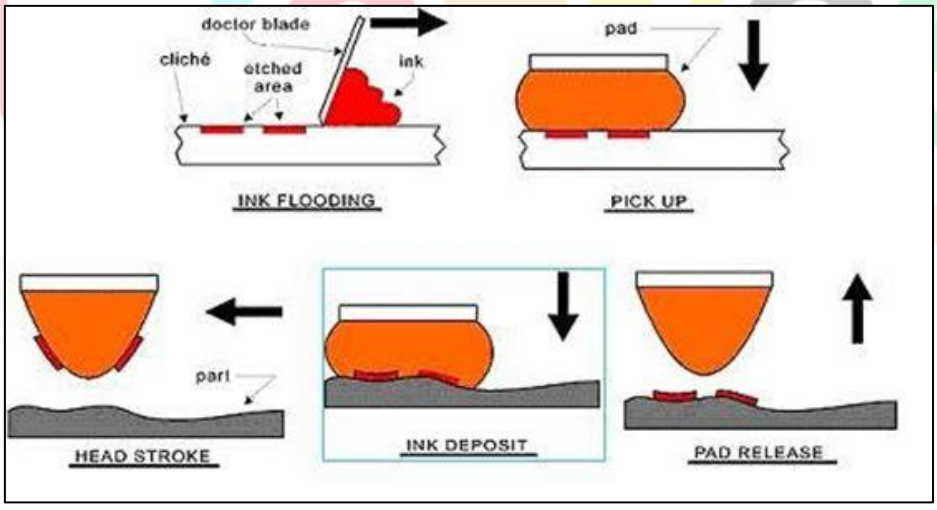


Figure 7- Tampoprinting Process FlowChart

Figure 8- Tampoprinting Application Examples

2.6 Chrome Coating

Chrome coating used in automotive interior plastic trim components is one of the most important surface finishing technologies combining aesthetic appearance with functional surface properties. This process is generally based on applying thin metallic layers onto the surface of ABS or PC/ABS plastic components through electroplating methods. Since plastic surfaces are not electrically conductive, several pretreatment operations such as surface etching, activation and chemical metallization are required prior to the coating process. Subsequently, copper, nickel and finally chromium layers are deposited onto the surface through electrolytic baths. ABS material is one of the most commonly preferred plastics for chrome coating applications in the automotive industry due to its surface structure, which provides high adhesion strength between the plastic substrate and metallic layers (McNamara & Sexton, 1965).

Chrome coating processes are widely used in both exterior and interior automotive trim applications. In automotive interiors, common applications include air vent surrounds, multimedia panel details, door handle bezels, gear panel decorations, steering wheel trims and decorative instrument panel components. The primary reasons for the widespread use of this technology are its ability to provide a metallic and premium appearance, lightweight advantages and improved surface durability compared to conventional plastic surfaces.

Among the main advantages of chrome coating are high gloss appearance, decorative quality, scratch resistance, corrosion resistance and increased surface hardness. Thanks to the nickel and chromium layers, the environmental durability of plastic components is significantly improved, allowing the preservation of aesthetic appearance over long-term vehicle usage. However, the process also has several disadvantages. Chrome coating is a highly sensitive process, and even small surface defects generated during injection molding may become highly visible after plating. Surface imperfections such as scratches, sink marks, gas voids and deformations tend to be more noticeable on chrome-coated surfaces (Mallory & Hajdu, 1990). In addition, certain chemicals used in conventional chrome plating processes require careful environmental and occupational safety management. Therefore, environmentally friendly trivalent chromium technologies have gained increasing attention in recent years.

Studies reported in the literature indicate that chrome-coated plastics provide significant advantages in terms of lightweight performance, cost optimization and durability while meeting the aesthetic expectations of the automotive industry. Particularly in decorative applications, the use of low-density plastic substrates instead of solid metal components contributes to overall vehicle weight reduction. Nevertheless, maintaining consistent process quality requires strict control of injection molding parameters, surface preparation operations and plating bath chemistry. For this reason, chrome coating in the automotive industry is considered not only a decorative application but also an engineering-oriented surface technology requiring advanced process control.

Figure 9- Chrome Plating Fixture

***Figure 10-** Chrome Plating Plastic Parts*

2.7 Textile Applications

Textile applications are among the decorative solutions widely used in automotive interiors to provide soft-touch surfaces, premium appearance and improved acoustic performance. In these applications, fabrics, suede materials or various textile surfaces are applied onto plastic substrates through lamination or adhesive bonding processes.

Textile-covered surfaces are commonly preferred for door panels, decorative dashboard areas, armrests and premium interior trim components. In recent years, with the increasing focus

on sustainable materials, recycled textile-based applications have also gained significant importance in the automotive industry.

Foam-molded wrapping structures used in automotive interiors generally consist of three main layers: a decorative surface layer, a foam layer and a structural substrate layer. The outer decorative skin layer is typically manufactured from PVC, TPO or similar decorative thermoplastic materials through thermoforming or vacuum forming processes. The intermediate foam layer is generally polyurethane (PUR)-based and is used to provide soft-touch characteristics and improve tactile comfort. The inner structural layer is usually composed of glass fiber reinforced plastics or similar engineering plastic materials, which provide the required mechanical strength and dimensional stability of the component. During the manufacturing process, foam material is injected between the decorative skin and the structural substrate to create an integrated multilayer structure suitable for automotive interior applications (Oral et al., 2024).

One of the major advantages of textile applications is their ability to provide a warm and premium tactile feeling for vehicle occupants. In addition, textile surfaces may contribute to improved acoustic damping performance by reducing vibration and noise transmission within the passenger cabin.

However, textile surfaces also have several disadvantages related to contamination sensitivity, stain formation and cleanability. Furthermore, lamination and adhesive bonding operations require additional manufacturing steps, increasing both production cost and process complexity.

Figure 11- Wrapping Door Trim Component

2.8 Back Injection Technology

Back injection technology is an advanced manufacturing method based on the principle of combining a decorative surface layer with a structural substrate through plastic injections from the rear side of the decorative material. Thanks to this technology, decorative surfaces and structural plastic carriers can be integrated within a single manufacturing process (Giles et al., 2023).

In back injection applications, decorative materials such as textiles, films, leather-like surfaces or special decorative layers can be used as the outer surface. Subsequently, molten plastic material is injected from the backside of the decorative layer to create the final component geometry and structural support.

This technology is widely used in decorative instrument panel trims, center console surfaces, door panel inserts and premium cockpit components. Due to its high design flexibility and process integration capability, back injection technology has gained increasing importance in the automotive industry in recent years.

One of the most important advantages of back injection technology is its potential for part integration and weight reduction. Compared to conventional multi-component structures, the technology requires fewer assembly operations and enables more compact component designs. Furthermore, the ability to combine soft-touch premium decorative surfaces with structural carrier substrates within a single manufacturing process significantly improves production efficiency.

Figure 12- Back Injection Automotive Component

However, process control in back injection applications is highly sensitive. Decorative surface deformation, wrinkling and local surface defects may occur during manufacturing. In addition, high tooling investment and process development costs are considered among the major disadvantages of this technology.

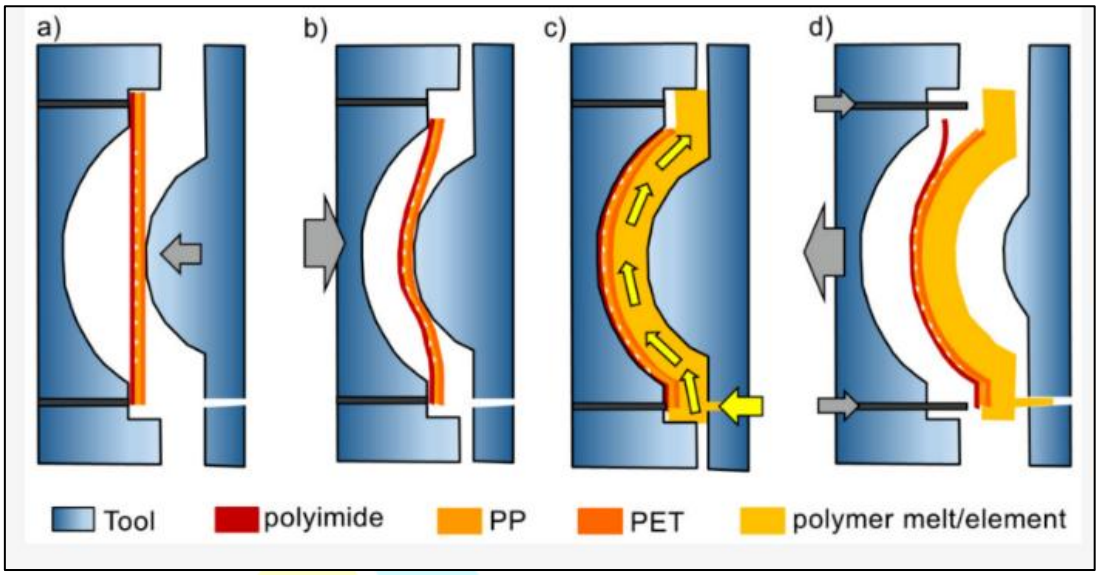


Figure 13- Back Injection Manufacturing Process

3. COMPARATIVE EVALUATION

Automotive interior decorative manufacturing technologies demonstrate significant differences in terms of surface quality, cost, manufacturing complexity, design flexibility and durability. The selection of the appropriate technology is strongly influenced by factors such as vehicle segment, customer expectations, production volume and engineering requirements.

IMD and back injection technologies offer major advantages regarding surface quality and process integration. These technologies are capable of meeting the high expectations of premium interior applications. In addition, the integration of decorative surfaces within the manufacturing process reduces the need for secondary operations and improves overall component quality. However, high tooling investments and complex process control requirements may increase manufacturing costs.

Mold-in-Color (MIC) technologies provide low-cost and highly efficient manufacturing solutions. By eliminating painting operations, production flow becomes simpler while environmental impacts and VOC emissions can be reduced. Furthermore, recyclability performance can be improved due to the absence of additional coating layers. Nevertheless, MIC technologies may remain insufficient for applications requiring premium surface appearance, high gloss or decorative special effects.

Painting technologies provide superior visual quality, excellent color flexibility and enhanced customization capability. Different colors, gloss levels and decorative effects can be achieved using the same base component geometry. However, additional processing steps increase production time and cost. Surface sensitivity, VOC emissions and scratch susceptibility are among the major disadvantages of painted components. Particularly in piano black applications, even minor scratches or dust contamination may significantly affect perceived quality.

Chrome coating technologies offer significant advantages in terms of metallic appearance and premium surface perception. Chrome-plated plastic parts can achieve luxury visual effects while maintaining lightweight characteristics compared to solid metal

alternatives. On the other hand, environmental sustainability concerns, recycling complexity and high process costs remain important limitations of chrome coating technologies.

Textile applications and wrapping technologies provide high tactile quality and enhanced premium user experience. Soft-touch surfaces and decorative stitching applications significantly improve perceived interior quality. In addition, textile-based structures may contribute to acoustic damping performance. However, additional assembly operations, labor-intensive manufacturing steps and process variability may increase production cost and complexity.

Tampo printing technology provides a low-cost, fast and flexible solution for decorative marking and symbol applications. The process is particularly suitable for printing on complex geometries with high precision. Nevertheless, long-term durability and wear resistance remain limited compared to integrated decorative technologies. Therefore, tampo printing is generally preferred for small symbols, icons and functional graphics rather than large decorative surfaces.

Overall, there is no single optimal decorative manufacturing solution for automotive interior applications. Technology selection depends on multiple criteria including target vehicle segment, cost objectives, aesthetic expectations, production volume, sustainability requirements and engineering constraints. As customer expectations continue to evolve, automotive manufacturers increasingly combine multiple decorative technologies within the same cockpit system to achieve the desired balance between cost, quality and user experience.

Table 1- *Comparison of Decorative Manufacturing Technologies in Automotive Interior Components*

Table 1. Comparison of Decorative Manufacturing Technologies in Automotive Interior Components

Technology	Basic Manufacturing Principle	Typical Materials	Common Applications	Main Advantages	Main Limitations
In-Mold Decoration (IMD)	Decorative film is placed in the mold and plastic is injected to bond the film with the part surface.	Polycarbonate (PC), ABS, PP, Decorative films	Instrument panels, Center consoles, Door trims	High aesthetic quality, Design flexibility, Durability, Integration capability	High tool cost, Film cost, Complex process control
Mold-in-Color & Graining	Color and texture are achieved directly in the mold during the injection process.	PP, ABS, PC, TPE	Lower dashboard, Door panels, Consoles	Cost-effective, Good scratch resistance, No secondary operation	Limited to mold surface texture, Less design flexibility
Painting Technologies	The part surface is coated with paint layers through spray or other painting processes.	Water-based paint, Solvent-based paint, UV paint	Decorative trims, Visible surfaces	Wide color range, Good surface finish, Applicable to complex geometries	Environmental concerns, Additional process steps, Higher VOC
Pad Printing (Tampo Printing)	Ink is transferred onto the part surface using a silicone pad.	Ink, Solvent, Additives	Buttons, Logos, Small parts	Low cost, Suitable for complex shapes, High precision for small areas	Limited durability, Wear resistance issues, Small printing area
Chrome Plating	A chrome layer is deposited on the part surface using electroplating.	ABS, PC/ABS, PC, Electroplating layers	Air vent surrounds, Switch bezels, Decorative trims	Premium appearance, High gloss, Good corrosion resistance	Environmental impact, Cost, Complex process
Textile Applications	Textile materials are integrated with plastic parts using adhesive or molding processes.	Textiles, Nonwovens, Adhesives, PP, ABS	Door panels, Pillar trims, Seat back panels	Premium feel, Lightweight, Design flexibility	Adhesion issues, Soiling sensitivity, Moisture absorption
Back Injection	Decorative skin is back-injected onto an insert or structural substrate.	TPE, TPU, PP, PC, Decorative skins	Decorative trims, Armrests, Instrument panels	Strong bond, High durability, Good tactile quality, Process integration	High tool and process cost, Material compatibility
Wrapping	A decorative skin (PVC, TPO, leather, etc.) is thermoformed and bonded onto the substrate with foam.	PVC, TPO, PU, Leather, Foam (PUR), Adhesives	Instrument panels, Door trims, Armrests, Consoles	Soft-touch feel, Premium appearance, Design and material variety	Labor-intensive, Higher cost, Potential for delamination

Table 2. Comparative Evaluation of Decorative Manufacturing Technologies

Technology	Surface Quality	Design Flexibility	Cost (Level)	Weight Efficiency	Manufacturing Complexity	Durability	Sustainability	Overall Score*
In-Mold Decoration (IMD)	★★★★★	★★★★★	High	★★★½	★★★★	★★★★½	★★★	4.2
Mold-in-Color & Graining	★★★½	★★★	Low	★★★★	★★	★★★½	★★★★½	3.6
Painting Technologies	★★★★	★★★★½	Medium	★★★	★★★½	★★★½	★★½	3.4
Pad Printing (Tampo Printing)	★★★	★★★	Low	★★★★	★½	★★★	★★★	2.8
Chrome Plating	★★★★★	★★★	High	★★½	★★★★	★★★½	★	2.9
Textile Applications	★★★★	★★★★	Medium	★★★½	★★★½	★★★	★★★	3.4
Back Injection	★★★★½	★★★★	High	★★★★½	★★★★	★★★★½	★★★½	4.1
Wrapping	★★★★★	★★★★½	High	★★★	★★★★	★★★½	★★	3.6

** Overall Score is the average of all criteria. (★ = Poor, ★★ = Fair, ★★★ = Good, ★★★★ = Very Good, ★★★★★ = Excellent)*

4. CONCLUSION

In this study, commonly used decorative manufacturing technologies for automotive interior components were comparatively investigated. The fundamental manufacturing principles, application areas, engineering advantages and limitations of In-Mold Decoration (IMD), mold-in-color & graining, painting technologies, tampo printing, chrome coating, textile applications, back injection and wrapping methods were evaluated.

The results indicate that the selection of decorative manufacturing technologies depends on multiple parameters such as surface quality, cost, production volume, design flexibility, durability and vehicle segment. While premium vehicle applications prioritize high aesthetic quality and tactile performance, simpler and more economical manufacturing methods are generally preferred in high-volume and cost-oriented projects.

In particular, back injection and IMD technologies are considered among the manufacturing methods that are expected to gain increasing importance in the future due to their process integration capability, lightweight potential and high surface quality. At the same time, sustainable material usage, recyclability and low VOC emissions are becoming key factors influencing the development of decorative manufacturing technologies.

This study aims to contribute to the selection of appropriate decorative manufacturing methods during the early design stages of automotive interior components and to support the evaluation of different technologies from an engineering perspective.

REFERENCES

Tovillo, G., Rapuano, M., Milite, A., & Ruggiero, G. (2024). Perceived Quality in the Automotive Industry: Do Car Exterior and Interior Color Combinations Have an Impact?. Applied System Innovation, 7(5), 79.

Hu, Z. & Nong, Y. Brief introduction of imd technology and its application in automobiles. AutoTime 131–132 (2021)

Rong, H. Integrated molding process combining thermoplastic injection and reactive mold coating. China Plastics Industry 24–30 (2021)

Chen, H.-L., Huang, P.-W., Hsu, S.-H., & Wu, J.-S. (2025). Investigation of Processing Conditions and Product Geometry in Out-Mold Decoration and Their Effects on Film Adhesion and Deformation. Polymers, 17(24), 3239.

Thomas, J., Patil, R. S., John, J., & Patil, M. (2023). A Comprehensive Outlook of Scope within Exterior Automotive Plastic Substrates and Its Coatings. Coatings, 13(9), 1569.

Kim, B. R. (2011). VOC emissions from automotive painting and their control: A review. Environmental Engineering Research, 16(1), 1–9.

Kipphan, H. (Ed.). (2001). Handbook of print media: Technologies and production methods. Springer.

Smith, R. (2010). Industrial printing systems and print quality control. Journal of Imaging Science and Technology, 54(6), 60501-1–60501-7.

McNamara, J. B., & Sexton, B. J. (1965). Chrome plated ABS – A breakthrough for the automotive industry (SAE Technical Paper No. 650163). SAE International.

Mallory, G. O., & Hajdu, J. B. (Eds.). (1990). Electroless plating: Fundamentals and applications. American Electroplaters and Surface Finishers Society.

Oral, N., Otuz, O., Kocabıyık, R. K., & Akoğlu, M. (2024). Characterization of mechanical and temperature effects on delamination and basic strength behaviors of PVC coated PUR foam substrate used in bus dashboard. Heliyon, 10(20).

Giles, G.A.; Fasman, G.D.; Bain, D.R. (Eds.) Technology of Plastics Packaging for the Consumer Market; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2001; ISBN 978-0-8493-0508-5.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

The Role of Press Hardening Hot Stamping Components in Automotive Body Structures

Enes CEBE[1]

Abstract

This study evaluates the role and advantages of press hardening, also known as hot stamping, components used in automotive body structures through a literature-based review. In modern vehicle body engineering, the demand for high crashworthiness, reduced mass, and improved structural efficiency has increased the use of ultra-high-strength steel components in safety-critical areas. Press hardening enables steel sheets to be formed at elevated temperatures and rapidly quenched inside the die, resulting in a predominantly martensitic microstructure with very high strength. Within the scope of this study, the process is examined through the main stages of blank preparation, austenitization in a furnace, transfer, hot forming with in-die quenching, trimming and piercing operations, and coating strategies, especially Al–Si-based coatings. The findings indicate that press hardening improves mechanical performance, supports intrusion control in crash load paths, and enables lightweighting through gauge reduction and part integration when applied to suitable body components. Tailored and graded property approaches further enhance the balance between cabin protection and energy absorption within the same part. However, the process also introduces important trade-offs related to line investment, energy consumption, process window sensitivity, coating behavior, hardness distribution, and dimensional stability. From a sustainability perspective, low-carbon hot stamping approaches are mainly associated with steel grade selection, heating process efficiency, transfer optimization, and function-oriented part design. The study concludes that press hardening is a highly effective but process-sensitive technology whose benefits should be assessed at vehicle level through performance, mass, cost, quality, and carbon impact criteria.

Keywords: hot stamping; press hardening; press hardened steel; martensite; in-die quenching; Al–Si coating; tailored properties; graded properties; hardness mapping; energy consumption; CO_2.

[1] Engineering Designer, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş AR-GE Merkezi, Bursa,Türkiye, 0009-0009-4069-2404

GİRİŞ

Otomotiv gövde yapılarında, özellikle yolcu kabini çevresi, yan darbe elemanları, kolonlar, tavan rayları, traversler ve yük aktarım yollarında yüksek dayanım, düşük kütle ve yüksek çarpışma performansı beklentileri malzeme ve proses seçimlerini doğrudan etkilemektedir. Bu beklentiler doğrultusunda ultra yüksek dayanımlı çeliklerin güvenlik-kritik gövde elemanlarında kullanımı giderek artmıştır. Press hardening, diğer adıyla hot stamping, sac malzemenin yüksek sıcaklıkta şekillendirilmesi ve aynı kalıp içinde hızlı şekilde soğutularak martenzitik yapıya dönüştürülmesi esasına dayanan bir üretim prosesidir. Bu yöntem, yüksek yapısal direnç ve ölçüsel tekrar edilebilirlik gerektiren otomotiv gövde parçalarında önemli bir çözüm olarak değerlendirilmektedir (Karbasian ve Tekkaya, 2010: 2103-2118).

Press hardening prosesinin temel avantajı, oda sıcaklığında şekillendirilmesi zor olan yüksek dayanımlı çeliklerin, yüksek sıcaklıkta artan şekillendirilebilirlik sayesinde daha karmaşık geometrilerde üretilebilmesidir. Şekillendirme sonrasında kalıp içinde gerçekleştirilen hızlı soğutma ile nihai yüksek dayanım elde edilir. Böylece proses, üretim sırasında şekillendirilebilirliği, son parçada ise yüksek mekanik performansı bir araya getirir (Karbasian ve Tekkaya, 2010: 2103-2118; Åkerström ve Oldenburg, 2006: 399-406).

Bu çalışmanın amacı, otomotiv gövde yapılarında kullanılan press hardening parçaların avantajlarını, sınırlamalarını ve mühendislik etkilerini teknik bir çerçevede değerlendirmektir. Konu; mekanik performans, çarpışma güvenliği, ağırlık azaltma, üretilebilirlik, kalite kontrol, maliyet, sürdürülebilirlik ve proses kaynaklı riskler başlıkları altında ele alınmıştır. Çalışmada herhangi bir firma, OEM veya marka adına ait gizli bilgi kullanılmamıştır. Endüstriyel örnekler gerekli olduğu durumlarda genel mühendislik yaklaşımı üzerinden değerlendirilmiştir.

YÖNTEM

Bu çalışma literatür araştırması yöntemiyle hazırlanmıştır. Literatür taraması; press hardening/hot stamping prosesinin temel prensipleri, mikro yapı ve mekanik özellik ilişkisi, kaplama etkileri, tailored/graded özellik yaklaşımları, proses kalite kontrolü ve enerji/karbon emisyonu perspektiflerini kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Seçilen kaynaklar; derleme makaleleri, proses simülasyonu çalışmaları, kaplama davranışına yönelik malzeme incelemeleri, düşük karbonlu hot stamping çalışmaları ve sertlik ölçüm standartlarını içermektedir. İncelenen literatür, press hardened steel parçaların otomotiv gövde yapılarındaki temel teknik avantajlarını ve trade-off noktalarını belirlemek amacıyla değerlendirilmiştir. Bulgular, body-in-white tasarımı ve üretimi açısından önemli mühendislik başlıkları altında gruplandırılmıştır.

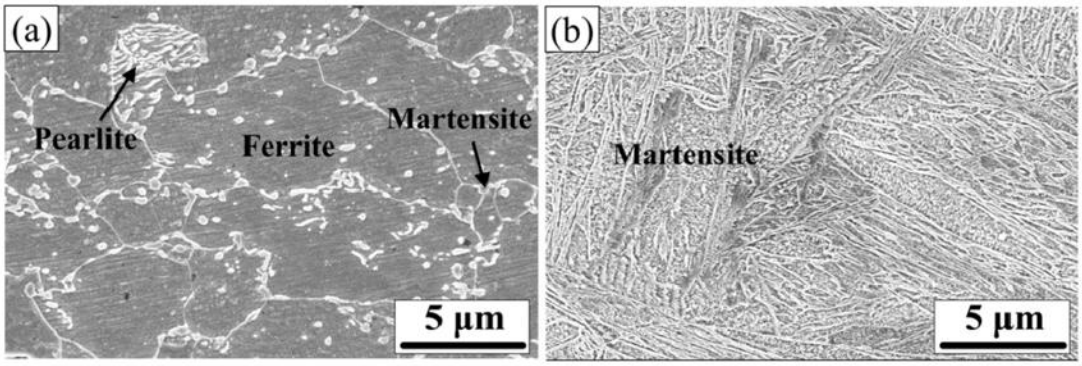
BIW Yapılarının Geometrik Karmaşıklığı

Mekanik Performans

Press hardening prosesinin mekanik üstünlüğü temel olarak kalıp içinde hızlı soğutma sonucu elde edilen martenzitik mikro yapıya dayanmaktadır. Proses sırasında çelik sac önce austenit bölgesine kadar ısıtılır, ardından yüksek sıcaklıkta şekillendirilir ve kontrollü koşullar altında kalıp içinde söndürülür. Oluşan martenzitik yapı çok yüksek çekme dayanımı sağlar ve

bu durum press hardened steel parçaların yüksek yük taşıma kapasitesi gerektiren gövde bölgelerinde kullanılmasına imkân tanır (Karbasian ve Tekkaya, 2010: 2103-2118).

Parçanın nihai özellikleri; ısıtma sıcaklığı, bekleme süresi, transfer süresi, takım-parça temas koşulları, kalıp soğutma performansı ve soğutma hızı gibi birçok proses parametresinden etkilenir. Bu nedenle yalnızca ortalama dayanım değeri değil, parça boyunca sertlik ve mekanik özellik dağılımı da kritik bir kalite kriteridir. Termo-metalurjik simülasyonlar, sertlik profillerinin ve faz dönüşüm davranışının öngörülmesini destekler. Ancak bu öngörülerin deneysel doğrulama ile teyit edilmesi, üretim koşullarında hedeflenen mekanik özelliklerin sağlandığını göstermek açısından gereklidir (Åkerström ve Oldenburg, 2006: 399-406).



Şekil 3. 22MnB5 pres sertleştirilmiş çeliğin ana metal mikroyapısı: 22MnB5 pres sertleştirilmiş çeliğin ana metal mikroyapısı:
a) İlk teslim/alındığı durum b) Sıcak şekillendirilmiş durum (Saha vd., 2016).

Kaplama davranışı da mekanik performansı etkileyen önemli bir faktördür. Al–Si kaplamalar, ısıtma sırasında oksidasyon ve dekarbürizasyon risklerini azaltmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak yüksek sıcaklığa maruz kalma sonrasında kaplama sisteminde difüzyon tabakaları ve intermetalik fazlar oluşabilir. Bu tabakalar özellikle bükme, kenar yükleme veya şekillendirme kaynaklı gerinim koşullarında çatlak davranışını etkileyebilir. Bu nedenle kaplama durumu, ısıtma parametreleri ve proses kontrol kriterleri dikkatli şekilde optimize edilmelidir (Cho vd., 2020).

Geleneksel advanced high-strength steel malzemelerle karşılaştırıldığında press hardened steel parçalar, güvenlik-kritik bölgelerde çok yüksek nihai dayanımı üretilebilir geometri ile birleştirmesi sayesinde öne çıkar. Ancak bu avantaj, ısıtma, transfer ve kalıp içi söndürme sistemleri nedeniyle daha yüksek proses karmaşıklığı ile birlikte değerlendirilmelidir (Karbasian ve Tekkaya, 2010: 2103-2118)

Çarpışma Güvenliği

Press hardening parçaların otomotiv gövde yapılarındaki en önemli katkılarından biri çarpışma performansıdır. Press hardened parçalar, kritik yük yollarının dayanımını ve rijitliğini artırarak yolcu kabini çevresindeki intrusion kontrolünü güçlendirebilir. Bu durum özellikle A kolonu, B kolonu, tavan rayı, rocker reinforcement, tampon kirişi ve travers gibi çarpışma sırasında yapısal bütünlüğün korunmasının gerekli olduğu parçalarda önemlidir (Karbasian ve Tekkaya, 2010: 2103-2118).

Bununla birlikte modern çarpışma tasarımında her bölgede maksimum rijitlik hedeflenmez. Bazı bölgelerde kontrollü deformasyon ve enerji yutma kabiliyeti de gereklidir.

Bu nedenle tailored ve graded özellik yaklaşımları önem kazanmıştır. Bu yöntemler, aynı parçanın farklı bölgelerinde farklı mekanik özelliklerin elde edilmesine imkân verir. Örneğin bir bölge yolcu kabini koruması için çok yüksek dayanımlı tasarlanırken, başka bir bölge enerji yutma amacıyla daha sünek özellikte tasarlanabilir (Merklein vd., 2016: 11-24).

Tailored tempering ve graded özellik yaklaşımları, intrusion kontrolü ile deformasyon yönetimi arasında fonksiyonel bir denge kurulmasını sağlar. Böylece mühendisler, birden fazla ayrı parça kullanmak yerine tek bir komponent üzerinde lokal olarak optimize edilmiş performans elde edebilir. Mikro yapı ve sertlik dağılımının simülasyon tabanlı öngörülmesi de erken mühendislik fazlarında çarpışma performans hedefleri ile proses parametrelerinin ilişkilendirilmesine yardımcı olur (Åkerström ve Oldenburg, 2006: 399-406).

Ağırlık Azaltma

Press hardening, uygun gövde parçalarında kalınlık düşürme ve parça entegrasyonu sağlayarak araç ağırlığının azaltılmasına katkıda bulunabilir. Press hardened steel parçalar, söndürme sonrasında çok yüksek dayanım seviyelerine ulaştığından, bazı komponentlerde gerekli çarpışma ve dayanım performansı korunarak daha düşük sac kalınlığı kullanılabilir. Bunun yanında bazı fonksiyonlar tek bir press hardened parça üzerinde birleştirilebilir ve böylece takviye, braket veya bindirme yapılarının sayısı azaltılabilir (Karbasian ve Tekkaya, 2010: 2103-2118).

Araç seviyesi açısından ağırlık azaltma yalnızca tek bir parçadaki kütle kazancı ile değerlendirilmemelidir. Gerçek fayda; malzeme tasarrufu, çarpışma performansı, üretim karmaşıklığı, takım maliyeti, enerji tüketimi ve karbon etkisi arasındaki dengeye bağlıdır. Düşük karbonlu hot stamping çalışmaları, prosesin sürdürülebilirliğinin çelik grade seçimi, ısıtma verimliliği, proses optimizasyonu ve parça tasarım stratejisi üzerinden değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Hou vd., 2023: 324-339).

Bu nedenle press hardening önemli bir ağırlık azaltma potansiyeli sunmakla birlikte, en verimli kullanım alanı performans avantajının proses karmaşıklığı ve enerji girdisini teknik olarak karşılayabildiği güvenlik-kritik bölgelerdir.

Üretilebilirlik ve Proses Akışı

Genel press hardening proses akışı; blank hazırlığı, austenitleme için fırında ısıtma, fırından prese transfer, sıcak şekillendirme, kalıp içinde söndürme, trimming/piercing ve nihai ölçüsel veya yüzey operasyonları şeklinde özetlenebilir. Her proses adımı, parçanın nihai kalitesi ve mekanik performansı üzerinde doğrudan etkilidir (Karbasian ve Tekkaya, 2010: 2103-2118).

Üretilebilirlik açısından en kritik konulardan biri transfer sırasında sıcaklık kaybının kontrol edilmesidir. Blank, şekillendirme ve söndürme öncesinde fazla ısı kaybederse faz dönüşümü ve nihai sertlik dağılımı olumsuz etkilenebilir. Benzer şekilde kalıp soğutma kapasitesi, temas basıncı, takım sıcaklığı ve çevrim süresi de kararlı bir proses penceresi elde etmek için kritik parametrelerdir (Åkerström ve Oldenburg, 2006: 399-406).

Press hardened parçaların nihai sertliği yüksek olduğundan trimming ve piercing operasyonları geleneksel çelik parçalara göre daha zorlayıcı olabilir. Takım aşınması, kenar çatlağı, ölçüsel sapma ve çapak oluşumu olası riskler arasındadır. Bu nedenle operasyon

sıralaması, kesme yöntemi, takım malzemesi ve bakım stratejisi press hardened steel uygulamalarına özel olarak uyarlanmalıdır (Karbasian ve Tekkaya, 2010: 2103-2118; Merklein vd., 2016: 11-24).

Kalite Kontrol ve Ölçüm

Press hardening prosesinde kalite riskleri büyük ölçüde oksidasyon, dekarbürizasyon, kaplama çatlakları, sertlik değişkenliği, ölçüsel distorsiyon ve lokal özellik sapmaları ile ilişkilidir. Bu riskler prosesin ısıl çevrimi ve soğutma koşulları ile doğrudan bağlantılıdır (Karbasian ve Tekkaya, 2010: 2103-2118).

Sertlik haritalama, hedeflenen mekanik özelliklerin parça boyunca sağlanıp sağlanmadığını doğrulamak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Parça geometrisi, kalıp temas durumu, lokal soğutma koşulları ve tailored özellik tasarımı nedeniyle nihai parçada bölgesel farklılıklar oluşabilir. Bu nedenle tek nokta sertlik ölçümü bazı durumlarda yeterli olmayabilir. Ölçüm sonuçlarının tekrarlanabilir ve karşılaştırılabilir olması için standartlaştırılmış bir ölçüm yaklaşımı gereklidir. Bu kapsamda Vickers sertlik testi standardı, sertlik doğrulaması için önemli bir referans niteliğindedir (International Organization for Standardization, 2023).

Simülasyon tabanlı sertlik öngörüsü ile deneysel sertlik doğrulamasının birlikte kullanılması kapalı döngü bir kalite kontrol yaklaşımı oluşturur. Bu yaklaşım, proses sapmalarının belirlenmesine, kalıp soğutma performansının optimize edilmesine ve gerçek parçanın gerekli güvenlik ve performans hedeflerini karşılayıp karşılamadığının doğrulanmasına yardımcı olur (Åkerström ve Oldenburg, 2006: 399-406).

Maliyet Değerlendirmesi

Press hardening prosesinin maliyeti; fırın kapasitesi, otomasyon seviyesi, çevrim süresi, kalıp soğutma sistemi, enerji tüketimi, hurda oranı, takım aşınması ve son operasyonlar gibi birçok faktöre bağlıdır. Geleneksel soğuk şekillendirme prosesleriyle karşılaştırıldığında press hardening genellikle daha yüksek yatırım maliyeti gerektirir. Bunun temel nedeni ısıtma ekipmanı, transfer sistemleri, soğutmalı kalıplar ve proses kontrol altyapısına duyulan ihtiyaçtır (Karbasian ve Tekkaya, 2010: 2103-2118).

Bununla birlikte maliyet yalnızca parça seviyesinde değerlendirilmemelidir. Bazı durumlarda press hardening, parça sayısının azaltılmasına, daha ince sac kalınlıklarının kullanılmasına, çarpışma performansının artırılmasına ve yapısal yük yolunun sadeleştirilmesine imkân verebilir. Bu avantajlar, seçilen parçaya ve araç mimarisine bağlı olarak yüksek proses yatırımını dengeleyebilir (Merklein vd., 2016: 11-24).

Bu nedenle press hardening kullanım kararı performans, kütle, maliyet ve kalite kriterlerini birlikte ele alan bir matris üzerinden verilmelidir. Teknoloji, özellikle yüksek dayanım, çarpışma güvenliği ve ağırlık azaltma faydasının açık mühendislik değeri oluşturduğu bölgelerde uygundur.

Sürdürülebilirlik

Press hardening prosesine yönelik sürdürülebilirlik tartışması çoğunlukla ısıtma adımının enerji tüketimi ve prosesin toplam karbon ayak izi etrafında şekillenmektedir. Çelik

sacın austenitleme sıcaklığına kadar ısıtılması gerektiğinden proses önemli miktarda termal enerji gerektirir. Bu nedenle ısıtma, transfer ve çevrim yönetiminde enerji verimliliği önemli bir sürdürülebilirlik başlığıdır (Hou vd., 2023: 324-339).

Düşük karbonlu hot stamping yaklaşımları birkaç temel strateji üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bunlar; optimize edilmiş çelik grade kullanımı, verimli fırın teknolojileri, transfer kayıplarının azaltılması, daha kısa çevrim süreleri, geliştirilmiş kalıp soğutma tasarımı ve yüksek dayanımın yalnızca gerekli bölgelerde kullanıldığı parça tasarımlarıdır. Tüm yapıda maksimum dayanım kullanmak yerine tailored özellik yaklaşımları daha fonksiyonel bir malzeme dağılımı sağlar. Böylece güvenlik performansı korunurken gereksiz malzeme kullanımı azaltılabilir (Merklein vd., 2016: 11-24; Hou vd., 2023: 324-339).

Sürdürülebilirlik açısından press hardening faydası yaşam döngüsü odaklı bir yaklaşımla değerlendirilmelidir. Üretim fazındaki enerji girdisi; araç kütlesindeki azalma, kullanım fazındaki enerji tüketimi düşüşü ve yapısal verimlilik artışı gibi potansiyel faydalarla birlikte ele alınmalıdır.

Sınırlamalar ve Riskler

Avantajlarına rağmen press hardening prosesinin bazı sınırlamaları ve riskleri bulunmaktadır. İlk önemli sınırlama proses penceresi hassasiyetidir. Isıtma sıcaklığı, bekleme süresi, transfer süresi, şekillendirme hızı, temas basıncı ve soğutma hızı dikkatli şekilde kontrol edilmelidir. Bu parametrelerdeki küçük sapmalar mikro yapı, sertlik, ölçüsel doğruluk ve nihai performans üzerinde etkili olabilir (Karbasian ve Tekkaya, 2010: 2103-2118; Åkerström ve Oldenburg, 2006: 399-406).

İkinci önemli risk kaplama ve ara tabaka davranışı ile ilişkilidir. Al–Si kaplamalar oksidasyona karşı koruma sağlasa da difüzyon tabakaları ve intermetalik fazların oluşumu bazı yükleme koşullarında çatlak başlatma ve ilerleme davranışını etkileyebilir (Cho vd., 2020).

Bir diğer önemli sınırlama ölçüsel distorsiyondur. Prosesin ısıl çevrim ve hızlı soğutma içermesi nedeniyle artık gerilmeler ve geometriye bağlı distorsiyonlar oluşabilir. Bu durum güçlü kalıp tasarımı, kararlı soğutma kontrolü ve güvenilir ölçüsel doğrulama gerektirir.

Son olarak enerji tüketimi ve yatırım yoğunluğu önemli trade-off noktalarıdır. Bu nedenle press hardening, ancak yapısal ve güvenlik faydalarının ek üretim karmaşıklığını, enerji girdisini ve maliyeti teknik olarak gerekçelendirdiği parçalarda uygulanmalıdır (Hou vd., 2023: 324-339).

3. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Press hardening, özellikle yüksek dayanım, intrusion direnci ve yapısal verimlilik gerektiren güvenlik-kritik otomotiv gövde parçaları için oldukça etkili bir üretim teknolojisidir. Kalıp içinde söndürme sırasında gerçekleşen martenzitik dönüşüm sayesinde proses çok yüksek mekanik performans sağlar ve oda sıcaklığında şekillendirilmesi zor olan karmaşık geometrilerin üretimine imkân verir (Karbasian ve Tekkaya, 2010: 2103-2118; Åkerström ve Oldenburg, 2006: 399-406).

Literatür bulguları, press hardening parçaların intrusion kontrolünü artırarak ve yük yollarını güçlendirerek çarpışma güvenliğine katkı sağladığını göstermektedir. Tailored ve graded özellik yaklaşımları ise aynı parça içinde yüksek dayanımlı ve daha sünek bölgelerin

birlikte tasarlanmasına olanak verir. Bu durum yolcu kabini koruması ile enerji yutma fonksiyonları arasında daha etkili bir denge kurulmasını sağlar (Merklein vd., 2016: 11-24).

Press hardening ayrıca kalınlık azaltma ve parça entegrasyonu yoluyla ağırlık azaltma hedeflerine katkı sağlayabilir. Ancak bu teknoloji; termal enerji tüketimi, hat yatırımı, kaplama davranışı, trimming operasyonları, proses penceresi hassasiyeti ve kalite kontrol gereksinimleri açısından bazı trade-off'lar oluşturur. Bu nedenle uygulama kararı yalnızca parça seviyesinde dayanım karşılaştırması üzerinden değil, araç seviyesi performans, kütle, maliyet, kalite ve karbon etkisi kriterleri üzerinden verilmelidir.

Gelecek dönemde başlıca gelişim alanlarının daha yaygın tailored özellik mimarileri, düşük karbonlu ısıtma ve çevrim optimizasyonları, dijital proses izleme, simülasyon tabanlı sertlik öngörüsü ve kapalı döngü kalite kontrol yaklaşımları olması beklenmektedir. Bu çerçevede press hardening, performans, maliyet, kalite ve sürdürülebilirlik etkileri birlikte yönetildiğinde modern body-in-white tasarımında stratejik bir teknoloji olmaya devam etmektedir.

KAYNAKÇA

Åkerström, P., ve Oldenburg, M. (2006). Austenite decomposition during press hardening of a boron steel: Computer simulation and test. Journal of Materials Processing Technology, 174(1–3), 399–406. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.02.013

Cho, L., Golem, L., Seo, E. J., Bhattacharya, D., Speer, J. G., ve Findley, K. O. (2020). Microstructural characteristics and mechanical properties of the Al–Si coating on press hardened 22MnB5 steel. Journal of Alloys and Compounds, 846, 156349. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156349

Hou, Z., Liu, Y., He, Q., Wang, J., ve Min, J. (2023). Low-carbon-emission hot stamping: A review from the perspectives of steel grade, heating process, and part design. Automotive Innovation, 6, 324–339. https://doi.org/10.1007/s42154-023-00242-3

International Organization for Standardization. (2023). ISO 6507-1:2023 Metallic materials — Vickers hardness test — Part 1: Test method. Erişim tarihi: 16 Şubat 2026, https://www.iso.org/standard/83898.html

Karbasian, H., ve Tekkaya, A. E. (2010). A review on hot stamping. Journal of Materials Processing Technology, 210(15), 2103–2118. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.019

Merklein, M., Wieland, M., Lechner, M., Bruschi, S., ve Ghiotti, A. (2016). Hot stamping of boron steel sheets with tailored properties: A review. Journal of Materials Processing Technology, 228, 11–24. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.023

D.C. Saha, E. Biro, A.P. Gerlich, Y.N. Zhou, Fiber laser welding of AlSi coated press hardened steel, Reprinted with permission from the Welding Journal, Copyright American Welding Society, (2016).

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Sönüm Oranı Hassasiyetinin Mod Şekilleri, Rezonans Tepkisi ve Lambda Doğruluğu Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi

Uğurcan SERBEST[1]
Mustafa NAZLI[2]

Abstract

This study examines the influence of damping definition on the dynamic response of a structural system using frequency response function (FRF) analysis, with particular emphasis on modal behavior and frequency-domain characteristics. The main objective is to evaluate how different damping formulations affect resonance representation and modal contributions in numerical dynamic analyses. Two damping approaches are compared: (1) a conventional definition without modal or frequency-based correlation, and (2) a physically informed correlated definition intended to better represent structural behavior. Numerical investigations demonstrate that variations in damping formulation do not alter statically derived structural parameters but significantly influence the amplitude, bandwidth, and frequency location of the FRF responses, as well as the relative contribution of vibration modes. The conventional, non-correlated approach leads to excessive suppression of resonance peaks, wider effective bandwidths, and altered modal contribution patterns, reducing the physical interpretability of the dynamic response. In contrast, the correlated definition provides clearer resonance behavior, improved modal separation, and frequency-domain responses more representative of the physical system. A lambda factor derived from static structural analysis is used as a reference parameter to assess consistency between static and dynamic behavior. While the lambda factor itself remains unaffected by damping formulation, improved coherence between static stiffness characteristics and dynamic frequency-domain responses is observed when the correlated approach is employed. The findings underline the importance of physically informed damping modeling in FRF-based structural dynamic analyses and highlight its role in obtaining reliable and realistic dynamic response predictions for safety-critical automotive components such as wheel rims.

Keywords: Modal Analysis, Frequency Response Function (FRF), Lambda Factor, Damping Definition, Wheel Rim, Finite Element Analysis (FEA)

[1] TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş, AR-Ge, Orcıd: 0009-0000-0816-5617
[2] TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş, AR-Ge, Orcıd: 0009-0008-8822-4346

INTRODUCTION

Wheel rim structures represent safety-critical components in automotive systems, where structural integrity, durability, and dynamic behavior play a crucial role in overall vehicle performance (Ewins, 2000: 15). Due to their geometric complexity and exposure to dynamic loading, wheel rims are subjected to combined static and dynamic effects that influence both vibration behavior and service performance. Therefore, an accurate representation of their dynamic characteristics is essential for reliable structural design and assessment (Maia ve Silva, 1997: 42).

Figure 1. Steel automotive wheel rim: (a) Outer view; (b) Inner view

Frequency Response Function (FRF) analysis is widely used to investigate the dynamic behavior of engineering structures in the frequency domain (Richardson ve Formenti, 1982: 3). By relating excitation inputs to structural responses, FRF-based approaches provide valuable insight into modal characteristics and the interaction between mass, stiffness, and damping properties. In applications involving wheel rim structures, FRF analysis offers an effective framework for evaluating vibration behavior under representative dynamic conditions (Ewins, 2000: 78).

One of the key challenges in FRF-based finite element analyses is the appropriate definition of damping (Hebbal ve Dabair, 2016: 248). Damping governs the dissipation of vibrational energy and has a direct influence on the amplitude, shape, and interpretation of modal responses. For practical numerical applications, damping is often defined using simplified or uniform assumptions. While such approaches may improve numerical robustness, they can also alter the physical representation of dynamic behavior by suppressing or distorting modal characteristics (Liang vd., 2016: 192).

Previous studies have indicated that damping behavior in metallic structures with geometric symmetry and connection-dominated load paths may exhibit mode-dependent characteristics rather than uniform behavior across the frequency range (Harris ve Piersol, 2002: 210). In such cases, correlated or physically informed damping definitions have been shown to provide a more realistic representation of the dynamic response, particularly in terms of modal separation and interpretability (Inman, 2014: 135).

The present study investigates the dynamic behavior of a wheel rim structure using finite element–based FRF analysis, with particular emphasis on the influence of damping definition. Two different damping approaches are examined, and their effects on modal behavior and perceived dynamic stiffness are evaluated. Additionally, a statically derived parameter, referred to as the lambda factor, is used as a reference to assess consistency between static and dynamic responses.

METHOD

Generalized Eigenvalue Problem

The foundation of modal analysis is the generalized eigenvalue problem derived from the undamped equation of motion (Clough ve Penzien, 1993: 210). For free vibration analysis, the equation of motion is expressed as:

$$[K]\{\varphi\} = \lambda[M]\{\varphi\}$$

where [K] is the global stiffness matrix (N/m), [M] is the global mass matrix (kg), λ (Lambda) is the eigenvalue (rad^2/s^2), and {φ} is the eigenvector (mode shape) (Clough ve Penzien, 1993: 212). The eigenvalue λ is related to the natural frequency ω_n by $\lambda = \omega_n^2$. Thus, the natural frequency in Hz is computed as $f_n = \sqrt{(\lambda)} / (2\pi)$.

The eigenvalue equation can be rewritten in standard form as $[K - \lambda M]\{\varphi\} = 0$ (Inman, 2014: 145). For non-trivial solutions to exist, the determinant of $[K - \lambda M]$ must equal zero, yielding the characteristic equation $\det[K - \lambda M] = 0$. Solving this N-degree polynomial equation yields N eigenvalues $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n$, each corresponding to a natural frequency and associated mode shape (Harris ve Piersol, 2002: 215).

Eigenvalue Solution Methods

For finite element models of practical structures like wheel rims, direct solution of the characteristic equation is computationally intractable due to the large number of degrees of freedom (typically 50,000 to 500,000) (Harris ve Piersol, 2002: 220). Instead, iterative eigenvalue solvers are employed.

Lanczos Method: This is the most commonly used eigenvalue solver for large structural dynamics problems (Inman, 2014: 152). The Lanczos algorithm transforms the large, sparse generalized eigenvalue problem into a smaller tridiagonal problem, then solves it to extract the lowest N eigenvalues and corresponding eigenvectors.

Subspace Iteration Method: This iterative technique projects the generalized eigenvalue problem onto a lower-dimensional subspace (Harris ve Piersol, 2002: 225). It is effective for extracting multiple eigenvalues and is robust for ill-conditioned matrices.

Arnoldi Method: Used for non-symmetric or damped eigenvalue problems, the Arnoldi iteration builds an orthonormal basis and computes eigenvalues of a smaller projected problem (Harris ve Piersol, 2002: 228).

FRF Synthesis from Eigenvalues

Once eigenvalues and mode shapes are computed, the FRF can be synthesized via modal expansion (Ewins, 2000: 112). The FRF is expressed as a superposition of modal contributions:

$$H(\omega) = \Sigma_n \{\varphi_n\}\{\varphi_n\}^T / (\lambda_n - \omega^2 + i\omega c_n)$$

where H(ω) is the FRF matrix, φ_n is the n-th eigenvector (mode shape), λ_n is the n-th eigenvalue (ω_n^2), ω is excitation frequency (rad/s), c_n is modal damping, and $i = \sqrt{(-1)}$ (Ewins, 2000: 115). At frequencies near the natural frequency ($\omega \approx \omega_n$), the denominator becomes small, causing the corresponding mode to dominate the response, producing characteristic peaks in the FRF magnitude plot (Maia ve Silva, 1997: 88).

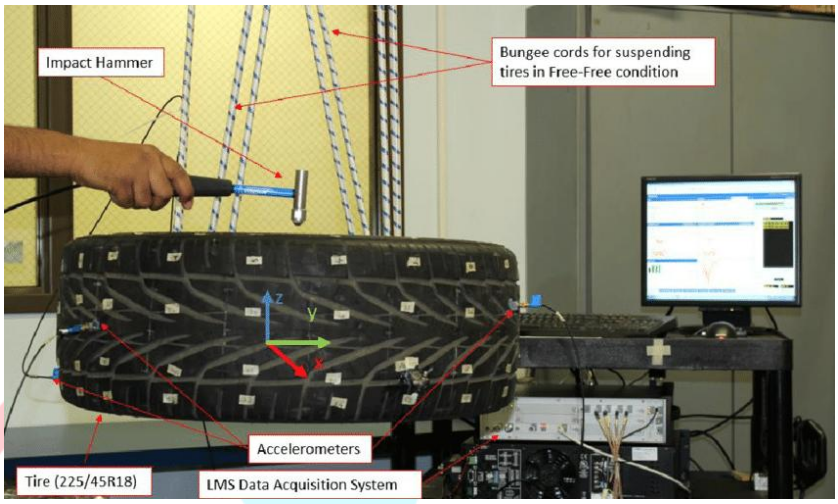


Figure 2. Experimental setup for impact hammer modal testing of a tyre

RESULTS AND ANALYSIS

FEA Results and Modal Characteristics

In this study, the dynamic behavior of the wheel rim structure was analyzed using the finite element method (Ewins, 2000: 125). The results obtained from static analysis, modal analysis, and frequency response function (FRF) analyses were evaluated together. Structural stiffness parameters derived from static analyses, together with the lambda factor, were used as a physically based reference for interpreting the dynamic analysis results (Ewins, 2000: 128).

FRF analyses conducted in the frequency domain demonstrated that the dynamic characteristics of the system can be represented by distinct modal responses (Maia ve Silva, 1997: 95). A dominant modal behavior was observed in the lower frequency range, while multiple modal contributions emerged as different degrees of freedom became effective over a wider frequency range. This observation indicates that the dynamic behavior of the wheel rim structure can be clearly identified and separated in the frequency domain (Inman, 2014: 165).

Evaluation of the first mode showed that, when the overall deformation pattern of the mode shapes and the dominant response components observed in the FRF results are considered together, this mode exhibits a character in which rotational behavior is predominant (Richardson ve Formenti, 1982: 7). Such globally dominated rotational modes are commonly encountered in geometrically symmetric structures with high circumferential stiffness, as reported in the literature (Clough ve Penzien, 1993: 245).

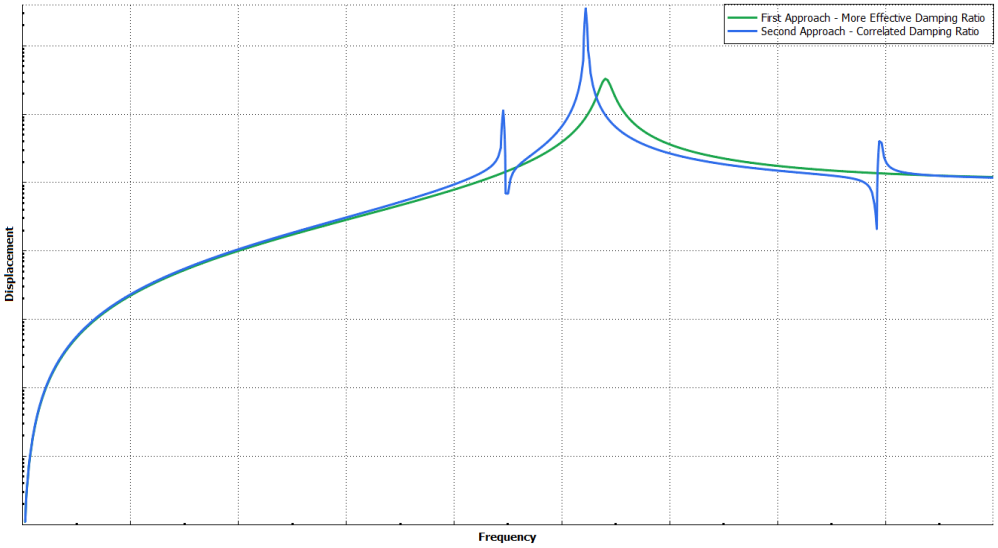


Figure 3. Comparison between two damping ratio definitions on FRF response.

Damping Effects on Dynamic Response

To investigate the effect of damping on the dynamic response, analyses were performed using two different damping definitions (Hebbal ve Dabair, 2016: 250). In the first approach, a damping definition without modal or frequency-based correlation was applied. Under this approach, the FRF results indicated suppressed modal amplitudes and smoother transitions between modes, suggesting a shift toward a stiffer apparent dynamic behavior of the system (Hebbal ve Dabair, 2016: 252).

In the second approach, a correlated damping definition was adopted to better reflect the physical behavior of the structure (Liang vd., 2016: 195). This approach resulted in more pronounced modal responses, improved modal distinguishability, and a dynamic behavior more consistent with the structural parameters obtained from static analyses (Liang vd., 2016: 198). The results demonstrate that the choice of damping definition has a decisive influence not only on the amplitude levels of the frequency response functions but also on the perceived dynamic stiffness and modal characteristics of the system (Ewins, 2000: 140).

DISCUSSION

The results obtained from the FRF and finite element analyses clearly demonstrate that damping definition is a critical modeling parameter for accurately representing the dynamic behavior of wheel rim structures (Ewins, 2000: 145). The effectiveness and physical relevance of FRF-based modal analyses are strongly dependent on how damping is defined within the numerical model (Inman, 2014: 170).

When damping definitions lacking modal or frequency correlation are employed, the dynamic behavior of the system may appear artificially stiff (Hebbal ve Dabair, 2016: 251). This can lead to suppressed modal responses and reduced modal separation, thereby limiting the physical interpretability of the results. In contrast, the use of correlated damping definitions resulted in a more balanced dynamic response, allowing modal contributions to be more clearly distinguished (Liang vd., 2016: 199).

In metallic structures with joints and connections, damping has been shown to exhibit mode-dependent behavior, and uniform damping assumptions may therefore fail to capture the true dynamic response (Harris ve Piersol, 2002: 230). The consistency observed between the dynamic results obtained with correlated damping and the lambda factor derived from static analysis highlights the importance of linking static and dynamic parameters (Clough ve Penzien, 1993: 250). This agreement suggests that statically derived parameters, when used together with physically appropriate dynamic assumptions, can effectively support the interpretation of frequency-domain analyses.

From a broader perspective, the findings indicate that FRF analyses should be considered as part of an integrated evaluation process, in which frequency-domain results are interpreted alongside static structural characteristics and expected physical behavior. Within this context, damping definition plays a central role in ensuring that dynamic analysis results are both physically meaningful and suitable for engineering decision-making. For safety-critical components such as wheel rims, where durability and vibration performance are of primary concern, defining damping in a physically informed and structure-consistent manner is essential (Ewins, 2000: 150)

Design Implications

Steel Rim Applications. Steel rims are preferred for commercial vehicles, trucks, buses, and off-road vehicles where durability and impact resistance are paramount (Inman, 2014: 180). The higher stiffness and inherent damping provide robust response even under severe operating conditions. However, the lower natural frequencies mean steel rims are more susceptible to resonance with lower-frequency excitations such as tire imbalance and suspension harmonics (Harris ve Piersol, 2002: 240).

Design Optimization. Modern wheel design employs FRF analysis to systematically optimize the trade-off between stiffness, weight, and resonance characteristics (Ewins, 2000: 155). Finite element parametric studies vary spoke thickness, rim thickness, hub transitions, and material grades, computing eigenvalues and FRF for each variant. The goal is to achieve natural frequencies outside critical operating frequency bands while maintaining load-carrying capacity and minimizing mass (Inman, 2014: 185).

NVH Performance. Noise, Vibration, and Harshness (NVH) performance of automotive systems depends critically on wheel rim dynamic characteristics (Clough ve Penzien, 1993: 260). By controlling natural frequencies away from excitation sources and optimizing damping

characteristics, engineers can significantly reduce cabin noise and vibration transmission (Harris ve Piersol, 2002: 245).

CONCLUSION

In this study, the dynamic behavior of wheel rim structures was investigated using the finite element method and frequency response function (FRF) analyses, with static analysis, modal analysis, and frequency-domain results evaluated within an integrated framework. This approach enabled the development of a consistent dynamic modeling strategy that accurately represents the physical behavior of the system.

Material properties and damping definitions were systematically examined, and the effects of different damping approaches on the dynamic response were evaluated in a comparative manner. Correlation studies conducted between experimental modal test results and numerical FRF outputs revealed that the use of physically based damping definitions provides an agreement of approximately 90% in terms of resonance frequencies and the overall characteristics of the FRF curves.

This high level of correlation demonstrates that the selected material properties and damping ratio successfully represent the physical behavior of the system. Consequently, the damping ratio employed in the study was not treated as an assumed parameter but was calibrated and validated using experimental data, thereby constituting a physically substantiated modeling input.

The findings indicate that damping definition affects not only the amplitude levels of the FRF responses, but also resonance behavior, the distribution of modal contributions, and the perceived dynamic stiffness of the structure. The adoption of a physically meaningful damping definition led to more realistic results in frequency-domain analyses and established a strong consistency between the dynamic response and the lambda factor derived from static analyses.

In conclusion, the results demonstrate that accurate material selection combined with a physically informed damping definition can achieve an approximately 90% correlation with experimental data. This highlights the significance of such an approach in the dynamic analysis of safety-critical wheel rim structures. The outcomes of this study contribute to the development of reliable and experimentally validated dynamic modeling strategies for automotive applications.

LITERATURE

[1] Clough, R. W., Penzien, J. (1993). Dynamics of structures (3rd ed.). Berkeley, CA: Computers & Structures.

[2] Ewins, D. J. (2000). Modal testing: Theory, practice and application (2nd ed.). Baldock, UK: Research Studies Press.

[3] Harris, C. M., Piersol, A. G. (2002). Harris' shock and vibration handbook (5th ed.). New York, NY: McGraw-Hill.

[4] Hebbal, P., Dabair, M. S. (2016). Static structural, modal and harmonic analysis of alloy car wheel rim. International Journal of Engineering Research and Technology, 5(5), 247-253.

[5] Inman, D. J. (2014). Engineering vibration (4th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.

[6] Liang, X., Wang, Z., Gao, Y., Zhang, H. (2016). The relationship between frequency response function and operational deflection shape. Vibration Testing Technology Journal, 34(2), 189-201.

[7] Maia, N. M. M., Silva, J. M. M. (1997). Theoretical and experimental modal analysis. Baldock, UK: Research Studies Press.

[8] Richardson, M. H., Formenti, D. L. (1982). Parameter estimation from frequency response measurements using rational fraction polynomials. Proceedings of IMAC I. Schenectady, NY: Union College.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Güvenlik Kritik Otomotiv Yapısal Bileşenlerinde Gigacasting Teknolojisinin Kullanımı

Necdet Selim KOÇYİĞİT[1]
Yağız SELÇUK[2]
Ferhat Can Köse[3]

Abstract

Gigacasting technology enables the production of large-scale automotive structural components as a single piece by using the High Pressure Die Casting (HPDC) process. In recent years, this manufacturing approach has gained increasing attention, particularly in electric vehicle platforms, due to its advantages in manufacturing efficiency, structural integration, and cost reduction. By replacing multiple welded or bolted parts with a single large aluminum casting, gigacasting significantly simplifies assembly processes and reduces the number of joining operations in vehicle body structures.This study investigates the use of gigacasting technology in safety critical automotive components and evaluates its potential effects on crash performance and structural behavior. A literature-based analysis was conducted focusing on the mechanical properties and deformation characteristics of aluminum alloys used in large high-pressure die cast structural parts. Particular attention was given to parameters such as torsional stiffness, energy absorption capability, and load distribution during crash events.The findings indicate that gigacasting structures can provide improved torsional rigidity and enhanced crash energy absorption due to optimized load paths and the elimination of multiple joints. However, the technology also introduces several engineering challenges. The control of casting defects such as porosity and the optimization of ductility in aluminum alloys remain critical factors influencing crashworthiness and structural reliability.Overall, gigacasting represents a promising manufacturing approach for next-generation electric vehicles, offering significant advantages in production efficiency and structural performance while requiring careful optimization of casting processes and material properties.

Keywords: Gigacasting, High Pressure Die Casting, Crashworthiness, Structural Aluminum, Electric Vehicles

[1] Tasarım Mühendisi, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0009-8523-1214
[2] Tasarım Mühendisi, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0007-4767-8838
[3] Tasarım Mühendisi, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0008-0886-6155

GİRİŞ

Otomotiv sektörü, elektrikli araç teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte hafif, dayanıklı ve üretim açısından verimli yapısal çözümlere yönelmektedir. Özellikle elektrikli araçlarda batarya sistemlerinin oluşturduğu ek ağırlık nedeniyle gövde yapılarında hafif malzemelerin kullanımı büyük önem kazanmıştır. Bu kapsamda alüminyum esaslı büyük ölçekli döküm yapılar son yıllarda dikkat çekici bir mühendislik çözümü olarak öne çıkmaktadır (Hirsch, 2014).

Gigacasting teknolojisi, araç şasisinde yer alan çok sayıdaki parçanın tek parça büyük bir döküm yapı halinde üretilmesini sağlayan yenilikçi bir üretim yöntemidir. Geleneksel otomotiv üretiminde birçok farklı sac parça kaynak, perçin veya cıvata gibi bağlantı yöntemleriyle birleştirilirken, gigacasting yaklaşımı bu parçaları tek bir yapıda bütünleştirmektedir (Busch, 2022).

Bu yaklaşım sayesinde üretim süreçleri sadeleşmekte, montaj süresi azalmakta ve üretim maliyetlerinde önemli düşüşler sağlanmaktadır. Aynı zamanda bağlantı noktalarının azalması, yapısal sürekliliği artırarak daha verimli yük dağılımı oluşturmaktadır. Bu durum özellikle çarpışma güvenliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Zhang, Li, & Wang, 2021).

Bununla birlikte büyük ölçekli döküm parçaların kullanımı bazı teknik sorunları da beraberinde getirmektedir. Yüksek basınçlı döküm işlemlerinde oluşabilecek gözeneklilik, sıcak yırtılma ve mikroyapısal düzensizlikler gibi kusurlar, yapının mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir (Cáceres & Davidson, 2019).

Bu çalışmada gigacasting teknolojisinin otomotiv sektöründeki kullanımı incelenmiş, özellikle güvenlik kritik yapılarda çarpışma performansına olan etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada ayrıca yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretilen alüminyum yapıların avantajları ve mühendislik açısından karşılaşılan temel zorluklar ele alınmıştır.

YÖNTEM

Gigacasting teknolojisi temel olarak yüksek akışkanlığa ve yeterli mekanik dayanıma sahip alüminyum alaşımlarının Yüksek Basınçlı Döküm süreçlerinde kullanılmasına dayanmaktadır. Güncel çalışmalar, kaynak noktalarının ve yapısal bağlantıların azaltılmasının araç gövde yapılarında yük aktarım sürekliliğini ve burulma rijitliğini artırabildiğini göstermektedir.

Yapısal alüminyum dökümler üzerine yapılan araştırmalar, entegre döküm geometrilerinin daha düzgün yük yolları ve azaltılmış gerilme yığılmaları sayesinde çarpışma enerjisi sönümleme performansına olumlu katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Geleneksel çok parçalı yapılarda bulunan çok sayıdaki punta kaynak noktası ve yerel takviyeler, çarpışma sırasında deformasyon sürekliliğini olumsuz etkileyebilmektedir.

Çeşitli çalışmalar, büyük ölçekli döküm yapıların geleneksel sac metal montajlarına kıyasla daha yüksek rijitlik/ağırlık oranı sağlayabildiğini göstermektedir. Bu durum özellikle batarya ağırlığının toplam araç kütlesini artırdığı elektrikli araç platformlarında önemli bir avantaj oluşturmaktadır.

Ancak literatürde HPDC parçaların süneklik ve hata hassasiyeti açısından bazı sınırlamalara sahip olduğu da vurgulanmaktadır. Gözeneklilik oluşumu, yorulma performansı ve çarpışma güvenilirliğini etkileyen en kritik üretim problemlerinden biridir. Kalın kesit bölgelerinde oluşan gaz boşlukları ve çekme boşlukları, yüksek enerjili çarpışma koşullarında yapısal bütünlüğü azaltabilmektedir.

Ayrıca gigacasting uygulamalarında kullanılan alüminyum alaşımları, geleneksel çelik gövde yapılarına kıyasla farklı deformasyon karakteristikleri göstermektedir. Bu nedenle alaşım kompozisyonunun ve ısıl işlem süreçlerinin optimize edilmesi, yeterli çarpışma dayanımının sağlanması açısından kritik öneme sahiptir.

1. Gigacasting Teknolojisi ve Yüksek Basınçlı Döküm Süreci

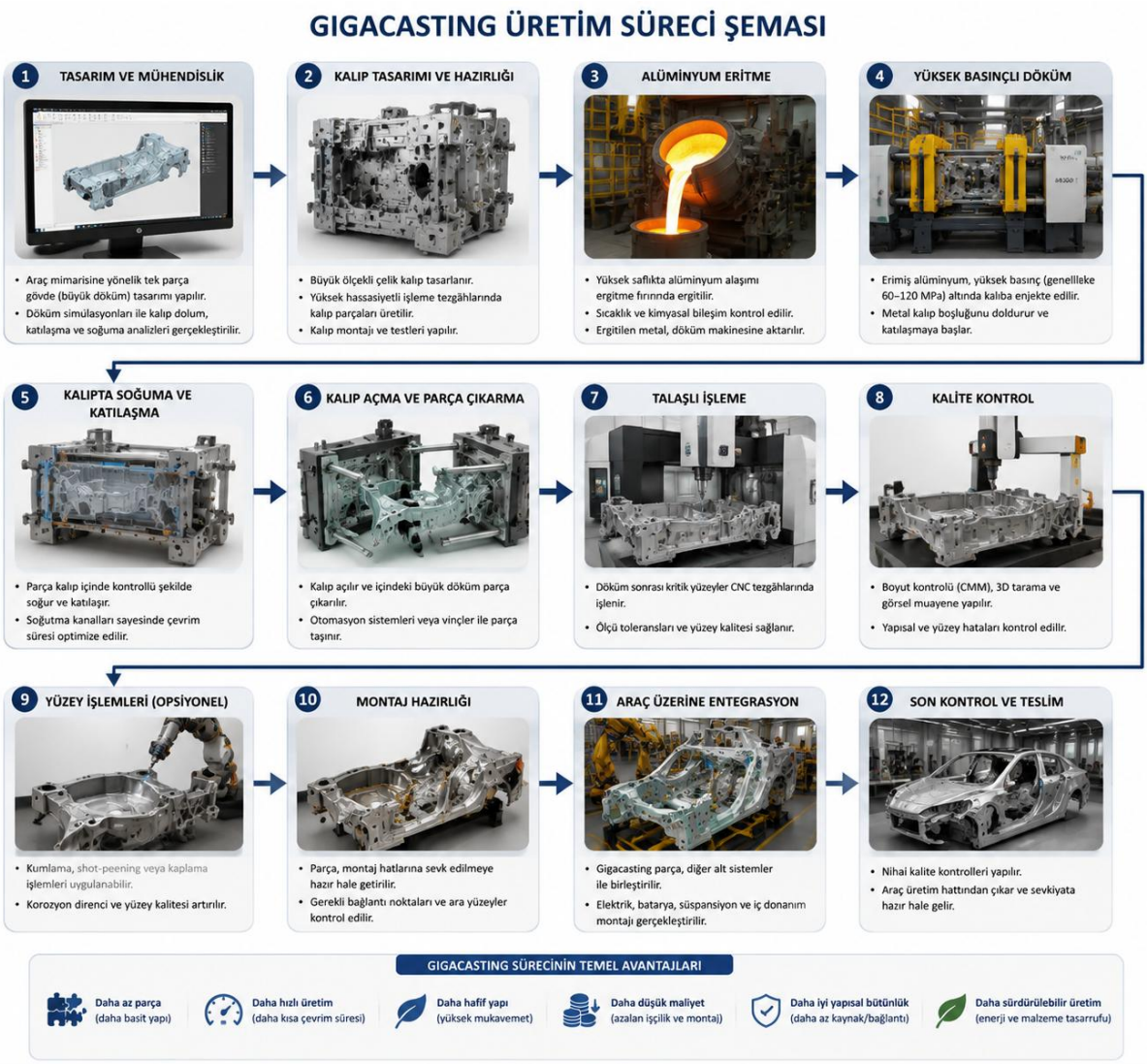
Gigacasting teknolojisinin temelini oluşturan Yüksek Basınçlı Döküm (HPDC) yöntemi, ergimiş alüminyum alaşımının yüksek hız ve yüksek basınç altında çelik kalıplara enjekte edilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem, karmaşık geometrilere sahip büyük ölçekli parçaların kısa çevrim sürelerinde üretilebilmesini sağlamaktadır (Miller ve diğerleri, 2000).

Geleneksel otomotiv gövde yapılarında çok sayıda küçük parçanın birleştirilmesi gerekmektedir. Ancak gigacasting yaklaşımı ile ön veya arka şasi gibi büyük yapısal bölgeler tek bir döküm parça halinde üretilebilmektedir. Böylece parça sayısı azalmakta, üretim hattı sadeleşmekte ve montaj operasyonları minimize edilmektedir (Busch, 2022).

Gigacasting uygulamalarında kullanılan büyük ölçekli döküm makineleri genellikle binlerce ton kapama kuvvetine sahip sistemlerden oluşmaktadır. Bu makineler sayesinde geniş yüzey alanına sahip yapısal parçalar yüksek boyutsal hassasiyetle üretilebilmektedir.

Yüksek basınçlı döküm yönteminin bir diğer avantajı ise hafiflik sağlamasıdır. Alüminyum alaşımları çeliğe kıyasla daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan araç ağırlığını azaltmakta ve enerji verimliliğini artırmaktadır (Tisza & Czinege, 2018).

Ancak büyük ölçekli döküm işlemlerinde proses parametrelerinin dikkatli biçimde kontrol edilmesi gerekmektedir. Enjeksiyon hızı, ergiyik sıcaklığı ve soğuma koşulları gibi faktörler doğrudan döküm kalitesini etkilemektedir. Özellikle gaz boşlukları ve gözeneklilik gibi kusurlar mekanik dayanımı azaltabilmektedir (Cáceres & Davidson, 2019).



Şekil 1- *Gigacasting Üretim Süreci Şeması*

2. Yapısal Davranış ve Çarpışma Dayanımı

Modern otomotiv mühendisliğinde çarpışma dayanımı, araç güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Araç yapılarının çarpışma sırasında kinetik enerjiyi kontrollü biçimde absorbe etmesi ve yolcu kabininin bütünlüğünü koruması gerekmektedir.

Gigacasting yapılar, bağlantı noktalarının azaltılması sayesinde daha sürekli yük yolları oluşturmaktadır. Bu durum çarpışma kuvvetlerinin yapı içerisinde daha dengeli şekilde dağılmasını sağlamaktadır (Zhang ve diğerleri, 2021).

Gigacasting teknolojisinin en önemli yapısal avantajlarından biri yüksek burulma rijitliği sağlamasıdır. Burulma rijitliğinin artması, araç gövdesinin daha kararlı davranmasına katkı sağlamakta ve sürüş dinamiklerini iyileştirmektedir. Özellikle elektrikli araç platformlarında batarya sistemlerinin oluşturduğu yüksek ağırlık nedeniyle yapısal rijitlik büyük önem taşımaktadır.

Çarpışma performansını belirleyen en önemli parametrelerden biri enerji absorpsiyon kapasitesidir. Çarpışma sırasında yapının kontrollü deformasyon göstermesi gerekmektedir. Bu nedenle kullanılan alüminyum alaşımının süneklik özellikleri büyük önem taşımaktadır.

Yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretilen yapılarda gözeneklilik, çatlak ilerlemesini hızlandırabilmekte ve dinamik yükler altında kırılma riskini artırabilmektedir (Cáceres & Davidson, 2019). Bu nedenle vakum destekli döküm sistemleri ve gelişmiş proses kontrol yöntemleri kullanılmaktadır.

Ayrıca otomotiv üreticileri, gigacasting yapıların çarpışma davranışını değerlendirmek amacıyla sonlu elemanlar analizleri ve bilgisayar destekli simülasyon yöntemlerinden yoğun biçimde yararlanmaktadır.

3. Avantajlar ve Mühendislik Zorlukları

Gigacasting teknolojisi otomotiv üreticilerine önemli avantajlar sağlamaktadır. Bunların başında üretim süreçlerinin sadeleşmesi gelmektedir. Parça sayısının azalması, üretim hattındaki operasyon sayısını düşürmekte ve maliyet avantajı oluşturmaktadır (Busch, 2022).

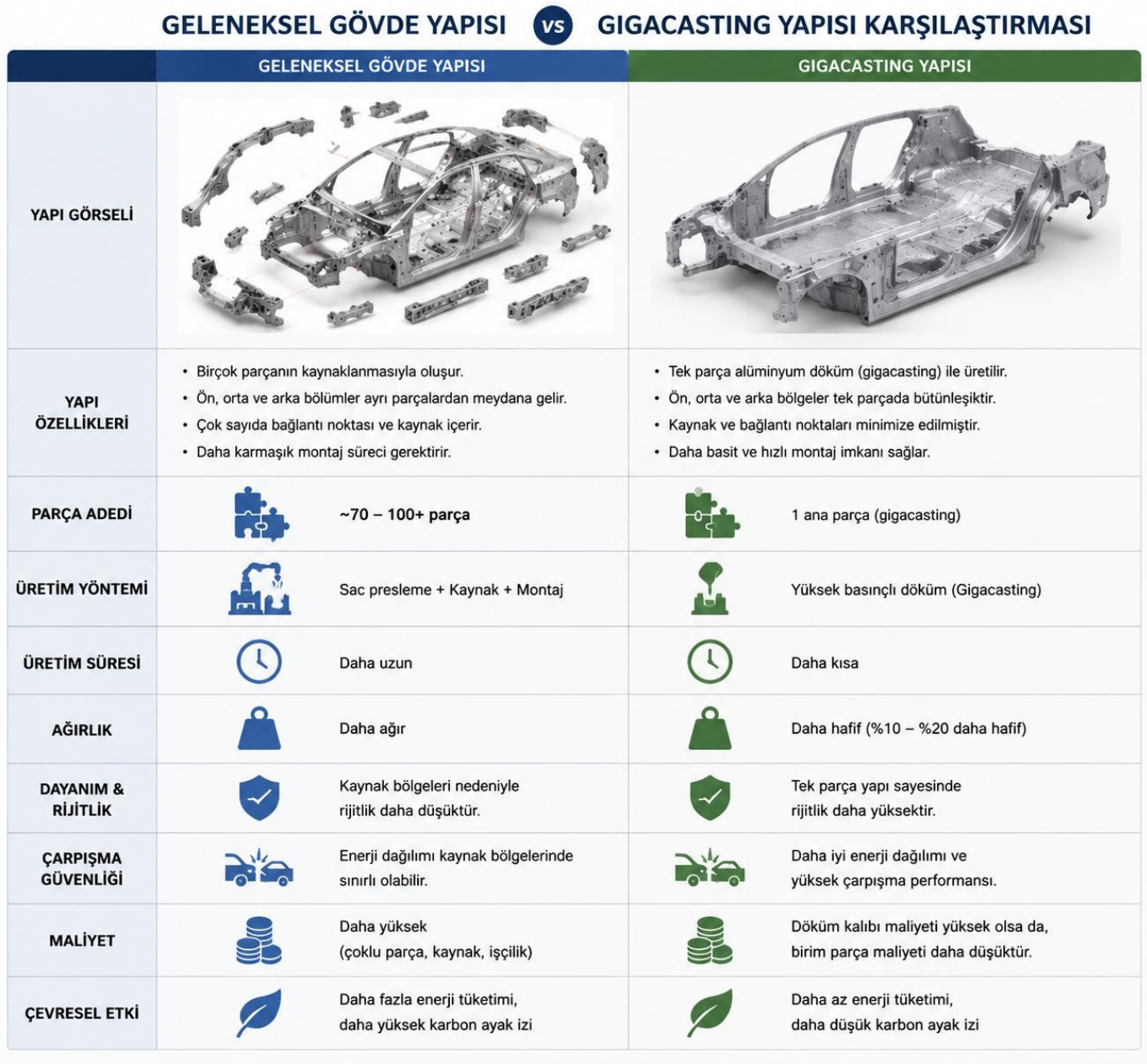
Bir diğer önemli avantaj ise araç ağırlığının azaltılmasıdır. Hafif yapıların kullanılması, elektrikli araçlarda enerji tüketimini azaltmakta ve menzil performansını artırmaktadır (Tisza & Czinege, 2018).

Yapısal açıdan değerlendirildiğinde ise daha az bağlantı noktası sayesinde gerilme yoğunlaşmaları azalmakta ve yük aktarımı daha verimli hale gelmektedir. Bu durum hem dayanıklılık hem de çarpışma güvenliği açısından olumlu sonuçlar doğurmaktadır.

Bununla birlikte gigacasting teknolojisi bazı mühendislik problemlerini de beraberinde getirmektedir. Özellikle büyük ölçekli döküm parçaların üretiminde kalite kontrol süreçleri oldukça hassastır. Küçük proses hataları bile ciddi yapısal kusurlara neden olabilmektedir.

Onarım maliyetleri de önemli bir diğer problemdir. Geleneksel araç yapılarında hasarlı küçük parçalar değiştirilebilirken, büyük tek parça döküm yapılarda tüm yapısal bölümün değiştirilmesi gerekebilmektedir.

Ayrıca güvenlik kritik uygulamalarda kullanılacak alüminyum alaşımlarının hem yüksek dayanım hem de yeterli süneklik sağlaması gerekmektedir. Bu nedenle yeni nesil alaşım geliştirme çalışmaları otomotiv sektöründe önem kazanmaktadır (Miller ve diğerleri, 2000).



Şekil 2- Gigacasting Üretim Süreci Şeması

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Gigacasting teknolojisi, otomotiv üretim süreçlerinde önemli bir dönüşüm oluşturan yenilikçi bir üretim yaklaşımıdır. Büyük ölçekli alüminyum yapıların tek parça halinde üretilebilmesi sayesinde üretim verimliliği artmakta, montaj süreçleri sadeleşmekte ve yapısal performans geliştirilmektedir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, gigacasting yapıların optimize edilmiş yük yolları sayesinde daha yüksek burulma rijitliği ve geliştirilmiş enerji absorpsiyonu sağlayabildiğini göstermektedir. Özellikle elektrikli araç platformlarında hafiflik ve yapısal entegrasyon açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Ancak gözeneklilik gibi döküm kusurları, çarpışma dayanımı üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Bu nedenle proses kontrolünün geliştirilmesi, vakum destekli döküm

tekniklerinin kullanılması ve yeni nesil alüminyum alaşımlarının geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak gigacasting teknolojisi, geleceğin elektrikli araçlarında hem üretim verimliliği hem de yapısal güvenlik açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Gelecekte yapılacak çalışmaların özellikle malzeme optimizasyonu, deneysel çarpışma testleri ve gelişmiş simülasyon teknikleri üzerine yoğunlaşması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

Busch, M. (2022). Large-scale aluminum die casting in electric vehicle manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology, 305*, 117586.

Cáceres, C. H., & Davidson, C. J. (2019). The effect of porosity on the mechanical properties of high-pressure die-cast aluminum alloys. *Materials Science and Engineering A, 746*, 1-10.

Hirsch, J. (2014). Recent development in aluminum for automotive applications. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 24*(7), 1995-2002.

Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A. J., De Smet, P., Haszler, A., & Vieregge, A. (2000). Recent development in aluminum alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering A, 280*(1), 37-49.

Tisza, M., & Czinege, I. (2018). Comparative study of the application of steels and aluminum in lightweight production of automotive parts. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 1*(4), 229-238.

Zhang, X., Li, Y., & Wang, Z. (2021). Crashworthiness analysis of aluminum structures manufactured by high pressure die casting. *Thin-Walled Structures, 166*, 108127.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Otomotiv Üretiminde Soğuk Kaynak ve Katı Hal Birleştirme Teknolojilerinin Uygulamaları

Necdet Selim KOÇYİĞİT[1]
Yağız SELÇUK[2]
Ferhat Can KÖSE[3]

Abstract

The automotive industry continuously seeks advanced manufacturing technologies to improve structural performance, reduce vehicle weight, and increase production efficiency. Among emerging joining technologies, cold welding and other solid-state welding methods have gained significant attention due to their ability to join metals without melting. Unlike conventional fusion welding processes, cold welding occurs through the application of high pressure that enables atomic bonding between clean metallic surfaces at or near room temperature. This characteristic makes cold welding particularly attractive for joining materials that are difficult to weld using traditional techniques. In the automotive sector, cold welding and related solid-state joining technologies are increasingly applied in electrical connections, lightweight structures, and electric vehicle battery systems. This study presents a literature-based review of cold-welding principles and evaluates its applications in automotive manufacturing. The fundamental mechanisms of cold welding, including surface preparation, plastic deformation, and atomic diffusion, are discussed. In addition, several solid-state joining techniques closely related to cold welding—such as friction stir welding, ultrasonic metal welding, and cold roll bonding—are examined in terms of their applicability to automotive structures. The study highlights the advantages of these methods, including reduced heat input, minimal distortion, improved joint reliability, and the capability of joining dissimilar materials. The findings indicate that solid-state welding technologies will play an increasingly important role in future automotive manufacturing systems.

Keywords: Cold welding, automotive manufacturing, solid-state welding, friction stir welding, ultrasonic welding

[1] Tasarım Mühendisi, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0009-8523-1214
[2] Tasarım Mühendisi, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0007-4767-8838
[3] Tasarım Mühendisi, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0008-0886-6155

GİRİŞ

Günümüzde otomotiv sektörü, daha hafif, daha dayanıklı ve enerji verimliliği yüksek araçların üretimine yönelik önemli bir dönüşüm süreci içerisindedir. Özellikle elektrikli araç teknolojilerinin gelişmesi, hafif malzemelerin kullanımının artması ve sürdürülebilir üretim hedefleri, geleneksel üretim yöntemlerinin yeniden değerlendirilmesine neden olmaktadır (Ashby, 2011). Bu kapsamda otomotiv endüstrisinde kullanılan birleştirme teknolojileri de sürekli gelişmekte olup, klasik ergitme kaynak yöntemlerine alternatif olarak katı hal birleştirme yöntemleri giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Kou, 2003).

Soğuk kaynak (cold welding), katı hal birleştirme yöntemleri arasında yer alan ve iki temiz metal yüzeyin yüksek basınç altında, ergime gerçekleşmeden atomik seviyede bağlanması prensibine dayanan bir yöntemdir (Messler, 2004). Geleneksel ergitme kaynak yöntemlerinden farklı olarak, kaynak bölgesinde yüksek sıcaklık oluşmaması sayesinde termal deformasyon, artık gerilme ve mikroyapısal bozulmalar büyük ölçüde azaltılabilmektedir (Cary & Helzer, 2005). Bu özellikleri nedeniyle soğuk kaynak yöntemleri, özellikle ince sac uygulamaları, elektriksel bağlantılar ve farklı malzemelerin birleştirilmesi gibi alanlarda önemli avantajlar sunmaktadır. Otomotiv sektöründe kullanılan alüminyum alaşımları, yüksek dayanımlı çelikler ve bakır bazlı iletken malzemeler gibi modern mühendislik malzemeleri, geleneksel kaynak yöntemlerinde çeşitli zorluklara neden olabilmektedir (Miller et al., 2000). Bu nedenle sürtünme karıştırma kaynağı (Friction Stir Welding- FSW), ultrasonik metal kaynağı ve soğuk hadde kaynağı gibi katı hal birleştirme yöntemleri otomotiv uygulamalarında giderek daha yaygın şekilde kullanılmaktadır (Mishra & Ma, 2005). Özellikle elektrikli araç batarya sistemlerinde ve hafif gövde yapılarında bu yöntemlerin sunduğu düşük ısı girdisi ve yüksek bağlantı kalitesi önemli avantajlar sağlamaktadır (Thomas et al., 1991). Bu çalışmada, soğuk kaynak ve ilişkili katı hal birleştirme teknolojilerinin temel prensipleri incelenmiş, otomotiv üretimindeki kullanım alanları değerlendirilmiş ve bu yöntemlerin sağladığı mühendislik avantajları genel hatlarıyla ele alınmıştır.

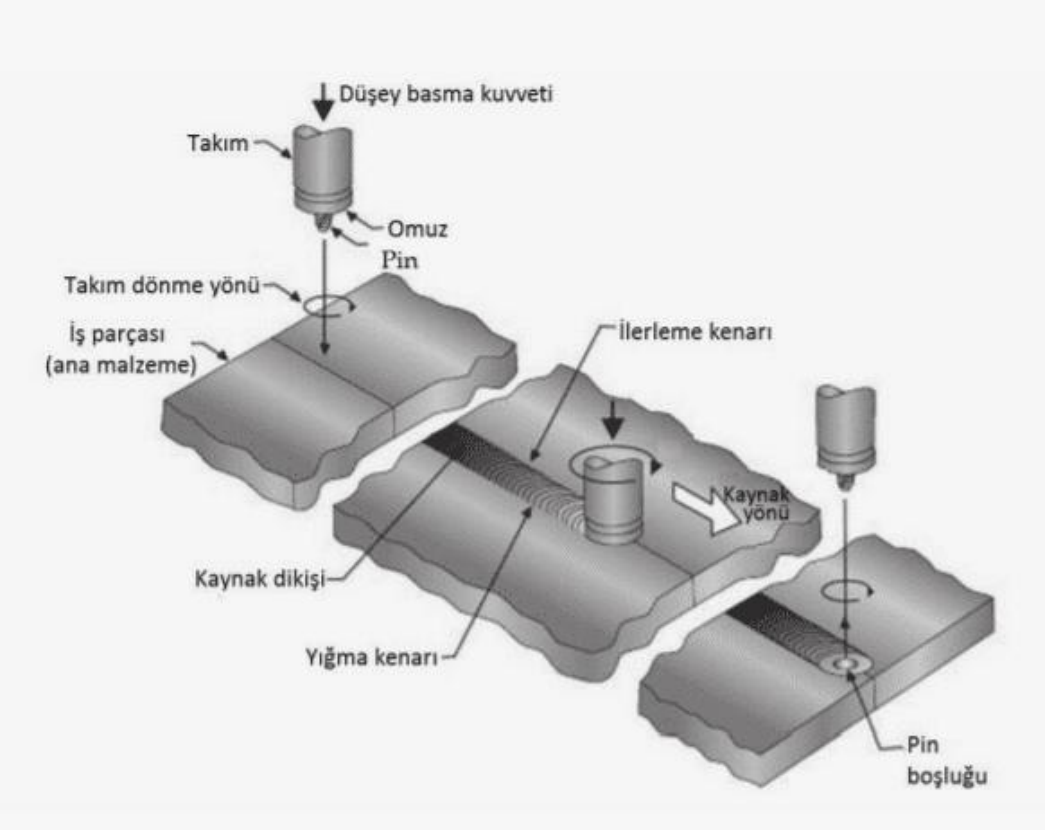
YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında literatür taraması yöntemi kullanılmıştır. Soğuk kaynak ve katı hal birleştirme teknolojilerine ilişkin akademik yayınlar, teknik raporlar, tez çalışmaları ve otomotiv sektöründeki endüstriyel uygulamalar incelenmiştir. Özellikle otomotiv üretim süreçlerinde kullanılan katı hal birleştirme yöntemlerinin çalışma prensipleri, uygulama alanları, avantajları ve proses sınırlamaları değerlendirilmiştir. Çalışmada; soğuk kaynak, sürtünme karıştırma kaynağı, ultrasonik metal kaynağı ve soğuk hadde kaynağı yöntemleri ele alınmış, bu yöntemlerin otomotiv sektöründeki kullanım potansiyelleri mühendislik bakış açısıyla analiz edilmiştir.

Soğuk Kaynağın Temel Prensibi

Soğuk kaynak, iki metal yüzeyin ergime gerçekleşmeden yüksek basınç altında atomik seviyede birleşmesi prensibine dayanan bir katı hal birleştirme yöntemidir (Messler, 2004). Bu yöntemde başarılı bir birleşim elde edilebilmesi için yüzeylerin oksit tabakalarından ve kirleticilerden arındırılması büyük önem taşımaktadır. Temiz metal yüzeylerin yüksek plastik deformasyona uğraması sonucunda atomlar arası bağ oluşmakta ve kalıcı bir birleşim meydana gelmektedir (Messler, 2004). Soğuk kaynak uygulamalarında malzeme sünekliği önemli bir

parametre olup, özellikle alüminyum, bakır ve bazı yumuşak metal alaşımları bu yöntem için uygun davranış göstermektedir (Mordike & Ebert, 2001). Yüksek sıcaklık oluşmaması sayesinde kaynak bölgesinde termal etkiler minimum seviyede kalmakta, böylece mikroyapısal değişimler ve artık gerilmeler azaltılabilmektedir (Davis, 1993).



Şekil 1- *Soğuk kaynağın uygulamasının gösterimi.*

1.1. Yüzey Hazırlığının Önemi

Soğuk kaynak uygulamalarında başarılı bir atomik bağ oluşabilmesi için yüzey hazırlığı kritik öneme sahiptir. Metal yüzeylerinde bulunan oksit tabakaları, yağ, nem ve diğer kirleticiler atomlar arası temasın oluşmasını engelleyebilmektedir (Messler, 2004). Bu nedenle kaynak öncesinde mekanik temizleme, kimyasal temizleme veya yüzey fırçalama işlemleri uygulanmaktadır. Özellikle alüminyum gibi hızlı oksitlenen malzemelerde yüzey temizliği daha kritik hale gelmektedir (Davis, 1993). Bazı uygulamalarda temiz yüzeylerin korunabilmesi amacıyla kontrollü atmosfer veya vakum ortamları kullanılabilmektedir (Kou, 2003). Yetersiz yüzey hazırlığı durumunda bağlantı dayanımı düşmekte ve kaynak kalitesinin sürekliliği olumsuz etkilenmektedir (Messler, 2004).

1.2. Plastik Deformasyon ve Atomik Bağ Oluşumu

Soğuk kaynak sırasında uygulanan yüksek basınç, metal yüzeylerde plastik deformasyon oluşturarak yüzey pürüzlülüğünün azalmasına ve gerçek temas alanının artmasına neden olmaktadır (Messler, 2004). Plastik deformasyon sonucunda yüzeylerdeki oksit tabakaları parçalanmakta ve temiz metal atomları birbirine yaklaşmaktadır (Messler, 2004). Atomlar arasındaki mesafe yeterince azaldığında metalik bağ oluşumu gerçekleşmekte ve kalıcı bir birleşim meydana gelmektedir (Messler, 2004). Bu süreçte sıcaklık artışı oldukça sınırlı

olup, birleşim temel olarak mekanik basınç ve atomik difüzyon etkisiyle oluşmaktadır (Messler, 2004). Uygulanan basınç miktarı, malzeme özellikleri ve yüzey kondisyonu, kaynak dayanımını doğrudan etkileyen temel parametreler arasında yer almaktadır (Mordike & Ebert, 2001).

Otomotiv Sektöründe Katı Hal Birleştirme Teknolojileri

Günümüzde otomotiv sektöründe kullanılan hafif malzemelerin artışı ve elektrikli araç teknolojilerinin gelişmesi, katı hal birleştirme yöntemlerine olan ilgiyi artırmaktadır (Mishra & Ma, 2005). Özellikle alüminyum alaşımları ve farklı metal kombinasyonlarının birleştirilmesi gereken uygulamalarda bu yöntemler önemli avantajlar sağlamaktadır (Thomas et al., 1991). Katı hal birleştirme yöntemleri, düşük ısı girdisi sayesinde deformasyonun azaltılması, farklı malzemelerin birleştirilebilmesi ve yüksek bağlantı kalitesinin elde edilmesi açısından otomotiv üretiminde önemli bir alternatif oluşturmaktadır (Messler, 2004).

2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Friction Stir Welding)

Sürtünme karıştırma kaynağı, dönen bir takımın iki metal parça arasındaki birleşim bölgesinde ilerleyerek sürtünme ısısı oluşturması ve malzemeyi plastik hale getirerek birleştirmesi prensibine dayanmaktadır (Mishra & Ma, 2005). Bu yöntem ergime içermediği için katı hal kaynağı olarak sınıflandırılmaktadır (Thomas et al., 1991). Özellikle alüminyum gövde panelleri, batarya muhafazaları ve hafif yapı elemanlarında sürtünme karıştırma kaynağı yaygın şekilde kullanılmaktadır (Miller et al., 2000). Geleneksel kaynak yöntemlerine göre daha düşük deformasyon oluşması ve yüksek mekanik özellikler sağlaması önemli avantajlar sunmaktadır (Mishra & Ma, 2005). Bununla birlikte ekipman maliyetleri, takım aşınması ve karmaşık geometrilere erişim sınırlamaları prosesin önemli zorlukları arasında yer almaktadır (Katayama, 2013).

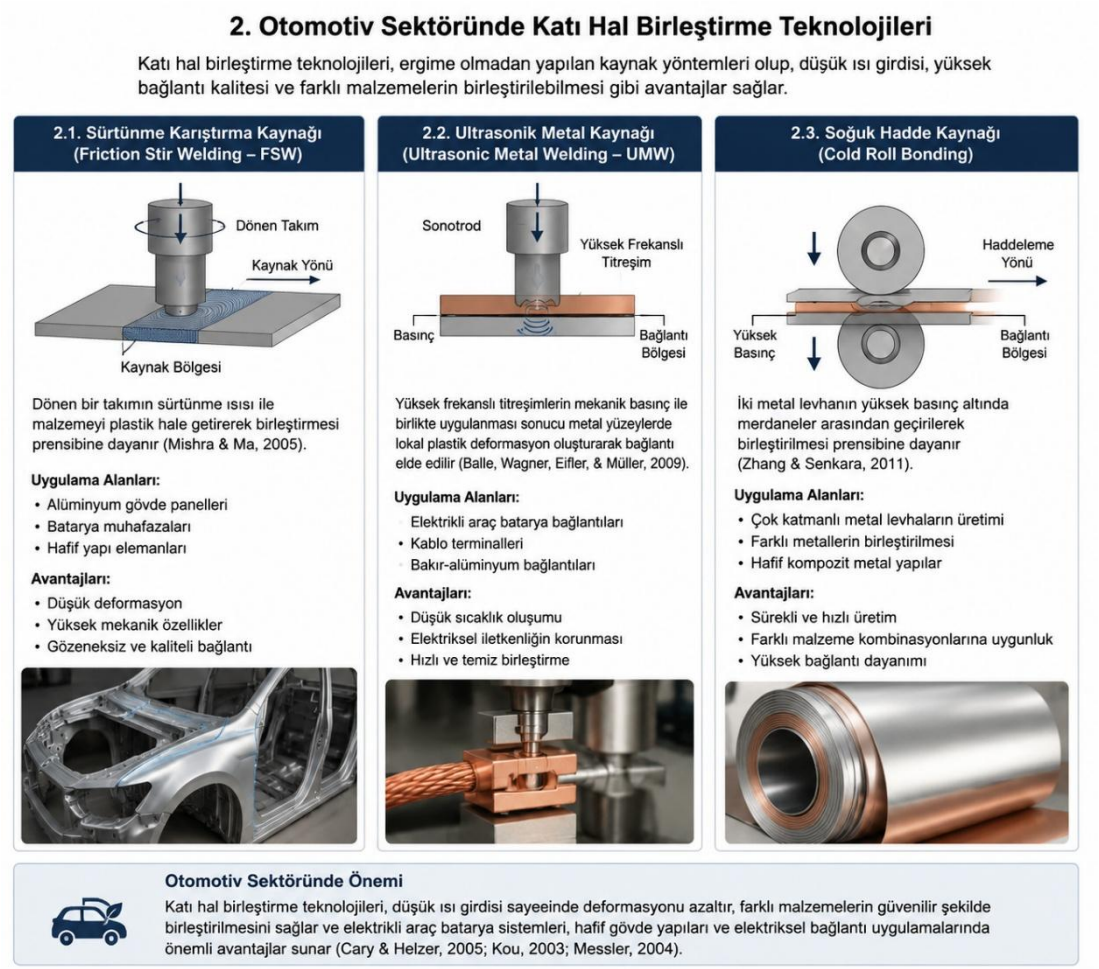
2.2. Ultrasonik Metal Kaynağı

Ultrasonik metal kaynağı, yüksek frekanslı titreşimlerin mekanik basınç ile birlikte uygulanması sonucu metal yüzeylerde lokal plastik deformasyon oluşturarak bağlantı elde edilmesi prensibine dayanmaktadır (Balle, Wagner, Eifler, & Müller, 2009). Bu yöntem özellikle ince metal levhalar ve elektriksel bağlantılar için uygun bir katı hal birleştirme teknolojisidir (Messler, 2004).

Otomotiv sektöründe ultrasonik metal kaynağı, elektrikli araç batarya bağlantıları, kablo terminalleri ve bakır-alüminyum bağlantılarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Balle et al., 2009). Düşük sıcaklık oluşumu sayesinde elektriksel iletkenlik korunabilmekte ve hassas bileşenlerde termal hasar riski azaltılabilmektedir (Messler, 2004).

2.3. Soğuk Hadde Kaynağı (Cold Roll Bonding)

Soğuk hadde kaynağı, iki metal levhanın yüksek basınç altında merdaneler arasından geçirilerek birleştirilmesi prensibine dayanmaktadır (Messler, 2004). Haddeleme sırasında oluşan plastik deformasyon sayesinde yüzey oksitleri parçalanmakta ve metalik bağ oluşmaktadır (Messler, 2004). Bu yöntem özellikle çok katmanlı metal levhaların üretiminde ve farklı metallerin bir araya getirilmesinde kullanılmaktadır (Davis, 1993). Otomotiv sektöründe hafif kompozit metal yapıların geliştirilmesi açısından önemli bir potansiyele sahiptir (Mishra & Ma, 2005).



Şekil 2- *Otomotiv Sektöründe Katı Hal Birleştirme Teknolojileri.*

Elektrikli Araçlarda Katı Hal Birleştirme Teknolojilerinin Önemi

Elektrikli araç teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte batarya sistemleri, güç elektroniği bileşenleri ve hafif yapı elemanlarının üretiminde yeni birleştirme teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır (Thomas et al., 1991). Özellikle bakır ve alüminyum gibi farklı iletken malzemelerin güvenilir şekilde birleştirilmesi, elektrikli araç üretiminde kritik önem taşımaktadır (Balle et al., 2009).

Katı hal birleştirme yöntemleri, düşük ısı girdisi sayesinde batarya hücrelerinde termal hasarı azaltmakta ve bağlantı güvenilirliğini artırmaktadır (Mishra & Ma, 2005). Ayrıca hafif malzemelerin etkin şekilde birleştirilebilmesi, araç ağırlığının azaltılmasına ve enerji verimliliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır (Ashby, 2011).

Katı Hal Birleştirme Teknolojilerinin Avantajları ve Sınırlamaları

Katı hal birleştirme teknolojileri, geleneksel ergitme kaynak yöntemlerine kıyasla birçok önemli avantaj sunmaktadır. Düşük ısı girdisi sayesinde deformasyon ve artık gerilmeler azaltılmakta, kaynak bölgesindeki mikroyapısal değişimler minimum seviyede tutulmaktadır (Messler, 2004). Ayrıca farklı metal kombinasyonlarının birleştirilebilmesi ve yüksek bağlantı kalitesi elde edilmesi önemli mühendislik avantajları sağlamaktadır (Mishra & Ma, 2005).

Bununla birlikte bu yöntemlerin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Yüksek ekipman maliyetleri, hassas yüzey hazırlığı gereksinimleri, proses parametrelerinin dar tolerans

aralıklarına sahip olması ve bazı yöntemlerin karmaşık geometrilerde uygulanmasının zor olması önemli proses zorlukları arasında yer almaktadır (Katayama, 2013).

Sonuç ve Değerlendirme

Soğuk kaynak ve ilişkili katı hal birleştirme teknolojileri, düşük ısı girdisi, yüksek bağlantı kalitesi ve farklı malzemeleri birleştirme kabiliyetleri sayesinde otomotiv sektöründe giderek daha önemli hale gelmektedir. Özellikle hafif malzeme kullanımı ve elektrikli araç teknolojilerinin gelişmesi, bu yöntemlerin kullanım alanlarını genişletmektedir.

Bu çalışmada soğuk kaynak prensipleri ve otomotiv sektöründe kullanılan başlıca katı hal birleştirme teknolojileri genel hatlarıyla değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, bu yöntemlerin özellikle elektrikli araç batarya sistemleri, hafif gövde yapıları ve elektriksel bağlantı uygulamalarında önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Gelecekte otomotiv üretim teknolojilerinin gelişimiyle birlikte katı hal birleştirme yöntemlerinin daha yüksek otomasyon seviyeleriyle entegre edilmesi ve farklı malzeme kombinasyonlarında daha yaygın şekilde kullanılması beklenmektedir. Bu nedenle soğuk kaynak ve benzeri teknolojiler, geleceğin otomotiv üretim sistemlerinde önemli bir rol oynayacaktır.

KAYNAKÇA

Messler, R. W. (2004). Principles of welding: Processes, physics, chemistry, and metallurgy. Wiley-Interscience.

Zhang, H., & Senkara, J. (2011). Resistance welding: Fundamentals and applications (2nd ed.). CRC Press.

Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering: R: Reports, 50(1–2), 1–78.

Cary, H. B., & Helzer, S. C. (2005). Modern welding technology (6th ed.). Pearson Education.

Kou, S. (2003). Welding metallurgy (2nd ed.). Wiley-Interscience.

American Welding Society. (2020). Welding handbook: Welding processes (Vol. 2). AWS.

Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, M. G., Temple-Smith, P., & Dawes, C. J. (1991). Friction stir butt welding. The Welding Institute.

Balle, F., Wagner, G., Eifler, D., & Müller, C. (2009). Ultrasonic metal welding of aluminium sheets to copper sheets. Materialswissenschaft und Werkstofftechnik, 40(12), 934–938.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Otomotiv Üretiminde BIW (Gövde İskeleti) Yapıları İçin Rheocast Bileşenler

Yağız SELÇUK[1]
Necdet Selim KOÇYİĞİT[2]
Ferhat Can KÖSE[3]

Abstract

The increasing demand for lightweight and high-performance vehicle structures has encouraged the development of advanced manufacturing processes for automotive components. Rheocasting, a semi-solid metal processing technique, has gained significant attention as an alternative production method for aluminum components used in Body-in-White (BIW) structures. This process combines certain advantages of casting and forging, enabling the production of components with improved mechanical properties and reduced defects compared to conventional high-pressure die casting.In the rheocasting process, molten metal is partially solidified to a semi-solid state before being injected into a die. This semi-solid slurry typically consists of globular primary solid particles suspended in a liquid matrix. The globular microstructure reduces turbulence during die filling and helps minimize common casting defects such as porosity, shrinkage, and air entrapment. As a result, rheocast components can achieve better structural integrity and improved mechanical performance.For BIW applications, rheocast aluminum components offer significant potential for weight reduction and part integration. Complex geometries and thin-walled structures can be produced with relatively high dimensional accuracy, allowing the consolidation of multiple steel components into a single lightweight aluminum part. This capability contributes to improved fuel efficiency and reduced carbon emissions in modern vehicles.However, the implementation of rheocasting technology also presents certain challenges. Process control, slurry preparation, and equipment investment are critical factors that influence production stability and component quality. In addition, proper alloy selection and process parameter optimization are essential to achieve the desired microstructure and mechanical properties.Overall, rheocasting represents a promising manufacturing technology for the production of lightweight BIW components, supporting the ongoing transition toward more efficient and sustainable automotive structures.

Keywords: rheocasting, semi-solid metal processing, BIW structures, aluminum alloys, lightweight manufacturing

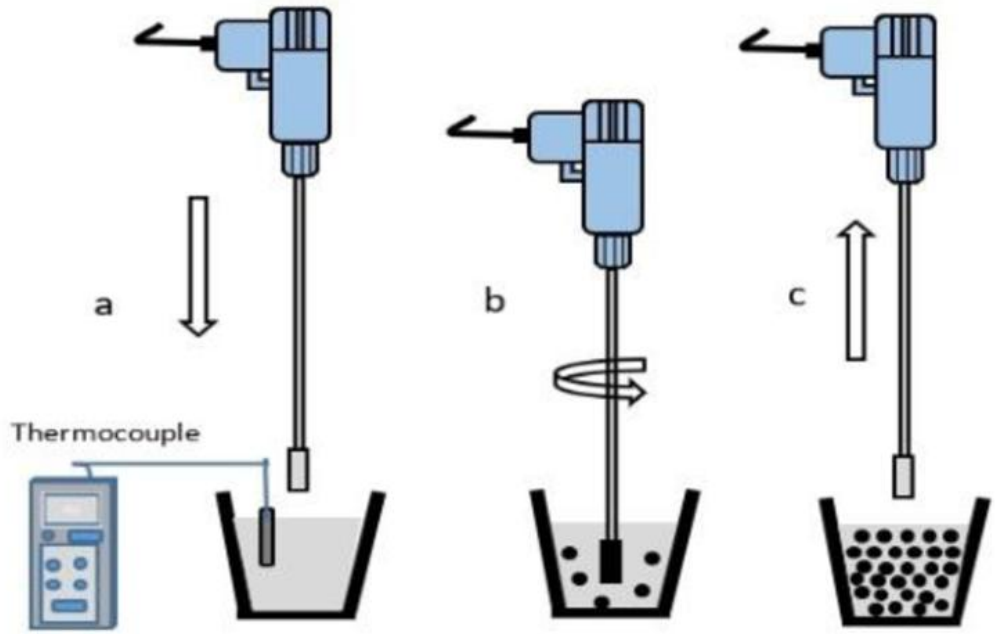
[1] Tasarım Mühendisi, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0007-4767-8838
[2] Tasarım Mühendisi, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0009-8523-1214
[3] Tasarım Mühendisi, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0008-0886-6155

GİRİŞ

Otomotiv sektöründe çevresel kaygılar ve yakıt verimliliği, araç yapılarının hafifletilmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle alüminyum, çeliğe kıyasla yüksek mukavemet/ağırlık oranı sunması nedeniyle BIW bileşenlerinde tercih edilmektedir (Smith, 2020). Geleneksel döküm ve dövme teknikleri, karmaşık geometrilere sahip ve ince cidarlı parçaların üretiminde sınırlamalar getirmektedir. Yüksek basınçlı dökümde türbülans, gözeneklilik ve çekme boşlukları sıkça görülürken, dövme süreçleri yüksek enerji tüketimi ve sınırlı parça geometrisi ile karakterizedir. Bu bağlamda rheocasting, döküm ve dövmenin avantajlarını birleştirerek mekanik performansı artırmakta ve üretim verimliliğini yükseltmektedir (Jones et al., 2021). Bu çalışma, rheocasting sürecini, BIW uygulamalarındaki avantajlarını ve karşılaşılan zorlukları detaylı olarak incelemektedir.

YÖNTEM

Rheocasting teknolojisi, 1990'lardan bu yana otomotiv endüstrisinde araştırılmaktadır. Zhang (2019), yarı-katı metal işleme tekniklerinin mikro yapı ve mekanik performans üzerindeki etkilerini incelemiş, küresel tanelerin dolum sırasında türbülansı azalttığını ve gözenekliliği minimize ettiğini göstermiştir. Lee, Chen ve Wu (2022), BIW tasarımında rheocast alüminyum kullanımının parçaların entegrasyonunu sağladığını ve araç ağırlığının önemli ölçüde azaltılabileceğini belirtmiştir. Ayrıca, düşük yoğunluklu alüminyum alaşımlarıyla yakıt verimliliğinin %10–15 artırılabileceği belirtilmiştir. Kim, Park ve Zhao (2021), rheocasting sürecinde alaşım seçimi ve proses parametrelerinin optimizasyonunun önemine dikkat çekmiş, süreç değişkenlerinin kontrolünün mekanik özellikleri doğrudan etkilediğini vurgulamıştır. Bu literatür çalışmaları, rheocasting'in BIW uygulamalarında sürdürülebilir, hafif ve yüksek performanslı üretim için potansiyelini ortaya koymaktadır.



Şekil1- *Rheocasting Süreci*

1. Rheocasting Sürecinin Temel Prensipleri

Rheocasting süreci, erimiş metalin kısmen katılaşarak yarı-katı bir slurry oluşturmasıyla başlar. Bu slurry, kalıba düşük türbülansla enjekte edilir ve katılaşma sonrası istenen mekanik özellikleri kazanır. Süreç üç ana aşamada özetlenebilir:

Yarı-Katı Slurry Hazırlığı: Erimiş metal kontrollü soğutmayla küresel birincil taneler oluşturur ve sıvı metal matrisi içinde homojen dağılım sağlar (Zhang, 2019).

Kalıba Enjeksiyon: Yarı-katı slurry, kalıba düşük türbülansla ve yüksek doğrulukla enjekte edilir; bu aşama gözenekliliği ve hava kapanmasını minimize eder.

Katılaşma ve Soğutma: Parça kalıp içinde tamamen katılaşır ve mekanik dayanım ile boyutsal doğruluk kazanır (Jones et al., 2021).

Bu süreç, geleneksel yüksek basınçlı döküm yöntemlerine kıyasla daha az gözenek, daha iyi yüzey kalitesi ve geliştirilmiş mekanik özellikler sağlar.

3. Malzeme ve Alaşım Seçimi

Rheocasting sürecinde kullanılan alüminyum alaşımları, sürecin verimliliği ve parça performansı açısından kritik öneme sahiptir. Genellikle Al-Si-Mg ve Al-Cu-Mg alaşımları tercih edilmektedir. Bu alaşımlar yüksek akışkanlık ve mekanik performans sağlar (Kim et al., 2021).

Alaşım elementleri slurry'deki katı tanelerin boyut ve dağılımını etkiler. Küresel tanelerin homojen dağılımı dolum sırasında türbülansı azaltır ve mekanik özelliklerin iyileşmesini sağlar.

4. BIW Uygulamaları ve Avantajları

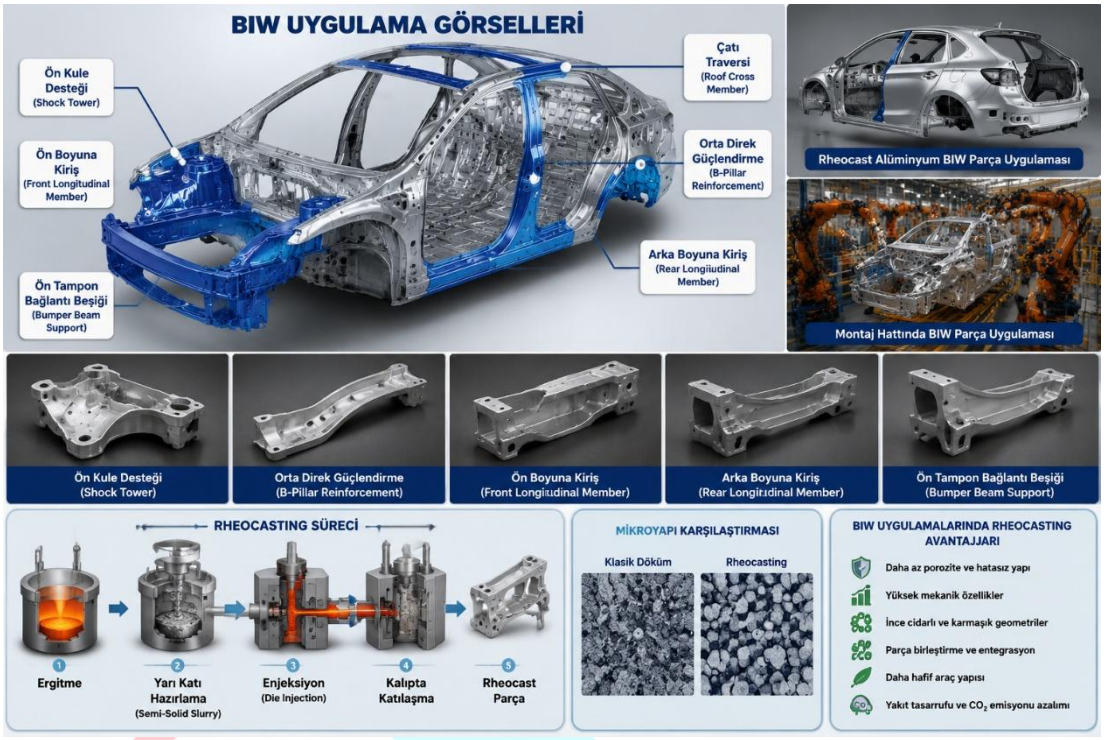
Rheocast alüminyum parçalar, BIW tasarımında çeşitli avantajlar sunar:

Ağırlık Azaltımı: İnce cidarlı yapılar ve entegre parçalar sayesinde araç ağırlığı düşer.

Parça Konsolidasyonu: Birden fazla çelik parça, tek bir alüminyum parçaya entegre edilebilir.

Karmaşık Geometri Üretimi: Geleneksel döküm veya dövme ile üretilemeyen karmaşık geometriler uygulanabilir.

Yakıt Verimliliği ve Emisyon Azalımı: Hafif araçlar daha düşük yakıt tüketimi ve CO_2 emisyonu sağlar (Lee et al., 2022).



Şekil 2- Rheocast BIW uygulaması

5. Süreç Zorlukları ve Optimizasyon

Rheocasting'in yaygın kullanımının önündeki zorluklar:

Süreç Kontrolü: Slurry'nin homojenliği ve enjeksiyon hızı kaliteyi doğrudan etkiler.

Ekipman Yatırımı: Rheocasting makineleri ve kalıpları yüksek maliyetlidir.

Parametre Optimizasyonu: Sıcaklık, soğutma hızı ve enjeksiyon basıncı mikro yapıyı belirler (Kim et al., 2021).

Otomasyon ve sensör tabanlı kontrol sistemleri ile bu zorluklar minimize edilebilir.

6. Sürdürülebilirlik ve Gelecek Perspektifleri

Rheocasting, hafif araç yapıları sayesinde enerji tüketimini ve emisyonları azaltarak sürdürülebilir otomotiv üretimine katkıda bulunur. Gelecekte:Daha çevreci alaşımlar kullanılacak. Süreç otomasyonu ve dijital kontrol sistemleri ile üretim stabilitesi artırılacak. BIW parçalarında daha fazla entegre tasarım mümkün olacak.Bu gelişmeler, otomotiv endüstrisinde hafif ve verimli araçların yaygınlaşmasını destekleyecektir (Smith, 2020; Jones et al., 2021).

SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Rheocasting, hafif alüminyum BIW bileşenlerinin üretiminde stratejik bir üretim teknolojisi olarak ön plana çıkmaktadır. Bu süreç, döküm ve dövme tekniklerinin avantajlarını bir araya getirerek parçaların mekanik performansını artırmakta ve üretim sırasında oluşabilecek hataları minimize etmektedir. Yarı-katı metal yapısı sayesinde kalıba dolum sırasında türbülansın azalması, gözenek oluşumunun ve çekme boşluklarının önlenmesi sağlanmakta, böylece bileşenlerin yapısal bütünlüğü ve uzun ömürlü performansı artırılmaktadır. Araç gövdelerinde karmaşık geometrilerin ve ince cidarlı yapıların

üretilebilmesi, birden fazla parçanın tek bir entegre alüminyum parçaya dönüştürülmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum hem araç ağırlığını azaltmakta hem de montaj süreçlerini basitleştirerek üretim verimliliğini artırmaktadır. Hafif yapılar, yakıt tüketimi ve karbon emisyonlarının düşürülmesine katkı sağlamakta, böylece otomotiv sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerine doğrudan destek olmaktadır. Rheocasting süreci, teknik ve ekonomik zorluklar barındırsa da uygun proses kontrolü, malzeme seçimi ve ekipman yatırımları ile bu zorluklar aşılabilir. Süreç optimizasyonu, slurry hazırlığı ve katılaşma kontrolü, üretim kararlılığının ve parça kalitesinin artırılmasında kritik rol oynamaktadır. Bu yaklaşım hem mekanik performans hem de boyutsal doğruluk açısından yüksek standartlar elde edilmesini sağlamaktadır. Gelecekte, rheocasting teknolojisinin geliştirilmesi, BIW tasarımlarında daha fazla entegre parçanın üretilmesine ve üretim maliyetlerinin düşürülmesine olanak sağlayacaktır. Daha çevreci ve enerji verimli alaşımların kullanılması, sürecin çevresel performansını artırarak üretimde sürdürülebilirliği destekleyecektir. Ayrıca üretim süreçlerinin dijital kontrol sistemleri ile optimize edilmesi, parça kalitesini daha da artıracak ve süreç istikrarını güvence altına alacaktır. Sonuç olarak, rheocasting, hafif ve yüksek performanslı otomotiv bileşenlerinin üretiminde vazgeçilmez bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir. Hem üretim verimliliği hem de yapısal performans açısından sağladığı avantajlar, bu teknolojiyi geleceğin otomotiv üretim stratejileri için kritik bir araç hâline getirmektedir. Uygun optimizasyon ve teknoloji yatırımları ile rheocasting, otomotiv endüstrisinde sürdürülebilir, verimli ve rekabetçi üretim yöntemlerinden biri olarak ön plana çıkacaktır.

KAYNAKÇA

Jones, A., Smith, B., & Lee, C. (2021). Advances in semi-solid metal processing for automotive applications. Journal of Materials Processing Technology, 291, 116–130.

Kim, D., Park, S., & Zhao, H. (2021). Process optimization of rheocast aluminum components for BIW applications. Materials & Design, 199, 109–120.

Lee, H., Chen, Y., & Wu, J. (2022). Lightweight BIW design using rheocast aluminum alloys. International Journal of Automotive Engineering, 33(4), 220–235.

Smith, J. (2020). Aluminum applications in modern automotive structures. Automotive Materials Journal, 12(2), 45–58.

Zhang, Q. (2019). Microstructure and mechanical properties of semi-solid aluminum components. Metallurgical Science and Technology, 37(7), 512–526.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Modern Üretimde Demir Dışı Sac Metaller İçin Birleştirme Teknolojileri

Necdet Selim KOÇYİĞİT[1]
Yağız SELÇUK[2]
Ferhat Can KÖSE[3]

Abstract

The increasing demand for lightweight and high-performance vehicle structures has accelerated the use of non-ferrous sheet metals such as aluminum and magnesium alloys in modern manufacturing industries, particularly in automotive applications. However, the joining of non-ferrous sheet metals presents several engineering challenges due to their high thermal conductivity, oxide layer formation, and differences in metallurgical properties compared to conventional steel materials. For this reason, advanced joining technologies have become increasingly important in the production of lightweight and durable structures. This study presents a literature-based evaluation of joining technologies used for non-ferrous sheet metals in modern manufacturing systems. Conventional and advanced joining methods including friction stir welding, adhesive bonding, mechanical fastening, laser welding, and hybrid joining techniques are examined in terms of their process principles, advantages, limitations, and applicability to lightweight structures. In addition, the effects of material properties, surface conditions, and process parameters on joint quality and production performance are discussed. The findings indicate that selecting an appropriate joining technology is critical for achieving structural integrity, corrosion resistance, dimensional accuracy, and production efficiency in lightweight manufacturing systems. Furthermore, the increasing use of electric vehicles and sustainable production approaches is expected to further expand the application of advanced joining technologies for non-ferrous materials in future manufacturing industries.

Keywords: Non-Ferrous Sheet Metals, Joining Methods, Friction Stir Welding, Adhesive Bonding, Mechanical Fastening

[1] Tasarım Mühendisi, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0009-8523-1214
[2] Tasarım Mühendisi, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0009-8523-1214
[3] Tasarım Mühendisi, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Orcid: 0009-0008-0886-6155

GİRİŞ

Günümüzde otomotiv, havacılık ve savunma sanayi gibi sektörlerde hafiflik, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik gereksinimleri doğrultusunda demir dışı metallerin kullanım oranı giderek artmaktadır. Özellikle alüminyum ve magnezyum alaşımları, düşük yoğunlukları ve yüksek özgül dayanımları sayesinde modern mühendislik yapılarında önemli avantajlar sunmaktadır. Bu malzemelerin kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte uygun birleştirme teknolojilerinin geliştirilmesi de kritik bir mühendislik konusu hâline gelmiştir.

Demir dışı sac metallerin birleştirilmesi, geleneksel çelik malzemelere kıyasla farklı proses zorlukları içermektedir. Yüksek ısıl iletkenlik, düşük ergime sıcaklığı, yüzey oksitlenmesi ve farklı metal kombinasyonlarının kullanılması, kaynak kalitesinin sürekliliğini doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle modern üretim sistemlerinde yalnızca geleneksel ergitme kaynak yöntemleri değil, aynı zamanda katı hâl birleştirme yöntemleri, yapıştırıcı teknolojileri ve hibrit bağlantı yöntemleri de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Özellikle elektrikli araç teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte hafif gövde yapıları, batarya muhafazaları ve çok malzemeli taşıyıcı sistemler için gelişmiş birleştirme yöntemlerine olan ihtiyaç artmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı, lazer kaynağı, yapısal yapıştırıcılar ve mekanik bağlantı yöntemleri gibi teknolojiler, modern üretim sistemlerinde önemli uygulama alanları bulmaktadır.

Bu çalışmada, modern üretim sistemlerinde kullanılan demir dışı sac metaller için birleştirme teknolojileri incelenmiş; temel yöntemlerin çalışma prensipleri, avantajları, sınırlamaları ve otomotiv üretimindeki uygulama alanları değerlendirilmiştir.

YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında literatür taraması yöntemi kullanılmıştır. Demir dışı sac metallerin birleştirilmesine yönelik akademik yayınlar, teknik raporlar, tez çalışmaları ve endüstriyel uygulamalar incelenmiştir. Özellikle otomotiv üretim sistemlerinde kullanılan alüminyum ve magnezyum alaşımlarına yönelik birleştirme yöntemleri değerlendirilmiştir.

Çalışmada sürtünme karıştırma kaynağı, lazer kaynağı, yapıştırıcı ile birleştirme, mekanik bağlantılar ve hibrit bağlantı yöntemleri ele alınmış; bu yöntemlerin proses parametreleri, üretim avantajları, kalite gereksinimleri ve uygulama sınırlamaları mühendislik bakış açısıyla analiz edilmiştir.

1. Yapısal Yapıştırıcıların BIW Rijitliği Üzerindeki Etkisi

Araç gövdesinin burulma ve eğilme rijitliği, sürüş dinamikleri ve yapısal dayanım açısından kritik öneme sahiptir. Geleneksel spot kaynaklı birleşimlerde yük transferi lokal bölgelerde yoğunlaşırken, yapısal yapıştırıcı uygulamalarında yükler daha geniş yüzey alanlarına yayılmaktadır (Zhang & Senkara, 2011).

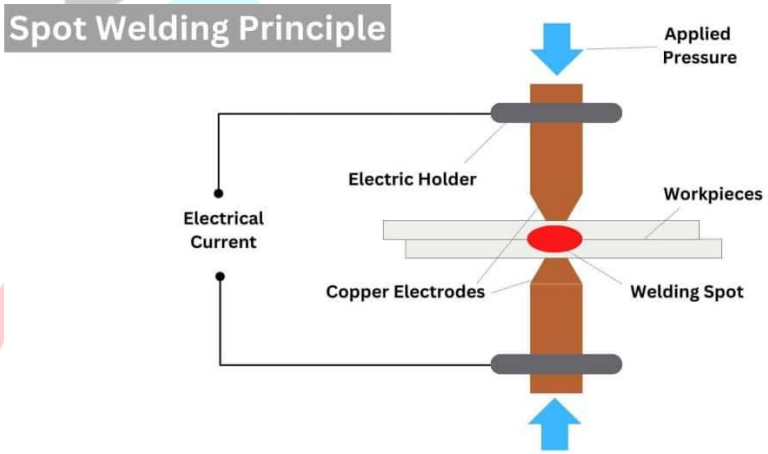
Bu durum özellikle BIW yapılarında birleşim bölgelerindeki gerilme yoğunlaşmalarını azaltmakta ve global gövde rijitliğini artırmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar, yapısal yapıştırıcı kullanımının torsiyonel rijitlikte önemli iyileşmeler sağlayabildiğini göstermektedir (American Welding Society, 2020).

Yapıştırıcı destekli birleşim teknolojileri ayrıca panel deformasyonlarını azaltarak boyutsal kararlılığın iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır.

1.1. Spot Weld Bonding Uygulamaları

Spot weld bonding yöntemi, yapısal yapıştırıcı ve direnç nokta kaynağının birlikte kullanıldığı hibrit bir birleştirme yöntemidir. Bu yöntemde yapıştırıcı yük dağılımını sağlarken, nokta kaynakları montaj fikstürlemesi ve ilk dayanım için kullanılmaktadır (Mordike & Ebert, 2001).

Bu hibrit yapı sayesinde birleşim bölgelerinde daha yüksek yorulma dayanımı elde edilebilmekte ve darbe yükleri altında enerji absorpsiyonu artırılabilmektedir.



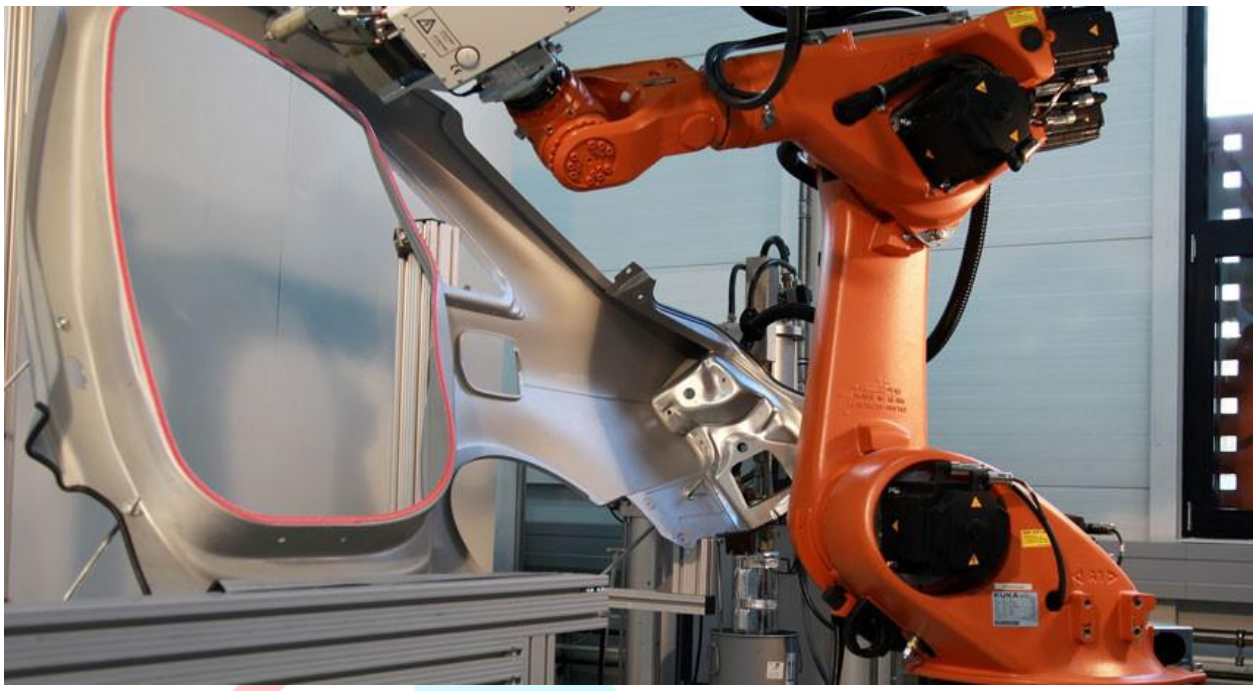
Şekil 1- Spot weld bonding uygulamasının şematik gösterimi.

2. Yapısal Yapıştırıcıların Çarpışma Performansına Etkisi

Araç çarpışma performansı, enerji absorpsiyonu ve yük aktarım mekanizmaları ile doğrudan ilişkilidir. Yapısal yapıştırıcılar birleşim bölgelerinde daha homojen yük dağılımı sağlayarak lokal deformasyonları azaltabilmektedir (Mishra & Ma, 2005).

Özellikle frontal ve yan darbe senaryolarında yapıştırıcı destekli birleşimlerin enerji emme kapasitesini artırdığı belirtilmektedir. Ayrıca birleşim bölgelerindeki çatlak ilerleme davranışının geciktirilmesi sayesinde yapısal bütünlüğün korunmasına katkı sağlanmaktadır (da Silva & Öchsner, 2008).

Yapısal yapıştırıcıların kullanımı ile birlikte çarpışma sırasında oluşan ani yük transferlerinin daha kontrollü gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 2- *Yapısal macun uygulamasının şematik gösterimi.*

2.1. NVH Performansına Katkıları

Yapısal yapıştırıcılar, viskoelastik davranış özellikleri sayesinde titreşim sönümleme kabiliyeti sunmaktadır. Bu özellik, araç gövdesindeki panel titreşimlerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Barnes & Pashby, 2000).

Özellikle düşük frekanslı titreşimlerin sönümlenmesi sayesinde araç içi akustik konfor artırılabilmektedir. Bu nedenle modern araç platformlarında yapısal yapıştırıcı kullanımı NVH optimizasyonunun önemli bir parçası haline gelmiştir.

3. Hafifletme Stratejileri ve Farklı Malzeme Birleşimleri

Otomotiv sektöründe emisyon hedefleri doğrultusunda hafif araç tasarımı büyük önem taşımaktadır. Yapısal yapıştırıcılar, farklı malzemelerin güvenilir şekilde birleştirilmesine imkân sağlayarak çok malzemeli gövde tasarımlarını desteklemektedir (Katayama, 2013).

Özellikle alüminyum ve yüksek dayanımlı çelik kombinasyonlarında galvanik korozyon riskinin azaltılması açısından yapıştırıcı ara katmanları önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca yapısal yapıştırıcılar sayesinde bazı bölgelerde kaynak nokta sayıları azaltılarak üretim optimizasyonu gerçekleştirilebilmektedir.

4. Proses Zorlukları ve Dayanım Problemleri

Yapısal yapıştırıcı uygulamalarında kürleme süreleri, proses entegrasyonu ve çevresel dayanım önemli mühendislik problemleri arasında yer almaktadır (Messler, 2004). Özellikle sıcaklık değişimleri, nem etkileri ve yaşlandırma koşulları yapıştırıcı performansını doğrudan etkileyebilmektedir. Bunun yanında üretim süreçlerinde yüzey hazırlığının yeterli olmaması aderans problemlerine neden olabilmektedir. Bu nedenle yapıştırıcı uygulamalarında proses parametrelerinin kontrolü ve kalite doğrulama yöntemleri büyük önem taşımaktadır.

SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Demir dışı sac metaller için geliştirilen modern birleştirme teknolojileri, hafiflik, yüksek dayanım ve sürdürülebilir üretim hedefleri doğrultusunda büyük önem taşımaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe kullanılan alüminyum ve magnezyum alaşımlarının yaygınlaşması, gelişmiş birleştirme yöntemlerine olan ihtiyacı artırmaktadır.

Bu çalışmada sürtünme karıştırma kaynağı, lazer kaynağı, yapıştırıcı teknolojileri ve mekanik bağlantı yöntemleri genel hatlarıyla değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, uygun proses seçiminin bağlantı kalitesi, üretim verimliliği ve yapısal performans açısından kritik önem taşıdığını göstermektedir.

Gelecekte elektrikli araç teknolojilerinin gelişmesi ve çok malzemeli yapıların yaygınlaşmasıyla birlikte hibrit ve düşük ısı girdili birleştirme yöntemlerinin daha fazla önem kazanacağı öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

Ashby, M. F. (2011). *Materials selection in mechanical design*. Butterworth-Heinemann.

Kou, S. (2003). *Welding metallurgy* (2nd ed.). Wiley-Interscience.

Cary, H. B., & Helzer, S. C. (2005). *Modern welding technology* (6th ed.). Pearson Education.

Davis, J. R. (1993). *Aluminum and aluminum alloys*. ASM International.

Zhang, H., & Senkara, J. (2011). *Resistance welding: Fundamentals and applications* (2nd ed.). CRC Press.

American Welding Society. (2020). *Welding handbook: Welding processes* (Vol. 2). AWS.

Mordike, B. L., & Ebert, T. (2001). Magnesium: Properties — applications — potential. *Materials Science and Engineering: A, 302*(1), 37–45. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01542-3

Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports, 50*(1–2), 1–78. https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001

da Silva, L. F. M., & Öchsner, A. (2008). *Modeling of adhesively bonded joints*. Springer.

Barnes, T. A., & Pashby, I. R. (2000). Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles. *Journal of Materials Processing Technology, 99*(1–3), 72–79. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00372-8

Katayama, S. (2013). *Handbook of laser welding technologies*. Woodhead Publishing.

Messler, R. W. (2004). *Principles of welding: Processes, physics, chemistry, and metallurgy*. Wiley-Interscience.

Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A. J., De Smet, P., Haszler, A., & Vieregge, A. (2000). Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering: A, 280*(1), 37–49. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00692-9

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

BIW Fastening Strategies in Automotive
Otomotivde BIW Bağlantı Stratejileri

Harun YENİ [1]
Necdet Selim KOÇYİĞİT [2]

Abstract

The Body-in-White (BIW) stage represents one of the most critical phases in automotive manufacturing, where the structural framework of a vehicle is assembled before painting and final component installation. During this stage, various sheet metal parts are joined together to create a rigid and safe body structure. As modern vehicles increasingly incorporate multi-material designs, including high-strength steels, aluminum alloys, and other lightweight materials, the selection of appropriate fastening strategies has become an essential aspect of BIW engineering. This study reviews commonly used fastening methods in BIW structures and evaluates their advantages, limitations, and applications in automotive manufacturing.Traditional resistance spot welding remains the most widely used joining technique in BIW assembly due to its high productivity, automation compatibility, and relatively low cost. However, the increasing use of dissimilar materials and advanced high-strength steels has created challenges for conventional welding processes. Therefore alternative fastening technologies have gained greater importance in modern vehicle production.Mechanical fastening methods such as self-piercing riveting and clinching are widely used for joining aluminum and mixed-material structures. These techniques offer advantages such as reduced thermal distortion and the ability to join materials that are difficult to weld. In addition, structural adhesive bonding has become an important complementary joining method, providing improved load distribution, vibration damping, and enhanced corrosion resistance in multi-material assemblies.The selection of an appropriate BIW fastening strategy depends on several factors, including material combination, sheet thickness, structural performance requirements, production efficiency, and overall manufacturing cost. Therefore, integrating multiple joining technologies within a single vehicle body has become a common practice to optimize both structural performance and manufacturing flexibility.

Keywords: BIW, multi-material, joining, resistance spot welding, laser welding, self-piercing riveting, clinching, structural adhesive, corrosion, quality assurance

[1] Engineering Specialist, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Bursa, Türkiye, ARGE Merkezi, Orcıd: 0000-0002-8200-443X
[2] Engineering Designer, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Bursa, Türkiye, ARGE Merkezi, Orcıd: 0009-0009-8523-1214

GİRİŞ

Otomotiv endüstrisinde araç gövdesi, literatürde yaygın kullanılan adıyla Body-in-White (BIW), aracın boya ve son montaj işlemleri öncesinde tamamlanan temel yapısal iskeletini oluşturmaktadır. BIW; yolcu güvenliği, yapısal rijitlik, çarpışma performansı ve NVH, yani gürültü, titreşim ve sertlik gibi temel araç fonksiyonlarını doğrudan etkileyen kritik bir alt sistemdir (Zhang, 2010). Bu aşamada farklı sac ve profil parçalar, hedeflenen yapısal bütünlüğü sağlayacak şekilde birleştirilerek rijit ve dayanıklı bir yapı elde edilmektedir.

Güncel emisyon mevzuatları, enerji verimliliği hedefleri ve elektrikli araçlarda menzil gereksinimleri; gövde kütlesinin azaltılmasını, başka bir ifadeyle hafifletme yaklaşımını, stratejik bir öncelik haline getirmiştir (Merklein and Lechner, 2017). Bu doğrultuda gelişmiş yüksek dayanımlı çelikler, press-hardened steel olarak adlandırılan sıcak şekillendirilmiş çelikler, alüminyum alaşımları ve kompozit malzemeler aynı gövde üzerinde eş zamanlı olarak kullanılabilmektedir (Dilthey and Wieschemann, 2009). Ancak çok malzemeli tasarım yaklaşımı, birleştirme teknolojilerinin seçiminde yalnızca mekanik dayanımın değil; korozyon dayanımı, üretim çevrim süresi, otomasyon entegrasyonu, kalite güvence yöntemleri ve servis/onarım gereksinimlerinin de birlikte değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır (Davies, 2010; Okuda and Takahashi, 2015).

Bu çalışmada BIW'de kullanılan birleştirme yöntemleri; proses prensibi, uygulama alanları, avantajlar ve sınırlılıklar çerçevesinde sistematik biçimde ele alınmaktadır. Ayrıca çok malzemeli gövde mimarilerinde bağlantı yöntemi seçimini etkileyen malzeme uyumluluğu, üretim kabiliyeti, yapısal performans, kalite güvence, korozyon dayanımı ve servis edilebilirlik gibi temel mühendislik kriterleri değerlendirilmektedir.

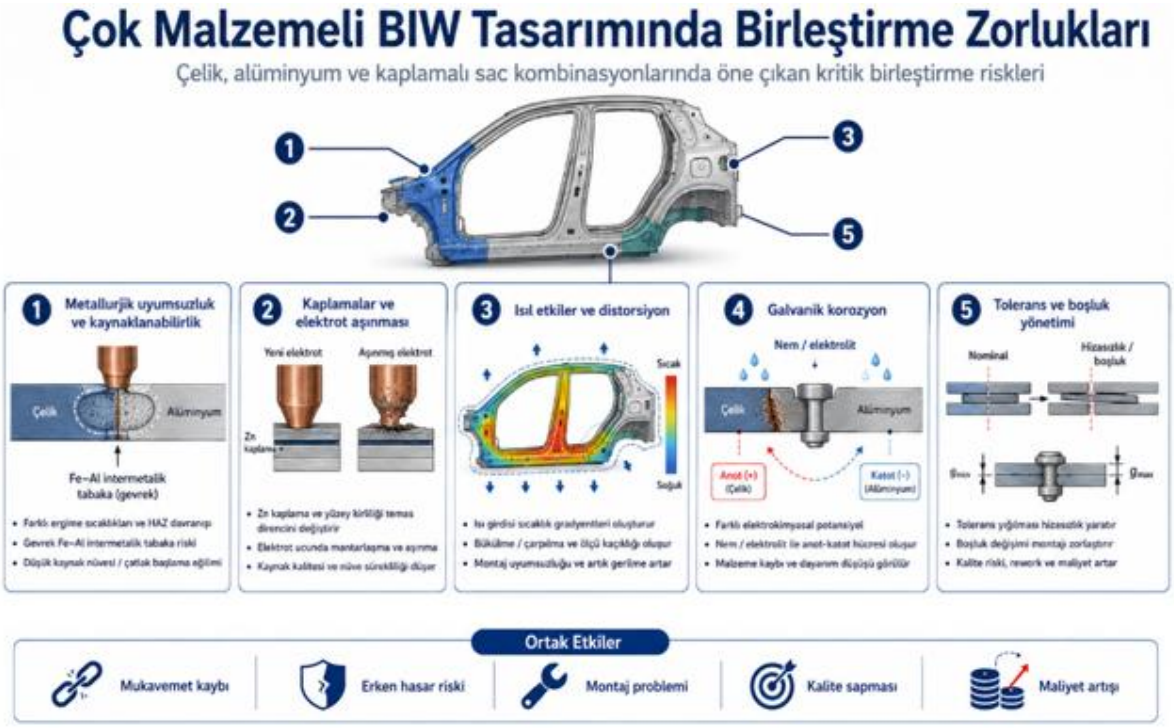
YÖNTEM

Bu çalışma, çok malzemeli BIW yapılarında kullanılan bağlantı yöntemlerine ilişkin literatür temelli bir derleme niteliğindedir. Çalışma kapsamında direnç nokta kaynağı, projeksiyon kaynağı, dikiş kaynağı, ark kaynağı, lazer kaynak, lazer brazing, self-piercing riveting, clinching, flow-drill screwing, vidalı bağlantılar ve yapısal yapıştırma yöntemleri değerlendirilmiştir.

Değerlendirme yapılırken her bir yöntemin proses prensibi, uygulanabilir malzeme kombinasyonları, üretim çevrim süresine etkisi, otomasyon uygunluğu, yapısal performansa katkısı, kalite güvence gereksinimleri, korozyon ve dayanıklılık üzerindeki etkileri ile servis ve onarım süreçlerindeki yansımaları dikkate alınmıştır. Bu yönüyle çalışma, tekil bir deneysel uygulamadan ziyade BIW mühendisliği açısından bağlantı yöntemi seçimine yönelik kavramsal ve karşılaştırmalı bir değerlendirme sunmaktadır.

Çok Malzemeli BIW Tasarımında Birleştirme Zorlukları

Çok malzemeli BIW yapılarında birleştirme süreçleri, malzeme-özel davranışlar ve üretim kısıtları nedeniyle belirgin mühendislik zorlukları içermektedir (bakınız Şekil-1). Geleneksel çelik gövde mimarilerinde çoğu durumda direnç nokta kaynağı temel birleştirme yöntemi olarak yeterli görülürken, günümüzde alüminyum, yüksek dayanımlı çelikler, magnezyum alaşımları, polimerler ve kompozitlerin aynı yapı içerisinde kullanılması bağlantı teknolojilerinin seçiminde daha karmaşık bir karar sürecini gerekli kılmaktadır.



Şekil-1 Çok Malzemeli BIW Tasarımında Birleştirme Zorlukları

1.1. Metallurjik uyumsuzluk ve kaynaklanabilirlik

Çelik–alüminyum gibi kombinasyonlarda intermetalik faz oluşumu ve buna bağlı kırılganlık riski, kaynak proseslerini sınırlandırabilmektedir (Zhou and Zhang, 2011; Ko vd., 2016). Bu tür malzeme kombinasyonlarında doğrudan ergitme esaslı kaynak işlemleri, bağlantı bölgesinde istenmeyen fazların oluşmasına ve mekanik özelliklerin zayıflamasına neden olabilmektedir. Bu nedenle mekanik bağlantı ve yapıştırma temelli hibrit çözümler daha güvenilir bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

1.2. Kaplamalar ve elektrot aşınması

Galvanizli saclar ve yüksek alaşımlı çeliklerde elektrot ömrünün azalması, proses kararlılığını ve kalite tekrarlanabilirliğini olumsuz etkileyebilmektedir (Smith, 2000). Elektrot yüzeyinde kaplama transferi, aşınma ve deformasyon meydana geldiğinde kaynak nugget geometrisi değişebilmekte, bu durum da bağlantı dayanımında dalgalanmalara neden olabilmektedir.

1.3. Isıl etkiler ve distorsiyon

Ark ve lazer kaynak proseslerinde ısıl girdinin distorsiyon, ısı tesiri altındaki bölge özellikleri ve artık gerilmeler üzerindeki etkisi kritik olup, fikstürleme ve tolerans yönetimini zorlaştırabilmektedir (Eagar and Tsai, 1983; Katayama, 2013). Özellikle ince sac parçaların kullanıldığı BIW uygulamalarında aşırı ısı girdisi, geometri sapmalarına ve montaj kalitesinin düşmesine yol açabilmektedir.

1.4. Galvanik korozyon

Elektrokimyasal potansiyeli farklı malzemelerin temas ettiği bölgelerde uygun izolasyon ve sızdırmazlık stratejileri gerekmektedir (Okuda and Takahashi, 2015). Çelik ve

alüminyum gibi farklı elektrokimyasal özelliklere sahip malzemelerin temasında, nem ve tuzlu ortam etkisiyle galvanik korozyon riski artmaktadır. Bu durum özellikle alt gövde, eşik ve dış ortam koşullarına açık bölgelerde önemli bir dayanıklılık problemi oluşturabilmektedir.

1.5. Tolerans ve boşluk yönetimi

Özellikle lazer kaynak ve yapıştırma proseslerinde boşluk toleranslarının dar olması, pres parça geometrisi ve montaj fikstürlerinin kalitesini belirleyici hale getirmektedir (Silva vd., 2002). Parçalar arasındaki boşluk, hizalama hataları ve yüzey düzensizlikleri bağlantı kalitesini doğrudan etkileyebildiğinden, proses öncesi parça üretim kalitesi ve montaj fikstür tasarımı kritik önem taşımaktadır.

Bu nedenlerle modern BIW uygulamalarında çoğu zaman tek bir yöntem yerine; kaynak, mekanik bağlantı ve yapıştırmanın bir arada kullanıldığı hibrit birleştirme mimarileri tercih edilmektedir (Baldan, 2004).

2. BIW Yapılarında Kullanılan Bağlantı Yöntemleri

BIW yöntemlerinde birden fazla bağlantı yöntemleri olup bunları bu bölümde alt başlıklar halinde inceliyor olacağız (bakınız Şekil-2).

Şekil-2 BIW yapılarında kullanılan bağlantı yöntemleri

2.1. Direnç Nokta Kaynağı (RSW)

Direnç nokta kaynağı, BIW üretiminde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olup yüksek üretkenlik ve robotik otomasyona elverişlilik nedeniyle seri üretimde önemli avantajlar sunmaktadır (Zhang, 2010; Pouranvari and Marashi, 2013). RSW prosesinde iki veya daha fazla sac parça, bakır alaşımlı elektrotlar arasında sıkıştırılır ve kısa süreli yüksek akım uygulanarak temas bölgesinde lokal ergime sağlanır. Oluşan kaynak çekirdeği, bağlantının taşıyıcı bölgesini meydana getirir.

RSW'nin başlıca avantajları kısa çevrim süresi, yüksek otomasyon uyumu, olgun proses altyapısı ve standardizasyon imkanlarıdır. Otomotiv seri üretim hatlarında çok sayıda robot ile uygulanabilmesi, prosesin en önemli tercih nedenlerinden biridir. Ayrıca ekipman ve proses bilgisi açısından otomotiv endüstrisinde geniş bir birikim bulunmaktadır.

Bununla birlikte RSW'nin bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Benzer olmayan malzeme birleştirmelerinde kalite güvence zorlukları ortaya çıkabilmekte, kaplamalı saclarda elektrot aşınması ve sıçrama eğilimi artabilmekte, AHSS ve PHS malzemelerde ise ısı tesiri altındaki bölge duyarlılığı bağlantı performansını etkileyebilmektedir (Kelly and Pickens, 2007; Smith, 2000; Dilthey and Wieschemann, 2009). Bu nedenle çok malzemeli BIW yapılarında RSW çoğu zaman tek başına yeterli görülmemekte, yapıştırıcı veya mekanik bağlantı yöntemleriyle desteklenmektedir.

Kalite göstergeleri açısından çekirdek çapı, kopma modu ve proses imzaları belirleyici parametrelerdir. Pull-out kopma modu çoğu durumda daha güvenli kabul edilirken, interfacial kopma modu bağlantı dayanımı açısından riskli değerlendirilebilmektedir (Pouranvari and Marashi, 2013). Dinamik direnç, elektrot kuvveti, kaynak akımı ve proses süresi gibi parametrelerin çevrim içi izlenmesi, kalite güvence faaliyetlerinin temelini oluşturmaktadır.

2.2. Projeksiyon ve Dikiş Kaynağı

Projeksiyon kaynağı, somun veya projeksiyon birleşimleri gibi uygulamalarda akımın belirli çıkıntı bölgelerinde yoğunlaştırılması prensibiyle daha kontrollü bir kaynak çekirdeği oluşumuna olanak tanımaktadır (Pouranvari and Marashi, 2013). Bu bağlamda tekrarlanabilirlik artabilmekte ve montaj sonrası gevşeme riski azaltılabilmektedir. Özellikle BIW üzerinde sonradan bağlanacak komponentler için kaynak somunları ve bağlantı elemanları projeksiyon kaynağı ile gövdeye sabitlenebilmektedir.

Bununla birlikte projeksiyon geometrisinin; sac kalınlığı, kaplama tipi ve yüzey durumu ile birlikte optimize edilmemesi durumunda eksik nüfuziyet veya düzensiz çekirdek oluşumu gibi kusurlar ortaya çıkabilmektedir (Smith, 2000). Bu nedenle projeksiyon yüksekliği, elektrot kuvveti, kaynak akımı ve süre parametreleri dikkatle belirlenmelidir.

Dikiş kaynağı ise süreklilik gerektiren flanş ve lokal takviye bölgelerinde uygulanabilmekle birlikte, ısı birikimi kaynaklı distorsiyon riski ve buna bağlı fikstürleme gereksinimi daha yüksek olabilmektedir (Eagar and Tsai, 1983). Dolayısıyla süreç parametrelerinin ve soğutma stratejilerinin ısıl etkileri sınırlayacak şekilde belirlenmesi önem taşımaktadır (Pouranvari and Marashi, 2013; Eagar and Tsai, 1983).

2.3. Ark Kaynağı (MIG/MAG)

MIG/MAG kaynağı BIW'de belirli alt bileşenlerde veya görece kalın kesitlerde uygulanabilmektedir. Ancak nispeten yüksek ısıl girdi, distorsiyon ve ısı tesiri altındaki bölge etkilerinin daha belirgin olmasına yol açabilmektedir (Eagar and Tsai, 1983). Bu nedenle BIW'de kullanım alanı, proses gereksinimleri ve tolerans hassasiyeti çerçevesinde sınırlıdır.

Ark kaynağı daha çok kalın kesitli alt gövde elemanları, lokal takviyeler veya üretim hattı dışı tamir uygulamaları gibi alanlarda değerlendirilebilmektedir. İnce saclı ve hassas tolerans gerektiren gövde bölgelerinde ise yüksek ısı girdisi nedeniyle geometrik sapmalar ve yüzey kalitesi problemleri oluşabilmektedir.

2.4. Lazer Kaynak ve Lazer Brazing

Lazer prosesleri, yüksek kaynak hızı ve dar ısıl etki bölgesi nedeniyle uzun dikişlerde distorsiyonu sınırlama potansiyeli taşımaktadır (Silva vd., 2002; Katayama, 2013). BIW'de lazer kaynak; tavan–yan panel, taban parçaları, kapı iç yapıları ve belirli ring-frame birleşimlerinde, rijitlik artırımı ve parça sayısının azaltılması hedefleriyle tercih edilebilmektedir (Silva vd., 2002).

Bununla birlikte lazer kaynak prosesi, boşluk ve hizalama toleranslarına duyarlı olduğundan pres parça geometrisi ile fikstürleme kalitesi kaynak stabilitesi üzerinde belirleyicidir (Silva vd., 2002; Katayama, 2013). Ayrıca alüminyum alaşımlarında yansıtıcılık,

porozite ve sıcak çatlak eğilimi gibi olgular proses penceresini daraltabilmektedir (Katayama, 2013).

Lazer brazing ise özellikle dış yüzey kalite beklentisinin yüksek olduğu bölgelerde tercih edilebilmektedir. Tavan ve yan panel birleşimleri gibi görünür bölgelerde düzgün yüzey kalitesi ve düşük distorsiyon avantajı sağlayabilmektedir. Ancak proses maliyeti, ekipman yatırımı ve hassas fikstürleme ihtiyacı göz önünde bulundurulmalıdır.

2.5. Mekanik Bağlantı Yöntemleri

Mekanik birleştirme yöntemleri, özellikle alüminyum ve karışık malzeme birleştirmelerinde kaynak yöntemlerine alternatif veya tamamlayıcı bir çözüm olarak değerlendirilmektedir (Olabi and Hashmi, 2004). Bu yöntemler genellikle ısıl etki oluşturmadan bağlantı sağladıkları için metallurjik uyumsuzluk riskini azaltmakta ve farklı malzemelerin bir arada kullanılmasına olanak tanımaktadır. Detaylar alt başlıklar halinde inceliyor olacağız (bakınız Şekil-3).

Şekil-3 Mekanik bağlantı yöntemleri

2.5.1 Self-Piercing Riveting (SPR)

Self-piercing riveting, perçin elemanının üst sacı delerek alt sacda kilitlenmesi prensibiyle çalışmakta ve ısıl etki oluşturmadan birleştirme sağlayabilmektedir (Abe vd., 2014). SPR yöntemi özellikle alüminyum–çelik ve alüminyum–alüminyum birleştirmelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Isıl işlem gerektirmemesi, kaplama ve malzeme özellikleri üzerinde kaynak proseslerine kıyasla daha düşük etki oluşturması önemli avantajlarındandır.

SPR yönteminin başlıca avantajları metallurjik uyumsuzluk riskinin azaltılması, alüminyum–çelik birleştirmelerinde yaygın uygulama kabiliyeti ve tekrarlanabilirliktir (Abe vd., 2014; Barnes and Pashby, 2000). Buna karşılık sarf malzeme maliyeti, ekipman yatırım gereksinimi ve birleştirme kombinasyonlarına bağlı proses sınırları önemli sınırlılıklar arasında yer almaktadır (Olabi and Hashmi, 2004; Abe vd., 2014).

2.5.2. Clinching

Clinching, sacların lokal plastik deformasyonla kilitlenmesi esasına dayanmakta olup ek birleştirme elemanı gerektirmemesi nedeniyle maliyet açısından avantaj sağlayabilmektedir (Mori, 2014; Varis, 2003). Bu yöntemde parçalar, kalıp ve zımba sistemi yardımıyla lokal olarak şekillendirilir ve mekanik kilitlenme oluşturulur.

Clinching yöntemi, özellikle düşük ve orta dayanım gerektiren bölgelerde ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Bununla birlikte dayanım ve sızdırmazlık gereksinimleri yüksek uygulamalarda sınırlı kalabilmektedir (Varis, 2003). Ayrıca yüksek dayanımlı çeliklerde lokal deformasyon kabiliyetinin sınırlı olması, yöntemin uygulanabilirliğini etkileyebilmektedir.

2.5.3. Flow-Drill Screwing (FDS) ve Vidalı Bağlantılar

Flow-drill screwing ve vidalı bağlantılar, özellikle tek taraflı erişimin zorunlu olduğu bölgelerde üretilebilirliği artırabilmektedir. FDS prosesinde vida elemanı, sürtünme kaynaklı ısı etkisiyle sac üzerinde lokal bir delik ve kovan benzeri yapı oluşturarak bağlantı sağlar. Bu özellik, kapalı kesitlerde veya ikinci tarafa erişimin mümkün olmadığı bölgelerde önemli avantaj sunmaktadır.

Bununla birlikte gevşeme davranışı, servis senaryoları ve kaplama hasarı riski gibi hususlar tasarımda dikkate alınmalıdır (Bickford, 2007). Vidalı bağlantılar sökülebilirlik ve servis edilebilirlik açısından avantaj sağlasa da titreşim altında gevşeme, ön yük kaybı ve korozyon gibi riskler uygun tasarım ve validasyon çalışmalarıyla kontrol edilmelidir.,

2.6. Yapısal Yapıştırma (Structural Adhesive Bonding)

Yapısal yapıştırıcılar, BIW'de rijitlik artışı, yorulma dayanımı ve sızdırmazlık performansı açısından önemli katkılar sunabilmektedir (Baldan, 2004; da Silva vd., 2009). Özellikle geniş flanşlı bağlantılarda yapıştırıcı, yük taşıyan temas alanını artırarak gerilme yığılmalarını azaltabilmekte ve yorulma ömrünü iyileştirebilmektedir (da Silva vd., 2009).

Yapıştırıcılar yalnızca mekanik dayanım açısından değil, aynı zamanda NVH performansı, sızdırmazlık ve korozyon koruması açısından da önemli avantajlar sağlamaktadır. Bağlantı boyunca sürekli bir tabaka oluşturduklarında yük transferi noktasal olmaktan çıkarak daha geniş bir alana yayılır. Bu durum özellikle yorulma kritik flanş bağlantılarında bağlantı ömrünü artırabilmektedir.

Bununla birlikte yapıştırıcıların tek başına kullanımı, proses kontrolü ve kalite doğrulama açısından daha yüksek disiplin gerektirmektedir. Bu nedenle pratik uygulamalarda sıklıkla "yapıştırıcı + mekanik sabitleme" şeklinde hibrit kurgular tercih edilmektedir (Baldan, 2004; da Silva vd., 2009). Bu hibrit yaklaşımda mekanik bağlantı elemanı veya kaynak noktası montaj sırasında parçaların pozisyonunu korurken, yapıştırıcı nihai dayanım, yorulma performansı ve sızdırmazlık açısından katkı sağlamaktadır.

Yapıştırıcı bağlantıların performansını belirleyen kritik hususlar yüzey hazırlığı, kürleme çevrimi uyumu ve yaşlanma etkileridir. Nem ve sıcaklık çevrimleri, bağ performansı üzerinde uzun vadeli etkiler oluşturabilmektedir (Dillard and Pocius, 2019; Pocius, 2012). Bu nedenle yapıştırıcı uygulamalarında proses disiplini, yüzey temizliği, kürleme kontrolü ve çevresel dayanım validasyonları büyük önem taşımaktadır.

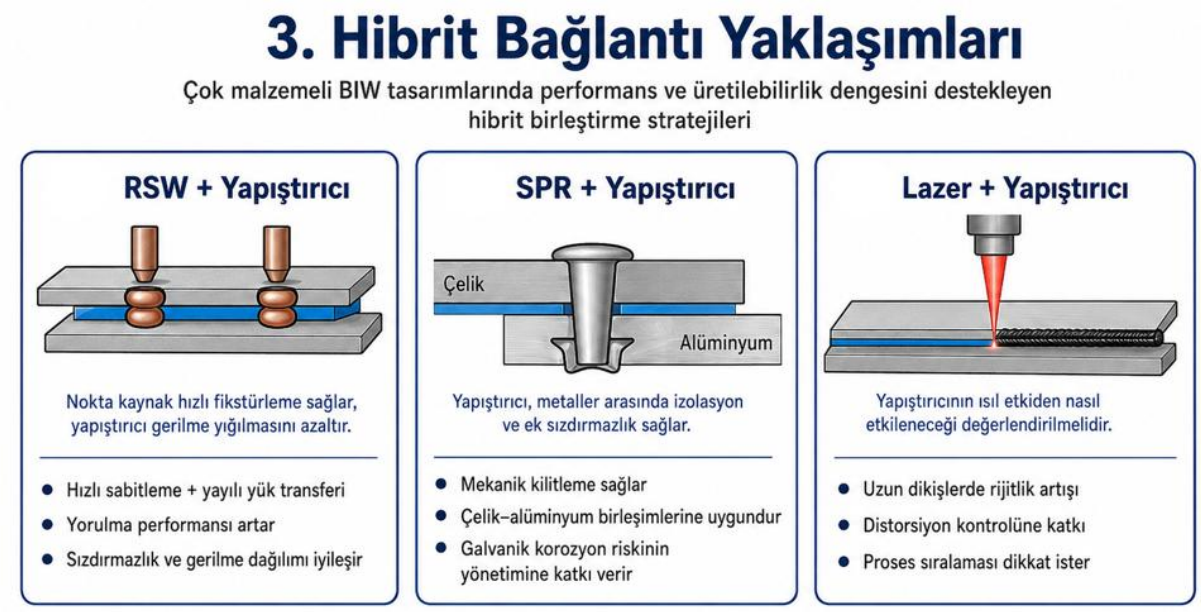
3. Hibrit Bağlantı Yaklaşımları

Çok malzemeli BIW tasarımlarında hibrit birleştirme stratejileri, performans ve üretilebilirlik arasında denge kurmak amacıyla yaygınlaşmaktadır (Baldan, 2004). Hibrit bağlantı yaklaşımı (bakınız Şekil-4), farklı bağlantı teknolojilerinin güçlü yönlerini bir araya getirerek tekil yöntemlerin sınırlılıklarını azaltmayı hedeflemektedir.

RSW + yapıştırıcı kombinasyonu, çevrim süresini korurken yorulma ve sızdırmazlık performansını artırabilmektedir (da Silva vd., 2009). Bu yaklaşımda nokta kaynaklar üretim sırasında hızlı sabitleme sağlarken, yapıştırıcı bağlantı boyunca yük transferini yayarak gerilme yığılmalarını azaltır.

SPR + yapıştırıcı kombinasyonu, çelik–alüminyum birleşimlerinde mekanik kilitleme sağlarken galvanik korozyon riskinin yönetimine katkıda bulunabilmektedir (Barnes and Pashby, 2000; Okuda and Takahashi, 2015). Yapıştırıcı tabakası farklı metaller arasında izolasyon sağlayarak doğrudan metal temasını azaltabilir. Aynı zamanda bağlantı bölgesinde sızdırmazlık sağlayarak nem ve tuz girişini sınırlandırabilir.

Lazer + yapıştırıcı kombinasyonu ise uzun dikişlerde rijitlik artışı ve distorsiyon kontrolü sağlayabilmektedir (Silva vd., 2002; Katayama, 2013). Ancak bu tür uygulamalarda yapıştırıcının lazer kaynak prosesi sırasında maruz kalacağı ısıl etki ve proses sıralaması dikkatle değerlendirilmelidir.



Şekil-4 BIW de hibrit bağlantı yaklaşımları

4. Bağlantı Yöntemi Seçim Kriterleri

Bağlantı yöntemi seçimi (bakınız Şekil-5); performans, üretilebilirlik ve yaşam döngüsü hedefleri ile birlikte çok kriterli bir karar problemi olarak ele alınmalıdır (Davies, 2010). BIW yapılarında doğru bağlantı teknolojisinin belirlenmesi yalnızca bağlantının statik dayanımına göre yapılamaz. Malzeme kombinasyonu, sac kalınlığı, erişim durumu, üretim hacmi, kalite güvence imkanı, korozyon dayanımı ve servis edilebilirlik gibi birçok faktör birlikte değerlendirilmelidir.

Şekil-5 Doğru bağlantı seçiminin etkileri şeması

4.1. Malzeme ve Birleştirme Uyumluluğu

Çelik–çelik kombinasyonlarında, iki taraflı erişimin sağlanabildiği birleştirmelerde direnç nokta kaynağı çoğu durumda temel çözüm olmaya devam etmektedir (Pouranvari and Marashi, 2013). Bu tür bağlantılarda proses altyapısı olgunlaşmış olup seri üretim açısından yüksek verimlilik sağlanabilmektedir.

Alüminyum–alüminyum birleştirmelerde SPR, FDS, lazer kaynak ve uygun yapıştırıcı kombinasyonları proses kararlılığı ve performans hedeflerine bağlı olarak değerlendirilebilir (Silva vd., 2002; Abe vd., 2014). Alüminyumun yüksek ısıl iletkenliği, oksit tabakası ve kaynak proseslerindeki kararlılık problemleri nedeniyle mekanik bağlantılar birçok uygulamada tercih edilebilmektedir.

Çelik–alüminyum kombinasyonlarında ise mekanik bağlantı + yapıştırıcı ve izolasyon stratejileri korozyon dayanımı açısından ön plana çıkmaktadır (Barnes and Pashby, 2000; Okuda and Takahashi, 2015). Bu tür benzer olmayan birleştirmelerde doğrudan kaynak, intermetalik fazlar ve galvanik korozyon riski nedeniyle sınırlı kalabilmektedir.

Çok katmanlı çelik birleştirmelerde RSW genellikle ilk tercih olup, AHSS ve PHS malzemelerde kopma modunun interfacial'a dönmesini önlemek üzere kaynak parametreleri ve nugget hedefi optimize edilmelidir (Dilthey and Wieschemann, 2009; Pouranvari and Marashi, 2013). Alüminyum birleştirmelerde RSW uygulanabilir olmakla birlikte elektrot ömrü ve proses stabilitesi daha zorlu olabilmektedir (Kelly and Pickens, 2007). Bu nedenle tek taraf erişim veya kaplama hassasiyeti bulunan bölgelerde SPR/FDS + yapıştırıcı yaklaşımı tercih edilebilmektedir (Abe vd., 2014; da Silva vd., 2009).

4.2. Yapısal Performans

Statik dayanımın yanı sıra çarpışma enerjisini sönümleme ve yorulma davranışı, bağlantı tasarımını doğrudan belirlemektedir (Banea and da Silva, 2009; da Silva vd., 2009). BIW yapılarında bağlantılar yalnızca parçaları bir arada tutan elemanlar değildir; aynı zamanda yük aktarım yollarını, deformasyon modlarını ve enerji sönümleme davranışını da belirler.

Yalnızca nokta kaynak kullanılan flanşlarda yük transferi kaynak noktaları çevresinde yoğunlaşabilir. Yapıştırıcı eklenmesi, yükü daha geniş alana yayarak yorulma çatlak başlangıcını geciktirebilir (da Silva vd., 2009). Bu nedenle özellikle yorulma kritik bölgelerde yapıştırıcı destekli hibrit bağlantılar önemli avantaj sağlayabilmektedir.

Çarpışma enerjisini sönümleme açısından progressive katlanma beklenen bölgelerde bağlantı tipi ve aralığı, katlanma modunu etkileyebilmektedir. Bu nedenle bağlantı seçimi yalnızca üretim kolaylığına göre değil, CAE doğrulamaları ve test korelasyonları ile iteratif biçimde yapılmalıdır (Davies, 2010).

4.3. Üretim ve Otomasyon

Çevrim süresi, robot erişimi, tek taraflı erişim gereksinimi ve fikstürleme karmaşıklığı yöntem seçiminde belirleyicidir (Olabi and Hashmi, 2004). Yüksek adetli üretimde proses çevrim süresi doğrudan üretim maliyetini etkiler. Bu nedenle RSW gibi hızlı ve otomasyona uygun prosesler seri üretimde önemli avantaj sağlar.

Kapalı kutu kesitlerde iki taraflı elektrot erişimi mümkün olmadığında FDS gibi yöntemler üretilebilirliği artırabilmektedir (Bickford, 2007). Benzer şekilde SPR ve vidalı bağlantılar, tek taraflı veya sınırlı erişime sahip bölgelerde kaynak yöntemlerine göre daha uygulanabilir çözümler sunabilmektedir.

Yüksek adetli üretimde RSW çevrim süresi avantajı sunmakla birlikte, kaplamalı sac ve çok katmanlı birleştirmelerde proses izleme ve elektrot bakım stratejileri maliyet/kalite dengesini belirlemektedir (Pouranvari and Marashi, 2013; Smith, 2000). Lazer kaynak ise

yüksek hız avantajı sunsa da fikstürleme hassasiyeti ve ekipman maliyeti nedeniyle tüm bölgelerde ekonomik olmayabilir.

4.4. Kalite Güvencesi

RSW'de proses imzaları, SPR'de perçin yerleşimi ve baş yüksekliği, yapıştırmada ise boşluk ve süreklilik takibi temel kalite parametreleridir (Pouranvari and Marashi, 2013; da Silva vd., 2009). Çevrim içi izleme; erken hata yakalama ve izlenebilirlik açısından önem taşımaktadır (Pouranvari and Marashi, 2013; Smith, 2000).

Yapıştırıcı sürekliliği, kalite güvence açısından kritik bir parametredir. Flanş boyunca yapıştırıcı süreksizliği, lokal korozyon ve NVH problemlerine neden olabileceğinden süreç verileri ve uygun kontrol yöntemleriyle izlenmelidir (Dillard and Pocius, 2019). Benzer şekilde SPR bağlantılarında perçin baş yüksekliği ve kilitlenme karakteristikleri, çevrim içi sensör verisi ve periyodik tahribatlı testlerle doğrulanabilir (Abe vd., 2014).

Kalite güvence süreçleri bağlantı tipine göre değişmektedir. Kaynaklı bağlantılarda tahribatlı ve tahribatsız testler, mekanik bağlantılarda kesit incelemeleri ve kuvvet-deplasman verileri, yapıştırıcı bağlantılarda ise yüzey hazırlığı, boncuk sürekliliği ve kürleme doğrulaması ön plana çıkmaktadır.

4.5. Korozyon ve Dayanıklılık

Benzer olmayan malzemelerde galvanik korozyon riski; izolasyon, kaplama bütünlüğü ve sızdırmazlık ile birlikte ele alınmalıdır (Okuda and Takahashi, 2015). Özellikle çelik–alüminyum temas bölgelerinde nem ve tuz etkisiyle galvanik hücre oluşumu hızlanabilmektedir. Bu nedenle farklı metaller arasında doğrudan elektriksel temasın azaltılması, yapıştırıcı veya yalıtım tabakalarıyla izolasyon sağlanması ve uygun kaplama stratejilerinin uygulanması gerekmektedir.

Çelik–alüminyum alt gövde bölgelerinde nem-tuz çevrimlerine maruz kalan temas bölgelerinde galvanik korozyon riski daha belirgin hale gelmektedir. Bu nedenle elektriksel temasın azaltılması, izolasyon ve validasyon testleri kritik önemdedir (Okuda and Takahashi, 2015; ISO 9227, 2022). Tuz püskürtme testleri ve çevrimsel korozyon testleri, bu tür bağlantıların dayanıklılığını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

4.6. Servis ve Tamir edilebilirlik

Onarım prosedürleri, sökülebilirlik ve hasarlı bölge değişim stratejileri tasarım aşamasında planlanmalıdır (Bickford, 2007). Modern BIW yapılarında bağlantı teknolojisinin yalnızca üretim aşamasındaki avantajları değil, servis ve onarım süreçlerindeki etkileri de dikkate alınmalıdır.

Yapıştırıcı + perçin gibi bağlantılar söküm sırasında ek işlem adımları gerektirebilir. Bu nedenle belirli servis bölgelerinde civatalı çözümler veya erişilebilir bağlantı düzenleri onarım süresini azaltabilir (Bickford, 2007). Ancak civatalı bağlantılarda gevşeme, korozyon ve ön yük kaybı gibi konular tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır.

5. Sonuç ve Değerlendirme

BIW üretiminde direnç nokta kaynağı, yüksek üretkenlik ve otomasyon uyumu nedeniyle önemini sürdürmekle birlikte; hafifletme hedefleri ve çok malzemeli gövde

mimarileri mekanik bağlantı ve yapısal yapıştırıcı kullanımını belirgin biçimde artırmıştır (Merklein and Lechner, 2017; Olabi and Hashmi, 2004). Bu çerçevede en uygun çözüm çoğu zaman hibrit birleştirme stratejileri ile elde edilmekte; malzeme-birleştirme seçimi, proses penceresi, kalite güvencesi, korozyon yönetimi ve onarım gereksinimlerinin bütüncül değerlendirilmesi gerekmektedir (Davies, 2010; Okuda and Takahashi, 2015).

Çok malzemeli BIW yapılarında bağlantı teknolojisi seçimi, yalnızca mevcut üretim imkanlarına göre değil, aracın tüm yaşam döngüsü boyunca karşılaşacağı mekanik, çevresel ve servis koşullarına göre yapılmalıdır. Bu nedenle tasarım, üretim, kalite, dayanıklılık ve servis mühendisliği disiplinlerinin birlikte çalışması büyük önem taşımaktadır. Elektrikli araç mimarilerinin yaygınlaşması, batarya taşıyıcı yapılarının gövdeye entegrasyonu ve daha karmaşık malzeme kombinasyonlarının kullanılması, hibrit bağlantı teknolojilerinin önemini günümüzde arttırmış, ilerleyen zamanlarda daha da artıracaktır.

KAYNAKÇA

Abe, T., Kato, S. ve Mori, K. (2014). Self-piercing riveting of aluminum sheets and steel sheets for automotive applications. *Journal of Materials Processing Technology, 214*, 2007–2013.

Baldan, A. (2004). Adhesively-bonded joints in metallic alloys, polymers and composite materials. *Journal of Materials Science, 39*, 4729–4797.

Banea, A. O. ve da Silva, L. F. M. (2009). Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 223*, 1–18.

Barnes, S. ve Pashby, I. (2000). Joining techniques for aluminum spaceframes used in automobiles. *Journal of Materials Processing Technology, 99*, 62–71.

Bickford, J. H. (2007). *An introduction to the design and behavior of bolted joints* (4th ed.). CRC Press.

Davies, R. (2010). Joining technologies for lightweight structures. *Materials & Design, 31*, S1–S5.

Dilthey, U. ve Wieschemann, A. (2009). Welding of advanced high-strength steels. *Welding in the World, 53*, 28–41.

Dillard, D. A. ve Pocius, A. V. (Ed.). (2019). *The mechanics of adhesion* (2nd ed.). Elsevier.

Eagar, T. W. ve Tsai, N. S. (1983). Temperature fields produced by traveling distributed heat sources. *Welding Journal, 62*, 346s–355s.

Hirsch, J. (2014). Recent development in aluminum for automotive applications. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 24*, 1995–2002.

ISO 9227. (2022). *Corrosion tests in artificial atmospheres — Salt spray tests*. International Organization for Standardization.

Katayama, A. (2013). *Fundamentals of laser welding*. Springer.

Kelly, S. M. ve Pickens, J. R. (2007). Resistance spot welding of aluminum alloys. *Welding Journal, 86*(4), 124s–132s.

Ko, M., Kim, J. ve Lee, S. (2016). Fatigue performance of SPR joints in benzer olmayan material stacks. *International Journal of Fatigue, 92*, 489–499.

Merklein, M. ve Lechner, J. (2017). Lightweight materials in automotive applications. *Journal of Materials Processing Technology, 242*, 1–14.

Mori, M. (2014). Clinching technology in sheet metal joining. *Journal of Materials Processing Technology, 214*, 1466–1474.

Okuda, H. O. ve Takahashi, T. (2015). Galvanic corrosion considerations in mixed-material automotive bodies. *Corrosion Reviews, 33*, 85–103.

Olabi, A. G. ve Hashmi, M. S. J. (2004). Mechanical joining methods in automotive body assembly. *Journal of Materials Processing Technology, 155–156*, 1389–1395.

Pocius, A. V. (2012). *Adhesion and adhesives technology: An introduction* (3rd ed.). Hanser.

Pouranvari, M. ve Marashi, S. P. H. (2013). Critical review of automotive resistance spot welding. *Science and Technology of Welding and Joining, 18*(5), 361–403.

Silva, R. P., Gonzales, M. A. ve Serra, P. R. T. (2002). Laser welding in automotive industry: a review. *Optics & Laser Technology, 34*, 523–531.

Smith, C. B. (2000). Electrode degradation in resistance spot welding. *Welding Journal, 79*(8), 209s–215s.

Varis, A. (2003). The suitability of clinching as a joining method for high-strength steels. *Journal of Materials Processing Technology, 132*, 242–249.

Zhang, W. (2010). Design and implementation of automotive body structures. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 3*(1), 45–52.

Zhou, Y. ve Zhang, H. (2011). *Resistance spot welding of aluminum alloys and advanced high strength steels*. Springer.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

A Comparative Study of Backbone Architectures in Faster Region-Based Convolutional Neural Network with Feature Pyramid Networks for Printed Circuit Board Defect Detection and Classification

Atakan YENİPAZARLI[1,2]
Mehmet Gökhan HABİBOĞLU[3]

Abstract

Early detection of Printed Circuit Board (PCB) manufacturing defects is crucial for ensuring product reliability and reducing production costs. While deep learning has advanced automated visual inspection, the impact of backbone architecture choice on detection performance across diverse defect morphologies remains insufficiently explored. This paper presents a systematic comparative study of six modern object detection models for PCB defect detection: four Faster R-CNN variants built on Feature Pyramid Network (FPN) necks with ConvNeXt-S, Swin Transformer-Tiny, ResNet-101 and the proposed PCBMicroNet backbones, together with two YOLO baselines (YOLOv11s and YOLO26l). All models are evaluated under an identical 5-fold cross-validation protocol on the PKU-Market-PCB defect dataset (six defect classes) using an 80-10-10 train/validation/test split in which the test fold rotates, with hyperparameters optimised via Optuna. Experimental results show that ConvNeXt-S FPN achieves the highest mAP@0.5 of 0.9684 ± 0.0024 and COCO mAP@0.5:0.95 of 0.4941 ± 0.0074, while the proposed PCBMicroNet attains 0.9410 ± 0.0105 mAP@0.5 and 0.4889 ± 0.0121 COCO mAP, second only to ConvNeXt-S on the stricter localisation metric, and within the combined cross-validation variance of the top model, at 52.09 M parameters. At the per-class level, PCBMicroNet outperforms every other evaluated model on the two topologically defined defect classes: *short*, with AP@0.5:0.95 of 0.472 against 0.431 for ConvNeXt-S, 0.427 for YOLOv11s, 0.410 for YOLO26l and 0.399 for Swin-T, and *open circuit*, with 0.513 against 0.491 for ConvNeXt-S, 0.470 for Swin-T, 0.449 for YOLO26l and 0.379 for YOLOv11s. The findings provide a comprehensive accuracy-efficiency trade-off analysis to guide backbone selection for real-time industrial PCB inspection systems.

Keywords: Backbone analysis, comparative study, ConvNeXt, deep learning, Faster R-CNN, feature pyramid network, PCBMicroNet, printed circuit board (PCB) defect detection, ResNet, Swin Transformer, YOLO.

[1] Elektrik-Elektronik Mühendisi, Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., ArGe Merkezi, Orcıd: 0009 – 0007 – 2941 – 488X
[2] Elektrik-Elektronik Mühendisi, Türk-Alman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Orcıd: 0009 – 0007 – 2941 – 488X
[3] Dr. Öğr. Üyesi, Türk-Alman Üniversitesi, Elektrik-Elektornik Mühendislik Fakültesi, Orcıd: 0000 – 0002 – 8334- 7944

INTRODUCTION

The rapid advancement in consumer electronics, automotive industries, and aerospace sectors has led to increasingly complex and ultra-compact Printed Circuit Board (PCB) designs. As the fundamental building blocks of modern electronic systems, the reliability of PCBs is an absolute prerequisite. For Original Equipment Manufacturers (OEMs), ensuring the integrity of these components is a crucial business imperative. A single undetected defect, such as an open circuit or a spur, does not merely represent a faulty board; it leads to escalating failures throughout the end product.

Traditional manual visual inspection is no longer feasible due to human attention deficit, subjectivity, and the microscopic scale of modern PCB features. Conventional Automated Optical Inspection (AOI) systems, even though they are faster, often suffer from high false-positive rates and struggle with the high variance of defect types. Recently, Deep Learning (DL) has emerged as a transformative solution for these challenges (Hu et al., 2024).

In this study, a robust defect detection and classification framework is proposed to fulfil strict industrial standards. By employing Faster R-CNN integrated with a Feature Pyramid Network (FPN), the system effectively captures multi-scale features so that even the smallest anomalies are detected (Lin et al., 2017). To provide a comprehensive benchmark for industrial application, a comparative analysis of modern backbone architectures (ConvNeXt-S, Swin Transformer-Tiny, ResNet-101 and the proposed PCBMicroNet) is conducted together with two strong YOLO baselines (YOLOv11s and YOLO26l), with all six models evaluated under an identical 5-fold cross-validation protocol.

RELATED WORK

The literature on PCB defect detection has transitioned from traditional image-subtraction methods (Putera and Ibrahim, 2010) to deep learning architectures. While one-stage detectors like YOLO offer real-time advantages, two-stage detectors such as Faster R-CNN are preferred for their high sensitivity to structural anomalies (Ren et al., 2017). Recent studies have introduced Feature Pyramid Networks (FPN) to address the multi-scale nature of defects (Lin et al., 2017). However, a systematic head-to-head comparison of modern transformer-, convolutional- and YOLO-style backbones on the same PCB dataset, with identical cross-validation splits and hyperparameter optimisation budgets, remains under-explored. This is the gap the present paper aims to address.

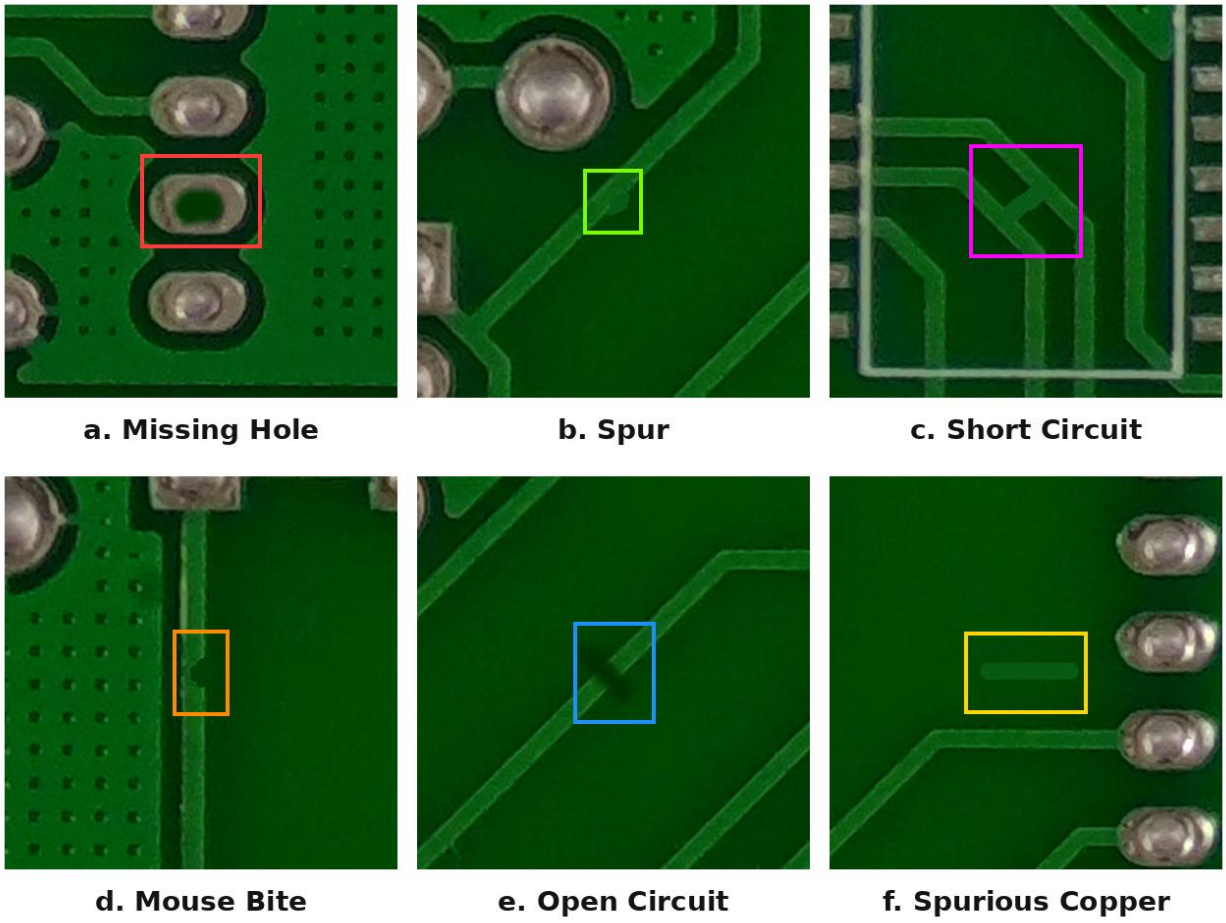


Figure 1 - *PCB defect examples: (a) Missing hole, (b) Spur, (c) Short circuit, (d) Mouse bite, (e) Open circuit, (f) Spurious copper.*

PROPOSED METHODOLOGY

The methodology evaluates the impact of feature-extraction architecture on PCB defect detection. The study employs a modular Faster R-CNN + FPN framework in which the backbone is systematically varied while the neck and detection head remain constant, ensuring fair comparison across the four R-CNN-based models. Two YOLO baselines (YOLOv11s and YOLO26l) are evaluated using the Ultralytics framework on the identical 5-fold partition for cross-paradigm reference.

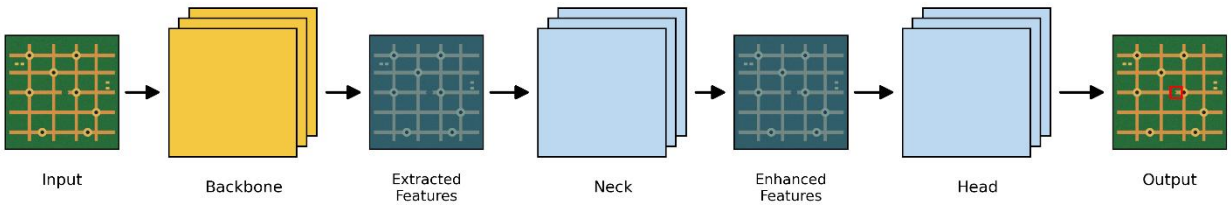


Figure 2- *Conceptual schematic of the three-stage PCB inspection model: Backbone, Neck and Head.*

Dataset Preparation and Format Conversion

This study uses the publicly available PKU-Market-PCB defect dataset (Xiaolong, 2024), originally released by Peking University. The dataset comprises six defect categories: missing hole, mouse bite, open circuit, short, spur, and spurious copper. Annotations are converted from YOLO normalised format to absolute pixel coordinates $(x^{min}, y^{min}, x^{max}, y^{max})$ required by the Region Proposal Network (RPN) of Faster R-CNN (Tang et al., 2019). All images are resized to 512 × 512 pixels prior to training.

A 5-fold cross-validation protocol with an 80-10-10 train/validation/test split is used. The test fold rotates across the five splits so that every image is in the test set exactly once. The same partitioning is applied to all six models to guarantee fairness. The six defect categories are well balanced in absolute terms, and all classes are present in every split. The mild imbalance between the most and least represented classes in the training split remains within the range generally considered acceptable for object detection training without explicit rebalancing. Given the relatively small size of the labelled corpus (693 defective images), k-fold cross-validation with $k = 5$ is the recommended evaluation strategy: it maximises data utilisation, mitigates the high-variance and optimistic-bias problems associated with single hold-out splits on small datasets, and offers a favourable bias-variance trade-off compared with both leave-one-out and larger k values (Kohavi, 1995; Raschka, 2018). Golden (defect-free) images are kept proportionally distributed across folds to preserve background-class balance.

Comparative Backbone Architectures

Six detection models are evaluated:

ConvNeXt-S FPN: ConvNeXt-Small backbone with FPN neck and Faster R-CNN head.

Swin-T FPN: Swin Transformer-Tiny backbone with FPN neck and Faster R-CNN head.

ResNet-101 FPN: classical residual backbone with FPN, retained as a strong CNN reference.

PCBMicroNet (proposed): a domain-specific backbone with FPN and Faster R-CNN head.

YOLO26l: large variant of the YOLO family, used as a high-capacity one-stage baseline.

YOLOv11s: small variant of YOLOv11, used as an efficiency-oriented one-stage baseline.

The FPN neck of the four R-CNN-based models uses a uniform 256-channel projection across all pyramid levels (P2-P5), enabling multi-scale fusion of low-level spatial features with high-level semantic features. Anchor scales of {8, 16, 32, 64} with aspect ratios of {0.5, 1.0, 2.0} are used to cover the broad geometric range of PCB defects.

Training Strategy and Hyperparameter Optimisation (HPO)

The four Faster R-CNN models share an identical training pipeline: Optuna-driven hyperparameter search (Akiba et al., 2019) (15 trials with Median Pruner) on the first fold, followed by training of all five folds with the best configuration. Optuna is selected because it implements an efficient Tree-structured Parzen Estimator (TPE) sampler together with an asynchronous pruning mechanism, which enables an order-of-magnitude reduction in wasted compute on the poor-performing trials, an essential property when the per-trial cost is a partial Faster R-CNN training run. AMP (mixed precision) is enabled, with a 5-epoch warm-up followed by cosine-annealed learning-rate decay and early stopping on validation mAP@0.5 with patience 15. The two YOLO baselines use the Ultralytics training routine with the same data splits and a comparable epoch budget.

Performance is reported using COCO-style mean Average Precision (mAP) at IoU thresholds of 0.5, 0.75 and the 0.5:0.95 range, together with per-class AP, parameter count, single-image inference latency at 512 × 512 on the training GPU, and total training time across the five cross-validation folds (excluding the one-time HPO).

EXPERIMENTAL SETUP

Training Configuration and Hyperparameters

All Faster R-CNN models are trained in PyTorch for up to 200 epochs per fold with early stopping (patience = 15, $\Delta^{min} = 10^{-4}$ on validation mAP@0.5). The Faster R-CNN backbones (ConvNeXt-S, Swin-T, ResNet-101) are initialised with ImageNet-1k pre-trained weights, and the YOLO baselines use the Ultralytics-provided COCO pre-trained checkpoints. PCBMicroNet, in contrast, is trained from random initialisation, as no public pre-trained weights are available for its domain-specific convolution blocks; this establishes the comparison as a stricter test of the proposed architecture's representational capacity rather than a benchmark of transfer-learning pipelines. The Optuna search space spans optimiser ∈ {Adam, AdamW, SGD}, learning rate ∈ $[10^{-5}, 10^{-2}]$ (log-uniform) and weight decay ∈ $[10^{-5}, 10^{-2}]$ (log-uniform). The three optimisers are deliberately chosen to span the dominant first-order optimisation families in modern deep learning: SGD with momentum represents the classical baseline that remains the strongest performer for many CNN-based detection pipelines, Adam (Kingma and Ba, 2015) introduces adaptive per-parameter learning rates that have become the default for transformer-based architectures, and AdamW (Loshchilov and Hutter, 2019) decouples weight decay from the adaptive gradient step and has been empirically shown to outperform Adam on image-classification and detection workloads. Searching across this trio per backbone allows the optimiser-architecture pairing to be determined empirically rather than fixed a priori, which is especially relevant given the architectural heterogeneity of the comparison (CNN, transformer, hybrid, and the proposed domain-specific backbone). The schedule combines a 5-epoch linear warm-up with cosine annealing to $\eta_{min} = 0.01 \cdot \eta_{peak}$. Batch sizes are tuned per architecture for the available GPU memory. The YOLO baselines use the default Ultralytics training recipe with image size 512, identical fold partitions, and the same patience for early stopping.

Computational Environment and Hardware

All Faster R-CNN-family experiments are conducted on a single NVIDIA RTX 2000 Ada GPU (15.6 GB), with Python 3.12 and PyTorch 2.11 (CUDA 13.0). The YOLO baselines are run on the same machine for direct comparability of training time. Inference throughput is reported in frames per second (FPS) and it quantifies how many input images a trained model can process per second at deployment time. All reported FPS values correspond to single-image inference at 512 × 512 on the training GPU.

RESULTS AND DISCUSSION

Overall Performance Comparison

Table 1 - *5-Fold cross-validation performance, complexity and efficiency for the six evaluated models on the PKU PCB defect detection benchmark. The row corresponding to the proposed PCBMicroNet is highlighted.*

Model	mAP@0.5	mAP@0.5:0.95	Params (M)	FPS	Train Time (min)
ConvNeXt-S FPN	0.9684 ± 0.0024	0.4941 ± 0.0074	66.71	11.7	385
Swin-T FPN	0.9505 ± 0.0072	0.4722 ± 0.0060	44.77	13.8	290
PCBMicroNet (proposed)	**0.9410 ± 0.0105**	**0.4889 ± 0.0121**	**52.09**	**6.9**	**2427**
YOLO26l	0.9156 ± 0.0231	0.4623 ± 0.0185	26.30	98.9	72.5
ResNet-101 FPN	0.8525 ± 0.0133	0.3788 ± 0.0105	60.26	37.3	204
YOLOv11s	0.8825 ± 0.0055	0.4453 ± 0.0062	9.46	289.8	60

Table 1 presents the headline 5-fold cross-validation results for all six models. ConvNeXt-S FPN obtains the highest mAP@0.5 (0.9684) and the highest COCO mAP@0.5:0.95 (0.4941), with the tightest across-fold standard deviation (± 0.0024). Swin-T FPN is the second-strongest backbone on mAP@0.5 (0.9505), although with a wider across-fold spread (± 0.0072) than ConvNeXt-S. The proposed PCBMicroNet ranks third on mAP@0.5 (0.9410) but second on COCO mAP@0.5:0.95 (0.4889), surpassing Swin-T FPN, YOLO26l, ResNet-101 FPN and YOLOv11s on the stricter localisation metric, and trailing ConvNeXt-S by only 0.0052 on that metric, well within the combined cross-validation variance of the two models. Within the Faster R-CNN family the four backbones span a wide parameter range from 44.77 M (Swin-T FPN) and 52.09 M (PCBMicroNet) to 60.26 M (ResNet-101 FPN) and 66.71 M (ConvNeXt-S FPN); PCBMicroNet thus achieves the second-best COCO mAP of the comparison using fewer parameters than both ResNet-101 FPN and ConvNeXt-S FPN. YOLOv11s represents the efficiency endpoint of the comparison: at only 9.46 M parameters and 289.8 FPS it still reaches 0.8825 mAP@0.5 and 0.4453 COCO mAP, outperforming ResNet-101 FPN on the COCO metric despite having 6.4 times fewer parameters.

Per-Fold Stability Analysis

Table 2 reports the per-fold mAP@0.5 of all six models. ConvNeXt-S FPN is the most stable, with all five folds between 0.9655 and 0.9714 with the range of 0.0059. YOLOv11s is the next most stable, with folds in the range 0.8751-0.8915. Swin-T FPN spans 0.9403-0.9622 and PCBMicroNet 0.9265-0.9543; both stay above 0.92 on every fold. ResNet-101 FPN ranges from 0.8296 to 0.8648 with a range of 0.0352. YOLO26l shows the widest spread from 0.8799 to 0.9525, although it remains in the upper range of the comparison on most folds.

Table 2 - *Per-fold mAP@0.5 on the rotating test split, together with the resulting 5-fold mean ± standard deviation.*

Model	Fold 1	Fold 2	Fold 3	Fold 4	Fold 5	Mean ± Std
ConvNeXt-S FPN	0.9714	0.9655	0.9665	0.9712	0.9675	0.9684 ± 0.0024
Swin-T FPN	0.9403	0.9622	0.9534	0.9473	0.9491	0.9505 ± 0.0072
PCBMicroNet (proposed)	**0.9328**	**0.9265**	**0.9543**	**0.9407**	**0.9506**	**0.9410 ± 0.0105**
YOLO26l	0.9152	0.9117	0.9525	0.9187	0.8799	0.9156 ± 0.0231
ResNet-101 FPN	0.8592	0.8296	0.8648	0.8456	0.8631	0.8525 ± 0.0133
YOLOv11s	0.8830	0.8838	0.8751	0.8790	0.8915	0.8825 ± 0.0055

Per-Class Defect Analysis

Table 3 and Figure 3 jointly summarise per-class AP@0.5:0.95 (5-fold mean) for the five models with reliable per-class statistics. The table provides precise numerical values, while the heatmap re-expresses the same data as a within-class ranking, making the dominance pattern visually explicit.

Table 3. *Per-class AP@0.5:0.95 (5-fold mean) for the five Faster R-CNN and YOLO models retained for fine-grained analysis. The best result per defect class is shown in bold. ResNet-101 FPN is omitted from this fine-grained comparison as it is consistently the lowest-performing backbone across every class (see Table 1 for its aggregate performance).*

Defect class	ConvNeXt-S FPN	Swin-T FPN	PCBMicroNet	YOLO26l	YOLOv11s
Missing hole	0.571	0.562	0.573	0.589	**0.603**
Mouse bite	**0.526**	0.474	0.480	0.455	0.414
Open circuit	0.491	0.470	**0.513**	0.449	0.379
short	0.431	0.399	**0.472**	0.410	0.427
spur	**0.433**	0.419	0.432	0.415	0.382
Spurious copper	**0.513**	0.508	0.464	0.456	0.467

No single backbone dominates every defect type. ConvNeXt-S FPN obtains the highest AP@0.5:0.95 on three of the six defect classes, mouse bite (0.526), spur (0.433) and spurious copper (0.513). YOLOv11s is best on missing hole (0.603), the geometrically most distinct class, where its dense single-stage prediction scheme appears particularly well matched to the highly symmetric circular target. The proposed PCBMicroNet obtains the highest AP@0.5:0.95 on the two topologically defined defect categories: *short* (0.472 versus 0.431 for ConvNeXt-S, an absolute gain of 4.1 points) and *open circuit* (0.513 versus 0.491 for ConvNeXt-S, a 2.2-point gain). Both defect classes correspond to topological discontinuities in conductor traces, where the multi-scale, domain-specific feature aggregation modules of PCBMicroNet appear to provide a measurable advantage over generic backbones. This comparison should, however, be read with one methodological asymmetry in mind: ConvNeXt-S, Swin-T, ResNet-101 and the two YOLO baselines all benefit from large-scale pre-training, ImageNet-1k for the Faster R-CNN backbones and COCO for the YOLO baselines, before exposure to any PCB image, whereas the proposed PCBMicroNet is trained entirely from scratch on the PKU-Market-PCB defective set with no transfer-learning warm start. Pre-trained backbones therefore enter the comparison with rich generic visual priors that PCBMicroNet must instead learn from a small, specialised corpus during training. Against this asymmetry, the wins of pre-trained backbones on texture-dominated defect classes (mouse bite, spurious copper) are the expected outcome of the data-scale and pre-training gap rather than evidence against the proposed design, and PCBMicroNet's lead on the topological classes *short* and *open circuit* is correspondingly more significant, as these classes appear to require features that are not transferable from natural-image pre-training and that pre-trained backbones do not recover even with their head-start. The heatmap representation in Figure 3 further shows that, in terms of mean within-class rank (averaged over the six defect categories), the five models order as ConvNeXt-S FPN (mean rank 1.83), PCBMicroNet (2.17), Swin-T FPN (3.50), YOLOv11s (3.67) and YOLO26l (3.83). PCBMicroNet therefore exhibits the second-most uniform per-class profile after ConvNeXt-S FPN, holding rank 1 on *short* and *open circuit*, rank 2 on mouse bite and spur, rank 3 on missing

hole, and rank 4 on spurious copper, never ranking last on any defect class. YOLOv11s, despite a from 4.7 to 7.1 times parameter reduction relative to the Faster R-CNN family, achieves the highest AP@0.5:0.95 on the geometrically symmetric missing-hole class (0.603) and remains competitive on short (0.427) and spurious copper (0.467), but loses substantial ground on the more fine-grained classes mouse bite (0.414), open circuit (0.379) and spur (0.382), where its lightweight single-stage backbone appears to lack the multi-scale feature aggregation that the Faster R-CNN family obtains from FPN.

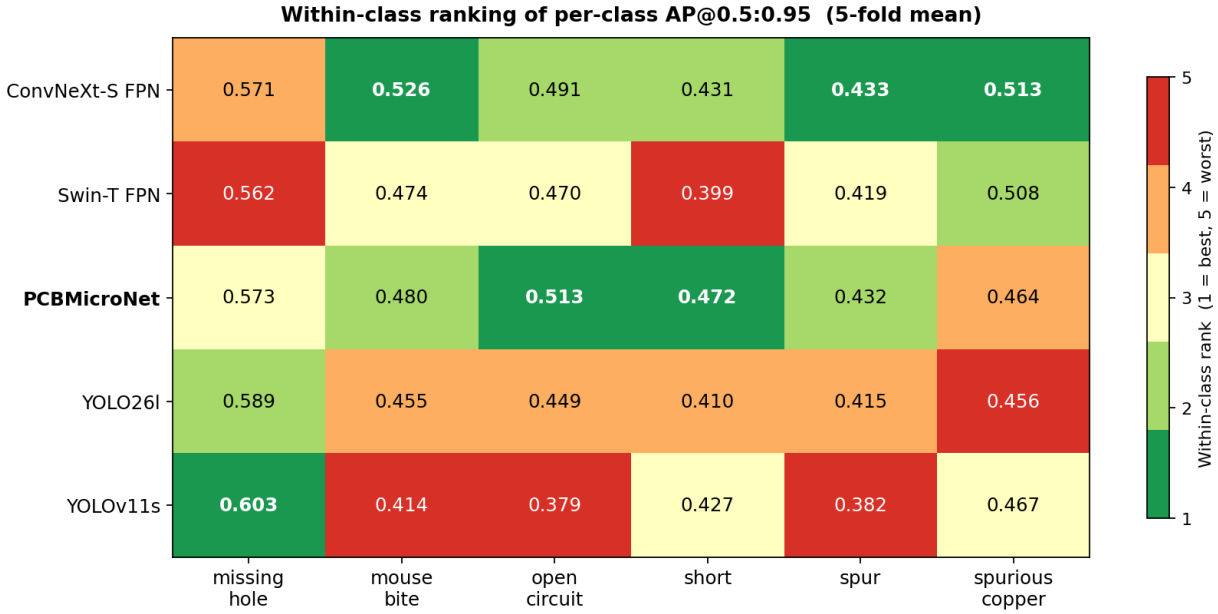


Figure 3- *Within-class ranking heatmap of the per-class AP@0.5:0.95 (5-fold mean) values of Table 3. Cell value is the 5-fold mean AP; colour encodes the rank of each model within its column (green = best, red = worst). No single backbone is ranked 1 out of three of the six defect classes.*

Accuracy-Efficiency Trade-off

The comparison yields three observations of practical interest. First, modern hierarchical backbones (ConvNeXt-S, Swin-T) deliver the highest accuracy on this benchmark, with ConvNeXt-S FPN achieving 0.9684 mAP@0.5 and 0.4941 COCO mAP and thus establishing a strong upper-bound reference for Faster R-CNN-style detection on PKU-PCB. Second, the proposed PCBMicroNet, at 52.09 M parameters, attains COCO mAP@0.5:0.95 of 0.4889, second only to ConvNeXt-S FPN and within the combined cross-validation variance of the two models, and produces the best AP@0.5:0.95 on the two topologically defined defect classes *short* and *open circuit*, suggesting that its domain-specific modules capture features relevant to fine-grained topological defects that are not well exploited by general-purpose backbones. Third, the efficiency baselines highlight an accuracy-throughput trade-off: YOLOv11s achieves 289.8 FPS at 9.46 M parameters with only an ≈ 8.6-point mAP@0.5 gap to the best Faster R-CNN backbone, which is relevant for line-speed industrial deployment where an inspection station must process boards within a fixed cycle time. The choice of model in practice therefore depends on whether the priority is peak accuracy (ConvNeXt-S FPN), balanced accuracy with class-specific advantages on topological defects (PCBMicroNet), or inference throughput at minimal parameter cost (YOLOv11s).

CONCLUSION

This paper presented a systematic five-fold cross-validation comparison of six modern object-detection models on the PKU PCB defect detection benchmark, comprising four Faster R-CNN + FPN variants (ConvNeXt-S, Swin-T, ResNet-101, and the proposed PCBMicroNet) and two YOLO baselines (YOLO26l, YOLOv11s). ConvNeXt-S FPN was identified as the strongest overall backbone. The proposed PCBMicroNet, however, demonstrated two distinctive strengths: at 52.09 M parameters it reached the second-highest COCO mAP@0.5:0.95 of the comparison (0.4889), trailing ConvNeXt-S FPN by only 0.0052, and, most notably, it outperformed every other evaluated model on the two topologically defined defect categories, reaching AP@0.5:0.95 of 0.472 on the *short*-circuit class against the next-best 0.431 obtained by ConvNeXt-S FPN (a gap of 0.041 AP units, equivalent to 4.1 percentage points of absolute improvement), and 0.513 on the *open circuit* class against the next-best 0.491 also obtained by ConvNeXt-S FPN (a gap of 0.022 AP units). This class-specific superiority directly supports the design hypothesis of PCBMicroNet: its domain-specific convolution layers are particularly effective at capturing fine-grained topological discontinuities in conductor material traces, a defect type that common ImageNet-pretrained hierarchical backbones do not exploit fully. YOLOv11s emerged as the efficiency endpoint, providing 289.8 FPS inference at 9.46 M parameters while remaining within approximately 9 mAP points of the best two-stage detector. As mentioned in Section of Dataset Preparation and Format Conversion, the six defect categories are well balanced in absolute terms, with the residual class imbalance remaining within the range generally considered acceptable for object-detection training without explicit rebalancing. Consequently, the per-class performance differences observed across all evaluated backbones can be attributed to intrinsic class detection difficulty. Table III further indicates that a partial class-level difficulty pattern is present across most models: *missing hole* is consistently the easiest class for every evaluated backbone, while *spur* is consistently among the hardest. For the remaining four classes, the relative ordering varies across backbones, indicating that whilst a portion of the difficulty hierarchy is intrinsic to the defects themselves, the rest is shaped by the inductive biases of the specific detector. The future work will focus on methodological refinements aimed at further improving detection performance across the backbones evaluated here. Two directions stand out: (i) adoption of a nested cross-validation protocol (Kohavi, 1995; Raschka, 2018) in which hyperparameter optimisation is performed independently inside each outer fold, eliminating the residual optimistic bias of the single-pass HPO used in the present study and providing tighter, less biased estimates of generalisation; and (ii) systematic exploration of richer learning-rate scheduling strategies, including warm restarts, cyclical schedules and per-layer adaptive decay, applied uniformly across all evaluated backbones, so that any resulting accuracy gains can be attributed to the schedule itself rather than to backbone-schedule interactions.

REFERENCES

Akiba, T., Sano, S., Yanase, T., Ohta, T., and Koyama, M. (2019). Optuna: A next-generation hyperparameter optimization framework. In *Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)* (pp. 2623-2631). Anchorage, AK, USA.

Hu, T., Lu, Y., Liu, C., and Zhuang, D. (2024). Research on PCB defect detection method based on deep learning. In *2024 5th International Conference on Computer Engineering and Intelligent Control (ICCEIC)* (pp. 303-307). Guangzhou, China. doi: 10.1109/ICCEIC64099.2024.10775544

Kingma, D. P., and Ba, J. (2015). Adam: A method for stochastic optimization. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR)*. San Diego, CA, USA.

Kohavi, R. (1995). A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. In *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)* (Vol. 2, pp. 1137-1145). Montreal, Canada.

Lin, T.-Y., Dollár, P., Girshick, R., He, K., Hariharan, B., and Belongie, S. (2017). Feature pyramid networks for object detection. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 2117-2125).

Loshchilov, I., and Hutter, F. (2019). Decoupled weight decay regularization. In *Proceedings of the 7th International Conference on Learning Representations (ICLR)*. New Orleans, LA, USA.

Putera, S. H. I., and Ibrahim, Z. (2010). Printed circuit board defect detection using mathematical morphology and MATLAB image processing tools. In *2010 2nd International Conference on Education Technology and Computer (ICETC)* (Vol. 5, pp. V5-359-V5-363).

Raschka, S. (2018). *Model evaluation, model selection, and algorithm selection in machine learning*. arXiv:1811.12808.

Ren, S., He, K., Girshick, R., and Sun, J. (2017). Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(6), 1137-1149.

Tang, S., He, F., Huang, X., and Yang, J. (2019). Online PCB defect detector on a new PCB defect dataset. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 2267-2271). Brighton, UK.

Xiaolong, L. (2024). *PCB defect detection dataset*. Kaggle. Retrieved from https://www.kaggle.com/datasets/liuxiaolong1/pcb-defect-detection-dataset, on January 25, 2026.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Simulating V2V-Based Dynamic Priority Management of Autonomous Vehicles at Unsignalized Intersections

Selim İŞCAN[1]
Cem Tolga MÜNYAS[2]
Can ÖNCEL[3]
Abdulkerim ÇEKİNMEZ[4]
Sibel DEMİR[5]

Abstract

This research examines the implementation of dynamic priority management for autonomous carrier vehicles at unsignalized intersections within industrial factory settings using Vehicle-to-Vehicle (V2V) communication. Addressing the limitations of static traffic control, a high-fidelity co-simulation framework was established by integrating SUMO for microscopic mobility and OMNeT++ for network simulation, synchronized through the Veins framework and TraCI protocol. The proposed algorithm operates through four specialized stages: V2V Beaconing, Geometric Conflict Detection, Distributed Leader Election, and Smart Yielding. By utilizing computational geometry to analyze vehicle trajectories as coordinate vectors, the system ensures vehicles only yield when physical path intersections are imminent, effectively maximizing factory throughput. Experimental results across three distinct scenarios validated the system's efficiency compared to unintervened traffic flows. In the first simulation, travel time was reduced from 90.6 to 70.05 seconds. The second simulation demonstrated that path-clearing Convoy Logic reduced completion time from 62.9 to 43.6 seconds. Even in complex mutual exclusion scenarios involving two priority vehicles, the system successfully managed right-of-way through ETA based leader election, reducing the yielding vehicle's travel time from 54.55 to 41.6 seconds. Consequently, transitioning to dynamic V2V-based management significantly enhances logistics efficiency and safety in industrial facilities by optimizing junction throughput and reducing stop-and-go costs.

Keywords: Autonomous Vehicles, Intersection Management, OMNeT++, SUMO, V2V Communication.

[1] Electronics and Communication Engineer, İzmir Institute of Technology, selimiscan@std.iyte.edu.tr , ORCID: 0009-0009-6443-1321
[2] Software Engineer, TOFAS, R&D İzmir Branch, cem.tolgamunyas@tofas.com.tr, ORCID: 0009-0002-9878-9566
[3] Software Engineer, TOFAS, R&D İzmir Branch, huseyin.canoncel@tofas.com.tr, ORCID: 0009-0006-9208-3430
[4] Software Engineer, TOFAS, R&D İzmir Branch, abdulkerim.cekinmez@tofas.com.tr, ORCID: 0009-0008-6345-7055
[5] Software Engineer, TOFAS, R&D İzmir Branch, sibel.demir56923@tofas.com.tr, ORCID: 0009-0005-8245-0607

INTRODUCTION

The rapid increase in vehicular density in both urban and industrial environments has necessitated a transition from traditional static traffic control to Intelligent Transportation Systems (ITS). Existing literature indicates that static mechanisms often fail to adapt to dynamic traffic conditions, leading to inefficiencies and safety concerns (Srivastava and Sudarshan, 2013: 1-6). In controlled environments such as factory sites, Autonomous Intersection Management (AIM) is critical for managing non-signalized intersections to optimize logistics operations. Previous studies suggest that priority-based systems can significantly increase traffic flow and decrease energy consumption compared to "First-Come-First-Served" (FCFS) policies (Hart et al., 2019: 451-462).

The primary objective of this project is to develop a traffic optimization algorithm based on V2V communication and to implement its simulation in a virtual environment. Specifically, the project aims to manage the flow of autonomous carrier vehicles within a factory setting to enhance operational efficiency. Validation of such systems relies on robust simulation tools like SUMO, which has been proven effective in testing complex priority schemes and congestion avoidance strategies (Sommer, 2025, paragraph 1). This study provides a theoretical and technical foundation for implementing dynamic priority management in industrial facilities.

METHODOLOGY

Simulation Framework and Co-simulation Environment

To evaluate the proposed algorithm, a high-fidelity co-simulation framework was established, integrating realistic vehicle mobility with complex network communication constraints. For this purpose, SUMO was selected as the microscopic traffic simulator, while OMNeT++ was utilized as the discrete-event network simulator. SUMO models individual vehicle movements, including acceleration, lane-changing, and car-following behaviors at a microscopic level. In contrast, OMNeT++ focuses on the communication layer, modeling wireless standards such as IEEE 802.11p and analyzing network parameters like latency, throughput, and packet loss. The integration between these two simulators is facilitated by the Veins framework, which acts as a bridge to ensure synchronized execution (Segata et al., 2014: 1-8). The synchronization is achieved through the TraCI (Traffic Control Interface) protocol, which connects Veins to SUMO via a TCP/IP socket.

Figure 13 - *OpenStreetMap, SUMO, and OMNeT++ environments.*

The synchronization of the simulators is achieved through the TraCI (Traffic Control Interface) protocol, which connects Veins to SUMO via a TCP/IP socket. As depicted in the

schematic structure in Figure 2, the simulation progresses in defined time steps, typically 0.1 second. During each step, OMNeT++ (via Veins) sends commands to SUMO to advance, retrieves updated vehicle positions and mobility data, and transfers this information to the respective node models within the network simulation . This bidirectional interaction allows communication events, such as congestion warnings, to influence vehicle behavior, while traffic dynamics simultaneously affect communication quality.

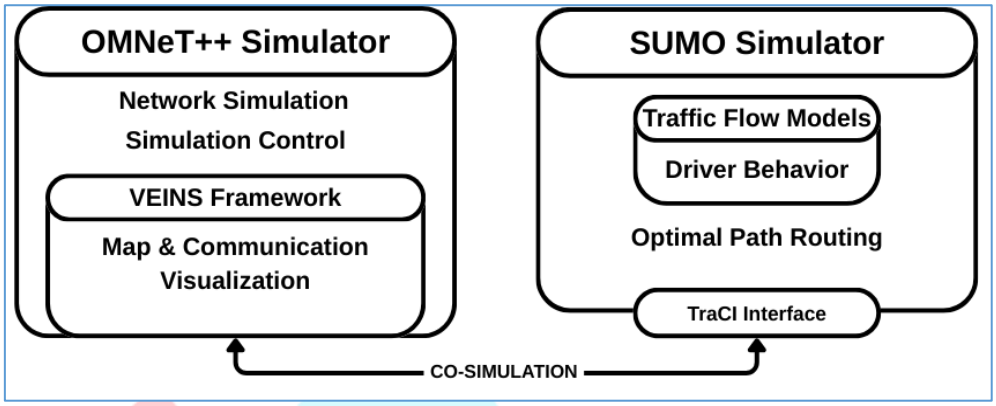


Figure 14 *- Schematic structure.*

To ensure environmental accuracy, OpenStreetMap data and the Vector Map Builder tool were employed. OpenStreetMap provides geographic information such as streets and junctions (Figure 1), while the Vector Map Builder allows for the creation of vector maps from point cloud data, incorporating critical road features like stop lines and traffic lights . Furthermore, the internal data transfer and OSI layer interactions were rigorously analyzed using packet transfer diagrams (Figure 3) and network interaction summaries (Table 1) to verify the reliability of the communication stack.

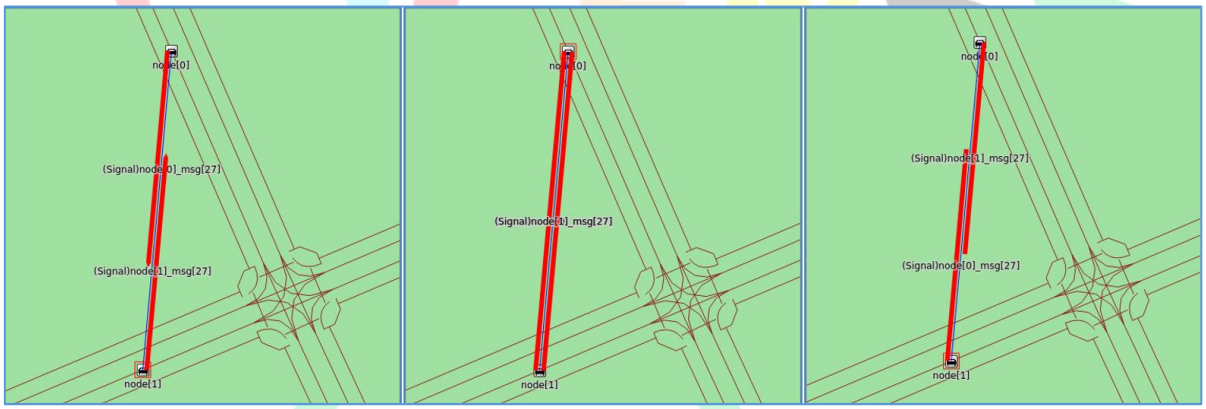


Figure 15 *- OMNeT++ network simulation example.*

Table 1 *- Summary of Network Layer Interactions for Packet 'node[0]_msg[27]'.*

** Event #928 t=11.05 Scenario.node[0].app[0] (VeinsInetSampleApplication, id=48) on selfmsg (veins::TimerMessage, id=35)
** Event #933 t=11.05 Scenario.node[0].ipv4.ip (Ipv4, id=92) on node[0]_msg[27] (inet::Packet, id=709)
** Event #939 t=11.05 Scenario.node[0].ipv4.ip (Ipv4, id=92) on node[0]_msg[27] (inet::Packet, id=711)
** Event #940 t=11.05 Scenario.node[0].wlan[0].mac (Ieee80211Mac, id=56) on node[0]_msg[27] (inet::Packet, id=709)
** Event #949 t=11.05 Scenario.node[0].wlan[0].mac.dcf.channelAccess.contention (Contention, id=78) on selfmsg channelGranted (omnetpp::cMessage, id=12)
** Event #950 t=11.05 Scenario.node[0].wlan[0].radio (Ieee80211DimensionalRadio, id=57) on configureRadioMode (inet::Request, id=715)
** Event #951 t=11.05 Scenario.node[0].wlan[0].radio (Ieee80211DimensionalRadio, id=57) on node[0]_msg[27] (inet::Packet, id=714)
** Event #954 t=11.05 Scenario.node[1].wlan[0].radio (Ieee80211DimensionalRadio, id=119) on node[1]_msg[27] (inet::Packet, id=722)
** Event #955 t=11.050000344524 Scenario.node[1].wlan[0].radio (Ieee80211DimensionalRadio, id=119) on node[0]_msg[27] (inet::physicallayer::Signal, id=718)
** Event #956 t=11.050000344524 Scenario.node[0].wlan[0].radio (Ieee80211DimensionalRadio, id=57) on node[1]_msg[27] (inet::physicallayer::Signal, id=726)

- **Application Trigger and Downward Traversal:** The process begins with Event #928, where the VeinsInetSampleApplication on node[0] triggers a self-message, leading to the creation of node[0]_msg[27]. The packet is then passed down to the UDP and IPv4 layers (Event #933), where it is encapsulated with relevant headers and routed to the wlan0 interface for wireless transmission.
- **MAC Layer Contention and Channel Access:** Before physical transmission, the IEEE 802.11 MAC layer manages channel access. In Event #940, the Distributed Coordination Function (DCF) starts the contention process. The log shows the scheduling of a backoff mechanism (3 slots) to prevent collisions, illustrating the CSMA/CA protocol implementation in OMNeT++.
- **Physical Layer Transmission and Radio State Management:** Once the channel is granted (Event #949), node[0] switches its radio mode from RECEIVER to TRANSMITTER (Event #950). The transmission of the signal (5.89 GHz, 12 Mbps) begins at and is scheduled to end at (Event #951).
- **Simultaneous Transmissions and Signal Interference:** Interestingly, Event #954 shows node[1] starting a simultaneous transmission. As a result, in Events #955 and #956, both nodes' radios report "Reception started: ignoring signal," which highlights how OMNeT++ models' interference and half-duplex radio constraints, where a node cannot receive a packet while it is currently transmitting.
- **Local Delivery and Loopback:** OMNeT++ also handles local stack processing. In Event #939, the IPv4 layer delivers the packet locally via the loopback interface (lo0), ensuring that the node's own internal components can process the transmitted information if necessary.

Algorithm Logic and Implementation

The proposed algorithm was implemented in C++ within the OMNeT++ environment, leveraging the Veins framework for Vehicle-to-Vehicle (V2V) communication and TraCI for mobility control. The core logic, encapsulated within the `VeinsInetSampleApplication` class, moves beyond simple distance-based checks by employing computational geometry and

distributed protocols. As illustrated in the algorithm flowchart (Figure 4), the implementation consists of four critical stages: V2V Beaconing, Geometric Conflict Detection, Distributed Leader Election, and Smart Yielding.

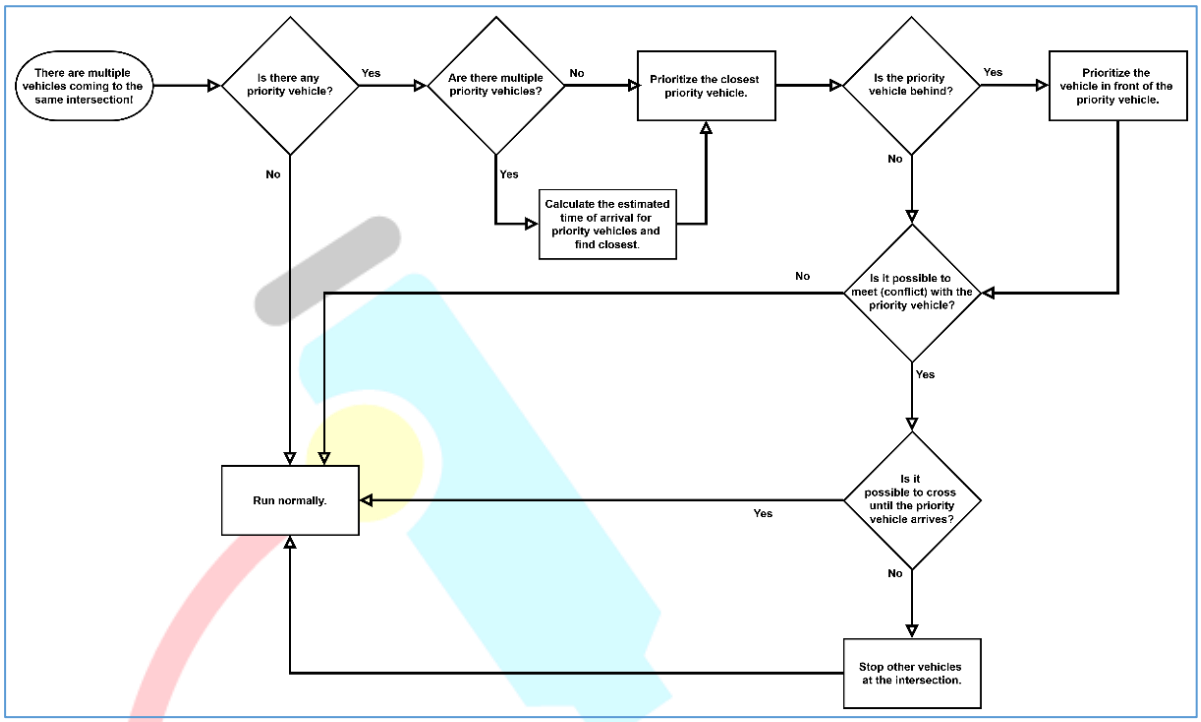


Figure 16 - Algorithm flowchart.

In the first stage, V2V Beaconing and Context Awareness, vehicles periodically broadcast "beacon" messages to surrounding nodes using the *VeinsInetSampleMessage* format. These packets contain critical telemetry data, including vehicle type (priority or standard), navigation data (current and target road IDs), kinematics (speed and distance to junction), and the precise coordinates of the targeted junction. Upon receiving these beacons, each vehicle maintains a local "Global Table" to dynamically track the state of nearby traffic.

The second stage involves Geometric Conflict Detection, which utilizes computational geometry to determine actual collision risks. By converting road segments into coordinate vectors, the system calculates whether the trajectories of the host and remote vehicles intersect. This approach, depicted in Figure 5, ensures that vehicles only yield when paths physically cross, significantly increasing traffic throughput compared to standard blocking methods.

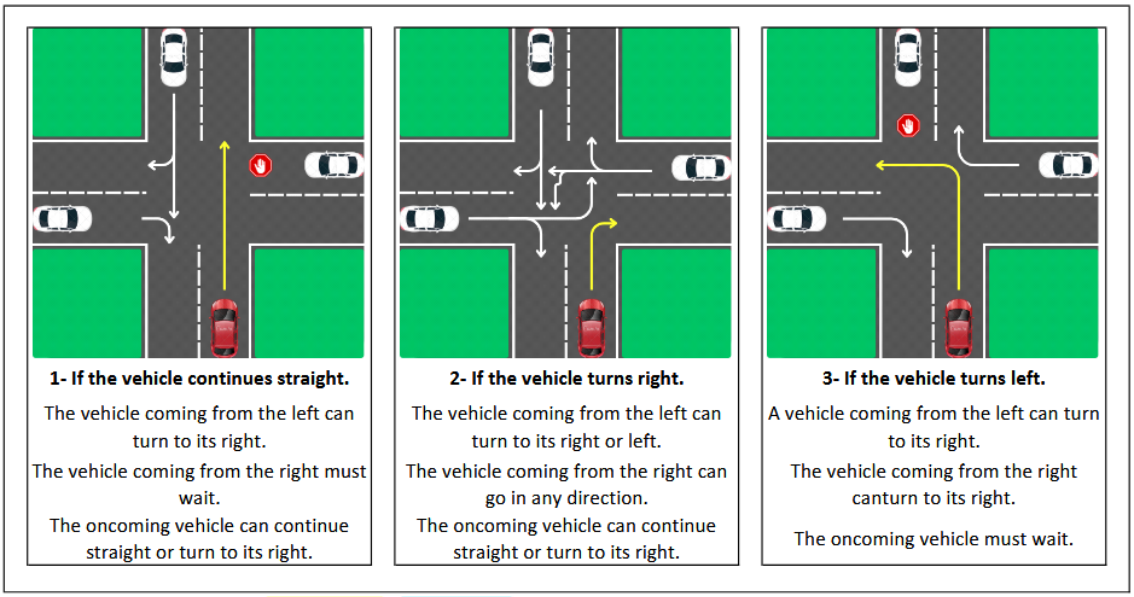


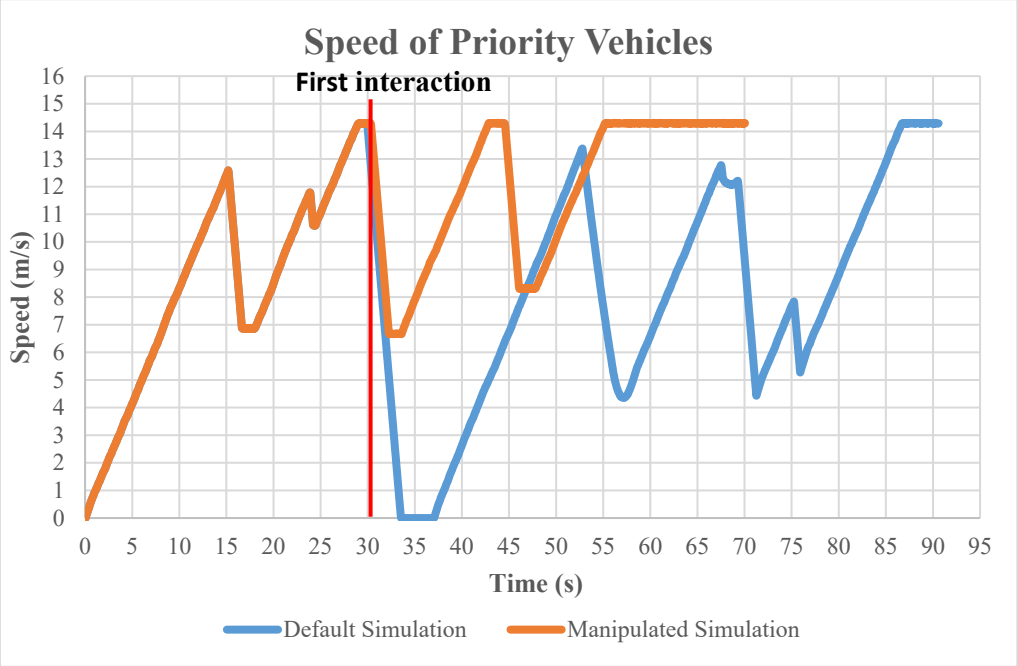
Figure 5 *- Possible turns of interacted vehicles.*

When multiple priority vehicles approach the same intersection, a Distributed Leader Election process is triggered to prevent deadlocks. The system assigns a "Global Junction Leader" based on a strict hierarchy: the vehicle with the lowest ETA is preferred, with speed and distance serving as tiebreakers. Finally, the Smart Yielding and Path Clearing module manages non-priority vehicles. If a conflict is detected, standard vehicles calculate a dynamic stopping margin based on their speed to prevent abrupt breaking. Crucially, if a normal vehicle is directly in front of a priority vehicle on the same lane, the algorithm overrides the stop command, allowing it to clear the lane for the emergency vehicle.

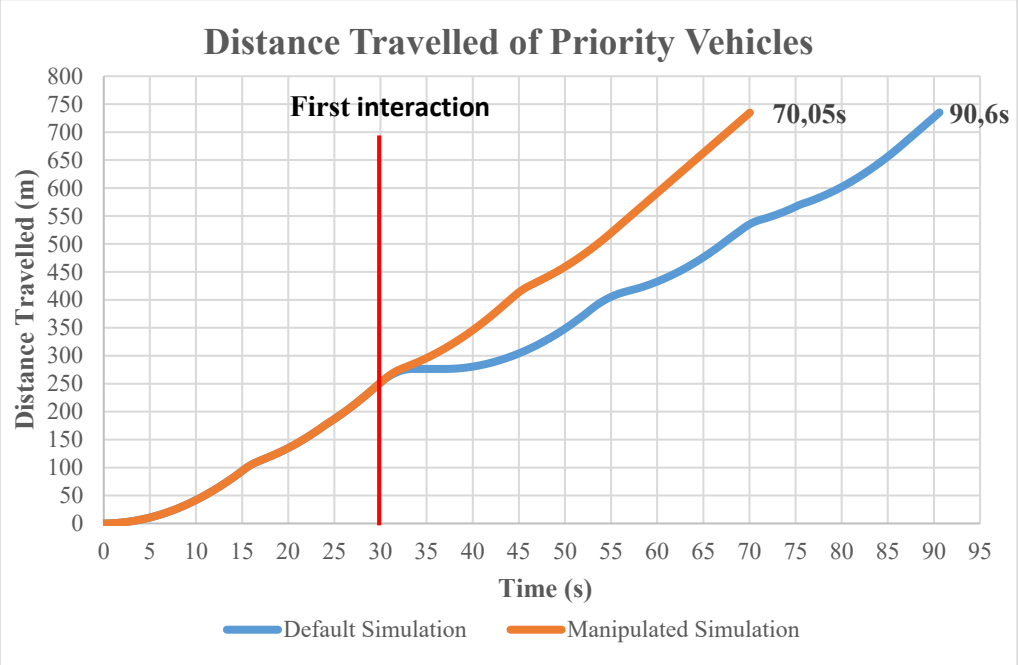
FINDINGS

The performance of the proposed V2V-based priority management system was evaluated through three distinct simulation scenarios, comparing the manipulated algorithm against a default baseline.

In Simulation 1, a prioritized vehicle traveled across a designated map area. As shown in Graph 1 and Graph 2, the default simulation forced the vehicle to yield at various intersections, resulting in a total travel time of 90.6 seconds. In contrast, the manipulated scenario leveraging the priority algorithm allowed the vehicle to reach its destination in 70.05 seconds, achieving significant time savings by eliminating unnecessary stops.

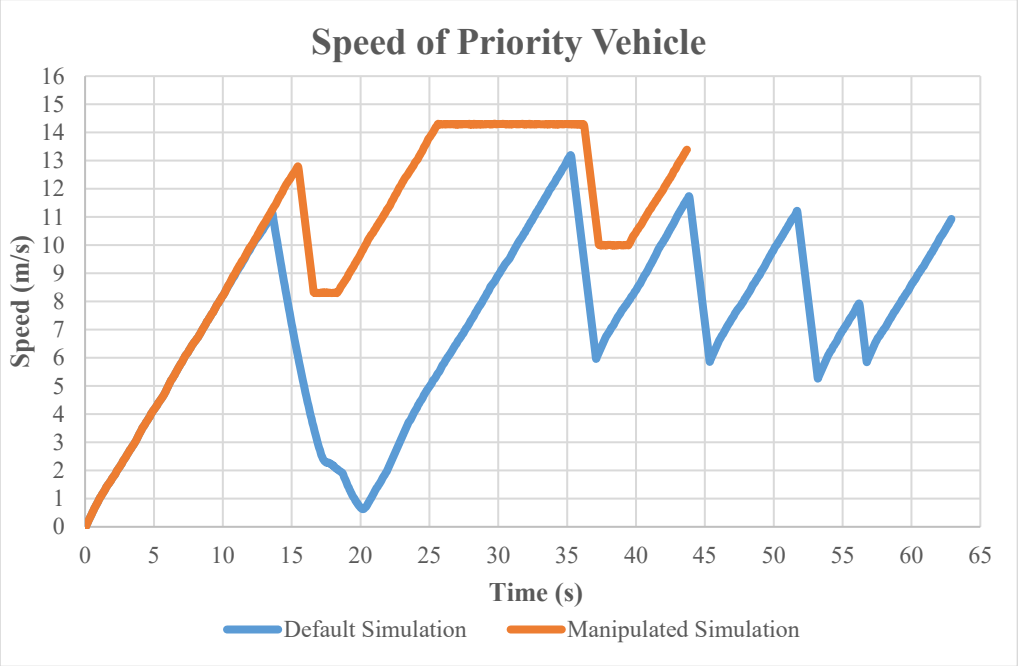


Graph 1 *- Speed by time graph of priority vehicle for simulation 1.*

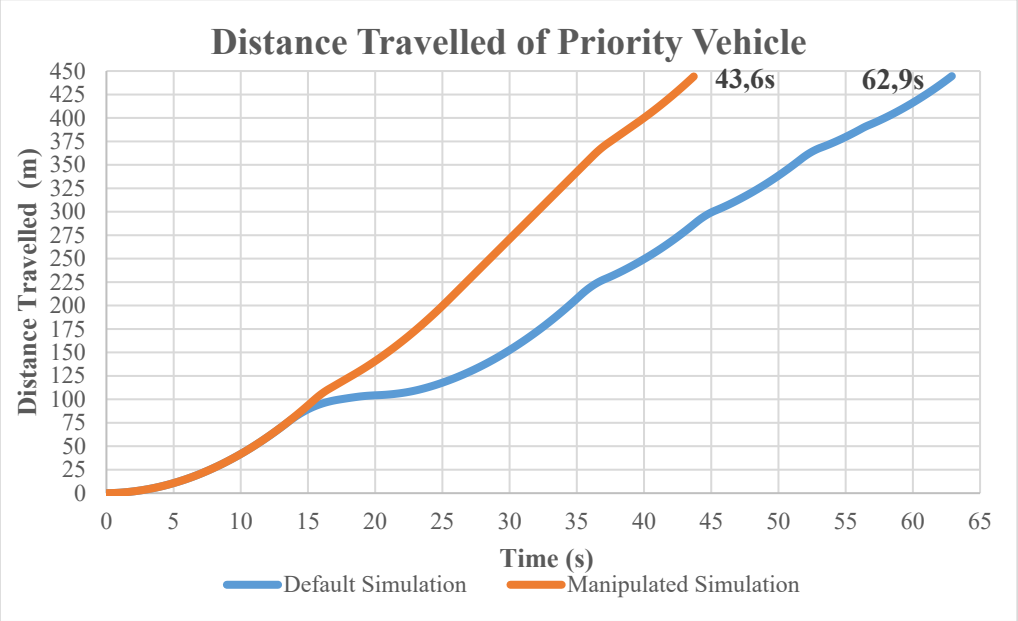


Graph 2 - *Distance travelled by time graph of priority vehicle for simulation 1.*

In the second scenario, Simulation 2, a prioritized vehicle was positioned behind a non-priority vehicle to test path-clearing capabilities. In the unintervened default case, the priority vehicle was obstructed by the slower leading vehicle, completing the route in 62.9 seconds. However, the application of Convoy Logic triggered the leading vehicle to clear the lane, allowing the priority vehicle to finish the same route in 43.6 seconds. These results, visualized in Graph 3 and Graph 4, confirm the algorithm's effectiveness in managing interactions between different vehicle classes.

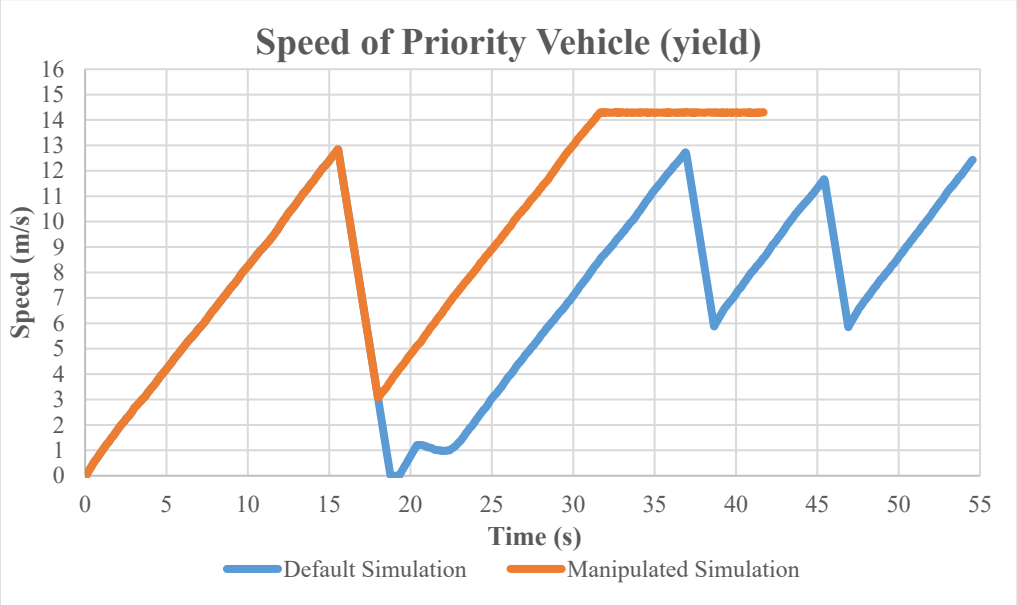


Graph 3 *- Speed by time graph of priority vehicle for simulation 2.*

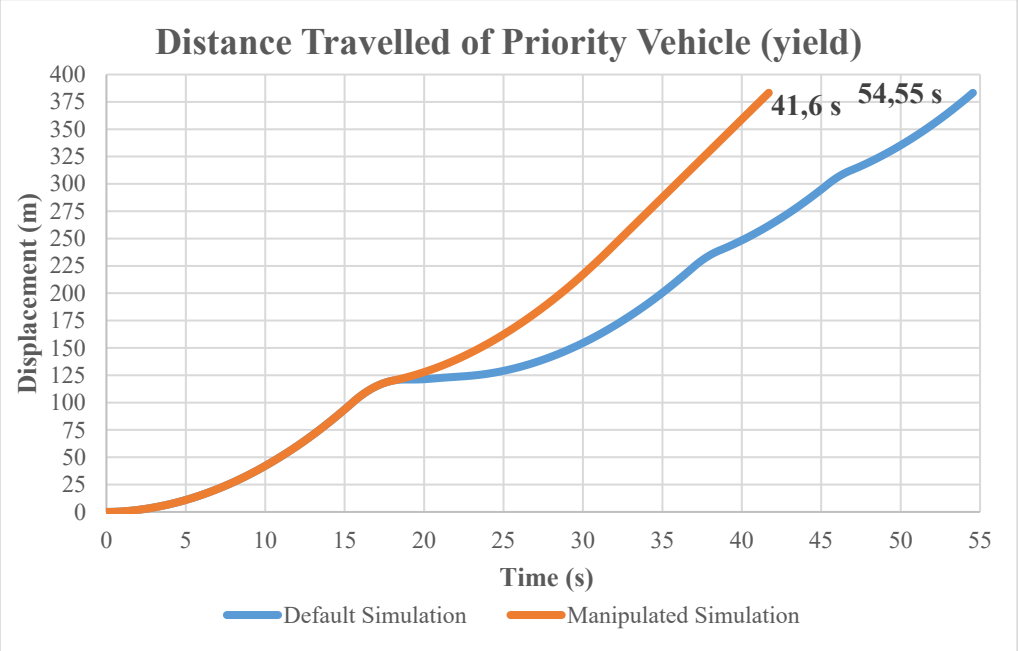


Graph 4 *- Distance Traveled by time graph of priority vehicle for simulation 2.*

Simulation 3 addressed the mutual exclusion of two prioritized vehicles arriving at the same intersection simultaneously. Based on the leader election logic, the vehicle with the earlier ETA was granted passage. For the passing vehicle, travel time was reduced from 33.9 seconds to 27.65 seconds (Graph 7 and Graph 8) . Notably, the yielding priority vehicle also benefited from the system; despite yielding, its total travel time dropped from 54.55 seconds to 41.6 seconds compared to the default scenario (Graph 5 and Graph 6), likely due to improved overall junction efficiency.



***Graph 5** - Speed by time graph of priority vehicle (yield) for simulation 3.*



***Graph 6** - Distance Traveled by time graph of priority vehicle (yield) simulation 3.*

DISCUSSION AND CONCLUSION

The results of this study demonstrate that transitioning from static traffic control to a dynamic, V2V-based priority management system significantly enhances logistics efficiency in industrial facilities. By utilizing a high-fidelity co-simulation framework (SUMO, OMNeT++, and Veins), the project accounted for both realistic vehicle mobility and network communication constraints. The implementation of geometric conflict detection proved to be a key differentiator, as it ensured that vehicles only yielded when a physical path intersection was imminent, thereby maximizing throughput compared to traditional distance-based blocking.

The implemented algorithm introduced several advanced logic modules, including geometric conflict detection and distributed leader election. Unlike traditional static systems,

the use of computational geometry to analyze vehicle trajectories ensured that vehicles only yielded when a physical path intersection was imminent, thereby maximizing traffic throughput. Furthermore, the priority arbitration logic, based on ETA and speed tiebreakers, effectively prevented deadlocks at unsignalized intersections when multiple priority vehicles were present.

Experimental results across multiple simulation scenarios validated the efficiency of the proposed system. In every case, the manipulated scenarios involving the priority management algorithm demonstrated significant time savings compared to baseline, unintervened traffic flows. Even in complex scenarios where two priority vehicles interacted, the system successfully managed the right-of-way while still reducing the total travel time for the yielding vehicle. Additionally, the "Smart Yielding" and "Convoy Logic" ensured that normal traffic cleared paths for emergency or high-priority vehicles without causing rear-end collisions or unnecessary stops.

In conclusion, the project demonstrates that transitioning from static traffic control to a dynamic, V2V-based priority system can substantially enhance logistics efficiency and safety in industrial facilities. The findings provide a robust theoretical and technical foundation for future implementations of AIM within production operations.

REFERENCES

Hart, F., Saraoglu, M., Morozov, A. and Janschek, K. (2019). *Fail-safe priority-based approach for autonomous intersection management*. Safety Science, 117, 451-462. doi: 10.1016/j.ssci.2019.04.020

Segata, M., Joerer, S., Bloessl, B., Sommer, C., Dressler, F. and Lo Cigno, R. (2014). *Plexe: a platooning extension for veins*. 6th IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), 1-8.

Sommer, C. (2025). *Veins: the open-source vehicular network simulation framework*. Retrieved from https://veins.car2x.org/documentation/, on 21 March 2026.

Srivastava, J. R. and Sudarshan, T. S. B. (2013). *Intelligent traffic management with wireless sensor networks*. Proceedings of the 2013 IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA), 1-6. doi: 10.1109/AICCSA.2013.6616429

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

RF Conducted Testing in LTE and 5G Systems: Design Verification, Measurement Methodologies, and Comparative Analysis

Özge ÖZDAMAR[1]

Abstract

Working with RF systems has gotten a lot complicated since the shift from LTE to 5G New Radio (NR). There's more going on now: wider bandwidths, higher frequencies, new ways of modulating signals, and more antennas in designs. All these factors make designing a system more complicated. Because of this, RF systems have to meet much stricter standards for things like linearity, spectral purity, and keeping the signal clean. That's why it's important to have advanced ways to check and validate everything. For this project, RF conducted testing is the method focused on. It's a straightforward, hands-on way to make sure designs work as intended and to see how well they perform, both in LTE and 5G setups. It is necessary to have a clear method to check key RF details—like how much power is coming out, how much the signal strays from where it should be (EVM), how much it leaks into neighboring channels (ACLR), and whether the frequency is spot-on. It is also necessary to stuck to the guidelines set by the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) to keep things consistent. As a result, Conducted testing is very reliable and helps spot RF problems quickly. Compared to over-the-air (OTA) testing, it's better for checking single parts, while OTA is still key for seeing how the whole system behaves.

Keywords:RF, conducted testing, ACLR, EVM, cable connection

[1] Electric&Electronics Engineer, R&D Engineer, Samsung Electronics Türkiye, 0009-0006-8341-8622

1. Introduction

Moving from LTE to 5G marks a real change in how RF engineering is done. LTE work largely centered on squeezing more efficiency out of sub-6 GHz spectrum. With 5G, the stack gets heavier, mmWave operation enters the picture, massive MIMO becomes central, and beamforming is no longer a side feature but something the system is constantly adjusting in real time (3GPP, 2024; Goldsmith, 2005). Those shifts don't just add features, they make design verification harder. This study focuses on the details of RF conducted testing, meaning the instruments connect straight to the device under test (DUT) through cabled links.

Within that setup, it looks at the verification metrics that matter, the measurement approaches typically relied on, and how the overall test plan changes when you move from an LTE target to a 5G NR target. Both LTE and 5G NR place tight demands on transmitter and receiver performance. On the transmit side, you still have to meet signal quality and spectrum rules while keeping power use under control. On the receive side, the job is to pick out and decode the intended signal even when the signal-to-noise ratio (SNR) is low. Conducted RF testing helps because it strips away a lot of uncontrolled variables, letting Tx and Rx be assessed on their own, which is why it remains a core tool for design verification, calibration work, and tracking down faults

Conducted test setup includes below items:

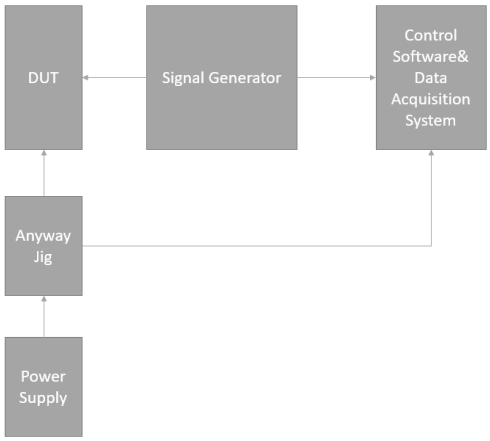


Figure 17

2.Measurement Methodologies

2.1 Transmitter (Tx) Measurement Methodologies

Transmitter testing focuses on signal generation quality and spectral integrity.

2.1.1 Output Power

The RF signal power transmitted by the device, typically expressed in dBm.

Low power means reduced coverage and link reliability

High power means interference and regulatory violations(Pozar, 2021)

2.1.2 Error Vector Magnitude (EVM)

EVM measures the deviation between the ideal constellation points and the actual transmitted signal(Keysight Technologies, 2022).

Physical meaning is that the scatter of constellation points in the IQ plane.

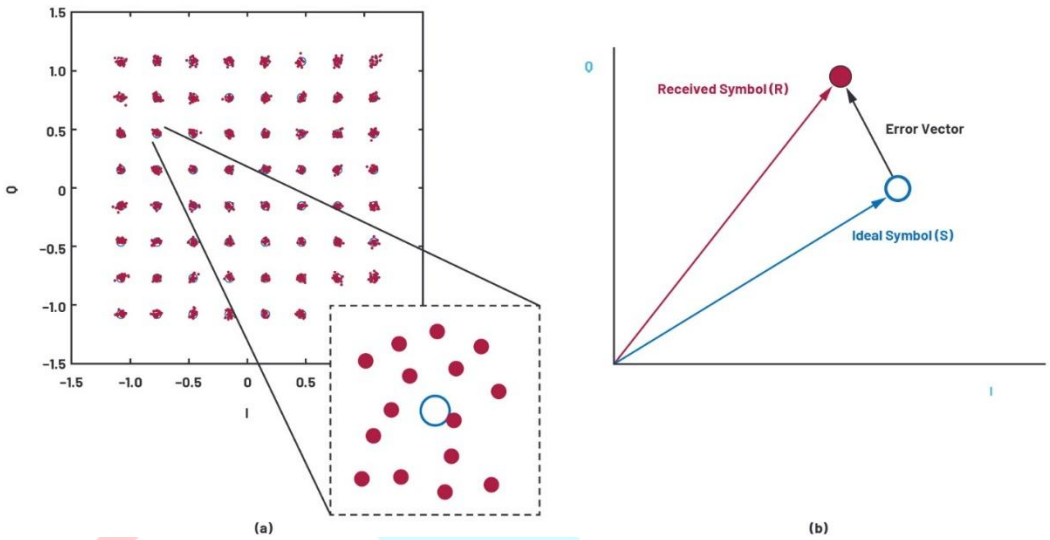


Figure 18. EVM Schematics

Source: Erkan Acar, 2023

Typical limits:

- QPSK: < 17.5%
- 16QAM: < 12.5%
- 64QAM: < 8%
- 256QAM: < ~3.5%

2.1.3 Adjacent Channel Leakage Ratio (ACLR)

ACLR quantifies the leakage of transmitted power into adjacent frequency channels(3GPP, 2024; Rohde&Schwarz, 2021).

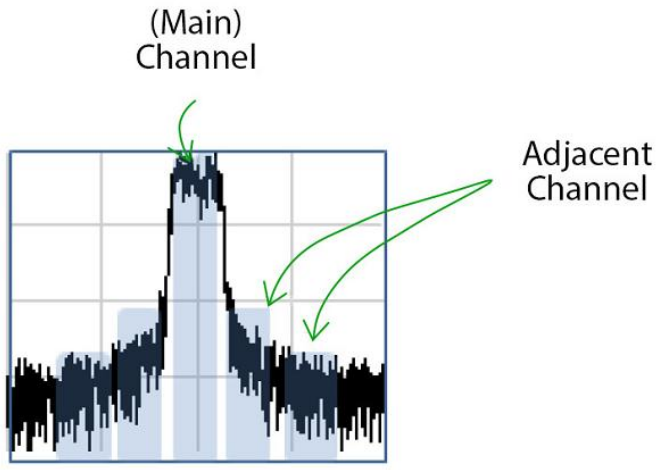


Figure 19 ACLR Schematics ACLR Schematics

Source: EverythingRF, 2023

2.1.4 Frequency Error

Deviation of the transmitted carrier frequency from its nominal value (Proakis& Salehi, 2019).

2.2 Receiver (Rx) Measurement Methodologies

Receiver testing focuses on signal detection under weak or noisy conditions.

2.2.1 Sensitivity

The minimum signal level at which the receiver can correctly decode data (Goldsmith, 2005).

2.2.2 Block Error Rate (BLER)

The percentage of received data blocks that are incorrectly decoded (3GPP, 2024).

2.2.3 Throughput

Actual data rate achieved by the system.

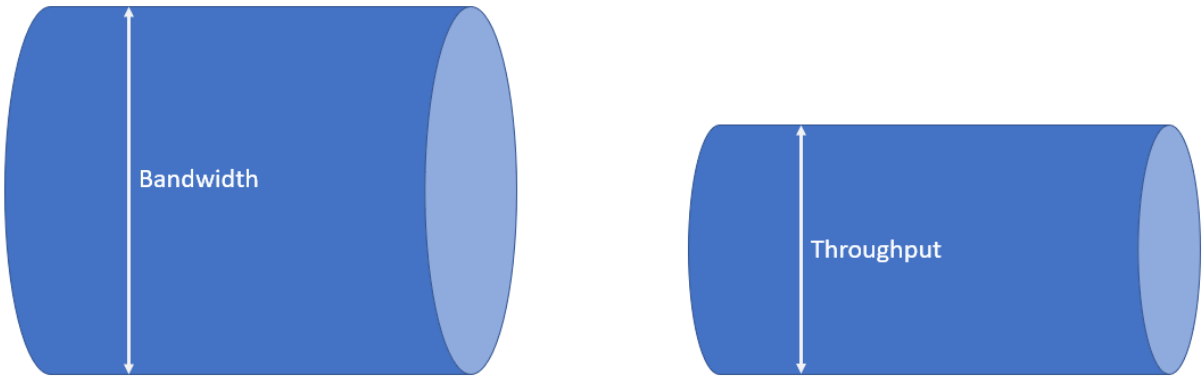


Figure 20

2.3 Tx vs Rx Behavioral Differences

Table: 1 TX and RX impact comparison on different issues

Issue	Tx Impact	Rx Impact
High EVM	Poor signal quality	Appears as low SNR
Poor ACLR	Causes interference	Increased noise/interference
Low power	Weak uplink	Hard to detect signal
Poor sensitivity	No impact	Weak downlink reception
Frequency error	Synchronization issues	Demodulation difficulty

3. Conducted Testing vs OTA Testing During Design Verification

In LTE and 5G RF development, design verification sits near the top of the priority list. It is the checkpoint where transmitter (Tx) and receiver (Rx) paths have to prove they meet performance targets, regulatory limits, and reliability expectations, all before a product ever moves into volume production. RF validation in that window usually splits into two paired methods: conducted testing and over-the-air (OTA) testing.With conducted testing, engineers

tap straight into the RF chain through a guided connection, typically a coaxial transmission path.

Taking the antenna and the surrounding environment out of the equation keeps the setup tightly controlled and easy to repeat. That is why conducted work is so useful for confirming component-level RF behavior, from power amplifier (PA) linearity and modulation quality to oscillator stability, filter response, and receiver sensitivity.OTA testing works from the opposite direction. Instead of isolating the chain, it checks the full wireless system in conditions that look like real operation. Because the signal travels through free space, the results naturally reflect antenna radiation properties, beamforming behavior, multipath, and whatever interference the environment contributes. For that reason, OTA testing becomes the key tool for judging how the link actually performs in the field.Across design verification, conducted testing usually leads during early and mid development since it supports fast debugging and clean fault isolation. High EVM seen in a conducted setup, for instance, can point straight to IQ imbalance, phase noise, or PA compression. Weak ACLR can tell a similar story, hinting at spectral regrowth tied to amplifier nonlinearities. With the RF chain separated from antennas and propagation effects, tracking down what is causing the drop in performance is typically much more direct.

Table 2: Conducted test and OTA test parameter comparison table

Parameter	Conducted Testing	OTA Testing
EVM	Direct measurement	Measured through radiated signal
ACLR	Direct spectral measurement	Possible, but affected by antenna/channel
Output Power	Conducted power (dBm)	Often measured as radiated power (TRP/EIRP)
Frequency Error	Direct carrier analysis	Can be evaluated radiatively
Sensitivity	Direct Rx measurement	Evaluated under radiated conditions
BLER	Yes	Yes
Throughput	Yes	Yes
TRP	Not applicable	Primary OTA metric
TIS	Not applicable	Primary OTA metric

OTA testing becomes increasingly important in later verification stages, especially for validating antenna integration, beam management, and end-to-end wireless performance. However, OTA measurements generally exhibit lower repeatability due to environmental variables such as reflections, chamber conditions, and device orientation(Rohde&Schwarz, 2021; IEEE, 2021).

Table 3: A comparison between conducted and OTA testing during design verification is summarized

Parameter	Conducted Testing	OTA Testing
Measurement Environment	Controlled	Real-world / radiated
RF Chain Isolation	Excellent	Limited
Repeatability	High	Moderate
Antenna Evaluation	Not included	Included
Debugging Capability	High	Moderate
Design Optimization	Highly effective	Limited
Environmental Influence	Minimal	Significant
Production Testing Suitability	High	Low
System-Level Validation	Partial	Comprehensive

4. Conclusion

RF conducted testing sits at the center of how LTE and 5G RF systems get checked and tuned, mainly because it delivers measurements that are accurate, repeatable, and tightly controlled for both transmitter (Tx) and receiver (Rx) behavior. With a conducted setup, engineers can measure output power, Error Vector Magnitude (EVM), Adjacent Channel Leakage Ratio (ACLR), frequency error, sensitivity, and BLER with a level of precision that makes it easier to separate true RF problems from everything else, then tighten the design around those findings.The study shows this approach matters most in design verification, when the work is less about broad system proof and more about component-level debugging, calibration, and performance adjustments. Once the antenna and the surrounding environment are taken out of the equation, the RF chain can be examined on its own terms, so the source of signal degradation is easier to pinpoint and the results are far more consistent from run to run.None of that makes over-the-air (OTA) testing optional. OTA is necessary when the goal is to judge antenna effects, beamforming behavior, and how the device performs in a wireless setting that looks like the real world. Still, conducted testing should not be treated as a lesser step that only comes before “the real” validation. The two methods cover different parts of the problem and, in practice, they carry equal weight in modern RF verification: conducted testing confirms the inherent health of the RF chain, while OTA testing checks end-to-end behavior under realistic propagation conditions.

For LTE and 5G to be validated properly, both conducted and OTA testing need to be used together. When they are combined, teams can verify RF design more reliably, raise overall performance, cut development time, and meet industry expectations, including the requirements set by the 3rd Generation Partnership Project (IEEE, 2021; 3GPP, 2024).

5.References

Goldsmith, 2005, Wireless communications. Cambridge University Press

Keysight Technologies. (2022). Fundamentals of RF and microwave signal measurements. Keysight Technologies.

Pozar, D. M. (2021). Microwave engineering (5th ed.). John Wiley & Sons.

Proakis, J. G., & Salehi, M. (2019). Digital communications (6th ed.). McGraw-Hill Education.

Rohde & Schwarz. (2021). 5G New Radio measurement techniques. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG.

3rd Generation Partnership Project. (2024). TS 36.521-1: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception (Release 18). 3GPP.

3rd Generation Partnership Project. (2024). TS 38.521-1: NR; User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 1: Range 1 standalone (Release 18). 3GPP.

3rd Generation Partnership Project. (2024). TS 38.141 Series: NR; Base Station (BS) conformance testing. 3GPP.

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2021). IEEE standard methodologies for wireless communication system performance evaluation. IEEE.

Acar E. 2021, How Error Vector Magnitude (EVM) Measurement Improves Your System-Level Performance, Analog Devices

EverythingRF 2023, www.everythingrf.com/community/what-is-acpr-or-aclr

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

HPLC-Based Evaluation of Phenolic Constituents in *Leucojum aestivum* L. Leaves Across Different Localities and Developmental Stages

Arzu Birinci YILDIRIM [1]
Arzu Uçar TÜRKER [2]
Sina Cafer DEMİR [3]

Abstract

Leucojum aestivum L. is an important geophyte of the Amaryllidaceae family. While research on this species primarily emphasizes alkaloids like galanthamine and lycorine, its phenolic composition remains underexplored. This study investigated the phenolic profiles of *L. aestivum* leaf extracts from six localities in Türkiye (Bolu-Gölcük, Bolu-Yeniçağa, Sakarya-Kaynarca, Yalova-Delmece, Bursa-Uluabat, and İstanbul-Terkos) across three phenological stages (pre-flowering, flowering, and post-flowering) using HPLC. Chlorogenic acid, rutin hydrate, quercetin, and apigenin were successfully identified and quantified. Rutin hydrate emerged as the major compound, peaking in the Sakarya and İstanbul populations during and after flowering. Conversely, chlorogenic acid accumulation was highest during vegetative stages, particularly in Sakarya, Gölcük, and Yeniçağa. Quercetin and apigenin were found in lower but variable concentrations. Overall, geographical origin and phenological stage significantly influence phenolic accumulation, providing crucial data for selecting optimal harvest periods and populations for phenolic-rich plant material.

Keywords: *Leucojum aestivum*, Rutin hydrate, Chlorogenic acid, HPLC, Phenolic compounds

[1] Unvan, Üniversite, Bölüm, Orcıd: Assoc. Prof Dr., Bolu Abant Izzet Baysal University, Faculty of Agricultural and Environmental Science, Department of Field Crops, Bolu, Türkiye, 0000-0001-7712-2813.
[2] Unvan, Üniversite, Bölüm, Orcıd: Dr., Bolu Abant Izzet Baysal University, Faculty of Science and Art, Department of Biology, Bolu, Türkiye, 0000-0001-9357-3673.
[3] Unvan, Üniversite, Bölüm, Orcıd: Prof Dr., Bolu Abant Izzet Baysal University, Faculty of Science and Art, Department of Biology, Bolu, Türkiye, 0000-0001-9617-6673.

INTRODUCTION

Leucojum aestivum L., the only naturally distributed species of the genus Leucojum in Türkiye, belongs to the Amaryllidaceae family. The species naturally grows in humid and semi-shaded habitats such as swamps, wetlands, and floodplains, ranging from sea level to higher altitudes (Mill, 1984). Besides its ornamental importance, *L. aestivum* is also considered a valuable medicinal plant due to its rich phytochemical composition. Previous studies on the species have mainly focused on Amaryllidaceae alkaloids such as galanthamine and lycorine because of their important pharmacological activities, including acetylcholinesterase inhibitory, antiviral, anti-inflammatory, and neuroprotective effects (Arslan et al., 2020: 2671; Demir et al., 2022: 714). However, compared with alkaloids, limited information is available regarding the phenolic composition of *L. aestivum*, particularly in relation to geographical origin and developmental stage. Phenolic compounds, including phenolic acids and flavonoids, are important secondary metabolites involved in plant defense, antioxidant protection, and adaptation to environmental stress conditions (Panche et al., 2016: 2 ; Clifford et al., 2017: 1414). The accumulation of these compounds is strongly influenced by environmental factors such as temperature, light intensity, nutrient availability, and phenological stage (Bohnert et al., 1995: 1104; Selmar and Kleinwächter, 2013: 821; Yang et al., 2018: 762).

Therefore, to comprehensively understand the phytochemical diversity of *L. aestivum*, this study aimed to systematically analyze and quantify the phenolic composition of the plant across different phenological stages (before flowering, flowering, and after flowering), utilizing High-Performance Liquid Chromatography (HPLC)

METHOD

Collection of *L. aestivum*

The bulbs and leaves of *L. aestivum* were collected from six distinct locations in Türkiye: Gölcük (Bolu), Yeniçağa (Bolu), Kaynarca (Sakarya), Delmece (Yalova), Uluabat (Bursa), and Terkos (İstanbul). Detailed geographical properties, coordinates, and soil characteristics of the sampling sites are summarized in **Table 1**, as previously characterized by Demir et al. (2022: 714).

Sampling commenced in March, and plants were harvested throughout their growing seasons. At each locality, ten individual plants were harvested at three phenological stages: before flowering (vegetative period), during full flowering (reproductive period), and after flowering (post-flowering period). Due to extended vegetation cycles, collection for the two locations in Bolu (Gölcük and Yeniçağa) continued through the senescence period until October. Botanical identification of the species was performed according to the "Flora of Turkey and the East Aegean Islands" (Mill, 1984), and voucher specimens were deposited in the Herbarium of Bolu Abant Izzet Baysal University.

Table 1. *Geographical properties and sampling coordinates of the collected L. aestivum populations.*

Locations	Habitat	Altitude	Phytogeographic regions	Annual average temperatures (°C)
Kaynarca-Sakarya	Flood plain forest	50 m	Euro-Siberian	14.56
Delmece-Yalova	Upland (wet meadows)	730 m	Transition from Euro-Siberian to the Mediterranean	15.55
Uluabat-Bursa	Lakeside (wet meadows)	8 m	Mediterranean	16.10
Terkos-İstanbul	Open field	25 m	Euro-Siberian	15.57
Gölcük-Bolu	Forest (streamside)	1126 m	Euro-Siberian	7.63
Yeniçağa-Bolu	Open field	1005 m	Transition from Euro-Siberian to Irano-Turanian	10.32

Extract Preparation

Bulbs and leaves of L. aestivum collected from all localities were freeze-dried (Christ®) at - 65 °C and then grounded into fine powder prior to the extraction. Extractions were carried out in water bath for 18 h by using methanol and then methanol was concentrated using rotary evaporator at 50 °C to obtain the crude extract. All crude extracts were stored at 4 °C and protected from light until analysis. Prior to HPLC injection, the samples were filtered through a 0.2 µm syringe-driven filter unit. Extract yields were calculated with the formula: Yield (%) = Weight of extract (g) / powdered plant material (g) × 100

HPLC-DAD Analysis

The methanolic extracts were analyzed for their phenolic acid and flavonoid profiles using a VWR-Hitachi LaChrom Elite® chromatographic system equipped with a photodiode array detector (PDA). Chlorogenic acid (as a phenolic acid), along with rutin hydrate, quercetin, and apigenin (as flavonoids), were utilized as reference standards for the quantitative determination of these compounds in *L. aestivum* extracts. All standards and methanol extracts were dissolved in HPLC grade methanol and different concentrations (6.25, 12.5, 25, 50, 100 and 200 mg/L) of standards were prepared. The separation was performed using Venusil XBP C18 reverse-phase chromatography column (250 mm length, 4.6 mm width and particle size 5 µm) in the gradient mode, using 0.1% orthophosphoric acid in water (A) and 0.1% orthophosphoric acid in methanol (B). Elution was used with 60% A at 0 min and adjusted to 50%, 40%, 40% and 60% at 10, 15, 25 and 25.1 min, respectively. The injection volume for all samples was 10 µL with 1 mL/min flow rate and 25 ºC oven temperature. The identification of

the peaks on chromatograms was achieved by comparing their retention times and spectra data were obtained from 190 to 400 nm during the entire run. The chromatograms were recorded at 325 nm for chlorogenic acid, 256 nm for rutin hydrate, 370 nm for quercetin and 338 nm for apigenin standards. HPLC analysis was carried out in triplicate for each extract. The chromatogram of the used standards was presented in Figure 1.

Statistical Analysis

Data analysis was performed using analysis of variance (ANOVA) and Duncan's multiple range tests using SPSS version 26 (IBM Corp, NY, USA). All data in the tables were presented as a mean number ± standard error (SE).

RESULTS

The phenolic composition of *L aestivum* extracts varied considerably depending on both geographical origin and phenological stage (Table 2). Extraction yields ranged from 12% to 37%, with the highest yield recorded in Bursa March samples collected during the vegetative stage (37%), while the lowest yield was detected in Yalova March samples (12%). In general, vegetative-stage samples exhibited higher extraction yields than flowering and post-flowering samples.

Among the analyzed compounds, rutin hydrate emerged as the predominant phenolic constituent across the majority of the extracts. The accumulation of rutin peaked significantly during the post-flowering period, with the highest concentration recorded in the Sakarya population in May (4.17 mg/g dry extract), followed closely by the İstanbul populations in May (4.03 mg/g) and April (2.65 mg/g). Conversely, the Bursa and Gölcük populations generally showed lower rutin accumulation. In contrast to rutin, chlorogenic acid was primarily restricted to the vegetative period. Its maximum accumulation was observed during the early growth stages, specifically in the March samples from Sakarya (1.06 mg/g) and Gölcük (1.03 mg/g), as well as the April samples from Yeniçağa (0.90 mg/g). Notably, chlorogenic acid dropped below detectable limits in almost all samples during the flowering and post-flowering stages.

The remaining flavonoids such as quercetin and apigenin were detected at relatively low concentrations. The highest quercetin level was found in the Yeniçağa April samples (0.03 mg/g), whereas apigenin reached its maximum in the Sakarya March samples (0.19 mg/g). Furthermore, apigenin was entirely absent in several samples, particularly within the Yalova and Bursa populations.

Table 2 *Determination of individual phenols with HPLC-DAD analysis in methanol extract of L. aestivum leaves. RT: retention times. Different letters in each column show significant differences (*P < *0.05).*

Locations of *L. aestivum* extracts	Extraction Yield (%)	Phenolics in Plant Extracts (mg/g dry extract)			
		Chlorogenic	Rutin hydrate	Quercetin	Apigenin
Sakarya March^{BF}	27.5	1.06 ± 0.01 ^{a}	1.69 ± 0.01 ^{d}	-	0.19 ± 0.01 ^{a}
Sakarya April^{F}	27.3	0.27 ± 0.00 ^{e}	1.35 ± 0.00 ^{g}	0.01 ± 0.00 ^{c}	0.01 ± 0.00 ^{cd}
Sakarya May^{AF}	18	-	4.17 ± 0.02 ^{a}	0.01 ± 0.00 ^{c}	0.04 ± 0.00 ^{b}
Yalova March^{BF}	12	-	0.07 ± 0.01 ^{r}	-	-
Yalova April^{F}	17	-	1.21 ± 0.00 ^{h}	0.01 ± 0.00 ^{c}	-
Yalova May^{AF}	24	-	0.82 ± 0.00 ^{j}	-	-
Bursa March^{BF}	37	0.50 ± 0.00 ^{d}	0.77 ± 0.00 ^{k}	-	-
Bursa April^{F}	35.5	-	0.63 ± 0.00 ^{m}	-	-
Bursa May^{AF}	29.3	-	1.54 ± 0.00 ^{f}	-	-
İstanbul March^{BF}	18.6	-	2.63 ± 0.01 ^{c}	0.02 ± 0.00 ^{b}	0.01 ± 0.00 ^{cd}
İstanbul April^{F}	26	-	2.65 ± 0.03 ^{c}	0.01 ± 0.00 ^{c}	-
İstanbul May^{AF}	24.5	-	4.03 ± 0.01 ^{b}	0.01 ± 0.00 ^{c}	0.01 ± 0.00 ^{cd}
Gölcük March^{BF}	23	1.03 ± 0.00 ^{b}	0.42 ± 0.00 ^{p}	-	-
Gölcük May^{F}	27	-	0.69 ± 0.00 ^{l}	-	-
Gölcük June^{AF}	19	-	0.54 ± 0.00 ^{n}	-	-
Yeniçağa April^{BF}	24	0.90 ± 0.01 ^{c}	1.63 ± 0.01 ^{e}	0.03 ± 0.00 ^{a}	0.02 ± 0.00 ^{c}
Yeniçağa May^{F}	22.5	-	0.86 ± 0.00 ^{i}	-	-
Yeniçağa June^{AF}	29	-	0.51 ± 0.00 ^{o}	-	-
RT (min)		3,51	7,65	14,33	14,92

Overall, these findings demonstrate substantial variations in phenolic accumulation across different populations and developmental stages. While vegetative-stage samples were generally characterized by higher levels of chlorogenic acid and apigenin, rutin hydrate accumulation markedly increased during the flowering and post-flowering periods.

DISCUSSION

The present findings indicate that the phenolic profile of *L. aestivum* is strongly influenced by both environmental conditions and plant developmental stage. Similar variations in secondary metabolite accumulation have been widely reported in medicinal plants, where phenological stage, climatic conditions, and geographical origin significantly affect phenolic biosynthesis (Yang et al., 2018).

Rutin hydrate was the dominant phenolic compound in most extracts, particularly in Sakarya and İstanbul populations during flowering and post-flowering stages. Rutin is an important flavonoid glycoside involved in antioxidant defense and protection against environmental stress factors such as UV radiation and oxidative damage (Panche et al., 2016). The increased rutin accumulation during reproductive stages may therefore be associated with enhanced metabolic activity and protective requirements during flowering and bulb maturation.

In contrast, chlorogenic acid accumulation was mainly associated with vegetative-stage samples. Chlorogenic acid is known to function in plant defense responses and oxidative stress regulation, particularly during active growth periods (Clifford et al., 2017). The relatively high chlorogenic acid contents detected in Sakarya, Gölcük, and Yeniçağa populations during early developmental stages may indicate enhanced phenylpropanoid pathway activity under active vegetative growth conditions.

The marked regional variations observed among the studied populations are closely associated with site-specific environmental variables, such as ambient temperature, humidity, light intensity, and soil composition. Environmental stress conditions are well-documented to stimulate the biosynthesis of secondary metabolites, particularly phenolic compounds, in medicinal plants (Selmar and Kleinwächter, 2013). Therefore, the significantly higher rutin hydrate accumulation observed in the Sakarya and İstanbul populations likely reflects habitat-specific ecological adaptations, potentially driven by the distinct microclimates and soil characteristics of these coastal or low-altitude localities.

Although quercetin and apigenin were detected only at low concentrations, their presence is of significant biological relevance, given that both compounds possess potent antioxidant and reactive oxygen species (ROS) scavenging activities (Panche et al., 2016). In particular, the relatively higher apigenin content recorded in the Sakarya March samples may reflect an increased protective metabolic response during the pre-flowering period.

Overall, these findings clearly demonstrate that both harvest timing and geographical origin strictly govern the phenolic architecture of *L. aestivum*. While early vegetative growth optimizes chlorogenic acid yields, the subsequent reproductive and post-flowering stages systematically favor rutin hydrate accumulation. Consequently, this study provides crucial baseline data for identifying the optimal harvesting periods and high-yield wild populations, enabling the standardized production of phenolic-rich *L. aestivum* extracts with maximized bioactive potential.

CONCLUSION

This study provides the first comprehensive insights into the dual influence of phenological stages and geographical origins on the phenolic composition of *Leucojum*

aestivum populations in Türkiye. Our findings clearly demonstrate a dynamic ontogenetic shift in the plant's secondary metabolism: early vegetative growth optimizes the yield of chlorogenic acid, whereas the subsequent reproductive and post-flowering periods systematically trigger a profound accumulation of rutin hydrate. Furthermore, the marked variations among the studied populations emphasize that habitat-specific ecological factors strictly regulate these phytochemical profiles. Ultimately, these insights establish a strategic roadmap for determining optimal harvesting schedules and selecting high-yield wild populations.

Overall, this study provides one of the limited reports focusing on phenolic profiling of *L. aestivum* leaves collected from different natural populations in Türkiye. The obtained results may contribute to future studies investigating the biological activities, ecological adaptations, and phytochemical potential of the species, as well as to the development of sustainable utilization strategies for this medicinally valuable plant.

REFERENCES

Arslan, M., Birinci Yildirim, A., Ozkan, E., Oktelik, F.B., Ucar Turker, A., 2020. Monthly variation of pharmaceutically valuable alkaloids, galanthamine and lycorine in summer snowflake (*Leucojum aestivum* L.). *Fresenius Environmental Bulletin, 29*, 2670-2677.

Bohnert, H. J., Nelson, D. E. and Jensen, R. G. (1995). Adaptations to environmental stresses. *The Plant Cell*, *7*(7), 1099.

Clifford, M. N., Jaganath, I. B., Ludwig, I. A., & Crozier, A. (2017). Chlorogenic acids and the acyl-quinic acids: discovery, biosynthesis, bioavailability and bioactivity. *Natural Product Reports*, *34*(12), 1391–1421. Doi: 10.1039/C7NP00030H

Demir, S. C., Yildirim, A. B., Turker, A. U., & Eker, I. (2022). Seasonal variation in alkaloid content, phenolic constituent and biological activities of some Leucojum aestivum L. populations in Turkey. *South African Journal of Botany*, *147*, 713-723. Doi:10.1016/j.sajb.2022.03.004

Khalifa, M.F., Attia, E.Z., Fahim, J.R., Kamel, M.S. (2018). An overview on the chemical and biological aspects of lycorine alkaloid. *Journal of Advanced Biomedical and Pharmaceutical Sciences, 1*, 41-49. Doi: 10.21608/jabps.2018.4088.1016

Mill, R.R. (1984). *Leucojum* L. In: Davis PH (Ed.). *Flora of Turkey and the East Aegean Islands*, Vol. 8, 364-365, Edinburgh University Press.

Naczk, M. and Shahidi, F. (2004). Extraction and analysis of phenolics in food. *Journal of Chromatography A*, *1054*(1–2), 95–111. Doi: 10.1016/j.chroma.2004.08.059

Panche, A. N., Diwan, A. D. and Chandra, S. R. (2016). Flavonoids: an overview. *Journal of Nutritional Science, 5*, 1-15. Doi: 10.1017/jns.2016.41

Selmar, D. and Kleinwächter, M. (2013). Stress enhances the synthesis of secondary plant products: the impact of stress-related over-reduction on the accumulation of natural products. *Plant and Cell Physiology, 54*(6), 817–826. Doi: 10.1093/pcp/pct054

Yang, L., Wen, K. S., Ruan, X., Zhao, Y. X., Wei, F. And Wang, Q. (2018). Response of plant secondary metabolites to environmental factors. *Molecules*, *23*(4), 762. Doi: 10.3390/molecules23040762

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Fire Safety Issues in Sustainable Façade Design

Bilgehan BAKIRHAN[1]

Abstract

In modern architecture, the goals of improving energy efficiency and reducing carbon footprints have accelerated the use of complex and multilayered facade systems. However, these sustainability-oriented architectural decisions are increasingly coming into conflict with fire safety requirements. A major gap in the current literature is that existing fire testing standards may be insufficient for evaluating the real-life fire behavior of innovative systems such as photovoltaic panels, green walls, and bio-based insulation materials. This study aims to analyze the emerging fire risks associated with sustainable facade systems and to propose holistic approaches that can minimize these risks during the architectural design process.

The methodology of the research is based on a literature review, a comparative analysis of contemporary facade systems, and a conceptual architectural evaluation. Within the scope of the study, the chimney effect in double-skin facades, the impact of combustible cladding systems on vertical fire spread, and the smoldering characteristics of bio-based insulation materials are examined. In particular, in light of the discussions that emerged after the Grenfell Tower fire, the ignition risks of photovoltaic systems, the impact of vertical gardens on firefighting intervention, and the smoke toxicity caused by synthetic and bio-based insulation materials are discussed from an architectural perspective.

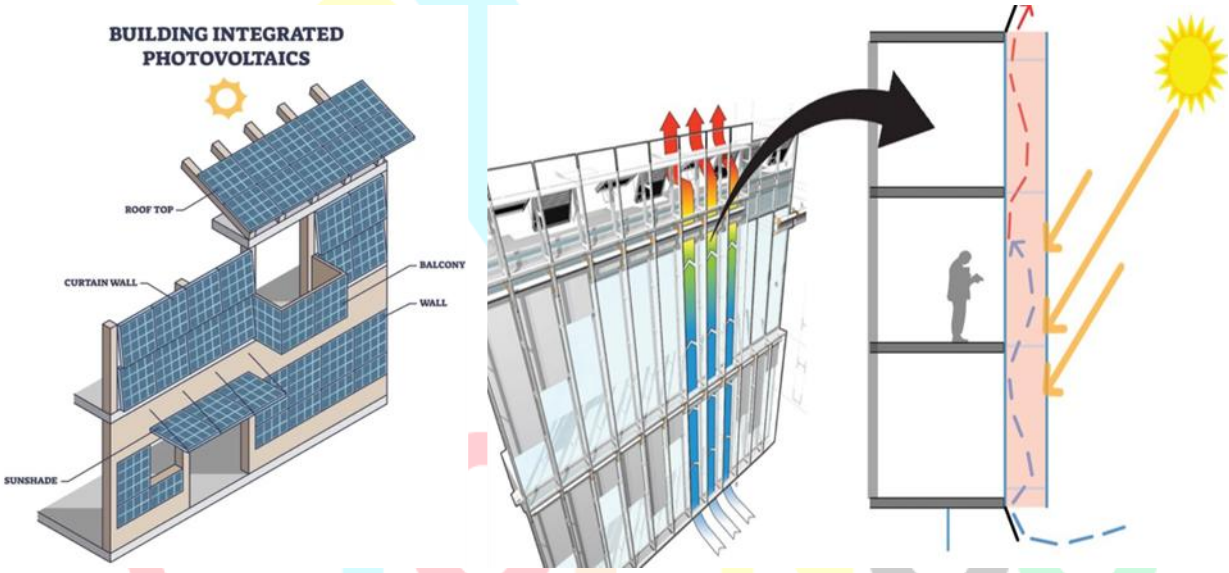
The findings of the study indicate that existing regulations and testing procedures may remain limited in evaluating the complex fire behavior of sustainable facade systems, and that some sustainability-oriented design decisions may carry the potential to increase fire spread risks. As a result, the study recommends the integration of interdisciplinary design strategies that address sustainability goals and fire safety requirements in a balanced manner into architectural design processes, while emphasizing the importance of performance-based design approaches.

Keywords: Sustainable facade systems, Fire safety, Facade fires, Photovoltaic systems

[1] Arş. Gör. Dr., Karabük Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, ORCID: 0000-0001-6940-9902

GİRİŞ

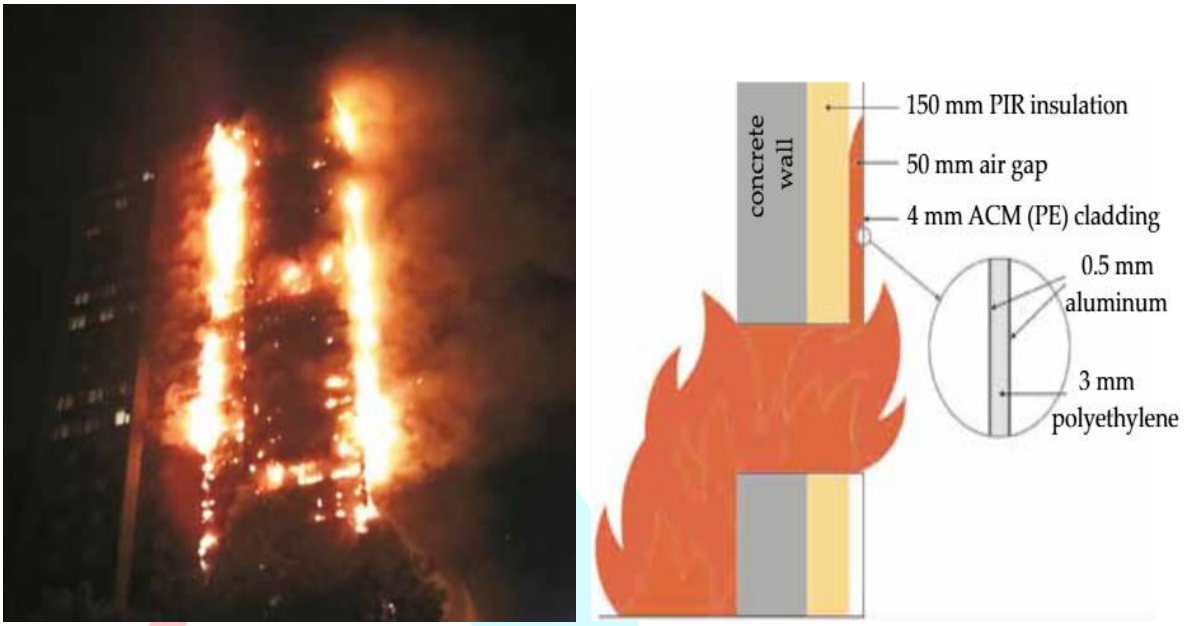
İklim değişikliğiyle mücadele, enerji tüketiminin azaltılması ve karbon emisyonlarının düşürülmesi hedefleri, son yıllarda mimarlık ve yapı sektöründe sürdürülebilir tasarım yaklaşımlarının yaygınlaşmasına neden olmuştur. Özellikle bina kabuğu sistemleri, yapıların enerji performansını doğrudan etkileyen temel bileşenlerden biri olarak görülmekte ve bu nedenle cephe tasarımlarında enerji verimliliğini artırmaya yönelik çok sayıda yenilikçi çözüm geliştirilmektedir. Bütünleşik fotovoltaik sistemler (BIPV), çift cidarlı cepheler, yeşil duvar uygulamaları ve biyotabanlı yalıtım malzemeleri bu çözümlerin en yaygın örnekleri arasında yer almaktadır. Bu sistemler sayesinde binaların enerji tüketiminin azaltılması, yenilenebilir enerji üretiminin artırılması ve çevresel etkilerin azaltılması hedeflenmektedir (McNamee & Meacham, 2023) (Şekil 1).



Şekil 1. BIPV elemanlarının bina cephesine entegrasyonu ve çift cidarlı cephelerde pasif havalandırma mekanizması (Novergy Solar, 2026).

Ancak sürdürülebilirlik odaklı tasarım kararları, beraberinde yeni yangın güvenliği problemlerini de ortaya çıkarmaktadır. Geleneksel cephe sistemlerine kıyasla daha karmaşık katmanlardan oluşan sürdürülebilir cepheler; yanıcı malzemeler, hava boşlukları, fotovoltaik modüller ve bitkilendirilmiş yüzeyler gibi farklı bileşenleri bir araya getirmektedir. Bu durum cephe yangınlarının oluşumu, gelişimi ve yayılımı açısından yeni risk senaryoları yaratmaktadır. Özellikle yüksek yapılarda meydana gelen cephe yangınları, alevlerin dış yüzey boyunca hızla yayılmasına, dumanın üst katlara taşınmasına ve bina kullanıcılarının tahliye süreçlerinin olumsuz etkilenmesine neden olabilmektedir (Roberts, 2017). Son yıllarda meydana gelen cephe yangınları, enerji verimliliği ile yangın güvenliği arasındaki ilişkinin yeniden değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir. Özellikle Grenfell Kulesi yangını sonrasında cephe sistemlerinde kullanılan malzemelerin yanıcılığı, boşluk detayları ve yangın durdurucu elemanların etkinliği uluslararası ölçekte yoğun biçimde tartışılmaya başlanmıştır. Bu süreçte birçok ülkede cephe sistemlerine yönelik mevzuatlar yeniden gözden geçirilmiş ve

sürdürülebilir malzemelerin yangın performansına ilişkin yeni araştırmalar hız kazanmıştır (Schulz ve ark., 2020) (Şekil 2).



Şekil 2. Grenfell Kulesi yangını ve cephe sistemindeki katmanlı yapının yangın güvenliği üzerindeki olumsuz etkisi (Mitchener, 2018).

Literatür incelendiğinde sürdürülebilir cephe sistemlerine yönelik çalışmaların ağırlıklı olarak üç temel konu üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bunlardan ilki, bütünleşik fotovoltaik sistemlerin yangın davranışıdır. BIPV sistemleri enerji üretimi açısından önemli avantajlar sunmasına rağmen, cephe yüzeyine entegre edilen elektriksel bileşenlerin ve polimer esaslı katmanların yangın sırasında alev yayılımını hızlandırabildiği belirtilmektedir. Zang (2026), özellikle yüksek yapılarda rüzgâr etkisinin de devreye girmesiyle BIPV sistemlerinin kontrol edilmesi güç cephe yangınlarına neden olabileceğini ifade etmektedir.

İkinci araştırma alanı çift cidarlı cephe sistemleridir. Bu sistemlerde iki cephe katmanı arasında oluşturulan hava boşluğu enerji performansını artırırken, yangın sırasında baca etkisi oluşturarak sıcak gazların ve alevlerin üst katlara taşınmasına neden olabilmektedir. Chow (2011) ve Yıldız (2026), çift cidarlı cephelerde boşluk geometrisinin yangın yayılım hızı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Özellikle yüksek yapılarda bu boşlukların kontrolsüz bırakılması durumunda cephe yangınlarının çok kısa süre içerisinde farklı katlara ulaşabildiği belirtilmektedir.

Üçüncü araştırma alanı ise biyotabanlı malzemelerin yangın performansıdır. Kenevir, mantar ve benzeri doğal malzemeler düşük karbon ayak izi nedeniyle sürdürülebilir yapı sektöründe giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bununla birlikte mevcut yangın test standartlarının bu malzemelerin gerçek kullanım koşullarındaki davranışlarını tam olarak yansıtamadığı ifade edilmektedir. Schulz ve diğerleri (2020) ile Walls ve diğerleri (2025), standart testlerin özellikle korlaşarak yanma, duman toksisitesi ve karmaşık cephe birleşim detaylarını değerlendirmede yetersiz kaldığını vurgulamaktadır.

Mevcut literatürde sürdürülebilir malzemelerin tekil performanslarını inceleyen çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, bu bileşenlerin bir araya gelerek oluşturduğu kompozit

cephe sistemlerinin yangın davranışını bütüncül olarak değerlendiren çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle mimari tasarım sürecinde enerji performansı, karbon azaltımı ve yangın güvenliği kriterlerinin birlikte ele alınmasına yönelik kapsamlı tasarım rehberleri yeterli düzeyde gelişmemiştir (Gültekin, 2019). Bu durum, sürdürülebilir cephe tasarımı ile yangın güvenliği arasındaki ilişkinin yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, sürdürülebilir cephe sistemlerinde ortaya çıkan yangın güvenliği problemlerini incelemek, mevcut test standartlarının sınırlılıklarını değerlendirmek ve enerji verimliliği ile yangın güvenliği arasındaki tasarım çatışmasına yönelik mimari bakış açısı geliştirmektir. Araştırma kapsamında çift cidarlı cepheler, bütünleşik fotovoltaik sistemler, yeşil duvar uygulamaları ve biyotabanlı malzemeler yangın davranışları açısından değerlendirilmekte; sürdürülebilir ve güvenli cephe tasarımı için öneriler sunulmaktadır.

YÖNTEM

Bu araştırmada sürdürülebilir cephe sistemlerinde ortaya çıkan yangın güvenliği problemlerini değerlendirmek amacıyla nitel araştırma yaklaşımına dayalı karşılaştırmalı bir yöntem benimsenmiştir. Çalışma; literatür incelemesi, cephe sistemlerinin karşılaştırmalı analizi ve mevcut yangın simülasyonu çalışmalarının değerlendirilmesi olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır.

Araştırmanın ilk aşamasında sürdürülebilir cephe sistemleri ile yangın güvenliği arasındaki ilişkiyi inceleyen ulusal ve uluslararası akademik çalışmalar değerlendirilmiştir. Bu kapsamda fotovoltaik cephe sistemleri, çift cidarlı cepheler, yeşil duvar uygulamaları, biyotabanlı yalıtım malzemeleri ve cephe yangınları üzerine yayımlanan araştırmalar incelenmiştir. Ayrıca Grenfell Kulesi yangını sonrasında yayımlanan teknik raporlar ve cephe yangınlarına ilişkin güncel mevzuat tartışmaları değerlendirilerek sürdürülebilir cephe sistemlerinde ortaya çıkan temel riskler belirlenmiştir.

Araştırmanın ikinci aşamasında sürdürülebilir cephe sistemleri yangın davranışları açısından karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda BIPV, çift cidarlı cepheler, yeşil duvar sistemleri ve biyotabanlı yalıtım malzemeleri; alev yayılımı, baca etkisi, duman oluşumu, müdahale zorlukları ve yangın sırasında meydana gelen sistem davranışları açısından değerlendirilmiştir. Böylece farklı sürdürülebilir cephe çözümlerinin yangın güvenliği üzerindeki etkileri ortak bir değerlendirme çerçevesi içerisinde karşılaştırılmıştır.

Araştırmanın üçüncü aşamasında ise literatürde yer alan sayısal modelleme ve yangın simülasyonu çalışmalarının sonuçları incelenmiştir. Özellikle cephe geometrisi, hava boşluğu genişliği, spandrel yüksekliği, fotovoltaik panel yerleşimi ve cephe birleşim detaylarının yangın yayılımı üzerindeki etkilerini değerlendiren FDS tabanlı araştırmalar analiz edilmiştir. Bu çalışmaların bulguları kullanılarak sürdürülebilir cephe sistemlerinde yangın davranışını etkileyen temel tasarım parametreleri ortaya konulmuştur.

Son aşamada elde edilen bulgular mimari tasarım perspektifiyle yorumlanmış ve mevcut yangın test standartlarının sürdürülebilir cephe sistemlerinin gerçek kullanım koşullarındaki performansını değerlendirme yeterliliği tartışılmıştır. Böylece enerji verimliliği, karbon azaltımı ve yangın güvenliği arasındaki ilişkinin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Sürdürülebilir cephe sistemlerinin yangın güvenliği üzerindeki etkilerini değerlendirebilmek amacıyla literatürde geniş yankı uyandıran cephe yangını vakaları incelenmiştir. Özellikle son yirmi yılda meydana gelen yüksek yapı yangınları, cephe sistemlerinde kullanılan malzemelerin, boşluk detaylarının ve tasarım kararlarının yangın davranışı üzerindeki etkilerini açık biçimde ortaya koymuştur. Araştırma kapsamında değerlendirilen başlıca cephe yangını vakaları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Araştırma kapsamında değerlendirilen önemli cephe yangını vakaları

Vaka	Yıl	Ülke	Yangınla İlişkilendirilen Cephe Bileşeni
TVCC Building	2009	Çin	Dış cephe sistemi
Wooshin Golden Suites	2010	Güney Kore	Dış cephe sistemi
Lacrosse Building	2014	Avustralya	Dış cephe sistemi
Address Downtown Hotel	2015	Birleşik Arap Emirlikleri	Dış cephe sistemi
Torch Tower	2015/2017	Birleşik Arap Emirlikleri	Dış cephe sistemi
Grenfell Tower	2017	Birleşik Krallık	Dış cephe sistemi ve yalıtım
The Cube Student Residence	2019	Birleşik Krallık	Dış cephe sistemi

Tablo 1'de yer alan vakalar, son yıllarda cephe yangınlarının farklı ülkelerde ve farklı yapı türlerinde önemli can ve mal kayıplarına neden olduğunu göstermektedir. Özellikle yüksek yapılarda meydana gelen bu olaylar, dış cephe sistemlerinin yangın güvenliği açısından yeniden değerlendirilmesine yol açmış ve cephe tasarımı, malzeme seçimi, yalıtım uygulamaları ve performans esaslı değerlendirme yaklaşımlarına yönelik araştırmaların hız kazanmasını sağlamıştır. Bu vakalar aynı zamanda sürdürülebilir cephe sistemlerinin yangın davranışlarının daha kapsamlı biçimde incelenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Cephe yangınları üzerine gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, yangın davranışının yalnızca kullanılan cephe sistemlerine bağlı olmadığı görülmektedir. Cephe geometrisi, hava boşlukları, rüzgâr etkisi, yalıtım katmanları ve yangın durdurucu detaylar gibi çok sayıda tasarım parametresi yangının gelişimi ve yayılımı üzerinde etkili olabilmektedir. Bu durum sürdürülebilir cephe sistemlerinin yangın performansının bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Literatürde sürdürülebilir cephe sistemleri arasında en fazla araştırılan konulardan biri bütünleşik fotovoltaik sistemlerdir (BIPV). Bu sistemler yenilenebilir enerji üretimi açısından "önemli avantajlar sunmasına rağmen, elektriksel bileşenler, kablolama sistemleri ve polimer esaslı katmanlar nedeniyle ek yangın riskleri oluşturabilmektedir. Zang (2026), yüksek yapılarda kullanılan BIPV sistemlerinde rüzgâr etkisinin alev davranışını önemli ölçüde değiştirdiğini ve bazı durumlarda cephe boyunca kontrol edilmesi güç alev yayılımı meydana gelebildiğini belirtmektedir. Ayrıca fotovoltaik panellerin cephe yüzeyine entegre edilmesi, yangın sırasında itfaiye müdahalesini zorlaştırabilmekte ve söndürme çalışmalarının etkinliğini azaltabilmektedir.

Araştırma kapsamında değerlendirilen bir diğer sistem çift cidarlı cephelerdir. Bu sistemlerde iki cephe katmanı arasında oluşturulan hava boşluğu enerji performansını artırırken, yangın sırasında baca etkisi oluşturarak sıcak gazların ve dumanın üst katlara taşınmasına neden olabilmektedir. Chow (2011) ve Yıldız (2026) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar, hava boşluğu geometrisinin yangın davranışını doğrudan etkilediğini göstermektedir. Özellikle boşluk yüksekliğinin artması ve yeterli yangın durdurucu elemanların bulunmaması

durumunda, alevlerin kısa süre içerisinde üst katlara ulaşabildiği belirtilmektedir. Bu durum enerji verimliliği amacıyla oluşturulan hava boşluklarının aynı zamanda önemli bir yangın yayılım güzergâhına dönüşebileceğini göstermektedir (Şekil 3).

Şekil 3. Çift cidarlı cephelerde baca etkisinin yangın yayılımı üzerindeki riskli etkisi (www.firetight.com)

Yeşil duvar sistemleri de sürdürülebilir cephe tasarımının önemli bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Bitkilendirilmiş yüzeyler bina enerji performansını iyileştirebilmekte, kentsel ısı adası etkisini azaltabilmekte ve kullanıcı konforunu artırabilmektedir. Bununla birlikte kullanılan bitki türleri, kuruyan biyokütle miktarı ve taşıyıcı sistem detayları yangın davranışını doğrudan etkileyebilmektedir. Ayrıca yoğun bitki örtüsünün bazı durumlarda dış cepheye erişimi zorlaştırdığı ve yangın sırasında müdahale ekiplerinin çalışma koşullarını olumsuz etkileyebildiği belirtilmektedir. Bu nedenle yeşil duvar sistemlerinin yalnızca ekolojik performansları açısından değil, yangın güvenliği açısından da değerlendirilmesi gerekmektedir.

Biyotabanlı yalıtım malzemeleri sürdürülebilir yapı sektöründe giderek daha fazla tercih edilmektedir. Kenevir, mantar ve benzeri doğal malzemeler düşük karbon ayak izleri nedeniyle çevresel açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak mevcut çalışmalar, bu malzemelerin yangın davranışlarının her zaman geleneksel malzemelerle aynı şekilde değerlendirilemeyeceğini göstermektedir. Özellikle korlaşarak yanma (smoldering combustion) davranışı ve duman oluşumu, biyotabanlı malzemelerin yangın performansının değerlendirilmesinde kritik parametreler arasında yer almaktadır. Walls ve diğerleri (2025), mevcut test standartlarının bu davranışları gerçek kullanım koşullarında yeterince temsil edemediğini vurgulamaktadır.

Araştırmanın en önemli bulgularından biri, mevcut yangın test standartları ile gerçek bina koşulları arasındaki uyumsuzluktur. BS 8414 ve ISO 13785 gibi yaygın kullanılan cephe testleri belirli performans kriterlerini değerlendirebilmekte; ancak pencere boşlukları, havalandırma menfezleri, fotovoltaik bileşenler, bitkilendirme sistemleri ve karmaşık birleşim detaylarının tamamını aynı anda temsil etmekte yetersiz kalabilmektedir. Čolić ve Pečur (2020) ile Walls ve diğerleri (2025), standart test sonuçlarının bazı durumlarda tasarımcılara gerçekte olduğundan daha yüksek bir güvenlik algısı oluşturabildiğini belirtmektedir. Elde edilen

bulgular sürdürülebilirlik ve yangın güvenliğinin birbirine karşıt kavramlar olmadığını, ancak mevcut uygulamalarda bu iki hedef arasında önemli bir denge problemi bulunduğunu göstermektedir. Özellikle enerji verimliliği hedefleri doğrultusunda geliştirilen bazı cephe sistemlerinin yangın davranışlarının tasarım sürecinde yeterince dikkate alınmadığı görülmektedir. Bu durum, sürdürülebilir cephe tasarımında malzeme performansının tek başına değerlendirilmesinin yeterli olmadığını; cephe sisteminin bir bütün olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda geliştirilen çağdaş cephe sistemlerinin enerji verimliliği ve karbon emisyonlarının azaltılması açısından önemli avantajlar sağlamakla birlikte, yangın güvenliği açısından yeni riskler ortaya çıkarabildiğini göstermiştir. Son yıllarda yaşanan cephe yangınları ve bu konuda gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar, sürdürülebilir tasarım kararlarının yalnızca çevresel performans üzerinden değerlendirilmesinin yeterli olmadığını ortaya koymaktadır. Özellikle cephe sistemlerinin çok katmanlı hale gelmesi, farklı malzeme türlerinin bir arada kullanılması ve enerji üretim işlevlerinin bina kabuğuna entegre edilmesi, yangın davranışının daha karmaşık bir yapıya dönüşmesine neden olmaktadır.

Araştırma bulguları, mevcut yangın test standartlarının sürdürülebilir cephe sistemlerinin gerçek kullanım koşullarındaki performansını her zaman tam olarak temsil edemeyebileceğini göstermektedir. Gerçek bina koşullarında cephe geometrisi, hava boşlukları, iklimsel etkiler, malzeme birleşimleri ve bakım süreçleri gibi çok sayıda değişken yangın davranışını etkileyebilmektedir. Bu durum, standart laboratuvar testleri ile gerçek yapı performansı arasındaki ilişkinin yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Çalışmanın ortaya koyduğu bir diğer önemli sonuç, sürdürülebilirlik ve yangın güvenliğinin birbirine rakip hedefler olmadığıdır. Aksine, güvenli olmayan bir cephe sisteminin uzun vadede sürdürülebilir kabul edilmesi mümkün değildir. Bu nedenle sürdürülebilir cephe tasarımında enerji performansı, karbon azaltımı, kullanıcı güvenliği ve yangın dayanımı kriterlerinin birlikte ele alındığı bütüncül bir yaklaşım benimsenmelidir. Tasarım sürecinde malzeme seçimlerinin yalnızca çevresel etkiler üzerinden değil, yaşam döngüsü boyunca göstereceği yangın performansı üzerinden de değerlendirilmesi gerekmektedir. Araştırma sonuçları, sürdürülebilir cephe tasarımında enerji verimliliği ve karbon azaltımı hedeflerinin tek başına yeterli olmadığını göstermektedir. Cephe sistemlerinin yangın davranışı tasarım sürecinin erken aşamalarında değerlendirilmediği durumlarda, sürdürülebilirlik amacıyla geliştirilen bazı çözümler beklenmeyen yangın riskleri oluşturabilmektedir. Bu nedenle sürdürülebilir cephe tasarımında performans temelli yangın güvenliği yaklaşımlarının enerji performansı kriterleriyle birlikte ele alınması önerilmektedir.

Bu doğrultuda gelecekte geliştirilecek cephe sistemlerinde performans esaslı tasarım yaklaşımlarının yaygınlaştırılması önerilmektedir. Özellikle bütünleşik fotovoltaik sistemler, çift cidarlı cepheler, yeşil duvar uygulamaları ve biyotabanlı malzemeler için gerçek kullanım koşullarını daha iyi temsil eden tam ölçekli deneysel çalışmaların artırılması gerekmektedir. Ayrıca mimarlar, yangın mühendisleri, malzeme bilimciler ve sürdürülebilirlik uzmanlarının tasarım sürecinin erken aşamalarında birlikte çalışmasını sağlayacak disiplinler arası yaklaşımların geliştirilmesi önem taşımaktadır.

Sonuç olarak sürdürülebilir cephe tasarımı, yalnızca enerji verimliliği sağlayan bina kabuklarının oluşturulmasını değil, aynı zamanda yangın güvenliği açısından dayanıklı ve

güvenilir yapı sistemlerinin geliştirilmesini de gerektirmektedir. Geleceğin cephe sistemlerinde sürdürülebilirlik ve yangın güvenliğinin birlikte ele alınması, daha güvenli, daha dirençli ve daha sürdürülebilir yapılı çevrelerin oluşturulmasına katkı sağlayacaktır

KAYNAKÇA

Chow, C. L. (2011). Numerical studies on smoke spread in the cavity of a double-skin façade. Journal of Civil Engineering and Management, 17(2), 208–217. https://doi.org/10.3846/13923730.2011.576809

Čolić, A., & Banjad Pečur, I. (2020). Influence of horizontal and vertical barriers on fire development for ventilated façades. Sustainability, 12(18), 7542. https://doi.org/10.3390/su12187542

Firetight. Why Firetight? Retrieved May 28, 2026, from https://www.firetight.com/why-firetight/

Gültekin, A. B. (Ed.). (2019). ISBS 2019 – 4th International Sustainable Buildings Symposium. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.87812

McNamee, M., & Meacham, B. J. (2023). Conceptual basis for a sustainable and fire resilient built environment. Fire Technology, 59(1), 1–25. https://doi.org/10.1007/s10694-022-01338-z

Mitchener, G. (2018). Impact of Grenfell Tower fire disaster on polyisocyanurate industry. Polimery, 63(10), 716–722. https://doi.org/10.14314/polimery.2018.10.8

Novergy Solar. BIPV facade architectural solar system. Retrieved May 29, 2026, from https://www.novergysolar.com/solutions/bipv-facade-architectural-solar-system/

Roberts, B. C. (2017). Fire safety in sustainable buildings: Status, options, alternatives (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Worcester Polytechnic Institute.

Schulz, J., Kent, D., Crimi, T., Williams, C., & Bisby, L. (2020). A critical appraisal of the UK's regulatory regime for combustible façades. Fire Technology, 56(6), 2613–2640. https://doi.org/10.1007/s10694-020-00963-1

Walls, R., Mat Kiah, H., Shewalul, Y. W., & de Koker, N. (2025). Fire testing of resilient and sustainable building materials (Teknik rapor). Stellenbosch University.

Yıldız, M. A. (2026). The impact of architectural design parameters on fire risk in double-skin facades: Fire simulations and regression-based assessment. Civil Engineering and Architecture, 14(2), 889–899. https://doi.org/10.13189/cea.2026.140216

Zang, Y. (2026). Investigation of fire safety strategies of buildings with BIPV external walls. Journal of Building Engineering.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Minimally Invasive Sensor Deployment in Historic Buildings Using Digital Twins

Bilgehan BAKIRHAN[1]

Abstract

The protection of historic buildings against fire presents significant challenges in practice due to the conflicts arising between cultural heritage conservation principles and the implementation of modern safety measures. A review of the fire safety and conservation literature reveals that the integration of digital twin technologies into historic buildings is still at an early stage and lacks a comprehensive and holistic perspective. This study aims to analyze digital twin-based fire risk management processes in historic buildings within the framework of their strategic opportunities, existing limitations, and architectural potentials. The primary problem addressed by the research is the development of recommendations for sensor placement configurations that are compatible with the principle of "minimum intervention," which limits physical intervention to the historic fabric while preventing damage to the existing structure.

Within the scope of the study, the relevant literature was first examined, followed by a conceptual evaluation and a comparative analysis of current fire safety approaches. The research theoretically discusses real-time risk monitoring and emergency response mechanisms supported by sensor data through a Historic Building Information Modelling (HBIM)-based data infrastructure. In particular, the study examines how the virtual modelling capacity offered by digital twin platforms can serve as a guide for determining optimum sensor locations that provide maximum efficiency without compromising the aesthetic and structural integrity of historic buildings. Furthermore, issues such as high installation costs, interoperability problems between software systems, and data management constraints are also evaluated. The study aims to contribute to the literature by presenting recommendations on how digital technologies can establish a security layer compatible with conservation principles. As a result, this research offers a roadmap and architectural recommendations for the integration of digital twin technologies and heritage management within future fire safety strategies.

Keywords: Historic buildings, Fire safety, Digital twin, HBIM, Sensor placement

[1] Arş. Gör. Dr., Karabük Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, ORCID: 0000-0001-6940-9902

GİRİŞ

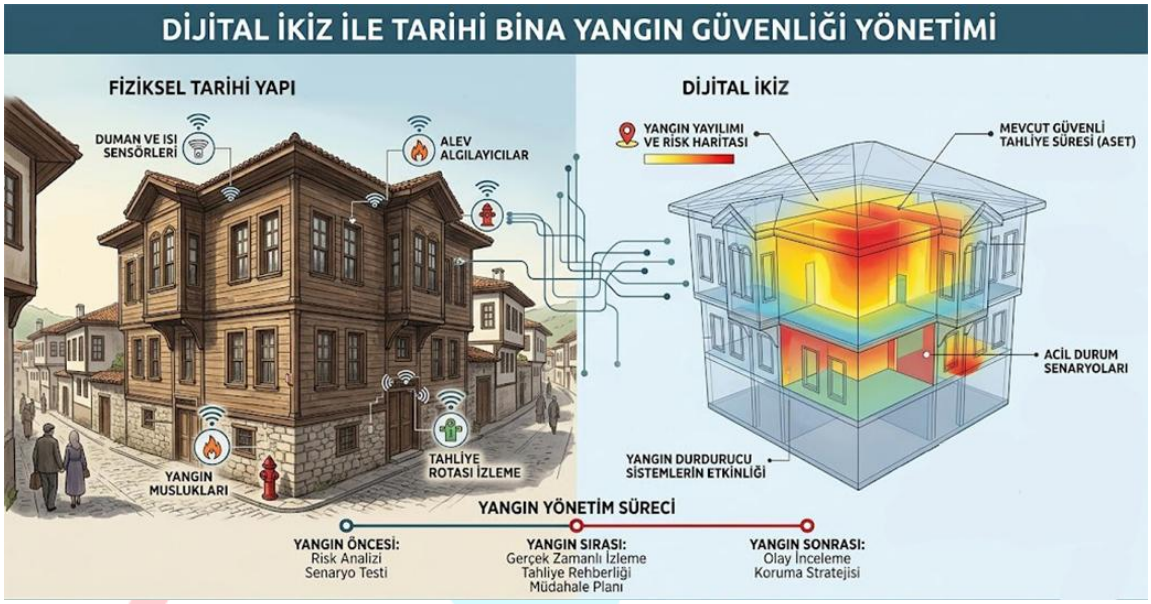
Tarihi yapılar, geçmiş uygarlıklara ait fiziksel ve kültürel değerleri günümüze taşıyan önemli miras unsurlarıdır. Ancak bu yapılar, yaşlanmış yapı malzemeleri, karmaşık mekânsal organizasyonları, yanıcı yapı elemanları ve güncel güvenlik sistemlerine uyum sağlamadaki zorluklar nedeniyle yangın riski açısından hassas bir yapı grubunu oluşturmaktadır. Son yıllarda dünyanın farklı bölgelerinde meydana gelen yangınlar, tarihi yapıların yalnızca fiziksel kayıplara değil, aynı zamanda geri döndürülemez kültürel miras kayıplarına da maruz kalabileceğini göstermiştir. Bu durum, tarihi yapılarda yangın güvenliğinin yalnızca teknik bir konu değil, aynı zamanda kültürel mirasın korunmasına yönelik stratejik bir gereklilik olduğunu ortaya koymaktadır (Jouan & Hallot, 2019) (Şekil 1).

Şekil 1. Tarihi yapılarda yangın kaynaklı fiziksel ve kültürel miras kayıplarına örnekler: Notre Dame Katedrali, Shuri Kalesi ve Brezilya Ulusal Müzesi.

Tarihi yapılarda yangın güvenliği uygulamalarının en önemli güçlüğü, modern güvenlik gereksinimleri ile koruma ilkeleri arasında denge kurulmasının gerekliliğidir. Geleneksel yangın algılama ve izleme sistemleri çoğu zaman kablolama, montaj ekipmanları ve fiziksel müdahaleler gerektirmektedir. Bu durum özgün duvar yüzeyleri, tavan süslemeleri, ahşap yapı elemanları ve tarihi malzemeler üzerinde kalıcı etkiler oluşturabilmektedir. Koruma disiplininde temel kabul gören "asgari müdahale" ilkesi, tarihi yapılara yapılacak her türlü uygulamanın mümkün olan en düşük fiziksel etkiyle gerçekleştirilmesini öngörmektedir. Bu nedenle tarihi yapılarda yangın güvenliği sistemlerinin tasarımı, yeni yapıların tasarımından farklı ve daha hassas bir yaklaşım gerektirmektedir (Lucchi, 2023).

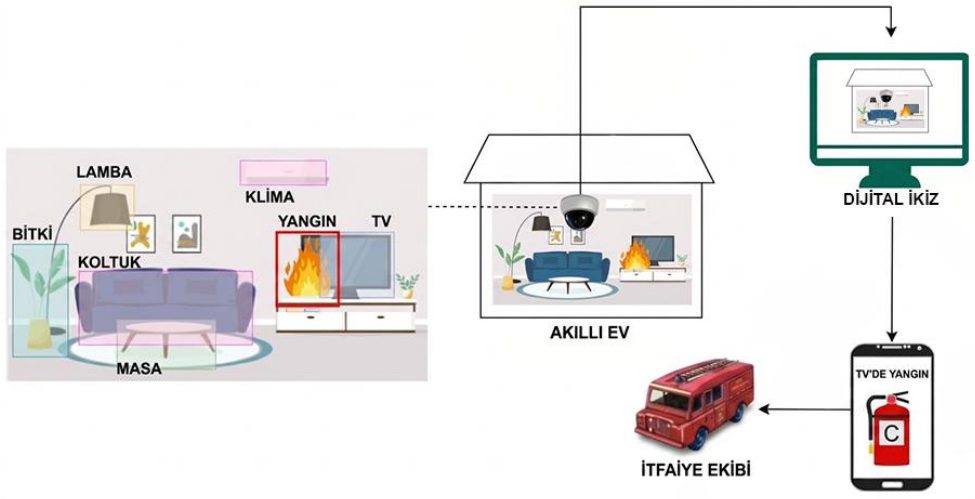
Dijital teknolojilerde yaşanan gelişmeler, tarihi yapıların korunması ve yönetilmesinde yeni olanaklar sunmaktadır. Özellikle Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi (HBIM), yapıların geometrik ve geometrik olmayan verilerinin dijital ortamda yönetilebilmesine olanak tanımaktadır. Başlangıçta daha çok dokümantasyon, restorasyon ve envanter amaçlı kullanılan

HBIM modelleri, günümüzde yapısal sağlık izleme, enerji performansı değerlendirmesi ve risk yönetimi gibi alanlarda da kullanılmaya başlanmıştır (Cui & Wu, 2025). Bununla birlikte HBIM modellerinin gerçek zamanlı veri akışlarıyla desteklenmesi sonucu ortaya çıkan Dijital İkiz yaklaşımı, tarihi yapıların dinamik biçimde izlenebilmesini mümkün kılmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Tarihi binalarda yangın güvenliği yönetiminde dijital ikiz teknolojisi (Gemini YZ aracı ile üretilmiştir.)

Dijital İkiz teknolojisi, fiziksel bir yapının dijital ortamda yaşayan bir temsilini oluşturarak sensör verileri, çevresel değişkenler ve operasyonel bilgilerle sürekli güncellenen bir model sunmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde yapının mevcut durumu izlenebilmekte, olası riskler önceden değerlendirilebilmekte ve farklı senaryolar sanal ortamda test edilebilmektedir. Özellikle yangın güvenliği açısından değerlendirildiğinde, Dijital İkiz sistemleri yalnızca yangın sonrası hasar değerlendirmesi için değil, yangın öncesi risklerin belirlenmesi ve erken uyarı mekanizmalarının geliştirilmesi için de önemli bir potansiyel taşımaktadır (D'Orazio ve ark., 2024) (Şekil 3).



Şekil 3. Dijital ikiz destekli yangın algılama, izleme ve acil durum müdahale sisteminin kavramsal işleyişi

Mevcut literatür incelendiğinde, tarihi yapılarda yangın güvenliği çalışmalarının büyük ölçüde tahliye senaryoları, risk değerlendirmeleri veya yangın sonrası koruma stratejileri üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Benzer şekilde HBIM tabanlı araştırmaların önemli bir bölümü de üç boyutlu modelleme, dijital arşivleme ve restorasyon uygulamalarına odaklanmaktadır. Buna karşın HBIM ve Dijital İkiz teknolojilerinin yangın güvenliği sistemlerinin planlanmasında, özellikle de sensör yerleşim optimizasyonunda kullanılması henüz sınırlı düzeyde ele alınmaktadır (Varolgüneş, 2025; Lucchi, 2023). Sensör yerleşimine ilişkin mevcut çalışmalar ise çoğunlukla kapsama alanı ve algılama performansı gibi mühendislik parametrelerine odaklanmakta; tarihi yapının kültürel değeri, özgün mimari özellikleri ve koruma hassasiyetleri gibi değişkenleri yeterince dikkate almamaktadır (Jouan & Hallot, 2019).

Bu çalışma, tarihi yapılarda yangın güvenliği ile koruma ilkeleri arasında denge kurabilen yeni bir yaklaşım önermektedir. Araştırmanın temel amacı, HBIM tabanlı Dijital İkiz modelleri kullanılarak tarihi yapılarda yangın algılama sensörlerinin optimum yerleşim stratejilerini değerlendirmek ve fiziksel müdahaleyi en aza indirirken algılama performansını en üst düzeye çıkarabilecek kavramsal bir çerçeve oluşturmaktır. Bu doğrultuda çalışma, Dijital İkiz teknolojilerinin tarihi yapıların yangın güvenliği yönetiminde nasıl kullanılabileceğini tartışmakta ve asgari müdahale ilkesini destekleyen dijital koruma yaklaşımlarına yönelik öneriler sunmaktadır.

YÖNTEM

Bu araştırmada tarihi yapılarda yangın güvenliği ile koruma ilkeleri arasındaki ilişkiyi değerlendirmek ve Dijital İkiz destekli asgari müdahaleli sensör yerleşimine yönelik kavramsal bir çerçeve geliştirmek amacıyla nitel araştırma yaklaşımı benimsenmiştir. Çalışma; literatür incelemesi, teknolojik bileşenlerin değerlendirilmesi ve kavramsal model geliştirme olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır.

Araştırmanın ilk aşamasında tarihi yapılarda yangın güvenliği, koruma ilkeleri, HBIM, Dijital İkiz teknolojileri, sensör ağları ve akıllı izleme sistemleri üzerine yayımlanmış ulusal ve uluslararası akademik çalışmalar incelenmiştir. Bu kapsamda özellikle tarihi yapılarda asgari müdahale ilkesi, dijital koruma uygulamaları ve yangın risk yönetimi konularında gerçekleştirilen araştırmalar değerlendirilmiş; mevcut yaklaşımların güçlü ve zayıf yönleri ortaya konulmuştur. Literatür incelemesi sonucunda tarihi yapılarda sensör yerleşimi ile koruma hassasiyetlerini birlikte ele alan çalışmaların sınırlı olduğu belirlenmiştir.

İkinci aşamada HBIM ve Dijital İkiz teknolojilerinin tarihi yapılardaki yangın güvenliği uygulamalarında sağlayabileceği potansiyeller değerlendirilmiştir. HBIM modellerinin yalnızca geometrik verileri değil, aynı zamanda malzeme özellikleri, yangın yükü, kültürel değer düzeyi ve mekânsal kullanım bilgileri gibi geometrik olmayan verileri de içerebileceği kabul edilmiştir. Ayrıca Dijital İkiz yaklaşımının gerçek zamanlı sensör verileri ile beslenerek yapının dinamik biçimde izlenmesine olanak sağlayabileceği değerlendirilmiştir. Son olarak literatürde önerilen sensör optimizasyon yaklaşımları ve dijital izleme sistemleri incelenerek tarihi yapılara yönelik kavramsal bir sensör yerleşim modeli geliştirilmiştir. Bu modelde sensör yerleşim kararları yalnızca algılama performansına göre değil; tarihi dokunun korunması, fiziksel müdahalenin azaltılması, yüksek riskli alanların önceliklendirilmesi ve bakım süreçlerinin kolaylaştırılması gibi koruma odaklı kriterler çerçevesinde ele alınmıştır. Böylece

yangın algılama sistemlerinin tarihi yapıların özgün karakterine zarar vermeden planlanabilmesine yönelik bir değerlendirme yaklaşımı oluşturulmuştur. Elde edilen bulgular koruma ve yangın güvenliği perspektiflerinden birlikte yorumlanmıştır. Bu doğrultuda Dijital İkiz teknolojisinin tarihi yapılarda yalnızca bir izleme aracı değil, aynı zamanda önleyici koruma ve risk yönetimi platformu olarak kullanılabileceği tartışılmıştır. Ayrıca sensör yerleşim stratejilerinin fiziksel uygulama öncesinde sanal ortamda değerlendirilmesinin, tarihi yapılarda gereksiz müdahalelerin azaltılmasına katkı sağlayabileceği değerlendirilmiştir.

Dijital ikiz teknolojisi sayesinde farklı sensör yerleşim senaryoları fiziksel uygulama öncesinde sanal ortamda test edilebilmekte ve böylece tarihi yapıya gereksiz müdahalelerin önüne geçilebilmektedir. Bu yaklaşım, koruma disiplininde temel kabul gören asgari müdahale ilkesini destekleyen önemli bir karar destek aracı olarak değerlendirilebilir.

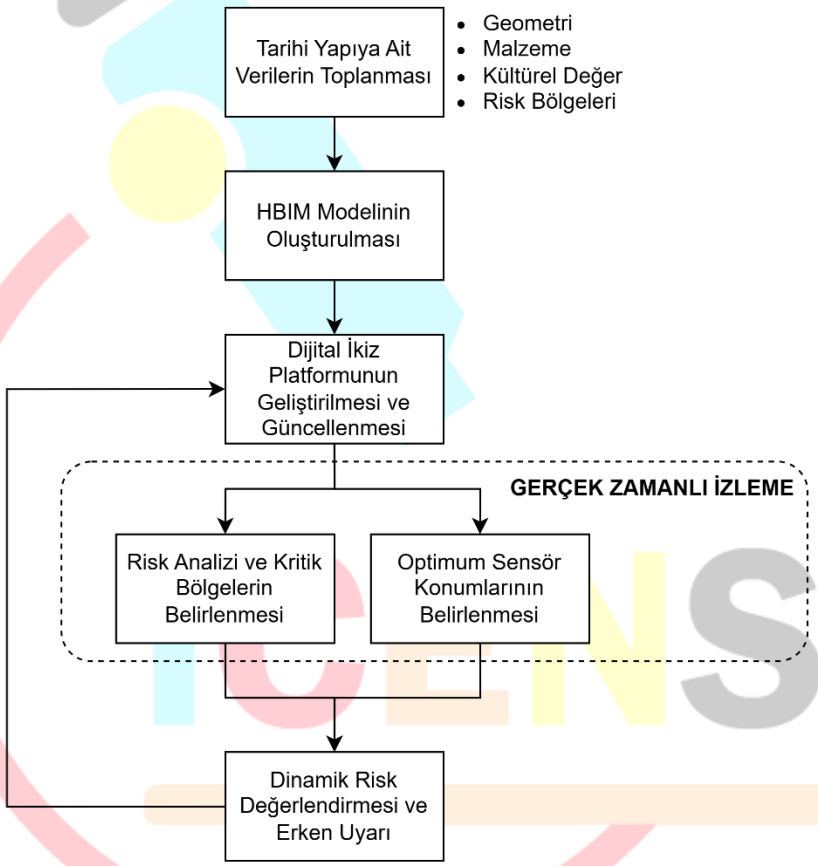
BULGULAR VE TARTIŞMA

Literatür incelemesi sonucunda tarihi yapılarda yangın güvenliği ile koruma ilkeleri arasında önemli bir tasarım gerilimi bulunduğu belirlenmiştir. Modern yangın güvenliği sistemleri yüksek algılama performansı ve hızlı müdahale gerektirirken, koruma yaklaşımları tarihi dokunun özgünlüğünün korunmasını ve fiziksel müdahalenin en düşük düzeyde tutulmasını önermektedir. Bu durum özellikle yangın algılama sistemlerinin tarihi yapılara entegrasyonu sırasında belirgin hale gelmektedir. Geleneksel kablolu sistemlerin montaj süreçleri çoğu zaman duvar, tavan ve dekoratif yüzeylerde fiziksel müdahale gerektirmekte, bu da koruma ilkeleriyle çelişebilmektedir (Jouan & Hallot, 2019).

Araştırma kapsamında incelenen çalışmalar, HBIM teknolojisinin tarihi yapıların yalnızca geometrik özelliklerini değil, aynı zamanda yangın güvenliği açısından kritik öneme sahip verileri de dijital ortamda yönetebildiğini göstermektedir. Yapı malzemeleri, kullanım yoğunluğu, yangın yükü, kaçış güzergâhları ve kültürel değer düzeyi gibi bilgilerin aynı model içerisinde bir araya getirilebilmesi, yangın güvenliği kararlarının daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte mevcut HBIM uygulamalarının büyük bölümünün dokümantasyon ve restorasyon odaklı olduğu, gerçek zamanlı risk yönetimi ve yangın izleme uygulamalarının ise henüz sınırlı düzeyde kaldığı görülmektedir (Lucchi, 2023; Cui & Wu, 2025).

Dijital İkiz teknolojisinin tarihi yapılardaki en önemli katkılarından biri, fiziksel uygulama öncesinde farklı senaryoların sanal ortamda test edilebilmesidir. Geleneksel yaklaşımlarda sensör yerleşimi çoğunlukla kapsama alanı hesapları ve mühendislik kriterleri doğrultusunda belirlenirken, Dijital İkiz yaklaşımı sensör konumlarının yapının kültürel değeri, mimari özellikleri ve risk düzeyi ile birlikte değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece sensör yerleşimi yalnızca teknik performans açısından değil, koruma hassasiyetleri açısından da optimize edilebilmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar, kablosuz sensör ağlarının tarihi yapılarda asgari müdahale ilkesini destekleyen önemli bir alternatif sunduğunu göstermektedir. Özellikle düşük enerji tüketimine sahip IoT tabanlı sensörlerin kablolama ihtiyacını azaltması, tarihi yapı elemanlarına yapılacak fiziksel müdahalelerin sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır. Deng ve diğerleri (2021) ile Machete ve diğerleri (2026), dijital modelleme ile desteklenen sensör ağlarının hem algılama performansını artırabildiğini hem de uygulama süreçlerinde ortaya çıkan müdahale ihtiyacını azaltabildiğini belirtmektedir.

Araştırma kapsamında değerlendirilen bir diğer önemli bulgu, sensör optimizasyonu yaklaşımlarının tarihi yapılardaki karmaşık mekânsal organizasyonları değerlendirmede önemli avantajlar sunmasıdır. Tarihi yapılarda düzensiz plan şemaları, farklı kat yükseklikleri, özgün yapı elemanları ve sonradan eklenmiş mekânlar nedeniyle geleneksel yerleşim yöntemleri bazı alanlarda yetersiz kalabilmektedir. Vila-Chã ve diğerleri (2023), optimizasyon algoritmalarının özellikle kör noktaların belirlenmesi ve algılama performansının artırılması açısından önemli potansiyeller taşıdığını vurgulamaktadır.Literatürde öne çıkan bulgular doğrultusunda tarihi yapılarda asgari müdahaleli sensör yerleşimine yönelik kavramsal bir Dijital İkiz entegrasyon modeli önerilmiştir. Önerilen süreç Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Tarihi yapılarda Dijital İkiz destekli asgari müdahaleli sensör yerleşim süreci

Şekil 4'te önerilen modelde, tarihi yapıya ait geometrik ve geometrik olmayan veriler öncelikle HBIM ortamında bir araya getirilmekte, ardından Dijital İkiz platformuna aktarılmaktadır. Bu sayede riskli alanlar dijital ortamda analiz edilerek farklı sensör yerleşim senaryoları test edilebilmekte ve fiziksel uygulama öncesinde optimum sensör konumları belirlenebilmektedir. Sürecin sonunda oluşturulan sensör ağı, gerçek zamanlı veri üretimi ve erken uyarı mekanizmalarıyla desteklenmektedir. Böylece tarihi yapıya doğrudan müdahale edilmeden önce farklı alternatifler değerlendirilebilmekte ve koruma ilkeleriyle uyumlu çözümler geliştirilebilmektedir. Literatürde öne çıkan bir diğer konu ise gerçek zamanlı veri yönetimidir. Dijital İkiz platformları ile entegre çalışan sensör sistemleri, yalnızca yangının tespit edilmesini değil, aynı zamanda risk göstergelerinin sürekli izlenmesini mümkün kılmaktadır. Sıcaklık değişimleri, duman yoğunluğu, nem oranı ve kullanıcı hareketleri gibi verilerin eş zamanlı değerlendirilmesi sayesinde riskli durumların erken aşamada

belirlenebileceği ifade edilmektedir. Xie ve diğerleri (2025), bu yaklaşımın geleneksel algılama sistemlerine kıyasla daha proaktif bir risk yönetimi anlayışı sunduğunu belirtmektedir.

Bununla birlikte Dijital İkiz teknolojilerinin tarihi yapılarda uygulanmasının bazı kısıtları da bulunmaktadır. Yüksek başlangıç maliyetleri, farklı yazılımlar arasındaki veri uyumsuzlukları, güncel veri yönetimi gereksinimleri ve uzman personel ihtiyacı uygulamaların yaygınlaşmasını sınırlandıran başlıca faktörler arasında yer almaktadır (Almatared ve ark., 2023; Lei ve ark., 2023). Ancak bu kısıtlara rağmen literatürdeki genel eğilim, Dijital İkiz teknolojilerinin yalnızca bir izleme aracı değil, aynı zamanda önleyici koruma ve risk yönetimi platformu olarak değerlendirilmesi yönündedir.

Elde edilen bulgular genel olarak değerlendirildiğinde, tarihi yapılarda yangın güvenliğinin yalnızca sensör sayısının artırılmasıyla değil, sensörlerin doğru konumlandırılması ve dijital sistemlerle bütünleşik şekilde yönetilmesiyle geliştirilebileceği görülmektedir. Özellikle HBIM ve Dijital İkiz teknolojilerinin birlikte kullanılması, asgari müdahale ilkesi ile yangın güvenliği gereksinimleri arasında daha dengeli çözümler geliştirilmesine olanak sağlayabilecek önemli bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, tarihi yapılarda yangın güvenliği ile kültürel mirasın korunması arasında uzun süredir devam eden denge probleminin dijital teknolojiler aracılığıyla yeniden ele alınabileceğini ortaya koymuştur. Geleneksel yangın algılama sistemleri çoğu zaman fiziksel müdahale gerektirmekte ve tarihi yapıların özgün mimari karakteri üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Buna karşılık HBIM ve Dijital İkiz teknolojileri, yangın güvenliği sistemlerinin fiziksel uygulama öncesinde sanal ortamda değerlendirilmesine olanak sağlayarak koruma ilkeleri ile güvenlik gereksinimlerinin birlikte ele alınabileceği yeni bir yaklaşım sunmaktadır.

Araştırma bulguları, tarihi yapılarda yangın güvenliğinin yalnızca algılama cihazlarının sayısına veya teknik özelliklerine bağlı olmadığını, bu sistemlerin yapının mimari özellikleri, kültürel değeri ve risk profiliyle bütünleşik biçimde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Özellikle Dijital İkiz teknolojisinin sağladığı dinamik veri yönetimi ve sürekli geri besleme mekanizması, yangın güvenliğinin statik bir uygulama olmaktan çıkarılarak sürekli güncellenen bir risk yönetim sürecine dönüştürülmesine olanak tanımaktadır. Çalışmanın ortaya koyduğu en önemli sonuçlardan biri, asgari müdahale ilkesinin dijital teknolojiler ile çelişen bir yaklaşım olmadığıdır. Aksine, doğru yapılandırılmış dijital modeller ve kablosuz sensör ağları sayesinde tarihi yapılarda fiziksel müdahale gereksinimi azaltılabilir, riskli alanlar önceden belirlenebilir ve uygulama kararları daha bilinçli biçimde alınabilir. Böylece koruma ve güvenlik hedefleri arasında daha dengeli çözümler geliştirilmesi mümkün hale gelmektedir. Bu doğrultuda gelecekte gerçekleştirilecek uygulamalarda HBIM modellerinin yalnızca dokümantasyon amacıyla değil, yangın güvenliği yönetiminin temel bileşenlerinden biri olarak kullanılması önerilmektedir. Ayrıca Dijital İkiz platformlarının yangın sonrası hasar değerlendirmesi yerine yangın öncesi risk tahmini, erken uyarı ve önleyici koruma odaklı biçimde geliştirilmesi önem taşımaktadır. Kablosuz sensör ağlarının tarihi yapılara özgü risk bölgelerini dikkate alacak şekilde optimize edilmesi ve gerçek zamanlı izleme sistemleriyle desteklenmesi de önerilmektedir. Bununla birlikte Dijital İkiz uygulamalarının tarihi yapılarda yaygınlaşabilmesi için veri standartlarının geliştirilmesi, farklı

yazılımlar arasındaki birlikte çalışabilirlik sorunlarının azaltılması ve koruma uzmanları ile yangın güvenliği uzmanlarının ortak çalışma kültürünün güçlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca gelecekteki araştırmalarda önerilen kavramsal modelin farklı yapı tiplerinde uygulanarak doğrulanması ve gerçek zamanlı sensör verileriyle desteklenen pilot çalışmaların gerçekleştirilmesi faydalı olacaktır.

Sonuç olarak Dijital İkiz teknolojisi, tarihi yapıların yangın güvenliği yönetiminde yalnızca yeni bir teknolojik araç değil, aynı zamanda koruma ilkeleriyle uyumlu önleyici risk yönetimi yaklaşımının önemli bir bileşeni olarak değerlendirilebilir. Bu yaklaşım, tarihi yapıların özgün değerlerini korurken yangın risklerine karşı daha dirençli hale getirilmesine katkı sağlayabilecek önemli bir potansiyel sunmaktadır.

KAYNAKÇA

Almatared, M., Liu, H., Abudayyeh, O., et al. (2023). Digital-twin-based fire safety management framework for smart buildings. Buildings, 13(2), 345. https://doi.org/10.3390/buildings13020345

Cui, H., & Wu, J. (2025). How architectural heritage is moving to smart: A systematic review of HBIM. Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development.

D'Orazio, M., Canafoglia, M., Bernardini, G., et al. (2024). Towards using digital technologies to balance conservation and fire mitigation in building heritage hosting vulnerable occupants: Rapid evacuation simulator verification for the "Omero Museum". Heritage Science, 12, Article 147. https://doi.org/10.1186/s40494-024-01218-5

Deng, M., Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (2021). From BIM to digital twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. Journal of Information Technology in Construction, 26, 58–83. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005

Friends of Notre-Dame de Paris. The fire of Notre-Dame Cathedral. Retrieved May 22, 2026, from https://www.friendsofnotredamedeparis.org/notre-dame-cathedral/fire/

The Guardian. (2024, May 7). Rio National Museum receives rare fossil donation six years after devastating fire. Retrieved May 25, 2026, from https://www.theguardian.com/world/article/2024/may/07/rio-national-museum-fossil-donation-fire

Hakimi, O., Liu, H., & Abudayyeh, O. (2023). Digital twin-enabled smart facility management: A bibliometric review. Automation in Construction, 150, 104830. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104830

Japan Forward. (2019, November 4). Shuri Castle fire: A failure of crisis management by Okinawa Governor Tamaki. Retrieved May 25, 2026, from https://japan-forward.com/shuri-castle-fire-a-failure-of-crisis-management-by-okinawa-governor-tamaki

Jouan, P., & Hallot, P. (2019). Digital twin: A HBIM-based methodology to support preventive conservation of historic assets through heritage significance awareness. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W15, 609–615. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-609-2019

Khan, T. (2023). A Smart Fire Detector IoT System with Extinguisher Class Recommendation Using Deep Learning. IoT, 4(4), 558-581. https://doi.org/10.3390/iot4040024

Lei, B., Janssen, P., Stoter, J., et al. (2023). Challenges of urban digital twins: A systematic review and a Delphi expert survey. Cities, 129, 103833. https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103833

Lucchi, E. (2023). Digital twins for the automation of the heritage construction sector. Automation in Construction, 145, 104645. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104645

Machete, R., Dias, F. M., Caetano, D. M., et al. (2026). A solution for heritage monitoring based on wireless low-cost sensors and BIM: Application to the Monserrate Palace. Heritage Science.

Varolgüneş, F. K. (2025). Typology-specific gaps in building fire safety: A scientometric review of technologies, functions, and research trends. Safety Science, 181, 106118. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106118

Vila-Chã, E., Barontini, A., & Lourenço, P. B. (2023). Implementation of a condition monitoring strategy for the monastery of Salzedas, Portugal: Challenges and optimisation. International Journal of Architectural Heritage, 17(9), 1251–1272. https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2030657

Xie, W., Zeng, Y., Zhang, X., et al. (2025). AIoT-powered building digital twin for smart firefighting and super real-time fire forecast. Automation in Construction, 158, 105210. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105210

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Architectural Challenges Related to Fire Evacuation and Patient Mobility in Healthcare Facilities

Bilgehan BAKIRHAN[1]

Abstract

Fire safety in healthcare facilities constitutes one of the most challenging areas of architectural design due to the high vulnerability of user groups and the complex requirements of medical equipment. A review of the literature indicates that the majority of fire evacuation models and regulatory frameworks are primarily based on "independently mobile occupants," while the spatial needs of groups such as bed-dependent patients and elderly individuals with limited mobility are insufficiently represented within these models. This study aims to move beyond a purely engineering-oriented approach to fire evacuation in healthcare facilities by analyzing the direct relationship between patient mobility, stretcher/bed circulation, and spatial organization. The primary problem addressed by the research is the lack of spatial planning standards for bedridden patient evacuation—an important gap in the architectural literature—and the inadequacy of existing designs in horizontal evacuation scenarios.

The methodology of the study is based on a literature review, architectural plan analyses of three hospital buildings representing different plan typologies, and a conceptual-comparative evaluation of hospital evacuation strategies. Within the scope of the research, corridor organization, fire compartments, stretcher maneuvering areas, and safe refuge zones are discussed within a theoretical framework. In particular, the study examines how horizontal evacuation approaches, which rely on the creation of safe zones on the same floor level, can be improved during the architectural design process for units where vertical evacuation is limited, such as operating rooms and intensive care units. As a result, this research aims to fill a conceptual gap in the literature by presenting architectural design recommendations that integrate patient-oriented evacuation strategies into hospital design processes and by offering a strategic roadmap for future healthcare facility projects.

Keywords: Healthcare facilities, Fire safety, Patient mobility, Fire evacuation

[1] Arş. Gör. Dr., Karabük Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, ORCID: 0000-0001-6940-9902

GİRİŞ

Sağlık yapıları, kullanıcı profillerinin çeşitliliği, karmaşık teknik altyapıları ve kesintisiz hizmet verme zorunlulukları nedeniyle yangın güvenliği açısından en kritik yapı türlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Hastaneler; bağımsız yürüyebilen hastalar (ambulant), sağlık personeli ve ziyaretçiler gibi bireylerin yanı sıra, yatağa bağımlı hastalar, yaşlı bireyler ve fiziksel hareket kabiliyeti sınırlı kullanıcıları (non-ambulant) da barındırmaktadır. Bu nedenle sağlık yapılarında meydana gelen yangın olaylarında tahliye süreci, diğer yapı türlerine kıyasla çok daha karmaşık bir organizasyon gerektirmektedir (Kwak ve ark., 2020) (Şekil 1).

Şekil 1. Sağlık yapılarında yangın tahliyesini etkileyen kullanıcılar

Yangın tahliyesi üzerine gerçekleştirilen çalışmaların önemli bir bölümü okul, alışveriş merkezi, havaalanı ve metro istasyonu gibi kullanıcıların kendi başlarına hareket edebildiği yapılara odaklanmaktadır (Karim ve ark., 2022). Ancak sağlık yapılarında hasta mobilitesi, tahliye performansını belirleyen temel değişkenlerden biridir. Özellikle yoğun bakım üniteleri, ameliyathaneler ve uzun süreli bakım servislerinde bulunan hastaların önemli bir bölümü bağımsız hareket kabiliyetine sahip değildir ve tahliye sürecinde sağlık personelinin desteğine ihtiyaç duymaktadır (Fahmi ve ark., 2026). Hasta tahliyesini zorlaştıran bir diğer unsur ise tıbbi ekipman bağımlılığıdır. Ventilatörler, monitörler, infüzyon pompaları ve medikal gaz sistemleri gibi yaşam destek ekipmanları, hastaların güvenli biçimde taşınabilmesi için ilave hazırlık süreleri gerektirmektedir. Özellikle yoğun bakım ünitelerinde gerçekleştirilen tahliye operasyonlarında, ekipmanların ayrılması ve yeniden bağlanması süreçleri toplam tahliye süresini önemli ölçüde artırmaktadır (Geoerg ve ark., 2025) (Şekil 2).

Şekil 2. Yatağa bağımlı ve hareket kısıtlı hasta örnekleri

Literatürde son yıllarda sağlık yapılarındaki tahliye performansını değerlendiren çeşitli simülasyon çalışmaları yapılmış olmasına rağmen, bu çalışmaların büyük bölümü mühendislik temelli yaklaşımlar üzerine yoğunlaşmaktadır. Tahliye süreleri, çıkış kapasiteleri ve kullanıcı yoğunlukları gibi değişkenler ayrıntılı biçimde incelenirken; koridor organizasyonu, sedye manevra alanları, yangın kompartımanları ve güvenli sığınma bölgeleri gibi mimari tasarım parametreleri ikincil planda kalmaktadır (Kwak ve ark., 2020) (Şekil 3).

Web of Science Arama Kriteri	Makale Sayısı
'Hospital evacuation' (2016–2026, Article, English)	81
AND 'Fire'	12
+ Engineering / Environmental Sciences Ecology / Construction Building Technology	7

Şekil 3. Web of Science veri tabanında hastane tahliyesi literatür taraması (2016–2026).

Bu bağlamda araştırmanın temel problemi, yataklı hasta tahliyesine yönelik mekânsal planlama standartlarının yetersizliği ve mevcut hastane tasarımlarının yatay tahliye senaryolarını destekleme kapasitesinin sınırlı olmasıdır. Mevcut standartlar genel tahliye gerekliliklerini belirlemektedir; ancak yatalak hastaların hareket kabiliyeti, sığınma alanları ve yatay tahliye düzenlemeleriyle ilgili ayrıntılı mimari kılavuzlar hâlâ sınırlıdır. Özellikle ameliyathane ve yoğun bakım gibi kritik birimlerde dikey tahliyenin uygulanabilirliği oldukça düşük olduğundan, aynı kat düzleminde güvenli alanlara geçişi esas alan yatay tahliye stratejilerinin mimari tasarım sürecinde daha fazla dikkate alınması gerekmektedir. Bu çalışma, hasta hareketliliği, sedye ve yatak sirkülasyonu ile mekânsal organizasyon arasındaki ilişkiyi analiz ederek sağlık yapılarında hasta odaklı yangın tahliyesi yaklaşımlarının geliştirilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

YÖNTEM

Araştırmada sağlık yapılarında yangın tahliyesi ile hasta mobilitesi arasındaki ilişkiyi değerlendirmek amacıyla nitel araştırma yaklaşımına dayalı bir yöntem izlenmiştir. Çalışma;

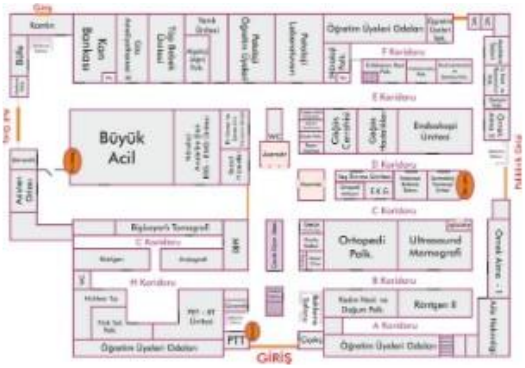
literatür incelemesi, mimari plan analizleri ve kavramsal-karşılaştırmalı değerlendirme olmak üzere dört temel aşamadan oluşmaktadır.

Çalışmanın ilk aşamasında sağlık yapılarında yangın güvenliği, hasta tahliyesi, hasta mobilitesi, yatay tahliye, yangın kompartımanları ve güvenli sığınma alanları konularında yayımlanmış ulusal ve uluslararası akademik çalışmalar incelenmiştir. Bu kapsamda hastane yangınları, tahliye stratejileri ve kullanıcı hareketliliği üzerine gerçekleştirilen araştırmalar değerlendirilerek mevcut bilgi birikimi ortaya konulmuş ve literatürdeki boşluklar belirlenmiştir. Özellikle hasta hareketliliğinin tahliye performansı üzerindeki etkisini inceleyen çalışmalar ile sağlık yapılarındaki yangın güvenliği mevzuatları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

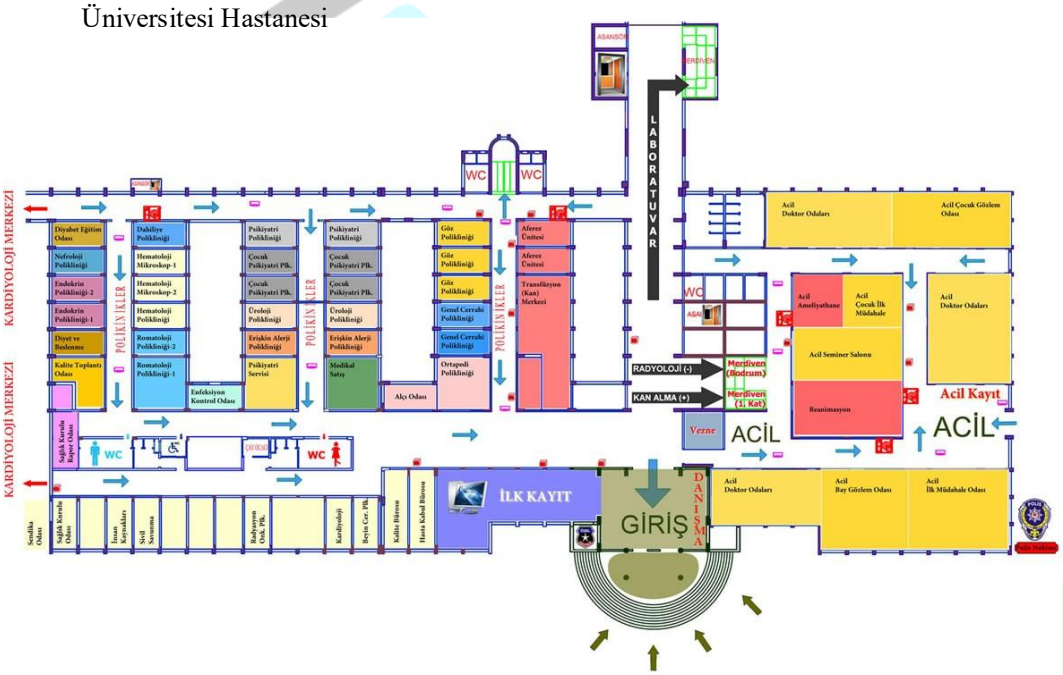
Araştırmanın ikinci aşamasında farklı mekânsal organizasyon özelliklerine sahip hastane planları incelenmiştir. Çalışmada örneklem olarak Manisa Celal Bayar Üniversitesi Hafsa Sultan Hastanesi, Kayseri Erciyes Üniversitesi Tıp Fakültesi Gevher Nesibe Hastanesi ve Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Hastanesi seçilmiştir. Bu hastaneler amaçlı örnekleme yöntemi doğrultusunda belirlenmiş olup, birbirinden farklı plan organizasyonlarını temsil etmeleri nedeniyle tercih edilmiştir. Örneklem seçiminde farklı mekânsal organizasyon özelliklerine sahip sağlık yapılarının temsil edilmesine öncelik verilmiştir.

Manisa Celal Bayar Üniversitesi Hafsa Sultan Hastanesi doğrusal koridor sistemini, Kayseri Erciyes Üniversitesi Tıp Fakültesi Gevher Nesibe Hastanesi çok koridorlu ve modüler plan organizasyonunu, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Hastanesi ise merkezi hol etrafında gelişen radyal plan organizasyonunu temsil etmektedir (Şekil 4).

a. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Hastanesi



b. Kayseri Erciyes Üniversitesi Tıp Fakültesi Gevher Nesibe Hastanesi



c. Manisa Celal Bayar Üniversitesi Hafsa Sultan Hastanesi

Şekil 4. İncelenen üniversite hastanelerinin zemin kat planları ve yatay dolaşım organizasyonları: (a) Manisa Celal Bayar Üniversitesi Hafsa Sultan Hastanesi, (b) Erciyes Üniversitesi Gevher Nesibe Hastanesi, (c) Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Araştırma ve Uygulama Hastanesi

Çalışmada sağlık yapılarında yaygın olarak karşılaşılan farklı dolaşım ve mekânsal organizasyon yaklaşımlarının hasta mobilitesi ve tahliye performansı üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca örneklem seçiminde hastanelerin güncel olarak hizmet vermesi, kamuya açık plan verilerine ulaşılabilmesi ve farklı kullanıcı yoğunluklarına sahip poliklinik, acil servis ve tanı birimlerini aynı plan bütünlüğü içerisinde barındırması temel kriterler olarak belirlenmiştir.

Üçüncü aşamada seçilen hastanelerin planları incelenmiştir. Bu kapsamda koridor düzenleri, kaçış yolları, yangın kompartımanları, hasta odalarının konumu, yoğun bakım ve ameliyathane gibi kritik birimlerin yerleşim kararları değerlendirilmiştir. Mimari plan analizlerinde özellikle sedye ve hasta yatağı kullanımına bağlı olarak ortaya çıkan manevra gereksinimleri dikkate alınmıştır. Koridor genişlikleri, kavşak noktaları, dönüş alanları ve kompartımanlar arası geçişler hasta tahliyesi açısından yorumlanmıştır.

Son aşamada ise elde edilen bulgular kavramsal ve karşılaştırmalı bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Sağlık yapılarında yaygın olarak kullanılan dikey tahliye ve yatay tahliye stratejileri hasta mobilitesi bağlamında karşılaştırılmıştır. Özellikle yoğun bakım üniteleri ve ameliyathaneler gibi hareket kabiliyeti sınırlı kullanıcıların bulunduğu alanlarda yatay tahliye yaklaşımının sağlayabileceği avantajlar incelenmiştir. Ayrıca güvenli sığınma bölgeleri, duman kontrolü, yangın kompartımanları ve medikal destek altyapılarının tahliye sürecine etkileri tartışılmıştır.

BULGULAR

Araştırma kapsamında incelenen Manisa Celal Bayar Üniversitesi Hafsa Sultan Hastanesi, Kayseri Erciyes Üniversitesi Tıp Fakültesi Gevher Nesibe Hastanesi ve Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Hastanesi zemin kat planları, hasta mobilitesi ve tahliye performansı açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Analiz edilen hastaneler farklı mekânsal organizasyonları temsil etmelerine rağmen, hareket kabiliyeti sınırlı kullanıcıların tahliyesini etkileyen ortak tasarım problemlerine sahip oldukları belirlenmiştir.

Manisa Celal Bayar Üniversitesi Hafsa Sultan Hastanesi'nde polikliniklerin uzun ve doğrusal bir koridor sistemi boyunca sıralandığı görülmektedir. Bu plan tipi kullanıcıların yön bulmasını kolaylaştırmakta ve mekânsal okunabilirliği artırmaktadır. Ancak kullanıcı hareketinin büyük ölçüde aynı dolaşım aksı üzerinde gerçekleşmesi nedeniyle yoğun hasta trafiğinin oluştuğu dönemlerde belirli noktalarda yoğunlaşma riski ortaya çıkabilir. Özellikle poliklinikler, laboratuvar alanları ve acil servis bağlantılarının aynı koridor sistemi üzerinden ilişkilendirilmesi, olağanüstü durumlarda hasta, refakatçi ve sağlık personeli hareketlerinin çakışmasına neden olabilecek bir yapı oluşturabilir.

Kayseri Erciyes Üniversitesi Tıp Fakültesi Gevher Nesibe Hastanesi'nde ise A, B, C, D, E, F ve H koridorlarından oluşan daha parçalı ve modüler bir dolaşım sistemi bulunmaktadır. Bu plan organizasyonu kullanıcı hareketinin farklı güzergâhlara dağıtılmasına olanak sağlamakta ve tek bir koridor üzerindeki yoğunlaşmayı azaltmaktadır. Bununla birlikte dolaşım ağının karmaşık hale gelmesi, özellikle binaya yabancı kullanıcılar açısından yön bulmayı zorlaştırabilmektedir. Acil durumlarda kullanıcıların en uygun kaçış güzergâhını belirleyebilmesi için yönlendirme ve işaretleme sistemlerinin büyük önem taşıdığı değerlendirilmektedir.

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Hastanesi ise merkezi hol etrafında gelişen radyal bir plan organizasyonuna sahiptir. A, B, C ve D bloklarının merkezi zemin kat holüne bağlanması sayesinde kullanıcı hareketi farklı yönlere dağıtılabilmektedir. Ayrıca poliklinik, servis, ambulans ve ayakta hasta girişlerinin farklı noktalarda konumlandırılması alternatif erişim ve dolaşım olanakları sağlamaktadır. Merkezi holün geniş bir dağıtım alanı oluşturması kullanıcı hareketlerini yönlendirme açısından avantaj sunmaktadır. Ancak çok sayıda fonksiyonun aynı merkezde birleşmesi nedeniyle bu alanın aynı zamanda potansiyel bir yoğunlaşma noktası oluşturduğu görülmektedir.

Üç hastanede gerçekleştirilen plan analizleri sonucunda koridor genişliklerinin bazı bölümlerde yaklaşık 2,50 m seviyelerine kadar düştüğü belirlenmiştir. Bu genişlik günlük kullanıcı dolaşımı açısından yeterli görünmekle birlikte, sedye ile gerçekleştirilen eş zamanlı hasta transferlerinde ve yoğun tahliye senaryolarında manevra kapasitesini sınırlandırabilecek

bir durum oluşturmaktadır. Hastanelerde kullanıcı profilinin yalnızca yürüyebilen bireylerden oluşmadığı dikkate alındığında, koridorların aynı anda sağlık personeli, ambulant hastalar, refakatçiler ve sedye ile taşınan hastalar tarafından kullanılacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle koridor genişliklerinin yalnızca normal kullanım koşullarına göre değil, acil durum ve tahliye senaryolarına göre de değerlendirilmesi gerekmektedir. Analiz edilen planların tamamında acil servis, görüntüleme merkezleri, poliklinikler ve tanı birimleri arasında yoğun kullanıcı hareketi bulunduğu görülmektedir. Buna rağmen hareket kabiliyeti sınırlı kullanıcılar için ayrılmış bağımsız tahliye güzergâhları veya özel transfer koridorları açık biçimde tanımlanmamıştır. Bu durum sedye veya yatakla taşınan hastaların tahliye süreçlerinde diğer kullanıcılarla aynı dolaşım alanlarını paylaşmasına neden olabilmektedir. Özellikle acil servisler ve görüntüleme birimlerinin bulunduğu bölgelerde oluşabilecek yoğunlukların tahliye performansını olumsuz etkileyebilecek potansiyel darboğazlar oluşturduğu değerlendirilmektedir. Bir diğer önemli bulgu, incelenen hastanelerin hiçbirinde yatay tahliyeyi destekleyen güvenli sığınma alanlarının plan üzerinde açık biçimde tanımlanmamış olmasıdır. Oysa yoğun bakım, ameliyathane, reanimasyon ve acil müdahale alanları gibi kritik birimlerde bulunan hastalar için dikey tahliye çoğu zaman uygulanabilir değildir. Bu nedenle kullanıcıların aynı kat düzleminde güvenli bölgelere aktarılmasını sağlayacak yangın kompartımanları, duman kontrol bölgeleri ve güvenli bekleme alanlarının sağlık yapılarında daha belirgin biçimde planlanması gerekmektedir.

Karşılaştırmalı değerlendirme sonucunda doğrusal koridor sistemlerinin mekânsal okunabilirlik açısından, modüler koridor sistemlerinin kullanıcı yoğunluğunu dağıtma açısından ve merkezi hol organizasyonunun alternatif dolaşım olanakları sunması açısından avantaj sağladığı görülmüştür. Bununla birlikte incelenen üç hastanenin hiçbirinde hasta mobilitesini doğrudan merkeze alan özel tahliye organizasyonlarının belirgin olmadığı tespit edilmiştir. Bu durum, sağlık yapılarında yangın güvenliğinin yalnızca kaçış mesafeleri ve çıkış sayıları üzerinden değil, aynı zamanda hasta hareketliliği, sedye transferi ve yatay tahliye gereksinimleri üzerinden de değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, sağlık yapılarında yangın tahliyesinin yalnızca kaçış yolları ve çıkış kapasitesi üzerinden değerlendirilemeyeceğini ortaya koymuştur. Hastaneler, farklı hareket kabiliyetlerine sahip kullanıcıları aynı anda barındıran karmaşık yapılar olduğundan, tahliye performansını belirleyen temel unsur kullanıcıların fiziksel hareket yetenekleri ile mekânsal organizasyon arasındaki ilişkidir. Bu nedenle sağlık yapılarında yangın güvenliği, diğer yapı türlerinden farklı olarak hasta mobilitesini merkeze alan bütüncül bir yaklaşım gerektirmektedir.

Araştırma sonuçları, mevcut hastane planlamalarında dolaşım sistemlerinin büyük ölçüde günlük kullanım ihtiyaçlarına göre şekillendiğini göstermektedir. Oysa olağanüstü durumlarda ortaya çıkan kullanıcı davranışları, hasta transfer süreçleri ve sağlık hizmetinin kesintisiz sürdürülmesi gerekliliği farklı mekânsal ihtiyaçları beraberinde getirmektedir. Bu durum, sağlık yapılarında yangın güvenliğinin yalnızca yönetmeliklerin öngördüğü minimum gerekliliklerin sağlanmasıyla değil, aynı zamanda acil durum senaryolarının tasarım sürecine entegre edilmesiyle mümkün olabileceğini göstermektedir. Çalışmanın ortaya koyduğu en önemli sonuçlardan biri, hareket kabiliyeti sınırlı kullanıcıların tahliye süreçlerinin mimari

tasarım kararlarıyla doğrudan ilişkili olmasıdır. Özellikle sedye veya yatakla taşınan hastaların bulunduğu birimlerde tahliye sürecinin temel amacı binanın tamamen boşaltılması değil, hastaların güvenli koşullar altında sağlık hizmetinin devam edebileceği alanlara aktarılmasıdır. Bu nedenle sağlık yapılarında tahliye kavramının yeniden ele alınması ve kullanıcıların yapı dışına çıkarılmasından ziyade güvenli alanlara yönlendirilmesini esas alan yaklaşımların geliştirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda gelecekteki sağlık yapılarında hasta hareketliliği tasarımın temel girdilerinden biri olarak kabul edilmelidir. Mimari planlama sürecinde güvenli sığınma alanlarının oluşturulması, yatay tahliye yaklaşımının güçlendirilmesi, alternatif dolaşım senaryolarının geliştirilmesi ve kritik birimlerin acil durum performansına göre konumlandırılması önerilmektedir. Ayrıca yangın güvenliği değerlendirmelerinde yalnızca yönetmelik kriterlerine değil, hasta mobilitesi ve sağlık hizmetinin sürekliliği gibi kullanıcı odaklı parametrelere de yer verilmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında incelenen plan tipleri arasında mutlak bir üstünlükten söz etmek mümkün değildir. Bununla birlikte doğrusal koridor sistemlerinin yön bulmayı kolaylaştırdığı, modüler plan şemalarının alternatif dolaşım seçenekleri sunduğu ve merkezi hol etrafında gelişen plan organizasyonlarının ise farklı kullanıcı hareketlerini ortak alanlarda toplama eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak sağlık yapılarında güvenli tahliye, teknik sistemler ile mimari tasarım kararlarının birlikte ele alındığı disiplinler arası bir yaklaşım gerektirmektedir. Hasta mobilitesini merkeze alan tasarım anlayışının yaygınlaşması, gelecekte daha güvenli, daha dirençli ve kullanıcı ihtiyaçlarına daha duyarlı sağlık yapılarının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

Fahmi, M. I., Purushothaman, M. B., Rotimi, F. E., & GhaffarianHoseini, A. (2026). Interactions and connections of safe egress factors in hospital designs. Journal of Engineering, Design and Technology.

Geoerg, P., de Schot, L., & Lovreglio, R. (2025). Decoding hospital evacuation drills: Pre-movement and movement analysis in New Zealand. Safety Science, 181, 106720.

Karim, R., Daniel, N. M., Khan, M., & Sheikh, M. A. (2022). Fire safety status and evacuation of medical facility considering elevated oxygen concentrations. Research Square.

Kwak, J., Lees, M., Cai, W., Pourghaderi, A. R., & Ong, M. E. (2021). Estimating horizontal movement performance of patient beds and the impact on emergency evacuation time. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 22, 6331–6342.

Anestezi Webline. Yoğun bakım üniteleri. Erişim tarihi: 28 Mayıs 2026, https://anesteziwebline.com/halka-ozel/yogun-bakim-uniteleri/

Erciyes Üniversitesi Hastanesi. Gevher Nesibe Hastanesi kat planı. Erişim tarihi: 24 Mayıs 2026,https://hastaneler.erciyes.edu.tr/EditorUpload/Files/e24c1f50-62a7-4537-8579-8b2ff8edbee9.jpg

Manisa Celal Bayar Üniversitesi Hafsa Sultan Hastanesi. Hastane kat planı. Erişim tarihi: 28 Mayıs 2026, https://hastane.mcbu.edu.tr/Sayfa/Hastane-Kat-Plani

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Hastanesi. Zemin kat planı. Erişim tarihi: 25 Mayıs 2026, https://hastane.nku.edu.tr/kategoriler/kat-planlari/zemin-kat/34

StockSnap. Wheelchair hospital [Fotoğraf]. Erişim tarihi: 25 Mayıs 2026, https://stocksnap.io/photo/wheelchair-hospital-M38DGA9LK7

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Digital Ecosystems for Sustainable Cities: Digital Twin Integration in Climate and Resource Management

Ebru KILIÇ BAKIRHAN [1]

Abstract

The built environment is inherently a holistic structure comprising multiple systems and their mutual interactions. Natural and built environments can come into conflict due to global factors such as climate change, escalating waste generation, and rising energy consumption. However, through accurate and innovative solution proposals, it is possible for these two domains to operate in harmony and to develop solutions for global challenges.

This study, which focuses on energy, waste, and climate nexus and incorporates social participation and community resilience, examines potential solutions that can be developed by digital twins (DT). Supported by contemporary research articles and real-world implementations, this review seeks answers to how current architecture can shape and contribute to the future. At this stage, the challenges and research gaps in the utilization of DT technologies are also explicitly addressed.

In conclusion, it is demonstrated that DT technologies can mitigate the urban heat island effect during the climate change adaptation process. Furthermore, they can increase sorting accuracy in construction and demolition waste (CDW) to 85–95% through smart selective demolition techniques, reduce building energy consumption by 30–40%, yield a 25% saving in operational costs alongside a 20–30% reduction in dismantling costs, and improve material recovery by 15–25%. The findings of this study offer actionable insights suitable for use by architects, engineers, stakeholders, and decision-makers.

Keywords: Digital twin, circular economy, climate adaptation, energy efficiency, sustainable cities.

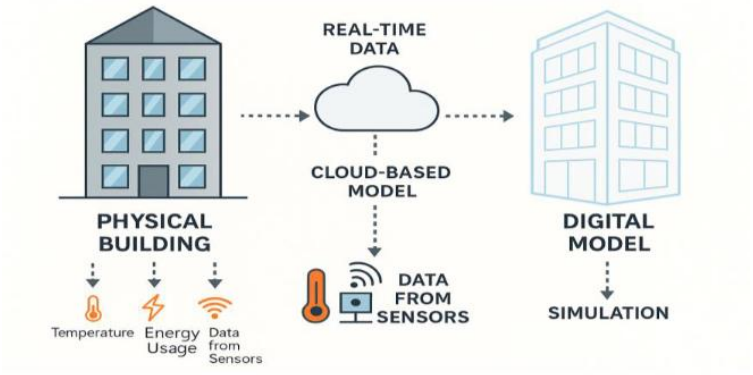
[1] Res. Assist., Karabuk University, Department of Architecture, Orcıd: 0000-0003-0650-8297 E-mail: ebrukilic@karabuk.edu.tr

GİRİŞ

Fiziksel bir varlığın, sürecin veya sistemin sanal ve dinamik bir kopyasını temsil eden teknolojilere "dijital ikiz" (digital twin, Dİ) denilmektedir. Bu kopyalar, gerçek zamanlı sensörlerin sağladığı veriler aracılığıyla sürekli güncellenir ve yapı sektörü açısından bakıldığında bu durum, binanın yaşam döngüsü boyunca kapsamlı bir izleme, analiz etme ve optimizasyon imkânı sunar (Ekinci, 2025). Bu ileri teknoloji sayesinde akıllı şehirlerde Endüstri 4.0'ın etkili olarak uygulanmasını sağlayan çift yönlü veri akışı sağlanır ve gerçek zamanlı yönetim yeteneklerinin bulunması Dİ'yi geleneksel dijital modellerden farklı kılar (Sepasgozar, 2021). Bu teknoloji sayesinde malzeme akışları ve kaynak kullanımı hakkında kapsamlı bilgiler elde edilebilir, böylece inşaat sektöründe döngüsel ekonomi modelinin benimsenmeyi kolaylaşır (Chen ve Huang, 2020; Talla ve McIlwaine, 2022).

Yapılı çevre doğası gereği birçok sistemi bünyesinde barındıran ve bunların birbiriyle olan etkileşiminden oluşan bütüncül bir yapıdır. Doğal ve yapılı çevreler iklim değişikliği, atık üretiminde ve enerji tüketiminde artış gibi küresel ölçekte meydana gelen etkenlerden ötürü birbiriyle çatışabilmektedir. İnşaat sektörü Avrupa Birliği (AB) çerçevesinde toplam doğal kaynak tüketiminin yarısından ve su tüketiminin %16'sından (Aksel Çiçekçi, 2020), dünya genelinde her yıl milyonlarca ton atık üretiminden (Gulghane ve Khandve, 2015), toplam enerji tüketiminin %40'ından (Aksel Çiçekçi, 2020) ve dünya genelinde iklim değişikliğini tetikleyen toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %37'sinden (Bozkurt ve Coşgun, 2025) sorumludur. Bu veriler yapılı çevreye yönelik acil müdahalelere ve önlemlere ihtiyaç olduğunu açıkça kanıtlamaktadır. Doğru ve inovatif çözüm önerileriyle küresel sorunlara çözüm önerileri geliştirilmesi mümkündür.

Yapı sektörüne entegre edilebilen Dİ, optimizasyon süreçleri ile bina tasarımına ve yenileme stratejileri ile mevcut yapılara katkı sunarak çevresel sorunlar için önemli gelişmelerin kaydedilmesini sağlayabilmektedir (Jahangir vd., 2024). Ayrıca bina ve şehir ölçeklerinde kullanılabilen bu teknoloji, performansı izlemek, simüle ve optimize etmek gibi işlevlerde kullanılabilmektedir (Şekil 1). Böylece yapılı çevrede enerji tüketimi ve karbon emisyonları açısından sürdürülebilirliğe katkı sunabilmektedir (Arsecularatne vd., 2024a; Liu vd., 2026). Operasyonel süreçteki iyileştirmelere ek olarak Dİ, yapı yetkilileri için proaktif uygunluk kontrollerini gerçekleştirebilmekte ve düzenleyici standartlara uyumu sağlayabilmektedir. Böylece geleceğin sürdürülebilir kentlerinin planlanma girişimlerine katkı sunabilmektedir (Ammar vd., 2022). Geleceğin sürdürülebilir kentlerinin inşasında Dİ'nin katkı sunduğu sahalar arasında; çeşitli iklim senaryolarının simüle edilmesi, iklime duyarlı tasarım stratejilerinin önünün açılması (Omar, 2025), kentsel ısı adası etkisinin azaltılması, mikroklima etkilerinin giderilmesi, akıllı seçici yıkım teknikleri işe inşaat ve yıkım atıkları (İYA)'nın minimize edilmesi, tekil binalarda kentsel ve küresel ölçeklere kadar enerji verimliliğinin teşvik edilmesi sıralanabilir (Gonzalez-Caceres vd., 2023).

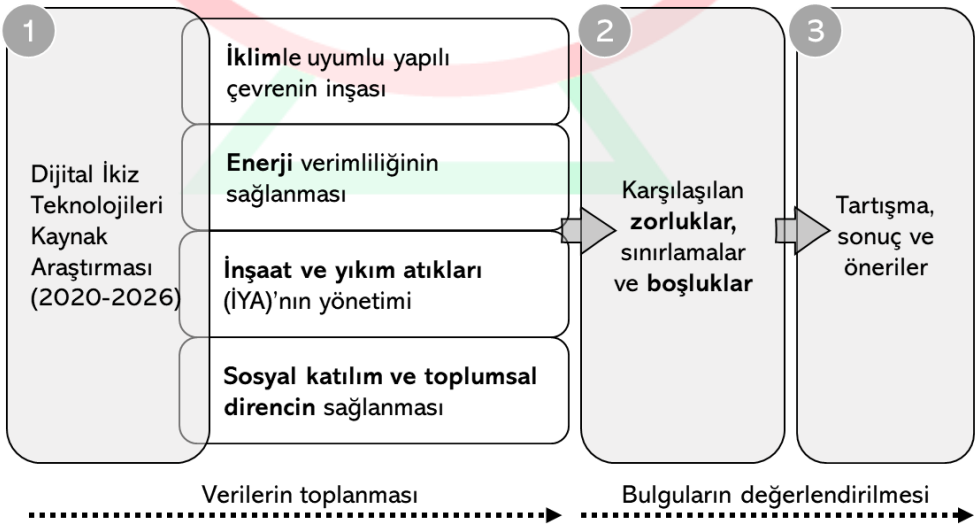


Şekil 1. Dijital ikiz teknolojisinin çalışma mantığı (Aleke vd., 2025)

Bu derleme, yapılı çevrede enerji verimliliğinin, iklim direncinin ve İYA yönetiminin optimize edilmesi amacıyla Dİ teknolojilerinin uygulanmasına ilişkin güncel araştırmaları şekilde özetlemektedir. Bu araştırma, Dİ sistemlerinin kaynak geri kazanımını artırmak, atık oluşumunu en aza indirmek ve kentsel sürdürülebilirliği iyileştirmek için gerçek zamanlı izleme ve veriye dayalı karar verme süreçlerini nasıl etkilediğini incelemektedir. Çalışmanın hedef kitlesi, sürdürülebilir kalkınma için yenilikçi çözümler arayan akademisyenler, sektör profesyonelleri ve politika yapıcılarıdır.

YÖNTEM

Çalışmanın kapsamı, enerji verimliliği, iklim direnci, İYA yönetimi ile toplumsal katılım olmak üzere dört kategori olarak belirlenmiştir. Bu dört kategori kapsamında gerçek zamanlı izleme ve öngörücü optimizasyon yoluyla enerji verimliliğini artırma, aşırı hava olaylarının etkilerinin simülasyonları yoluyla iklim direncinin geliştirilmesi, akıllı seçici yıkım teknikleri ile İYA'nın yönetimi ele alınmakta ve son olarak paydaş iş birliği ile uyarlanabilir kentsel planlamayı konu edinen toplumsal ve sosyal direncin etkileri araştırılmaktadır. Ayrıca bu çerçevede karşılaşılan zorluklar, sınırlar ve araştırma boşlukları ayrı bir başlık altında incelenmiştir. Çalışma, bu alanlarda başarılı Dİ uygulamalarının somut faydalarını göstermek ve mevcut sınırlamaları ele almak için son altı yıla ait güncel vaka çalışmalarını içermektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Çalışmanın metodolojisi

BULGULAR

Bu bölümde yukarıda bahsi geçen dört kategori, literatürden elde edilen bilgiler ışığında, başlıklar halinde ele alınmıştır.

İklimle Uyumlu Yapılı Çevrenin İnşası

Çeşitli ölçeklerde gerçek zamanlı verileri, gelişmiş simülasyonları ve öngörüsel analitiği bir araya getiren Dİ, yapılı ortamlarda iklim direncini artırmak için dönüştürücü bir araç işlevi görür (Ali vd., 2025). Uygulamalar, küçük ölçekli bina varlıklarından şehir çapındaki ağlara kadar uzanır ve iklimle ilgili risklerin azaltılması, uyum sağlanması ve proaktif yönetimine odaklanır.

Yeşil çatılar, serin kaldırımlar ve kentsel ağaçlandırmanın artırılması gibi müdahalelerin fiziksel olarak hayata geçirilmeden önce etkinliğini değerlendirmek üzere Dİ, şehirlerin yüksek kaliteli sanal kopyalarının oluşturulmasına olanak tanır (Hossain vd., 2026). Bu sistemler, yerel ısı risklerine göre uyarlanmış erken uyarı sistemlerinin tasarımını ve ısıya dayanıklı bina yönetmeliklerinin oluşturulmasını kolaylaştırır (Hossain vd., 2026). Bulgular, Dİ'lerin karbonsuzlaştırma çabalarına rehberlik edebileceğini göstermektedir (Ali vd., 2025). Diğer yandan Dİ, kıyı veya alçak bölgelerde bulunan şehirler için aşırı iklim olaylarına karşı artan duyarlılığı yönetmek amacıyla da kullanılmaktadır. Gerçek zamanlı sensör verilerini üç boyutlu şehir modelleriyle entegre eden Dİ, paydaşların sel ve diğer iklim felaketlerine etkili bir şekilde müdahale etmesini sağlayan kapsamlı erken uyarı sistemleri sunar (Riaz vd., 2023).

Kentsel ısı adası etkisi, sıcak hava dalgaları, yangın güvenliği, fırtınalar, taşkınlar ve küresel ısınmaya yönelik uzun vadeli adaptasyon sürecinde Dİ teknolojilerinden faydalanılabilmektedir (Tablo 1).

Tablo 1 *– İklim Değişikliğine Adaptasyon Kapsamında Dİ Teknolojilerinden Faydalanılması*

Kentsel Isı Adası	Yangın Güvenliği	Fırtına ve Taşkınlar
Serin çatı, yeşil duvar, termal kütle gibi fiziksel uygulamalardan önce sanal olarak test edilmesi (Hossain vd., 2026)	Yaban hayatı-kentsel alan arayüzü gibi yüksek yangın riskli alanların gerçek zamanlı takibi	Sel bariyerlerinin yüksekliklerinin belirlenmesi, mekanik sistemlerinin su geçirmezliklerinin sağlanması (Aleke vd., 2025)
Aşırı ısınma riski fazla olan bina kümelerinin belirlenerek yapısal soğutma müdahalelerine imkân tanıması (Stergiopoulos vd., 2025)	Duman ve ısı yoğunluğu simülasyonları (Seong vd., 2025)	Heyelanı tetikleyen yapısal stres ve deplasmanın devamlı izlenmesi (Argyroudis vd., 2021; Riaz vd., 2023).
Yapı malzemelerinin nem, UV maruziyeti altındaki davranışlarının tahmini (Ali vd., 2025; Omar, 2025).	Bina verilerinin meteorolojik sensörlerle birleştirilmesi (Seong vd., 2025)	

Yukarıda sıralanan stratejiler yardımıyla Dİ, bina yönetimini reaktif durumdan proaktif ve önleyici bir konuma taşır ve artış gösteren iklim olaylarına karşı yapıların direnç kazanmasına olanak sağlar (Aleke vd., 2025, Hossain vd., 2026).

Operasyonel Enerji Verimliliği

Binalarda enerji verimliliği için Dİ uygulamaları, tasarımdan işletmeye ve yıkıma kadar tüm yaşam döngüsünü kapsamaktadır. Literatürde, Dİ'lerin enerjiyle ilgili uygulamaları dört ana başlık altında sınıflandırılmaktadır. Bunlar, optimizasyon tasarımı, kullanıcı konforu, bina işletme ve bakımı ve enerji tüketim simülasyonlarıdır (Bortolini vd., 2022). Optimizasyon tasarımı, inşaat öncesinde maksimum verimlilik için mimari ve mühendislik alternatiflerinin test edilmesine olanak tanır. Kullanıcının konforu ise enerji tüketiminden bağımsız düşünülemez. Bu nedenle enerji tasarrufu ile termal, görsel, işitsel konforun ve iç ortam hava kalitesi arasındaki dengelemenin birlikte yönetilmesi gerekir. Uzun vadeli sistem performansını ve verimliliğini sağlamak için binanın kullanım ve bakım süreçlerinin sistematik olarak yönetilmesi gerekir. Son olarak enerji tüketimine dair simülasyonlarla çeşitli iklim senaryoları özelinde gelecekteki enerji taleplerini tahmin etmek için sanal kopyaları kullanılmaktadır. Bunların tümünü Dİ teknolojileri ile gerçekleştirebilmek mümkündür. Aktif enerji yönetimi için gerçek zamanlı sensör verilerini bütünleştiren Dİ, statik YBM'yi dinamik sistemlere dönüştürür. Bu yaklaşım, termal konfor ile enerji tasarrufunu geleneksel kural tabanlı stratejilerden daha etkili bir şekilde dengeler (Cespedes-Cubides ve Jradi, 2024).

Sürekli izleme, enerji israfına yol açan sistem verimsizliklerinin erken tespit edilmesini sağlar. Dİ'ler, HVAC veya aydınlatma sistemlerindeki anormallikleri, önemli enerji kaybına yol açmadan önce tespit ederek öngörücü bakımı kolaylaştırır (Arsecularatne vd., 2024b; Ba vd., 2025). Gelişmiş Dİ modelleri, aydınlatma ve iklim kontrolü gibi enerji yoğun hizmetlerin yalnızca kullanılan alanlarda aktif olmasını sağlamak için gerçek zamanlı kullanıcı davranışını sürece dahil eder, böylece konfordan ödün vermeden kaynak kullanımını optimize eder (Arsecularatne vd., 2024b; Borodinecs vd., 2024). Araştırmalar, Dİ uygulamalarının gelişmiş iç mekân iklim kontrolü ve öngörücü bakım sayesinde bina enerji kullanımını %30'a kadar azaltabileceğini ve işletme maliyetlerini %25 düşürebileceğini göstermektedir (Aleke vd. 2025).

Akıllı Atık Yönetimi

Yapılı çevrede İYA yönetimini konu alan Dİ uygulamaları, geleneksel yıkımdan akıllı seçici söküm ve döngüsel ekonomi modellerine geçişe odaklanmaktadır. Bu uygulamalar, atık yaşam döngüsünün tamamını optimize etmek için gerçek zamanlı veri entegrasyonu, YBM ve Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojilerinden yararlanmaktadır.

Binanın ömrünün son aşamasının hassas bir şekilde planlanmasına olanak tanıyan yüksek kaliteli simülasyonlar sağlayan Dİ, atık hacmini değerlendirir ve en uygun yıkım sıralarını planlar. Bu yaklaşım söküm maliyetlerini %20–30 oranında azaltabilmektedir (Abanda vd., 2024; Torres-Polo ve Ortíz, 2026). Ayrıca YBM ve IoT'yi entegre eden Dİ'ler, üretilen atık türlerini ve miktarlarını doğru bir şekilde tahmin etmek için gerçek zamanlı bilgi toplama ve analizi sağlar (Abanda vd., 2024). Buna ek olarak Dİ'ler, atık bertaraf rotalarını planlamak için de kullanılmaktadır. Nakliye sürecinin verimini artıran bu strateji, lojistikle ilişkili karbon ayak izini azaltmaktadır (Abanda vd., 2024).

Döngüsel ekonomi için hayati önem taşıyan malzemeye özgü bilgilerin depolandığı Dİ, bir tür veri havuzu işlevi görür. Bu teknoloji, fiziksel yapı bileşenlerini kimyasal bileşim, dayanıklılık ve önceki kullanım bilgilerini barındıran dijital malzeme pasaportlarına bağlar (Naghibalsadati vd., 2024; Talla ve McIlwaine, 2022). Bu, yıkım aşamasında malzemelerin yeniden kullanımına ve yüksek değerli geri dönüşümüne olanak tanır (Talla ve McIlwaine, 2022). Bir Dİ sistemi, içindeki blok zinciri destekli izlenebilirlik sayesinde malzeme geri kazanım oranlarını %15–25 artırabilmektedir (Torres-Polo ve Ortíz, 2026).

Atıkların fiziksel olarak ayrıştırılmasını yönetmek için Dİ, görsel otomasyon ve robotik gibi ileri teknolojileri entegre eder. Dİ çerçevesi içindeki makine görsel otomasyonu, atık ayırma doğruluğunu %85–95'e çıkararak geri dönüştürülmüş agregaların kirlenmesini önemli ölçüde azaltabilmektedir (Torres-Polo ve Ortíz, 2026). İzleme platformları, malzemelerin yıkım sahasından geri dönüşüm tesislerine veya ikincil pazarlara taşınırken gerçek zamanlı olarak takip edilmesini sağlar (Su vd., 2025). Yükleniciler ve geri dönüşümcülerin iki yönlü bilgi paylaşımına olanak tanıyan Dİ destekli iş akışları, geri kazanılmış atıktan elde edilen ürünler ile ihtiyaçları gerçek zamanlı olarak eşleştirir (Su vd., 2025). Bunun yanı sıra bu platformlar, lojistik sağlayıcılar için özel yönetim araçları ve kamu kurumları için uyumluluk ve sürdürülebilirliği sağlamak üzere kapsamlı izleme sistemleri sunmaktadır (Su vd., 2025).

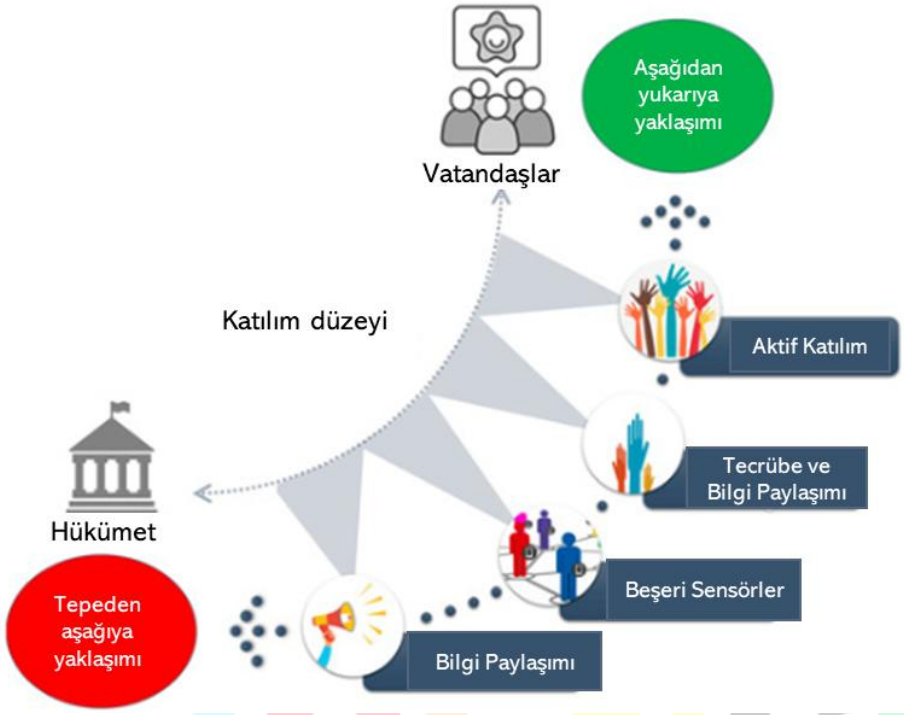
Çeşitli atık yönetimi senaryolarının küresel ısınma potansiyelini ve içsel enerjisini değerlendirmek üzere Dİ'ler çevresel etki değerlendirmelerini entegre eder (Naghibalsadati vd., 2024). Yıkım atıklarının geri dönüşümünü gerçekleştirerek, yeni inşaat hammaddelerine olan talebi doğrudan azaltır ve yapılı çevrenin uzun vadeli dayanıklılığına katkıda bulunur (Abanda vd., 2024). Özetle, Dİ, İYA yönetimini "önce depolama" yaklaşımından, malzeme geri kazanımını en üst düzeye çıkarırken operasyonel ve çevresel maliyetleri önemli ölçüde düşüren veriye dayalı bir döngüsel modele taşır (Su vd., 2025; Torres-Polo ve Ortíz, 2026).

Toplumsal-Sosyal Dayanıklılık

Güncel araştırma gündemleri, insan odaklı kentsel Dİ'yi ön plana çıkarmaktadır. Bu çerçeveler, topluluk altyapısının dayanıklılığını artırmak için doğal, fiziksel ve sosyal sistemleri bir araya getirmektedir (Ye vd., 2022). İş birliğine dayalı ticaret platformları ve simülasyon odaklı seçici söküm süreçlerini İYA açısından mümkün kılan Dİ, toplumsal ve sosyal dayanıklılığı artırır; malzeme geri kazanım oranlarını yükseltir ve döngüsel kaynak akışlarında paydaşların eşit katılımını teşvik eder (Naghibalsadati vd., 2024; Su vd., 2025; Torres-Polo ve Ortíz, 2026). Ayrıca, öngörülen iklim etkilerini görselleştirerek iş birliğine dayalı yönetişimi teşvik eder ve uyum politikalarının hem kanıta dayalı hem de adil olmasını sağlar (Hossain vd., 2026).

Bu sayede edilgen gözlemciler insan odaklı bir kentsel çerçeve içinde aktif katılımcılara dönüşmekte ve sosyal Dİ sayesinde yapılı çevrede toplumsal ve sosyal katılım kolaylaşmaktadır (Ye vd., 2022). Bu uygulamalar, kent yönetimini yukarıdan aşağıya karar alma mekanizmalarından; doğal, fiziksel ve sosyal sistemleri entegre eden iş birlikçi bir sürece kaydırmaktadır (Ye vd., 2022) (Şekil 3). Bu sayede vatandaşlar kent ölçeğindeki zorlukların çözümünde veri sağlayan birer beşerî sensör görevi görmektedirler (El-Agamy vd., 2024). Sosyal Dİ'ler sayesinde teknolojik sistemler ve kentsel deneyim arasındaki kopukluk giderilebilmektedir (Qanazi vd. 2025).

Ayrıca Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Sanal Gerçeklik (VR) gibi teknolojileri de etkileşimli olarak içerebilen Dİ, yeni düzenleme ve değişikliklere yönelik senaryoları değerlendirmeye olanak tanımaktadır (Elsehrawy vd., 2021; Hossain vd., 2026). Diğer yandan doğal afet riskleri karşısında halk ve karar vericiler arasında iş birlikçi katılımın sağlanması mümkün kılınmaktadır (Luleci vd., 2024). Akıllı sistemlerin adil kullanımı ve eşitsizliklerin gideriminde Dİ teknolojileri yardımcı olmakta ve kırılgan grupların ve kapsayıcı bir yönetişim biçiminin benimsenmesine katkı sunabilmektedir (Das ve Devadas, 2025; Zhu ve Jin, 2025).



Şekil 3. Karar vericilerin ve kent kullanıcılarının dahil olduğu sosyal dijital ikiz teknolojilerinin seviyeleri (Qanazi vd., 2025'ten uyarlanmıştır)

Dijital İkizlere Yönelik Bariyerler ve Gelecek Projeksiyonları

Dijital alanda günümüzde adından sıkça bahsettiren Dİ teknolojisi, iklim krizi, enerji verimliliği ve atık yönetimi konularında güçlü bir vizyon sunsa da yapılı çevrede tam ölçekli ve etkin bir şekilde uygulanmasının önünde aşılması gereken akademik ve pratik engeller bulunmaktadır.

Kentsel alanların karmaşık yapısı, Dİ'lerin dinamik afet senaryolarını canlandırmasını zorlaştırmaktadır. Bu süreç, yönetilmesi güç olan bulut mimarilerini zorunlu hale getirmektedir (Argyroudis vd., 2021).

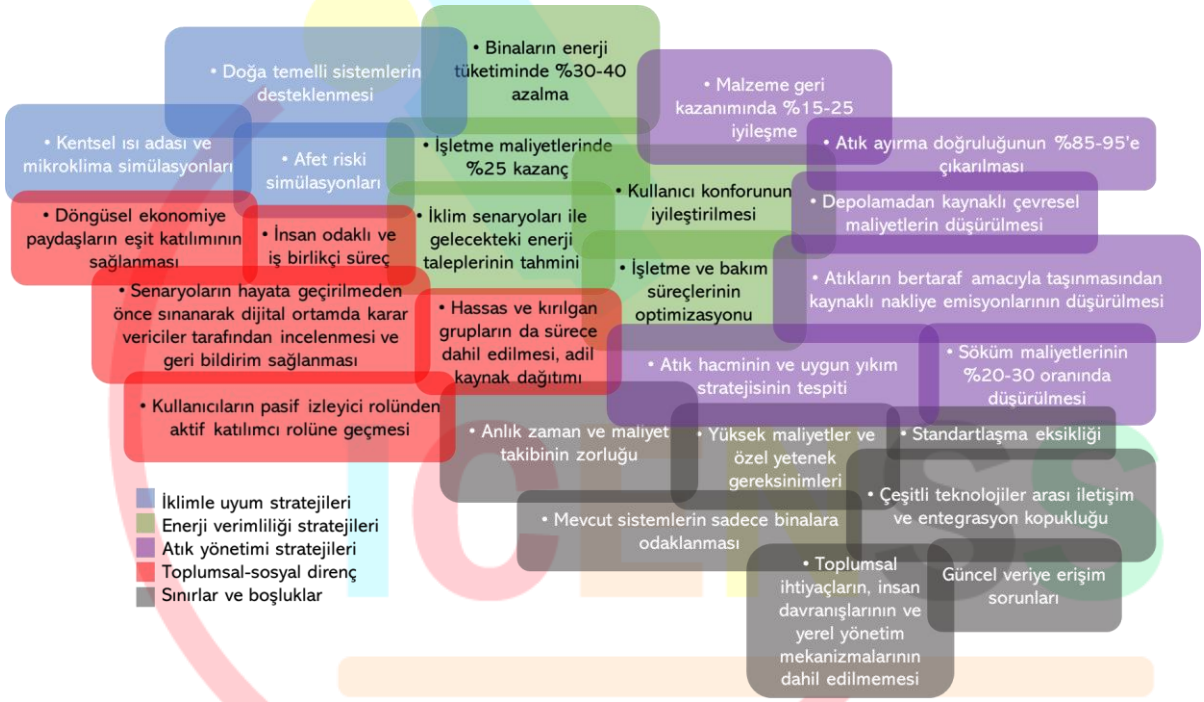
Farklı kentsel sistemler arasında standart veri formatlarının eksikliği, birlikte çalışabilirlik sorunu ve toplanan verilerin optimize edilememesi sürekli bir dijital ekosistem kurulmasının önünde engel teşkil etmektedir (Therias ve Rafiee, 2023; Omrany vd., 2025; Zhu ve Jin, 2025). Süreci küresel ölçekte standartlaştıracak, ölçeklenebilirliği kolaylaştıracak ortak kılavuzların yokluğu, bu teknolojiden tam verimle faydalanılmasını kısıtlamaktadır (Omrany vd., 2025). Ayrıca bu tür teknolojilerin tutarlı bir şekilde farklı coğrafyalarda yaygın olarak uygulanabilmesi için ulusal düzeyde belirlenmiş referans değerleri eksiktir (Argyroudis vd., 2021).

Mevcut Dİ uygulamaları genelde fiziksel altyapıya odaklanmaktadır. Oysa toplumsal direncin inşası için doğal, fiziksel ve sosyal sistemlerin insan odaklı bütüncül bir yaklaşımla dijital modele entegre edilmesi gerekmektedir (Ye vd., 2022).

Teknolojinin yerel yönetişimlerce ele alınması, kapsayıcılık ve adil kaynak dağılımının sağlanması ve öncelikli kullanıcı ihtiyaçlarının belirlenmesi kritik birer araştırma alanı olarak güncelliğini korumaktadır (Therias ve Rafiee, 2023; Zhu ve Jin, 2025).

Veri güvenliği ve yetkilendirme sorunlarını çözme aşamasında blok zincir gibi teknolojiler umut vadedici olsa da bu tür gelişmiş entegrasyonların pazarda ticari olgunluğa erişmesinin önünde en az on yıllık bir süreç olduğu öngörülmektedir (Argyroudis vd., 2021).

Buraya kadar bahsedilen ve Dİ'nin yakından ilişkili olduğu iklim, enerji, atık ve toplum çerçevesinde ele alınan dört temel alan ve konuya ilişkin sınırlamalar ve boşluklar Şekil 4'te özetlenmiştir.



Şekil 4. Yapılı çevrede iklim, enerji, atık ve sosyal çerçevede Dİ teknolojilerinin sağladığı avantajlar ve mevcut sınırlar

SONUÇ VE ÖNERİLER

Akıllı altyapı yönetiminde Dİ teknolojisinin dönüştürücü rolünü aktaran bu çalışma; enerji verimliliğinin artırılması, döngüsel ekonomi ilkelerinin yaygınlaştırılması ve kentsel alanlarda iklim ile toplum odaklı dirençliliğin güçlendirilmesi eksenlerine odaklanmaktadır. Geliştirilen bu yaklaşım, altyapı yönetim süreçlerinde verimlilik ile operasyonel dayanıklılık arasındaki hassas dengenin kurulmasında Dİ'lerin kritik bir işlev gördüğünü kanıtlamakta olup iklim dirençli kalkınma hedefleriyle bağdaşmaktadır.

Literatürdeki sayısal verilerle desteklenen çalışmada; Dİ teknolojileri sayesinde binalarda enerji tüketiminin %30-40 oranında düşürülebileceği, işletme maliyetlerinin %25 ve söküm maliyetlerinin %20-30 oranında azaltılabileceği vurgulanmıştır. Ayrıca Dİ'nin sunduğu akıllı seçici yıkım teknikleri sayesinde atık ayırma doğruluğu %85-95 oranında artırılabilirken

malzeme geri kazanımında %15-25 iyileşme sağlanabilmektedir. Ancak söz konusu gelişmelerin en üst düzeyde hayata geçirilebilmesi için belirli sistemsel ve yönetimsel engellerin aşılması gerekmektedir. Tekil varlık düzeyinde çalışan bağımsız Dİ'lerin, kent ölçeğindeki makro karar alma platformlarıyla kesintisiz olarak iletişim kurabilmesi ve veri uyuşmazlıklarının giderilmesi, çözülmesi gereken engellerin başında gelmektedir. Ayrıca sürecin başarısı, hem güven verici ve sistematik veri yönetişim mekanizmaları hem de vatandaş katılımını destekleyen eşitlikçi bir temele sahip platformların varlığını destekler niteliktedir. Farklı dijital modellerin bütüncül ve uyumlu kentsel bir Dİ ekosistemine dönüştürülmesi, modern kentsel planlama için benzersiz fırsatlar barındırmaktadır. Karar vericilerin kentsel sistemler arasındaki karşılıklı karmaşık bağımlılıkları analiz etmesi ve müdahalelerin uzun vadeli etkilerinin çok daha isabetli şekilde tespit edilebilmesi bu fırsatlardan bazılarıdır.

Öte yandan, Dİ'lerin sunduğu avantajların mevcut yapı stokuna, özellikle de ömrünü tamamlamış veya yıkılması planlanan binalara, aktarılması ciddi finansal ve teknik bariyerleri beraberinde getirmektedir. Yenileme amaçlı oluşturulan dijital projelerin yüksek maliyetleri ve bu yapılara ait hazır dijital modellerin bulunmaması en büyük açmazlardandır. Bu engellerin aşılması için mevcut yapıların veri toplama ve model üretme süreçlerinde yenilikçi yaklaşımlar geliştirilmelidir. Eksik veya kayıp bina bilgilerinin yeniden oluşturulmasında, gelişmiş geometrik tarama teknolojilerinden ve makine öğrenmesi algoritmalarından yararlanılmalıdır. Özellikle tarihi yapılar için kapsamlı Dİ'ler üretebilmek adına, standartlaştırılmış ve çift yönlü bilgi akışına izin veren veri değişim protokolleri geliştirilmeli ve paydaşlar arası iş birlikleri devreye sokulmalıdır.

Gelecekteki bilimsel araştırmaların, Dİ'lerin uzun vadeli sürdürülebilirlik performanslarını hayata geçirebilecek kapsamlı metodolojiler üretmesi beklenmektedir. Bu noktada, kaynak verimliliği ve enerji yönetimi gibi alanlardaki kazanımları sadece kısa vadeli pilot projeler üzerinden değerlendirmek yetersizdir. Araştırma stratejileri, Dİ uygulamalarını binaların yalnızca tasarım ve inşaat evreleriyle sınırlamamalı; yıkım, nakliye, bertaraf ve geri dönüşüm süreçlerini de kapsayacak şekilde genişletmelidir. Böylece, döngüsel mimarinin temel bir gerekliliği olarak, yapıların tüm yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan çevresel ve ekonomik etkiler bütüncül ve bir yaklaşımla ölçülebilecektir.

KAYNAKÇA

Abanda, F. H., Jian, N., Adukpo, S. E., Tuhaise, V. V., ve Manjia, M. B. (2024). Digital twin for product versus project lifecycles' development in manufacturing and construction industries. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *36*(2), 801–831. doi: 10.1007/s10845-023-02301-2

Aleke, C. U., Ovie, E. O., Asere, J. B., Oriakhi, E. A., Igah, G. C., Ajibade, O. O., ve Egbuna, I. K. (2025). Digital Twins for Climate-Resilient Infrastructure: Simulating Environmental Impact on Buildings. *Asian Journal of Geographical Research*, *8*(2), 132–141. doi: 10.9734/ajgr/2025/v8i2270

Ali, E., Mansour, A., Abdelkader, E. M., Elshaboury, N., ve Zayed, T. (2025). Digital Twin for Climate Resilience: Transforming Smart Cities for a Sustainable Future. *The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences/International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 139–145. doi: 10.5194/isprs-archives-xlviii-g-2025-139-2025

Ammar, A., Nassereddine, H., AbdulBaky, N., AbouKansour, A., Tannoury, J., Urban, H., ve Schranz, C. (2022). Digital Twins in the Construction Industry: A Perspective of Practitioners and Building Authority. *Frontiers in Built Environment*, *8*. doi: 10.3389/fbuil.2022.834671

Argyroudis, S., Mitoulis, S. A., Chatzi, E., Baker, J. W., Brilakis, I., Gkoumas, K., Vousdoukas, M., Hynes, W., Carluccio, S., Keou, O., Frangopol, D. M., ve Linkov, I. (2021). Digital technologies can enhance climate resilience of critical infrastructure. *Climate Risk Management*, *35*, 100387–100387. doi: 10.1016/j.crm.2021.100387

Arsecularatne, B. P., Rodrigo, N., ve Chang, R. (2024a). Review of reducing energy consumption and carbon emissions through digital twin in built environment. *Journal of Building Engineering*, *98*, 111150–111150. doi: 10.1016/j.jobe.2024.111150

Arsecularatne, B. P., Rodrigo, N., ve Chang, R. (2024b). Digital Twins for Reducing Energy Consumption in Buildings: A Review. *Sustainability*, *16*(21), 9275–9275. doi: 10.3390/su16219275

Ba, L., Tangour, F., Abbassi, I. E., ve Absi, R. (2025). Analysis of Digital Twin Applications in Energy Efficiency: A Systematic Review. *Sustainability*, *17*(8), 3560–3560. doi: 10.3390/su17083560

Borodiņecs, A., Palcikovskis, A., Krūminš, A., ve Ļebedeva, K. (2024). Optimizing office building operations: a framework for continuous dynamic energy simulations in decision-making for efficiency. *Frontiers in Built Environment*, *10*. doi: 10.3389/fbuil.2024.1405182

Bortolini, R., Rodrigues, R., Alavi, H., Vecchia, L. F. D., ve Forcada, N. (2022). Digital Twins' Applications for Building Energy Efficiency: A Review. *Energies*, *15*(19), 7002–7002. doi: 10.3390/en15197002

Cespedes-Cubides, A. S., ve Jradi, M. (2024). A review of building digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage [Review of *A review of building*

digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage]. *Energy Informatics*, *7*(1). Springer Nature. doi: 10.1186/s42162-024-00313-7

Chen, Z., ve Huang, L. (2020). Digital Twin in Circular Economy: Remanufacturing in Construction. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, *588*(3), 32014–32014. doi: 10.1088/1755-1315/588/3/032014

Das, D. K., ve Devadas, V. (2025). Smart and Resilient Infrastructure in the Wake of Climate Change. *Urban Planning*, *10*. doi: 10.17645/up.11373

Ekinci, C. E. (2025). Yapıların dijital ikizleri: kapsamlı bir genel bakış. *NWSA Academic Journals*, *20*(1), 13–37. doi: 10.12739/nwsa.2025.20.1.2a0202

El-Agamy, R. F., Sayed, H. A., Akhatatneh, A. M. A., Aljohani, M., ve Elhosseini, M. A. (2024). Comprehensive analysis of digital twins in smart cities: a 4200-paper bibliometric study. *Artificial Intelligence Review*, *57*(6). doi:10.1007/s10462-024-10781-8

Gonzalez-Caceres, A., Malakhatka, E., ve Hellebro, H. (2023). The use of synthesised data for the development of Digital Twin: Chalmers student house case study. *Journal of Physics Conference Series*, *2600*(8), 82008–82008. doi:10.1088/1742-6596/2600/8/082008

Hossain, M. I., Hossan, M. R., Shaon, Z. H., ve Ferdous, N. (2026). Linking digital twin paradigm for urban heat monitoring and policy integration to building smart city climate resilience. *Discover Cities*, *3*(1). doi:10.1007/s44327-025-00179-8

Jahangir, M., Schultz, C., ve Kamari, A. (2024). A review of drivers and barriers of Digital Twin adoption in building project development processes [Review of *A review of drivers and barriers of Digital Twin adoption in building project development processes*]. *Journal of Information Technology in Construction*, *29*, 141–178. Conseil International du Bâtiment. doi: 10.36680/j.itcon.2024.008

Liu, K. P., Lü, Q., Li, H., Fu, Q., ve Zhou, H. (2026). Applıcatıons of dıgıtal twın (Dİ) for energy savıng and carbon reductıon over buıldıng lıfe cycle: a revıew. *Journal of Green Building*, *21*(1), 93–122. doi: 10.3992/jgb.21.1.93

Luleci, F., Sevim, A., Özgüven, E. E., ve Çatbaş, F. N. (2024). Community Twin Ecosystem for Disaster Resilient Communities. *Smart Cities*, *7*(6), 3511–3546. doi:10.3390/smartcities7060137

Naghibalsadati, F., Gitifar, A., Ray, S., Richter, A., ve Ng, K. T. W. (2024). Temporal evolution and thematic shifts in sustainable construction and demolition waste management through building information modeling technologies: A text-mining analysis. *Journal of Environmental Management*, *369*, 122293–122293. doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122293

Omar, O. (2025). Digital Twins for Climate-Responsive Urban Development: Integrating Zero-Energy Buildings into Smart City Strategies. *Sustainability*, *17*(15), 6670–6670. doi: 10.3390/su17156670

Omrany, H., Mehdipour, A., Oteng, D., ve Al-Obaidi, K. M. (2025). The uptake of urban digital twins in the built environment: a pathway to resilient and sustainable cities. *Computational Urban Science*, *5*(1). doi: 10.1007/s43762-025-00177-x

Qanazi, S., Leclerc, É., ve Bosredon, P. (2025). Integrating Social Dimensions into Urban Digital Twins: A Review and Proposed Framework for Social Digital Twins. *Smart Cities*, *8*(1), 23–23. doi:10.3390/smartcities8010023

Riaz, K., McAfee, M., ve Gharbia, S. (2023). Management of Climate Resilience: Exploring the Potential of Digital Twin Technology, 3D City Modelling, and Early Warning Systems. *Sensors*, *23*(5), 2659–2659. doi: 10.3390/s23052659

Sepasgozar, S. M. E. (2021). Differentiating Digital Twin from Digital Shadow: Elucidating a Paradigm Shift to Expedite a Smart, Sustainable Built Environment. *Buildings*, *11*(4), 151–151. doi: 10.3390/buildings11040151

Stergiopoulos, G., Leventopoulos, S., Karamousadakis, M., Schuster, B., ve Gritzalis, D. (2025). Enhancing Urban Heatwave Response Planning via a Graph-Based Digital Twin Approach: Spatial Dependency Risk Analysis in Vienna City. *IEEE Access*, *13*, 106590–106605. doi: 10.1109/access.2025.3580334

Su, S., Yu, C., Jiang, Y., ve Zhong, R. Y. (2025). Digital Twin-Enabled Building Demolition Waste Trading: A Demonstrative Case. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, *23*, 2245–2255. doi: 10.1109/tase.2025.3553883

Talla, A., ve McIlwaine, S. (2022). Industry 4.0 and the circular economy: using design-stage digital technology to reduce construction waste. *Smart and Sustainable Built Environment*, *13*(1), 179–198. doi: 10.1108/sasbe-03-2022-0050

Torres-Polo, M., ve Ortíz, E. G. (2026). *Computational Economics of Circular Construction: Machine Learning and Digital Twins for Optimizing Demolition Waste Recovery and Business Value*. doi: 10.3390/computation14040076

Ye, X., Du, J., Han, Y., Newman, G., Retchless, D., Zou, L., Ham, Y., ve Cai, Z. (2022). Developing Human-Centered Urban Digital Twins for Community Infrastructure Resilience: A Research Agenda. *Journal of Planning Literature*, *38*(2), 187–199. doi: 10.1177/08854122221137861

Zhu, M., ve Jin, J. (2025). Data-Driven Urban Digital Twins and Critical Infrastructure Under Climate Change: A Review of Frameworks and Applications. *Urban Planning*, *10*. doi: 10.17645/up.10109

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Shaping the Architecture of the Future with Innovative Building Materials

Ebru KILIÇ BAKIRHAN [1]

Abstract

The building materials sector is a continuously expanding and evolving field driven by advancing technology. Tracking developments in this domain provides a roadmap for architects and engineers to address current and future challenges. The objective of this study is to examine contemporary, innovative, and widely recognized building materials. The properties, application areas, and performances of these manufactured construction materials are evaluated from multiple perspectives. To achieve this, six distinct experimental research articles published in the Web of Science (WoS) database within the last six years, each receiving over one hundred citations, and focusing on the production of innovative building materials were identified.

The findings indicate that next-generation construction materials ranging from transparent wood to geopolymers, and from living materials to silica aerogels, enhance the performance of conventional building materials across various metrics. The improved properties encompass a wide spectrum, including light transmittance, mechanical strength, thermal conductivity, freeze-thaw resistance, acoustic absorption, thermal insulation, crack remediation, waste utilization, and water absorption. Conclusively, the results demonstrate that beyond-imagination solutions for the architecture of the future are within the scope of current capabilities, and that challenges can be transformed into potentials through appropriate solutions. Realizing this potential requires innovative solution proposals, extensive research, and scientific curiosity. The study findings provide strategic insights for architects, material manufacturers, material engineers, and decision-makers.

Keywords: Innovative building materials, future architecture, advanced material performance, material science, literature review.

[1] Res. Assist, Karabuk University, Department of Architecture, Orcıd: 0000-0003-0650-8297

GİRİŞ

Teknolojik gelişmelerin etkisiyle şekillenen ve geleneksel yapım yöntemlerini geliştirmeye imkân tanıyan 21. yüzyıl mimarisi, malzeme ve strüktür arasındaki ilişkiyi yeniden tanımlayan yenilikçi sistemleri beraberinde getirmektedir (Elhaman, 2025; Güdük ve Satıcı, 2022). Bu yüzyılda akıllı yapı malzemeleri, mimari tasarımın henüz başında iken sahneye çıkarak yapıların yapısal, iklimsel ve kullanıcı odaklı performans ihtiyaçlarını karşılayan ve uyarlanabilen bir konuma yükselmiştir (Topal ve Arpacıoğlu, 2020). Bu tür malzemeler, dış etkenlere karşı sergiledikleri dinamik tepkiler neticesinde yapıların çevresel şartlara göre form veya nitelik değiştirmesine imkân tanıyarak enerji verimliliği aracılığıyla mimari sürdürülebilirliğe katkı sunar (Çüçen ve Solak, 2023).

Dinamik sistemlerin sürdürülebilirliğe sağladığı bir diğer katkı ise kullanıcı konforunun iyileştirilmesidir. Doğa temelli çözümler arasında yer alan biyomimetik tasarım ilkeleri ve dikey ormanlar gibi yenilikçi çözümler, çevresel değişkenlere cevap üreten ve daha dirençli yapıların üretilmesine katkı sunan diğer teknolojilerdendir. Bu tür yaklaşımlar, biyolojik sistemlerin doğal olarak sahip olduğu optimizasyon yeteneğini binalara kazandırarak kaynak tüketiminin kontrol altına alınmasına ve iklim değişikliğine karşı adaptasyonun kazanılmasına olanak tanır (Akkaya ve Beyhan, 2025).

Yapısal elemanların kendini onarması, binaların ömrünü uzatarak sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sunan bir başka boyuttur. Biyolojik süreçlerle kendini onarabilen beton gibi teknolojiler sayesinde yapıların bakım maliyetleri düşürülebilmektedir (Hosni, 2026). Diğer yandan mikrokapsüllenmiş ajanlar aracılığıyla mekanik hasarlar çeşitli polimerler aracılığıyla giderilebilmekte ve strüktürel bütünlük korunabilmektedir (Umoh vd., 2024). Ayrıca faz değiştiren malzemeler ve yüksek performanslı yalıtım gibi pasif stratejiler, malzemenin sahip olduğu içsel nitelikler sayesinde enerji kazanımlarının ve çevresel performansın iyileştirilmesine yardımcı olur (Olatunde vd., 2024; Fiorito vd., 2015). Şekil hafızalı alaşımlar yapı bileşenlerinde kullanıldığında dış faktörlere göre fiziksel formun değişimine olanak tanıyarak mekanik aksam ihtiyacını azaltabilmektedir (Çabuk, 2024). Böylece yapı, statik bir kütle formundan çıkarak iklim şartlarına göre uyum sağlayabilen dinamik bir sisteme dönüşebilmektedir (Belek ve Yamaçlı, 2023; Esgil ve Yamaçlı, 2024).

Yapı sektörü küresel ölçekte yüksek enerji tüketimi, atık yönetimindeki eksiklikler, çevresel iklim krizi ve dirençsiz yapılaşma neticesinde olumsuz bir tabloya sahiptir. Bu nedenle yukarıda bahsi geçen pasif sistemler aracılığıyla alınabilecek önlemler hayati önem taşımaktadır. Yapı malzemeleri yapının kimliğini oluşturan en temel bileşenlerdir. Bu nedenle mimarlar, mühendisler, müteahhitler ve diğer karar vericiler tarafından belirlenen yapı malzemelerinin, estetik, dayanım ve ilk yatırım maliyeti gibi kriterlerin yanı sıra yapının ömrü boyunca sağladığı avantajlar, çevresel performansı ve sürdürülebilirliğe katkısı irdelenerek seçilmesi gerekmektedir.

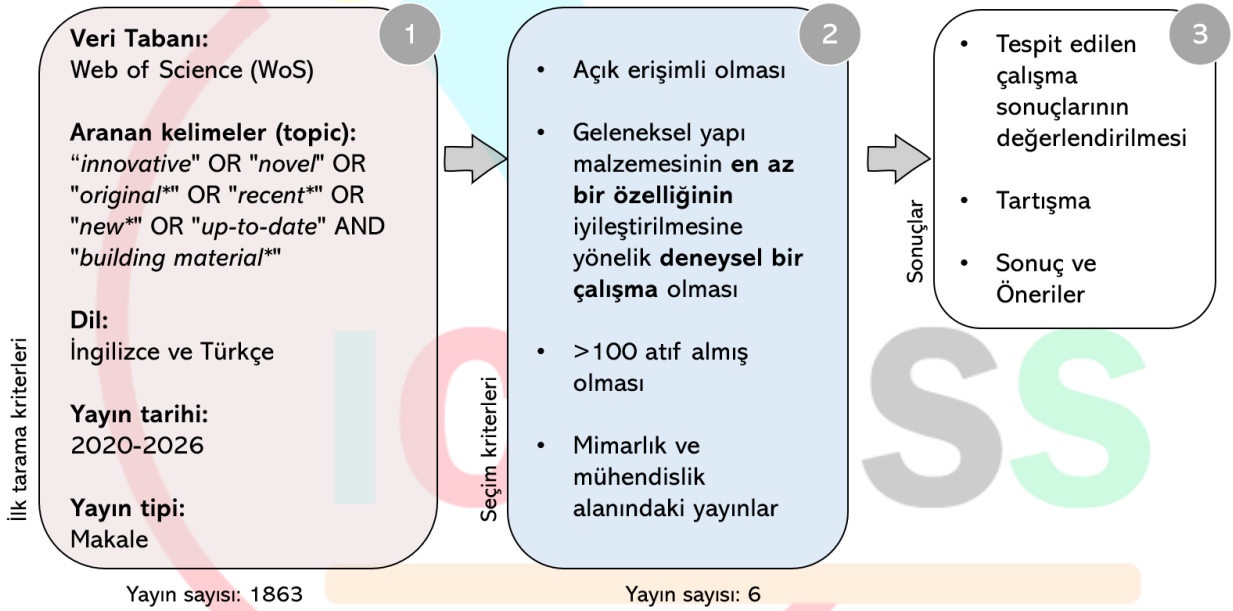
Bu çalışma bu türden bir çabayı tespit edebilmek adına güncel ve literatürde kabul görmüş, yenilikçi ve geleneksel malzemeleri en az bir açıdan iyileştirmeye yönelik bir öneri sunan çalışmaların tespitini ve değerlendirmesini yapmayı amaçlamaktadır. Yapı malzemesi sektörü hızla büyüyen ve gelişen bir sektör olduğundan, bu çalışma güncel teknolojilerin takip edilmesine katkı sunmayı hedeflemektedir. Ayrıca yüksek atıf sayısına sahip deneysel

çalışmaların seçilmesinin, literatürde neye daha çok ihtiyaç duyulduğunun ve dikkat çeken çalışmaların ortak yönünün neler olduğunun anlaşılmasına katkı sunacağı düşünülmektedir.

METODOLOJİ

Çalışmada güncel ve literatürde kabul görmüş çalışmaların takibi için Web of Science (WoS) veri tabanında 2020-2026 yılları arasında yayınlanmış çalışmalar belirlenen anahtar kelimeler kapsamında aranmıştır. Seçilen anahtar kelimeler konu (*topic*) kısmında "*innovative*" OR "*novel*" OR "*original**" OR "*recent**" OR "*new**" OR "*up-to-date*" AND "*building material**" yazılarak tespit edilmiştir. Ayrıca çalışma türü olarak yalnızca deneysel makaleler seçilmiştir. Dil olarak İngilizce ve Türkçe yayınlar seçilmiştir.

Bu arama kriterlerine göre belirlenen 1863 adet makaleden yüzün üzerinde atıf alan 6 adet yayın seçilmiştir. Atıf sayısının çok olması makalelerin uluslararası sahada kabul görmesinin ve yenilikçi olduğunun bir göstergesi olarak kabul edilmiştir. Seçilen deneysel çalışmaların yenilikçi yapı malzemesi üretimine odaklanmasına ve geleneksel malzeme özelliklerini iyileştirici en az bir kriter içermesine özen gösterilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışmanın akışı

SONUÇLAR

Yapılan literatür taraması sonucunda tespit edilen çalışmalar geleneksel yapı malzemelerinin mekanik, termal ve çevresel performanslarını optimize etmeye odaklanırken, literatüre yenilikçi üretim teknikleri ve özgün değerler katmaktadır. Seçilen çalışmaların yapı malzemeleri özelinde sunduğu iyileştirmeler ve bulgular Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 *– Belirlenen Kriterlere Göre Tespit Edilen Deneysel Makalelerin Üzerinde Çalıştığı Yenilikçi Malzemelerin Özellikleri ve Çalışma Bulguları*

Yenilikçi malzeme	İyileştirilen özellikler	Kaynak -Atıf sayısı (WoS)-	Bulgular
Şeffaf ahşap	Enerji verimliliği, ışık geçirgenliği, mekanik dayanım	Mi vd. (2020) -302-	•Yüksek geçirgenlik (%93 bulanıklık oranı ile %80'e varan ışık geçirgenliği) ve UV ışınlarının engellenmesi •Düşük termal iletkenlik ve yüksek mekanik dayanım •Hızlı üretim ve ölçeklendirme, cam tavan, dekor ve iç mekân paneli olarak kullanım
Jeopolimer	Mukavemet, çevresel performans	Zhou vd. (2021) -191-	•Ay toprağı kullanılarak ve ay atmosferi koşullarında üretilen jeopolimer malzeme sentezi simulantı •Basınç dayanımında %100'e varan artış •Gerekli katkı malzemelerinin ağırlığında azalma •Dünya'dan taşınan malzeme kütlesinde azalma •Uzay nakliye masraflarında tasarruf
Polimer	Emicilik, onarım	Schröfl vd. (2022) -185-	•Betonda yüksek emicilik özelliğine sahip polimer kullanımı ile reolojinin değişimi •Çatlakların kendiliğinden kapanması ve onarımı •Donma-çözünme dayanıklılığının artması
Yaşayan malzemeler	Yapısal destek ve biyolojik canlılık	Heveran vd. (2020) -173-	• Mikrobiyal canlılık oranı %9-14 •Yapısal işlev ve mikrobiyal canlılık arasında dehidrasyona bağlı ters orantılı ilişki •Çok işlevselli kullanım
Silika aerojel	Isı yalıtımı ve akustik	Chen vd. (2022) -153-	•Aerojel parçacık boyutunun köpük sıva üzerindeki etkisi •Büyük parçacıkların ses emilimi ve ısı yalıtımı üzerinde daha etkili sonuç vermesi
Jeopolimer	Mekanik ve mikrostrüktürel karakterizasyon, dayanım, çevresel performans	Ulugöl vd. (2021) -140-	•Tuğla, kiremit ve cam atıklarından jeopolimer üretilmesi •Katkı maddesi türü, kürleme süresi ve konsantrasyona bağlı olarak basınç dayanımları değişmekte olup tümünde 45 Mpa'dan fazla •Kompakt mikroyapıya sahip içi boş tuğlada daha yüksek dayanım •Cam içeren numunelerde basınç dayanımları daha düşük seviyede

İyileştirilen Malzeme Özellikleri

Çalışmalarda geleneksel malzemelere oranla, atık malzemelerin geri kazanımı, termal ve kustik performansların iyileştirilmesi, yüksek dayanım ve emicilik özelliklerinin kazanılması ve ışık geçirgenliğinin artırılması gibi geliştirilen malzeme özellikleri açısından geniş bir yelpazeye rastlamak mümkündür. Örneğin, geleneksel yalıtım malzemelerine kıyasla, jeopolimer köpük matrisine silika aerojel entegre edilerek 0,133 W/(mK) gibi çok düşük ısıl iletkenlik değerleri ve 0,51 seviyesinde yüksek ses yutma katsayıları elde edilmiştir (Chen vd., 2022). Diğer yandan, Portland çimentosu yerine kırmızı tuğla, kiremit ve cam atıkları

kullanılarak 45 MPa ve üzerinde basınç dayanımına sahip bağlayıcılar geliştirilmiştir (Ulugöl vd., 2021).

Süper emici polimerler geleneksel betondaki çatlakların iyileştirilmesinde kullanılabilmektedir. Plastik büzülmeyi azaltmak amacıyla bu teknoloji yardımıyla çatlakların %60-100 oranında kendi kendine iyileşmesi sağlanmıştır (Schröfl vd., 2022). Diğer bir çalışmada ise, geleneksel ahşapların ışık geçirgenliklerinin artırılması ile bir yandan estetik özellik kazandırılırken bir yandan enerji verimliliğinin sağlanmasının mümkün olduğu kanıtlanmıştır. Mi vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, geleneksel ahşabın doğal desenleri korunurken, ahşaba %80 şeffaflık, yüksek UV bloklama ve camdan daha düşük ısıl iletkenlik (0,24 W/mK) özellikleri kazandırılmıştır.

Yapı malzemelerinin yaşayan mikroorganizmalarla kendi kendilerini yenilemesini konu alan bir çalışmada ise siyanobakterilerinden yararlanılmıştır. Heveran vd. (2020), siyanobakteriler aracılığıyla biyomineralizasyon gerçekleştirilerek, yapı malzemesinin çevresel tetikleyicilerle kendi kendini çoğaltmasını ve çatlaklara karşı direnç oluşturmasını sağlamışlardır. Bir diğer çalışma ise dünya dışından bir örnek olması sebebiyle ilgi çekicidir. Çalışmada ay toprağı simülatörü kullanılarak, düşük alkali içeriğiyle basınç dayanımı %100,8 oranında artırılan yüksek mukavemetli yapı malzemeleri geliştirilmiştir. Zhou vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada üretilen jeopolimerlerin dünyadan daha az katkı maddesine ihtiyaç duyduğu ve bu nedenle malzeme nakliyesinden kaynaklı emisyonlarda azalmaya katkı sunacağı tahmin edilmektedir.

Yenilikçi Çözüm Önerileri

Çalışmaların öne çıkan özgün yönleri şu şekilde özetlenebilir:

Ay'da yerinde kaynak kullanımıyla nakliye maliyetlerini ve emisyonlarını düşüren ve ekstrem atmosfer koşullarında kürlenen, yüksek performanslı jeopolimer üretim mekanizması moleküler düzeyde açıklanmıştır (Zhou vd., 2021).

Bir numuneden yeni nesil yapı malzemeleri üretilebileceği kanıtlanarak, yapı sektöründe biyolojik işlevselliğe sahip yeni bir malzeme sınıfı ve üretim paradigması önerilmiştir (Heveran vd., 2020).

Estetik şeffaf ahşap üretimi ile hem doğal odun desenlerinin korunması hem de büyük ölçekli üretime uygun, enerji verimli tavan ve pencere sistemlerinin üretimi yeni nesil mühendislik ile mümkün kılınmıştır (Mi vd., 2020).

Betonda kullanılan yeni nesil polimer sayesinde sadece mühendislik özellikleri değil, yangın sıçramasının azaltılması ve yeşil duvarlarda bitki büyümesinin teşvik esilmesi gibi yeni uygulama alanları da literatüre kazandırılmıştır (Schröfl vd., 2022).

Literatürde genellikle atıklar başka puzolanlarla harmanlanırken, İç Anadolu bölgesinden alınan atıkların saf kullanımını ve gerçek yıkım sahası koşullarını temsil eden sabit öğütme sürelerinin etkisini inceleyen ilk çalışmalardan biri gerçekleştirilmiştir (Ulugöl vd., 2021).

Aerojel parçacık boyutunun mikro ve makro ölçekte jeopolimerin gözenek yapısı ve higrotermal davranışı üzerindeki rolü derinlemesine analiz edilerek, düşük miktarlarda maksimum verim almanın mekanizmasını açıklanmıştır (Chen vd. 2022).

Tartışma

İncelenen çalışmalar, doğa temelli yaklaşımların, atık odaklı döngüsel ekonomi modellerinin ve yeni nesil teknolojilerin yapı bileşenlerinin hem yapısal bütünlüğünü hem de çevresel uyum kapasitesini kökten değiştirebileceğini kanıtlar niteliktedir. Özellikle dünya dışı ortamlarda yerel kaynakların kullanımı ve biyolojik işlevselliğe sahip malzemelerin geliştirilmesi, inşaat teknolojilerinde sürdürülebilirlik anlayışını geleneksel yöntemlerin ötesine taşımaktadır. Bu dönüşüm süreci, mühendislik mükemmeliyeti ile çevresel sorumluluğu birleştiren yüksek performanslı kompozitlerin yaygınlaşmasıyla sektördeki ekolojik ayak en aza indirebilecek güce sahiptir. Bununla birlikte, biyokompozitlerin polimer ve mineral esaslı matrislerle entegrasyonu, yapısal performansın ve mikrostrüktürel yapının iyileştirilmesinin yanı sıra çevresel verimliliği artırmak adına kritik bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Portland çimentosunun küresel karbon emisyonlarındaki %8'lik payı göz önüne alındığında, jeopolimer esaslı kompozitlerin yaygınlaştırılması endüstriyel atık yönetimini destekleyerek çevresel sürdürülebilirliğe önemli bir katkı sağlamaktadır (Özel, 2020; Zhang vd., 2023). Bu bağlamda, yapısal performans ile ekolojik gereksinimleri dengeleyen bu tür yeni nesil kompozitler, geleceğin kentsel dokusunda enerji verimli ve dirençli yapılaşmanın temel taşlarını oluşturabileceklerdir.

Çalışmaların literatürde kabul gördüklerinin en büyük göstergelerinden biri aldıkları atıf sayılarıdır. Bu altı özgün çalışmanın literatürdeki benzerlerinden sıyrılarak yüzün üzerinde atıf alması, sundukları kavramsal yenilikler, yüksek etki faktörlü yayın kanalları ve stratejik öneme sahip materyal geliştirmeleri gibi yönleriyle açıklanabilir Genel olarak incelendiğinde bu çalışmaların yüksek etki yaratmasının temel nedenleri şu şekilde sıralanabilir:

Koleksiyondaki çalışmaların yayınlandığı dergiler, malzeme bilimi ve inşaat alanında dünyanın en saygın platformlarıdır. Bu durum, çalışmaların hem görünürlüğünü hem de akademik otoritesini artırmıştır. Örneğin şeffaf ahşap üretimine odaklanan deneysel çalışma (Mi vd., 2020) 14.18 gibi oldukça yüksek bir etki faktörüne sahipken; atık bazlı jeopolimer üretimi hakkındaki makale (Ulugöl vd., 2021) 10.34 etki faktörlü bir dergide yayınlanmıştır.

Makalelerin çoğu, mevcut malzemeleri modifiye etmekten ziyade, literatüre yeni kavramlar kazandırmıştır. Örneğin, "Yaşayan Yapı Malzemeleri" üzerine yapılan çalışmada, fiziksel tetikleyicilerle bir "ana" nesilden üç nesil boyunca çoğalabilen ve biyomineralizasyon ile kendi kendini iyileştirebilen yeni bir malzeme sınıfı önerilmiştir (Heveran vd., 2020). Diğer bir çalışma konusu olan "Estetik Şeffaf Ahşap" ile sadece şeffaflık değil, aynı zamanda optik yönetim ve UV engelleme özelliklerine çalışılmış olup, camın yerini alabilecek bir mühendislik bileşeni tanımlanmıştır (Mi vd., 2020).

Araştırmalar, dünyanın karşı karşıya olduğu sürdürülebilirlik ve uzay araştırmaları gibi kritik problemlere odaklanmıştır. Örneğin, yüksek emisyona sahip olması ile bilinen çimento yerine alternatif olabilecek nitelikteki jeopolimerler üzerine yoğunlaşılmış olup, inşaat atıklarını tamamen geri dönüştürebilen yeşil bağlayıcılar geliştirilmiştir (Ulugöl vd., 2021).

Keşif odaklı ve yeni fikirlere kapı aralayan çalışmaların daha çok öne çıktığı tespit edilmiştir. Örneğin, Ay'da inşa edilmesi planlanan bir yapı için gerçek Ay toprağına mineral ve kimyasal açıdan yüksek benzerlik gösteren bir simülatör yardımıyla yüksek mukavemetli jeopolimerler geliştirilmiştir (Zhou vd., 2021).

Pek çok akademik çalışma laboratuvar ortamıyla sınırlı kalırken, bu çalışmalar sundukları birtakım akıllı yöntemler ile ticarileşme potansiyellerini artırmıştır. Örneğin, yüksek maliyeti nedeniyle günümüzde uygulanması zor olan silika aerojellerin, ultra hafif matrisler veya jeopolimerlerle optimize edilerek verimli kullanımı sağlanmıştır (Chen vd. 2022).

Çalışmalar, geliştirdikleri malzemelerin mikro yapısından mekanik dayanımına kadar geniş bir spektrumda veri sunarak sonraki araştırmalar için güçlü bir referans zemini oluşturmuştur.

Sonuçta, bu çalışmaların her biri, yapı malzemeleri alanında biyolojik fonksiyonellik, enerji verimli sistemler ve yerinde kaynak kullanımı gibi modern araştırma akımlarını başlatan öncü niteliktedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapı malzemesi sektörünün sürekli büyüyen ve gelişen doğası, onun sürekli takibinin yapılmasını ve yeniliklerin hayata geçirilmesini gerekli kılmaktadır. Ancak bu sayede yapı sektörünün neden olduğu çevresel ve yapısal problemlerle baş edilebilmesi mümkündür. Bu çalışma WoS veri tabanında gerçekleştirilen bir literatür taramasını konu edinmektedir. Bunun amacı literatürde geniş yankı uyandırmış, yenilikçi yönü ile öne çıkan, deneysel olarak yeni yeni malzeme üretimine odaklanan çalışmaların tespiti ve değerlendirilmesidir. Çalışmaların diğerlerinden olan farkı, neyi önceledikleri ve neyi başardıkları da ayrıca bu çalışmanın araştırma sorularını oluşturmaktadır.

Belirli kriterler doğrultusunda elde edilen toplamda 1863 adet makaleden 6'sı belirlenen atıf sayısı, araştırma alanları, erişim imkânı ve araştırma konusu itibariyle tespit edilerek detaylı olarak ele alınmıştır. Neticede şeffaf ahşaptan jeopolimerlere, yaşayan malzemelerden silika aerojellere kadar çeşitli yapı malzemelerinin özellikleri, özgün yönleri ve geleneksel yapı malzemelerine göre daha iyi performans sergiledikleri özellikleri irdelenmiştir. Geliştirilen özellikler arasında termal iletkenlik, ses yutma kapasitesi, mekanik dayanım, ışık geçirgenliği, geri dönüştürülebilir atık içerikleri, kendini onarabilme özellikleri ve su emme kapasiteleri sayılabilir.

Neticede, geleceğin mimarisini oluşturan yeni nesil yapı malzemelerinin üretiminde, hayal gücünün sınırlarını zorlayan çözümlerin mevcut imkanlar dahilinde olduğu sonucuna varılmıştır. Yapı sektörünün neden olduğu günümüz sorunlarının yerinde ve yenilikçi çözümlerle hafifletilebilmesi mümkündür. Sahip olunan bu potansiyelin farkına varılabilmesi için doğru çözümlere, kapsamlı bir araştırmaya ve bilimsel meraka ihtiyaç duyulmaktadır. İleriye dönük çalışmalarda, yapı malzemelerinin türlerine, kullanıldığı yapı bileşenlerine ve uygun oldukları iklim türlerine göre sınıflandırmalarının yapılması önerilmektedir. Yeni nesil yapı malzemelerinin kullanım alanlarının araştırılması, önerilen teknolojinin başka hangi tür malzemelere uygulanmasının mümkün olduğu gibi araştırma soruları, konu ile ilgilenen araştırmacılara rehberlik edebilir.

KAYNAKÇA

Akkaya, R., ve Beyhan, F. (2025). Teknoloji Geliştirme Bölgelerinin Mimari Tasarımı Model Önerisi için Literatür Araştırması. *DergiPark (Istanbul University)*. https://dergipark.org.tr/en/pub/gujsb/issue/93374/1683373

Belek, A. N., ve Yamaçlı, R. (2023). Adaptif cephe sistemlerinin sürdürülebilir tasarım kriterlerine yönelik tasarım çözümleri. *ArtGRID - Journal of Architecture Engineering and Fine Arts*, *5*(2), 216–239. https://doi.org/10.57165/artgrid.1357657

Çabuk, S. (2024). İklim Uyumlu Cephe Sistemlerindeki Kinetik Uygulamaların Analizi. *DergiPark (Istanbul University)*. https://dergipark.org.tr/tr/pub/stardergisi/issue/85472/1499772

Chen, Y., Klima, K. M., Brouwers, H. J. H., ve Yu, Q. (2022). Effect of silica aerogel on thermal insulation and acoustic absorption of geopolymer foam composites: The role of aerogel particle size. *Composites Part B Engineering*, *242*, 110048–110048. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110048

Çüçen, A., ve Solak, A. (2023). Çağdaş Mimarlık Bağlamında Akıllı Yapı Malzemelerinin Kullanımının Araştırılması. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, *6*(1), 13–22. https://doi.org/10.51764/smutgd.1203403

Elhaman, B. (2025). Investigating the impact of computational design and material on kinetic behaviors. *DergiPark (Istanbul University)*. https://dergipark.org.tr/en/pub/kja/issue/93079/1712092

Esgil, M., ve Yamaçlı, R. (2024). Kinetik mimarlık kapsamında uyarlanabilir cephelerin sürdürülebilir mimariye katkısı. *ArtGRID - Journal of Architecture Engineering and Fine Arts*, *6*(1), 60–79. https://doi.org/10.57165/artgrid.1389786

Fiorito, F., Sauchelli, M., Arroyo, D., Pesenti, M., Imperadori, M., Masera, G., ve Ranzi, G. (2015). Shape morphing solar shadings: A review [Review of *Shape morphing solar shadings: A review*]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *55*, 863–884. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.086

Güdük, M. B., ve Satıcı, B. (2022). Teknolojik Gelişmelerin Mimariye ve Malzemeye Etkisi. *DergiPark (Istanbul University)*. https://dergipark.org.tr/tr/pub/icujtas/issue/64668/897553

Heveran, C. M., Williams, S., Qiu, J., Artier, J., Hubler, M. H., Cook, S. M., Cameron, J. C., ve Srubar, W. V. (2020). Biomineralization and Successive Regeneration of Engineered Living Building Materials. *Matter*, *2*(2), 481–494. https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.11.016

Hosni, A. A. (2026). The Role of Smart Materials in Future Architecture: Self-Healing, Adaptive, and Sustainable Innovation. *ARCHive-SR*, *10*(1), 78–96. https://doi.org/10.21625/archive-sr.v10i1.1243

Mi, R., Chen, C., Keplinger, T., Pei, Y., He, S., Liu, D., Li, J., Dai, J., Hitz, E., Yang, B., Burgert, I., ve Hu, L. (2020). Scalable aesthetic transparent wood for energy efficient buildings. *Nature Communications*, *11*(1), 3836–3836. https://doi.org/10.1038/s41467-020-17513-w

Olatunde, T. M., Okwandu, A. C., Akande, D. O., ve Sikhakhane, Z. Q. (2024). Energy efficiency in architecture: Strategies and technologies. *Open Access Research Journal of Multidisciplinary Studies*, *7*(2), 31–41. https://doi.org/10.53022/oarjms.2024.7.2.0024

Özel, B. F. (2020). *Influence Of Self Healıng On The MechanıcalProperties Of Geopolymer Bınder Composıtes*. http://www.openaccess.hacettepe.edu.tr:8080/xmlui/handle/11655/23202

Schröfl, C., Erk, K. A., Siriwatwechakul, W., Wyrzykowski, M., ve Snoeck, D. (2022). Recent progress in superabsorbent polymers for concrete. *Cement and Concrete Research*, *151*, 106648–106648. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106648

Topal, A. S., ve Arpacıoğlu, Ü. (2020). Mimarlıkta Akıllı Malzeme. *Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi (MBUD)*. https://doi.org/10.30785/mbud.784518

Ulugöl, H., Kul, A., Yıldırım, G., Şahmaran, M., Aldemir, A., Figueira, D., ve Ashour, A. (2021). Mechanical and microstructural characterization of geopolymers from assorted construction and demolition waste-based masonry and glass. *Journal of Cleaner Production*, *280*, 124358–124358. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124358

Umoh, A. A., Adefemi, A., Ibewe, K. I., Etukudoh, E. A., Ilojianya, V. I., ve Nwokediegwu, Z. Q. S. (2024). Green architecture and energy efficiency: a review of innovative design and construction techniques. *Engineering Science ve Technology Journal*, *5*(1), 185–200. Fair East Publishers. https://doi.org/10.51594/estj.v5i1.743

Zhang, Y., Li, H., Gamil, Y., Iftikhar, B., ve Murtaza, H. (2023). Towards modern sustainable construction materials: a bibliographic analysis of engineered geopolymer composites. *Frontiers in Materials*, *10*. https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1277567

Zhou, S., Lu, C., Zhu, X., ve Li, F. (2021). Preparation and Characterization of High-Strength Geopolymer Based on BH-1 Lunar Soil Simulant with Low Alkali Content. *Engineering*, *7*(11), 1631–1645. https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.10.016

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Comparative Investigation of The Nonlinear Behavior of Concentrically Braced Steel Frames Under Near-Fault and Far-Fault Earthquakes

İlayda KATILMIŞ[1]
Mehmet Aydın KÖMÜR[2]

Abstract

Due to Türkiye's location on active fault zones, accurately evaluating the seismic behavior of structures is of great importance. Concentrically braced steel frame systems are widely preferred in steel structures because of their high stiffness, efficient lateral load resistance, and ductile behavior characteristics. In this study, the nonlinear behavior of 10-story steel frame systems with X, V, and inverted-V concentrically braced configurations subjected to near-fault and far-fault ground motions was investigated using nonlinear time history analysis. For this purpose, 11 near-fault and 11 far-fault earthquake records selected from the PEER database were used, and a total of 44 analyses were performed for each model. Interstory drift ratios, roof displacements, base shear forces, and plastic hinge formations were evaluated in the analyses. In addition, the distribution of plasticity along the building height was examined to investigate the effect of bracing configuration on damage mechanisms. The results showed that the X-braced system generally produced lower drift and displacement demands, while generating higher base shear forces. In the V and inverted-V braced systems, drift demands increased and plasticity spread more significantly to beam and column elements. Although the overall behavioral trends under near-fault and far-fault records were generally similar, some response parameters varied depending on the spectral characteristics of the ground motions and their compatibility with the structural period. The findings indicate that bracing configuration is a critical design parameter affecting the seismic performance of steel structures.

Keywords: Near-fault, far-fault, concentrically braced frame, steel structure, nonlinear time history analysis

[1] Unvan, Üniversite, Bölüm, Orcıd: Lisansüstü Öğrenci, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 0009-0001-3699-8824
[2] Unvan, Üniversite, Bölüm, Orcıd: Prof. Dr., Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 0000-0002-6423-6069

1. GİRİŞ

Türkiye'nin aktif fay kuşakları üzerinde yer alması, yapıların deprem etkileri altındaki davranışının güvenilir biçimde değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu nedenle güncel tasarım yaklaşımlarında yalnızca dayanım koşulları değil, yapıların deprem performansı, yer değiştirme talepleri ve hasar dağılımı da dikkate alınmaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde özellikle belirli yapı türleri ve performans değerlendirmeleri için zaman tanım alanında analiz yöntemlerine yer verilmiştir (TBDY, 2018).

Çelik yapılar, yüksek dayanım/ağırlık oranı, sünek davranış özellikleri ve hızlı uygulanabilirliği nedeniyle deprem bölgelerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Merkezi çaprazlı çelik çerçeveler ise yüksek rijitlik sağlaması ve göreli kat ötelenmelerini sınırlandırması bakımından öne çıkmaktadır. Bununla birlikte çapraz elemanların burkulması, dayanım kaybı ve plastikleşmenin elemanlar boyunca dağılımı sistem performansını doğrudan etkilemektedir (Tremblay, 2002; Hsiao vd., 2013; Uriz ve Mahin, 2008).

Merkezi çaprazlı çelik çerçeveler üzerine yapılan çalışmalarda, çapraz düzeni ve kesit özelliklerinin yapı davranışı üzerinde önemli etkiler oluşturduğu görülmektedir. İnce ve Girgin (2024), farklı çapraz kesitlerinin rijitlik ve enerji tüketimi açısından farklı davranışlar sergilediğini belirtmiştir. Bozkurt ve Zeybek (2021), çapraz konfigürasyonunun sistem performansını etkilediğini ortaya koymuştur. Benzer şekilde Yaman ve Ağcakoca (2017), merkezi çelik çaprazların performansını incelemiş; Akşar vd. (2018) ise dayanım farklılıklarından kaynaklanan burulma etkilerini değerlendirmiştir.

Yapıların deprem etkileri altındaki gerçekçi davranışının belirlenmesinde doğrusal olmayan analiz yöntemleri önemli bir yere sahiptir. Özellikle doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz yöntemi, gerçek deprem kayıtlarının doğrudan yapısal modele uygulanmasına olanak sağlayarak elastik ötesi davranışın ayrıntılı biçimde değerlendirilmesine imkân vermektedir (Vamvatsikos ve Cornell, 2002; Chopra, 2012). Khademi ve Rezaie (2017), çapraz düzeninin sistem performansı üzerinde belirgin etkileri olduğunu göstermiştir. Nassani vd. (2017) ise farklı çapraz sistemlerinin çelik çerçevelerin sismik tepkisini önemli ölçüde değiştirdiğini belirtmiştir.

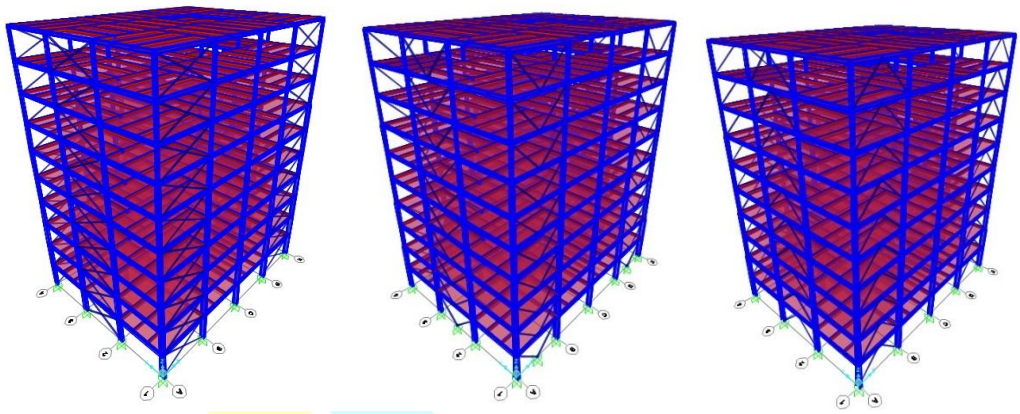
Yakın fay deprem kayıtları; yönlendiricilik etkisi, hız darbesi ve kalıcı yer değiştirme bileşenleri nedeniyle kısa sürede yüksek enerji talebi oluşturabilmektedir (Hall vd., 1995; Baker, 2007; Kalkan ve Kunnath, 2006). Bu çalışmada, X, V ve ters-V merkezi çapraz düzenlerine sahip 10 katlı çelik çerçeve sistemlerin yakın fay ve uzak fay deprem kayıtları altındaki doğrusal olmayan davranışı incelenmiştir. Analiz sonuçları göreli kat ötelenmeleri, tepe yer değiştirmeleri, taban kesme kuvvetleri ve plastik mafsal oluşumları bakımından karşılaştırılarak çapraz geometrisinin yapı performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir (Yıldızhan Sağer ve Temel, 2022).

2. YAPI MODELLERİ VE ANALİZ ESASLARI

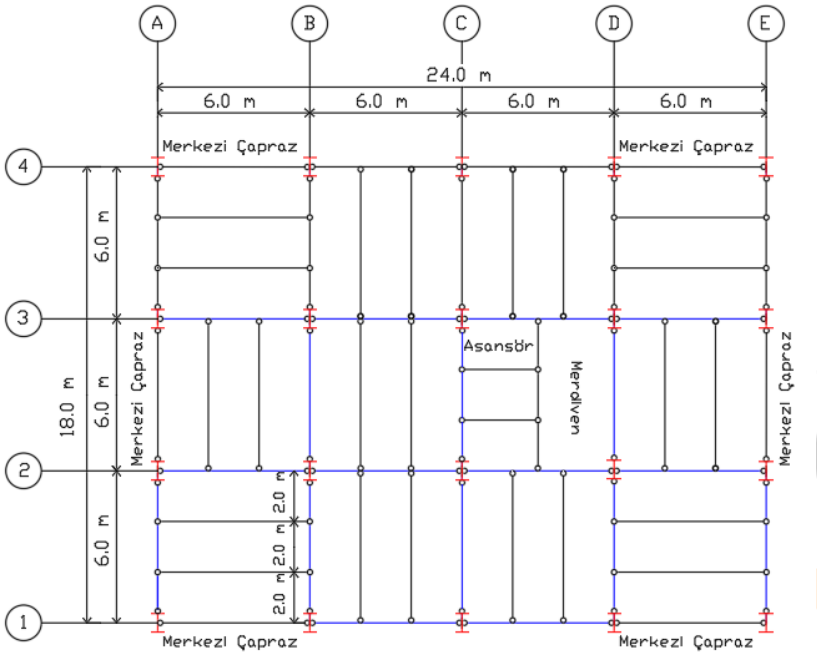
2.1. Yapı Modelleri ve Geometrik Özellikler

Bu çalışmada, merkezi çaprazlı çelik çerçeve sistemlerin yakın fay ve uzak fay deprem kayıtları altındaki davranışını incelemek amacıyla üç farklı taşıyıcı sistem modeli oluşturulmuştur. Çapraz geometrisinin yapısal performansa etkisini değerlendirmek için X, V

ve ters-V çapraz düzenleri kullanılmıştır. Tüm modeller aynı plan boyutları, kat yükseklikleri ve malzeme özellikleriyle tanımlanmış, yalnızca çapraz konfigürasyonu değiştirilmiştir. Yapı modellerinin genel görünüşleri Şekil 1'de, plan yerleşimi ise Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. *X, V ve ters-V merkezi çaprazlı çelik çerçevelerin üç boyutlu modelleri*



Şekil 2. *Tipik kat planı*

Yapı modelleri 10 katlı olarak tasarlanmış olup her kat yüksekliği 3.0 m, toplam bina yüksekliği ise 30.0 m'dir. Plan düzleminde düzenli ve simetrik taşıyıcı sistem yerleşimi tercih edilmiştir. Burulma düzensizliğini azaltmak amacıyla kütle ve rijitlik merkezlerinin birbirine yakın olmasına dikkat edilmiştir. Döşemelerin kendi düzlemlerinde rijit davrandığı kabul edilerek tüm kat seviyelerinde rijit diyafram tanımı yapılmıştır.

Analiz modellerinde kolon tabanları ankastre mesnet koşulu ile modellenirken, kiriş-kolon birleşimleri, çapraz eleman bağlantıları ve tali kiriş birleşimleri moment aktarmaz şekilde mafsallı olarak tanımlanmıştır. Taşıyıcı sistemde yatay yüklerin büyük ölçüde merkezi çaprazlı çerçeveler tarafından karşılandığı, ara çerçevelerin ise ağırlıklı olarak düşey yük taşıyıcı sistem olarak davrandığı kabul edilmiştir.

Taşıyıcı sistem elemanlarında yapısal çelik malzeme kullanılmıştır. Elastisite modülü 200000 MPa, Poisson oranı 0.30 ve birim hacim ağırlık 78.5 kN/m³ olarak alınmıştır. Çelik akma dayanımı ve diğer mekanik özellikler seçilen profil sınıfına uygun şekilde tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan analizlerde plastik davranışın temsil edilebilmesi amacıyla uygun malzeme modeli kullanılmıştır.

Kolon, kiriş ve çapraz eleman kesitleri kat seviyelerine göre iç kuvvet talepleri dikkate alınarak seçilmiştir. Alt katlarda daha büyük kesitler, üst katlarda ise daha ekonomik kesitler kullanılmıştır. Kirişlerde I profiller, kolonlarda geniş başlıklı profiller ve çapraz elemanlarda çekme-basınç etkilerine uygun kesitler tercih edilmiştir. Yapı modellerinde kullanılan tipik kesit bilgileri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. *Taşıyıcı sistem elemanların kesitleri*

Kat	Kolon	Çapraz x-doğrultusu	Çapraz y-doğrultusu	Kiriş
1	HEB 550	CHS 152.4×6	CHS 168.3×10	HEA 280
2	HEB 550	CHS 152.4×6	CHS 168.3×10	HEA 280
3	HEB 450	CHS 152.4×6	CHS 168.3×10	HEA 280
4	HEB 450	CHS 152.4×6	CHS 168.3×10	HEA 280
5	HEB 360	CHS 152.4×6	CHS 168.3×10	HEA 280
6	HEB 360	CHS 139.7×6	CHS 159×8	HEA 280
7	HEB 360	CHS 139.7×6	CHS 159×8	HEA 280
8	HEB 240	CHS 139.7×6	CHS 159×8	HEA 280
9	HEB 240	CHS 139.7×6	CHS 159×8	HEA 280
10	HEB 240	CHS 139.7×6	CHS 159×8	HEA 280

2.2. Tasarım Kriterleri ve Dinamik Özellikler

Yapı modellerinin tasarımında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) ile Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (ÇYTHYE, 2018) hükümleri esas alınmıştır. Düşey yüklerin belirlenmesinde TS 498 standardı, kar yüklerinin hesabında TS EN 1991-1-3 ve rüzgâr yüklerinin hesabında ise TS EN 1991-1-4 standardı dikkate alınmıştır. Çelik taşıyıcı elemanların boyutlandırılmasında Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) yaklaşımı benimsenmiştir.

Sabit yükler kapsamında trapez sac, betonarme döşeme ve kaplama yükleri dikkate alınmış; bu yükler normal katlarda 4.1 kN/m², çatı katında ise 3.6 kN/m² olarak tanımlanmıştır. Ayrıca çevre kirişlerine normal katlarda 3.0 kN/m cephe duvar yükü, çatı katında ise 2.0 kN/m parapet yükü uygulanmıştır. Hareketli yükler normal katlar ve çatı katı için 2.0 kN/m² alınmıştır. Sismik kütlenin hesabında TBDY-2018 Tablo 4.3'e göre hareketli yük katılım katsayısı n = 0.30 kullanılmış ve sabit yüklerin tamamı ile hareketli yüklerin belirli kısmı kütle tanımına dahil edilmiştir.

Deprem tasarım parametreleri için bina kullanım sınıfı BKS = 3, bina önem katsayısı $I = 1.0$, deprem tasarım sınıfı DTS = 1 ve bina yükseklik sınıfı BYS = 4 olarak alınmıştır. Yapının Kahramanmaraş ili Pazarcık ilçesinde ve ZC zemin sınıfında bulunduğu kabul edilmiş; TBDY-2018 kapsamında DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için tasarım spektrum parametreleri $S_{DS} = 1.110$ ve $S_{D1} = 0.375$ olarak kullanılmıştır. Süneklik düzeyi yüksek merkezi çaprazlı çelik çerçeveler için davranış katsayısı $R = 5$ ve dayanım fazlalığı katsayısı $D = 2$ alınmıştır.

Yük birleşimleri ilgili yönetmelik hükümlerine göre oluşturulmuş, ayrıca ön tasarım aşamasında göreli kat ötelenmesi, ikinci mertebe etkileri ve düzensizlik kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Modal analizlerde her iki doğrultuda toplam etkin kütle katılım oranının en az %95 olması sağlanmıştır.

Yapı modellerine ait birinci doğal titreşim periyotları modal analiz sonuçlarından elde edilmiş olup Tablo 2'de verilmiştir. Modellerin birinci doğal titreşim periyotlarının birbirine yakın olduğu, çapraz geometrisine bağlı olarak sınırlı farklılıklar oluştuğu görülmektedir.

Tablo 2. *Modellerin doğal titreşim periyotları*

Doğrultu	X Çapraz T(sn)	V Çapraz T(sn)	Ters-V Çapraz T(sn)
X Yönü	1.2576	1.2703	1.1707
Y Yönü	1.1804	1.1677	1.0795

3. DOĞRUSAL OLMAYAN ZAMAN TANIM ALANI ANALİZİ

Bu çalışmada, merkezi çaprazlı çelik çerçeve sistemlerin deprem etkileri altındaki elastik ötesi davranışlarının belirlenmesi amacıyla doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi (ZTADA) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, gerçek deprem ivme kayıtlarının doğrudan yapısal modele uygulanmasına olanak sağlaması nedeniyle, yapıların yer değiştirme taleplerinin, iç kuvvet dağılımlarının ve hasar mekanizmalarının gerçeğe en yakın biçimde değerlendirilmesine imkân vermektedir. Analizler SAP2000 v22 paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (CSI,2020).

3.1. Plastik Mafsal Tanımlamaları ve Analiz Modeli

Doğrusal olmayan analiz öncesinde tüm yapı modellerinde plastik mafsal tanımlamaları yapılmıştır. Kolon elemanlarının uçlarında eksenel kuvvet ve iki eksenli moment etkilerini temsil eden P-M2-M3 mafsalları, kiriş ortasında eğilme davranışını temsil eden M3 mafsalları ve çapraz elemanların orta noktalarında eksenel davranışı temsil eden P mafsalları atanmıştır. Böylece deprem etkileri altında oluşabilecek elastik ötesi davranışların ve hasar dağılımlarının izlenmesi amaçlanmıştır. Analizlerde yapısal sönüm oranı % 2.5 olarak kabul edilmiş, deprem kayıtları modele iki yatay doğrultuda uygulanmıştır. Analizler sonunda göreli kat öteleme oranları, tepe yer değiştirmeleri, taban kesme kuvvetleri ve plastik mafsal oluşumları elde edilmiştir.

Plastik mafsal dağılımının kat bazında değerlendirilmesi amacıyla her kat ve eleman türü için plastik mafsal oluşum oranı tanımlanmıştır. Bu oran, ilgili katta plastik mafsal oluşan eleman sayısının toplam eleman sayısına oranının tüm analizler üzerindeki ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Plastik mafsal oluşum oranı Denklem (1) ile verilmiştir.

$$H_{e,k}(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{N_a} n_{e,k,i}}{N_a \times N_{e,k}} \times 100$$

Burada $H_{e,k}$, k. kattaki $e$eleman türüne ait ortalama plastik mafsal oluşum oranını (%); $n_{e,k,i}$, ilgili katta plastik mafsal oluşan eleman sayısını; $N_{e,k}$, kattaki toplam eleman sayısını; $N_a$ise toplam analiz sayısını ifade etmektedir. Bu çalışmada $N_a = 22$ olarak alınmıştır. Bu oran,

hasarın şiddetini değil, plastik mafsallaşmanın kat ve eleman bazındaki yaygınlığını göstermektedir.

3.2. Deprem Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklendirilmesi

Analizlerde kullanılmak üzere PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) veri tabanından seçilen gerçek deprem kayıtları esas alınmıştır (PEER, 2025). TBDY-2018 hükümleri doğrultusunda, her biri birbirine dik iki yatay bileşenden oluşan 11 adet yakın fay ve 11 adet uzak fay deprem kaydı kullanılmış, böylece her yapı modeli için toplam 44 analiz gerçekleştirilmiştir. Seçilen kayıtların moment büyüklükleri $M_w = 6.0–8.0$ aralığında olup faylanma mekanizması doğrultu atımlı olarak tercih edilmiştir. Ayrıca zemin sınıfı ile uyum sağlanabilmesi amacıyla V_{s30} değerleri 360–760 m/s aralığında seçilmiştir. Yakın fay ve uzak fay deprem kayıtlarına ait özellikler sırasıyla Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir.

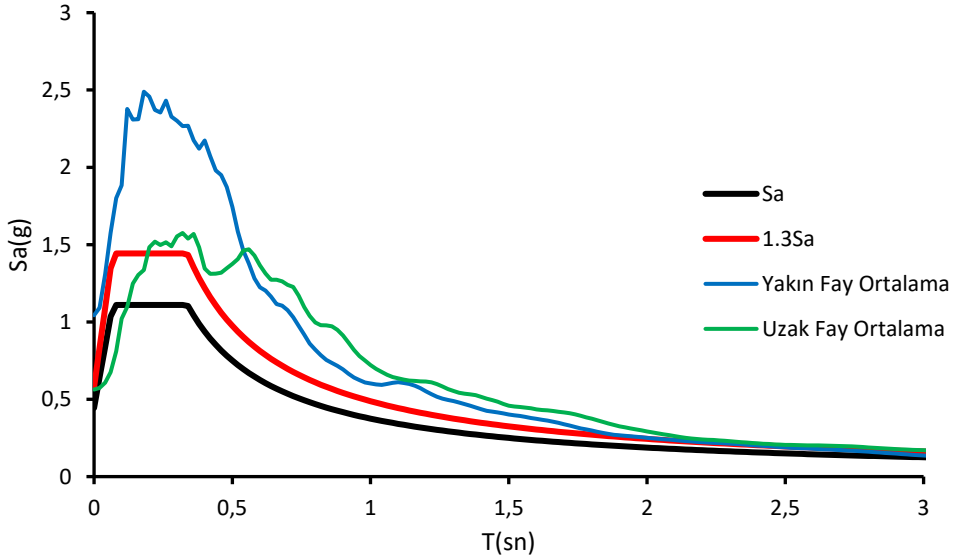
Tablo 3. *Yakın fay deprem kayıtları ve özellikleri*

Deprem Adı	PEER RSN	Ölçek Faktörü	Büyüklük	Faylanma Mekanizması	Vs30 (m/s)
Victoria_ Mexico	265	1.711331	6.33	Doğrultu atımlı	471.53
Superstition Hills-02	727	1.17094	6.54	Doğrultu atımlı	362.38
Landers	864	1.551159	7.28	Doğrultu atımlı	379.32
Big Bear-01	901	1.358987	6.46	Doğrultu atımlı	430.36
Kobe_ Japan	1111	1.132931	6.9	Doğrultu atımlı	609
Duzce_ Turkey	1617	1.036821	7.14	Doğrultu atımlı	454.2
Manjil_ Iran	1633	1.400552	7.37	Doğrultu atımlı	723.95
Hector Mine	1787	1.71047	7.13	Doğrultu atımlı	726
Tottori_ Japan	3964	1.263016	6.61	Doğrultu atımlı	469.79
Tottori_ Japan	3966	1.700107	6.61	Doğrultu atımlı	420.2
Duzce_ Turkey	8166	2.19269	7.14	Doğrultu atımlı	425

Tablo 4. *Uzak fay deprem kayıtları ve özellikleri*

Deprem Adı	PEER RSN	Ölçek Faktörü	Büyüklük	Faylanma Mekanizması	Vs30 (m/s)
Landers	832	2.9892	7.28	Doğrultu atımlı	382.93
Kocaeli_ Turkey	1160	2.1754	7.51	Doğrultu atımlı	386.75
Hector Mine	1762	2.2209	7.13	Doğrultu atımlı	382.93
Hector Mine	1794	2.5955	7.13	Doğrultu atımlı	379.32
Landers	3753	1.8907	7.28	Doğrultu atımlı	388.63
Landers	3756	2.3615	7.28	Doğrultu atımlı	368.2
Big Bear-01	6059	2.7635	6.46	Doğrultu atımlı	396.41
Big Bear-01	6060	2.7317	6.46	Doğrultu atımlı	367.84
Joshua Tree_ CA	6876	2.4028	6.1	Doğrultu atımlı	425.02
Darfield_ New Zealand	6971	2.2545	7	Doğrultu atımlı	389.54
Darfield_ New Zealand	6980	2.9235	7	Doğrultu atımlı	484.49

Deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesinde TBDY-2018'e göre DD-2 deprem yer hareketi düzeyi esas alınmıştır. Ölçeklendirme işleminde her kayıt takımına ait iki yatay bileşen kullanılarak ortalama spektrum elde edilmiş ve bu spektrumun, etkin birinci doğal titreşim periyoduna bağlı olarak tanımlanan $0.2T_1 - 1.5T_1$ aralığında hedef tasarım spektrumunun 1.30 katından küçük olmaması sağlanmıştır. Ölçeklendirme sonrası elde edilen yakın fay ve uzak fay kayıtlarının ortalama spektrumları ile hedef tasarım spektrumu birlikte Şekil 3' te sunulmuştur.

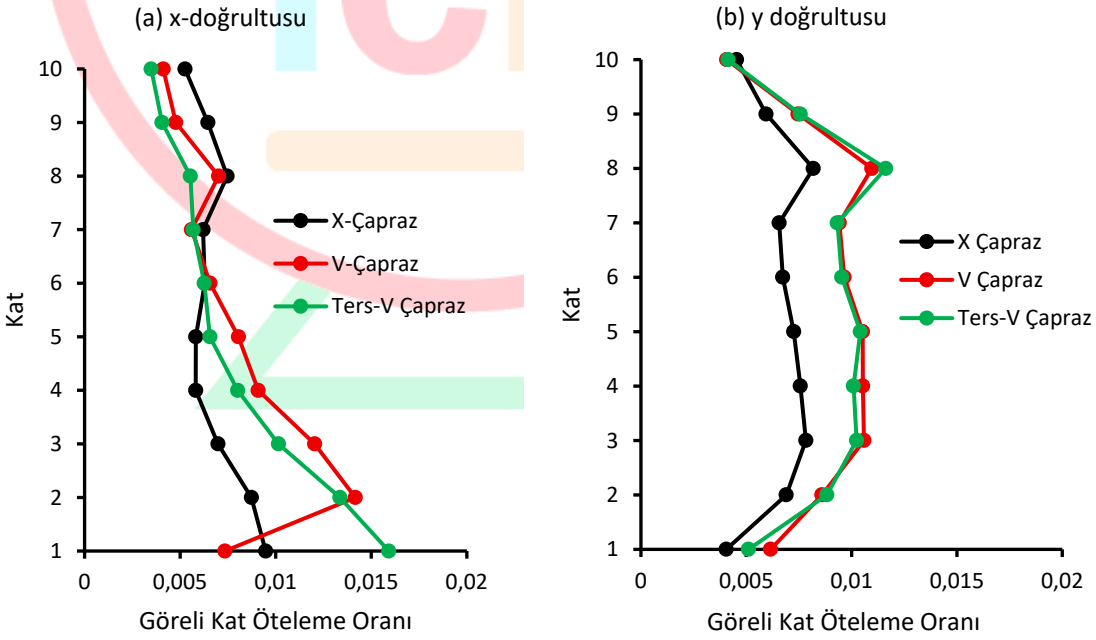


Şekil 3. *Yakın fay ve uzak fay kayıtlarına ait ortalama spektrumların hedef tasarım spektrumu ile karşılaştırılması*

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

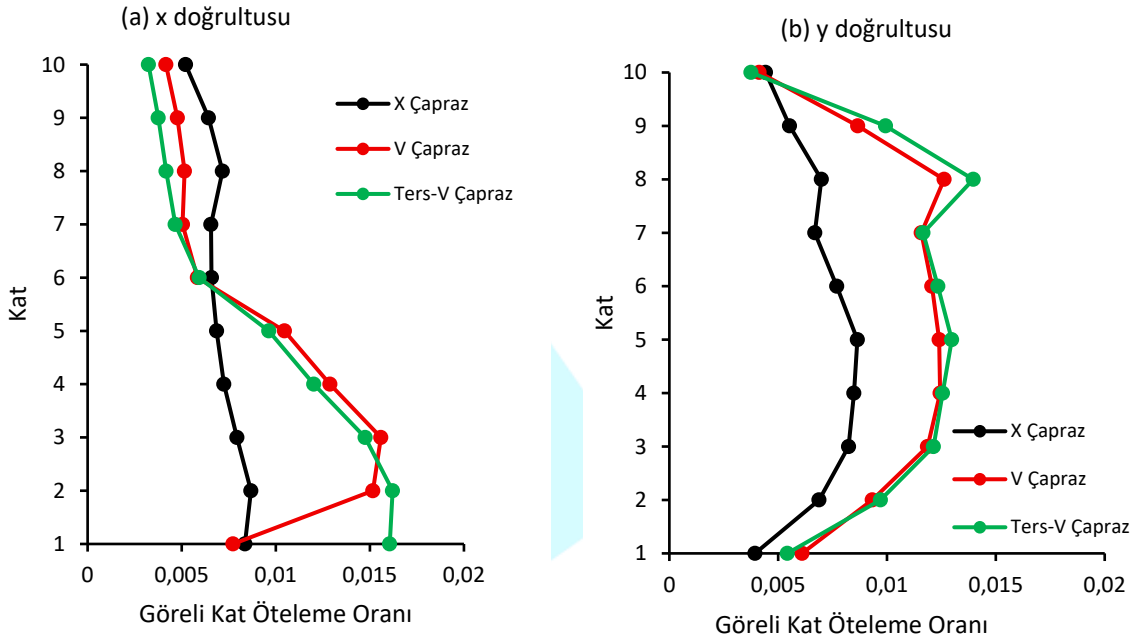
4.1. Göreli Kat Öteleme Oranları

Göreli kat öteleme oranları, taşıyıcı sistemlerin deprem etkileri altındaki yatay rijitliğini ve deformasyon taleplerini değerlendirmede önemli bir performans göstergesidir. Bu çalışmada, X, V ve ters-V merkezi çaprazlı modellerin yakın fay ve uzak fay kayıtları altındaki ortalama göreli kat öteleme oranları X ve Y doğrultuları için ayrı ayrı incelenmiştir. Yakın fay kayıtlarına ait sonuçlar Şekil 4'te, uzak fay kayıtlarına ait sonuçlar ise Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4. Yakın fay kayıtları altında ortalama göreli kat öteleme oranlarının katlara göre değişimi

Şekil 4(a) değerlendirildiğinde, alt ve orta kat seviyelerinde V ve ters-V çaprazlı sistemlerde genel olarak daha yüksek ötelenme oranları elde edilirken, üst kat seviyelerinde X çaprazlı sistemin ötelenme oranlarının arttığı ve bazı katlarda en yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Şekil 4(b)'de yakın fay deprem kayıtları altında Y doğrultusunda elde edilen ortalama göreli kat ötelenme oranları verilmiştir. X çaprazlı model tüm kat seviyelerinde en düşük ötelenme oranlarını oluştururken, V ve ters-V çaprazlı sistemler birbirine oldukça yakın ötelenme profilleri sergilemektedir.



Şekil 5. Uzak fay kayıtları altında ortalama göreli kat öteleme oranlarının katlara göre değişimi

Uzak fay kayıtları için verilen Şekil 5(a) değerlendirildiğinde, X çaprazlı sistem alt ve orta katlarda daha düşük ötelenme oranları oluştururken, üst katlara doğru sistemler arasındaki fark azalmaktadır. Son katlarda X çaprazlı sistemin ötelenme oranları diğer sistemlere yaklaşmakta ve bazı katlarda en yüksek değerlere ulaşmaktadır. V ve ters-V çaprazlı sistemler ise genel olarak benzer bir eğilim göstermektedir. Şekil 5(b)'de uzak fay deprem kayıtları altında Y doğrultusunda elde edilen ortalama göreli kat ötelenme oranları verilmiştir. X çaprazlı sistem tüm kat seviyelerinde en düşük ötelenme oranlarını oluştururken, V ve ters-V çaprazlı sistemler birbirine yakın davranış sergilemiş ve daha yüksek ötelenme talepleri üretmiştir.

4.2. Tepe Yer Değiştirmeleri

Tepe yer değiştirmesi, yapıların deprem etkileri altındaki toplam yatay deformasyon düzeyini göstermesi bakımından önemli bir performans göstergesidir. Bu nedenle X, V ve ters-V merkezi çaprazlı modellerin yakın fay ve uzak fay deprem kayıtları altında elde edilen ortalama tepe yer değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. *Yakın fay ve uzak fay deprem kayıtları altında modellerin tepe yer değiştirme değerleri*

Deprem	Yön	X Çapraz	V çapraz	Ters-V Çapraz
		u_n(cm)	u_n(cm)	u_n(cm)
Yakın Fay	x	14.77	17.37	18.11
	y	14.54	19.75	20.29
Uzak Fay	x	17.17	21.15	22.01
	y	16.83	24.77	25.88

Tablo 5 incelendiğinde, tüm analiz durumlarında en düşük tepe yer değiştirme değerlerinin X çaprazlı modelde elde edildiği görülmektedir. Buna karşılık, en yüksek tepe yer değiştirme değerleri ters-V çaprazlı modelde oluşmuştur. V çaprazlı sistem ise tüm durumlarda iki sistem arasında bir davranış sergilemiştir. Sonuçlar, X çaprazlı sistemin yatay deformasyonları sınırlandırmada daha başarılı olduğunu göstermektedir.

Yakın ve uzak fay kayıtları birlikte değerlendirildiğinde, tüm sistemlerde uzak fay kayıtlarının yakın fay kayıtlarına göre daha büyük yer değiştirme talepleri oluşturduğu görülmüştür. Bu durum, yapı davranışının yalnızca fay uzaklığına değil, deprem kaydının spektral içeriğine ve yapı periyodu ile uyumuna da bağlı olduğunu göstermektedir. İncelenen kayıt seti için uzak fay kayıtlarının, yapıların doğal titreşim periyotlarına karşılık gelen bölgelerde daha yüksek spektral talep oluşturduğu ve bunun sonucunda daha büyük yer değiştirme taleplerine neden olduğu değerlendirilmektedir. Genel olarak, tepe yer değiştirmelerinin sınırlandırılması açısından X çaprazlı sistemlerin daha başarılı performans gösterdiği belirlenmiştir.

4.3. Taban Kesme Kuvvetleri

Taban kesme kuvveti, deprem etkileri altında yapıda oluşan toplam yatay kuvvetlerin temel seviyesine aktarılmış halini göstermesi bakımından önemli bir parametredir. Bu nedenle X, V ve ters-V merkezi çaprazlı modellerin yakın fay ve uzak fay deprem kayıtları altında elde edilen ortalama taban kesme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Tablo 6'te verilmiştir.

Tablo 6. *Yakın ve uzak fay kayıtları altında X, V ve ters-V çaprazlı modellerin taban kesme kuvveti değerleri*

Deprem	Yön	X Çapraz	V çapraz	Ters-V Çapraz
		V_n(kN)	V_n(kN)	V_n(kN)
Yakın Fay	x	5680.02	4700.28	4032.89
	y	5150.84	4429.65	4179.28
Uzak Fay	x	5328.28	4528.11	4054.24
	y	4847.18	4208.04	4098.87

Tablo 6 incelendiğinde, tüm analiz durumlarında en yüksek taban kesme kuvvetlerinin genel olarak X çaprazlı modelde elde edildiği görülmektedir. Bu durum, X çaprazlı sistemin daha yüksek yatay rijitliğe sahip olmasıyla ilişkilendirilebilir. V çaprazlı model tüm analiz durumlarında ara seviyede değerler verirken, en düşük taban kesme kuvvetleri ters-V çaprazlı modelde oluşmuştur.

Yakın ve uzak fay kayıtları birlikte değerlendirildiğinde, sistemler arasındaki taban kesme kuvveti sıralamasının tüm analiz durumlarında korunduğu görülmüştür. X çaprazlı

sistemler daha yüksek taban kesme kuvveti üretirken, V ve özellikle ters-V sistemlerde daha düşük kuvvet değerleri elde edilmiştir.

4.4. Plastik Mafsal Oluşumları ve Hasar Dağılımı

Plastik mafsal oluşumları, yapıların deprem etkileri altındaki elastik ötesi davranışını ve hasarın taşıyıcı sistem boyunca dağılımını göstermesi bakımından önemli bir performans göstergesidir. Bu nedenle X, V ve ters-V merkezi çaprazlı modellerde oluşan plastik mafsallar kat bazında ve eleman türlerine göre değerlendirilmiştir. Yakın fay kayıtları için sonuçlar Tablo 7'da uzak fay kayıtları için ise Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 7. *Yakın fay depremi etkisinde modellerin kat bazında mafsallaşma oranları(%)*

KAT	X Çapraz			V Çapraz			Ters-V Çapraz		
	Kolon	Kiriş	Çapraz	Kolon	Kiriş	Çapraz	Kolon	Kiriş	Çapraz
10	0	0	31.1	0	0	6.1	0	0	7.6
9	0	0	87.9	0	1.5	24.2	0	0	26.5
8	0	0	85.6	0	1.5	59.1	0	4.6	60.6
7	0	0	87.9	0	13.6	41.7	0	9.1	53
6	0	0	79.6	0	7.6	55.3	0	9.1	53
5	0	0	83.3	0	10.6	65.9	0	9.1	65.2
4	0	0	92.4	1.3	25.8	75	0	15.2	70
3	0	0	98.5	2.6	20	91.7	0.65	16.7	84.1
2	0	0	100	1.3	33.3	100	1.3	19.7	100
1	5.2	0	100	9.4	56.1	95.5	20.1	39.4	100

Tablo 8. *Uzak fay depremi etkisinde modellerin kat bazında mafsallaşma oranları(%)*

KAT	X Çapraz			V Çapraz			Ters-V Çapraz		
	Kolon	Kiriş	Çapraz	Kolon	Kiriş	Çapraz	Kolon	Kiriş	Çapraz
10	0	0	12.1	0	0	5.3	0	0	13.6
9	0	0	76.5	0	1.5	25	0	3	26.5
8	0	0	87.9	0	3	43.9	0	12.1	37.1
7	0	0	83.3	0	13.6	35.6	0	10.6	42.4
6	0	0	84.9	0	12.1	65.2	0	15.2	62.9
5	0	0	92.4	0	19.7	81.8	0	28.8	80.3
4	0	0	98.5	0	28.8	89.4	0	34.9	87.9
3	0	0	97	0	54.6	90.2	0	33.3	87.9
2	0	0	99.2	0	56.1	97	0	48.5	96.2
1	0	0	100	5.8	65.2	93.9	14.9	47	98.5

Tablo 7 ve Tablo 8 incelendiğinde, tüm modellerde en yüksek mafsallaşma oranlarının genel olarak çapraz elemanlarda meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, merkezi çaprazlı çelik çerçeve sistemlerde deprem enerjisinin büyük ölçüde çapraz elemanlar aracılığıyla tüketildiğini göstermektedir. X çaprazlı modelde plastikleşmenin büyük ölçüde çapraz elemanlarda yoğunlaştığı, kiriş ve kolon elemanlarında ise oldukça sınırlı düzeyde kaldığı belirlenmiştir. Buna karşılık, V ve ters-V çaprazlı modellerde plastikleşmenin yalnızca çapraz elemanlarla sınırlı kalmadığı, kiriş ve kolon elemanlarına da yayıldığı görülmüştür. Özellikle alt katlarda daha belirgin olmak üzere, kiriş mafsallaşma oranlarının arttığı ve hasarın daha geniş bir eleman grubuna dağıldığı tespit edilmiştir.

Yakın fay ve uzak fay kayıtları birlikte değerlendirildiğinde, genel mafsallaşma dağılımının benzer olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, uzak fay kayıtları altında bazı kat

seviyelerinde kiriş mafsallaşma oranlarının arttığı belirlenmiştir. Genel olarak X çaprazlı sistemlerin hasarı daha kontrollü biçimde çapraz elemanlarda topladığı, V ve ters-V sistemlerde ise hasarın kiriş ve kolon elemanlarına daha fazla yayıldığı sonucuna ulaşılmıştır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, X, V ve ters-V merkezi çapraz düzenlerine sahip 10 katlı çelik çerçeve sistemlerin yakın fay ve uzak fay deprem kayıtları altındaki doğrusal olmayan davranışları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, çapraz geometrisinin yapı performansı üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu göstermiştir.

X çaprazlı model, göreli kat öteleme oranları ve tepe yer değiştirmeleri bakımından genel olarak daha düşük değerler üretmiştir. V ve özellikle ters-V çaprazlı modellerde ise daha yüksek deformasyon talepleri oluşmuştur.Taban kesme kuvvetleri incelendiğinde en yüksek değerlerin tüm analiz durumlarında X çaprazlı modelde meydana geldiği belirlenmiştir.

Plastik mafsal dağılımları değerlendirildiğinde, tüm modellerde plastikleşmenin büyük ölçüde çapraz elemanlarda yoğunlaştığı görülmüştür. X çaprazlı modelde plastikleşme çoğunlukla çapraz elemanlarla sınırlı kalırken, V ve ters-V çaprazlı modellerde kiriş ve kolon elemanlarında daha yaygın mafsallaşma oluşmuştur. Özellikle ters-V çaprazlı modelde alt kat seviyelerinde hasarın daha geniş bir eleman grubuna yayıldığı belirlenmiştir.

Yakın fay ve uzak fay kayıtları birlikte değerlendirildiğinde, genel davranış eğilimlerinin büyük ölçüde benzer olduğu, ancak seçilen kayıtların spektral özellikleri nedeniyle uzak fay kayıtlarının daha yüksek yer değiştirme taleplerine neden olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, X çaprazlı sistemlerin ötelenme kontrolü ve hasarın sınırlandırılması açısından daha kontrollü davranış sergilediği; V ve ters-V sistemlerde ise daha yüksek deformasyon ve daha yaygın plastikleşme oluşabildiği belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2018). *Türkiye bina deprem yönetmeliği (TBDY-2018).* Ankara, Türkiye.

Akşar, B., Doğru, S., Çakır, F., Shen, J., & Akbaş, B. (2018). Merkezi çaprazlı çerçevelerde dayanım farklılığı sonucu oluşan burulma etkileri. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33*(1), 13–30.

Baker, J. W. (2007). Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America, 97*(5), 1486–1501.

Bozkurt, M. B., & Zeybek, Ö. (2021). Çapraz konfigürasyonunun merkezi çaprazlı çelik çerçevelerin tasarımına ve dinamik performansına etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 23*(68), 399–412.

Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (4th ed.). Prentice Hall.

Computers and Structures Inc. (2020). *SAP2000 integrated finite element analysis and design of structures* (Version 22) [Computer software]. Berkeley, CA, USA.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2018). *Çelik yapıların tasarım, hesap ve yapım esaslarına dair yönetmelik.* Resmî Gazete (Sayı: 30364 Mükerrer).

Hall, J. F., Heaton, T. H., Halling, M. W., & Wald, D. J. (1995). Near-source ground motion and its effects on structures. *Earthquake Spectra, 11*(4), 569–605.

Hsiao, P. C., Lehman, D. E., & Roeder, C. W. (2013). Improved analytical model for special concentrically braced frames. *Journal of Constructional Steel Research, 88*, 80–94.

İnce, G., & Girgin, A. (2024). Merkezi çaprazlı çerçevelerde çapraz kesitlerinin sismik performansa etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30*(2), 240–256.

Kalkan, E., & Kunnath, S. K. (2006). Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings. *Earthquake Spectra, 22*(2), 367–390.

Khademi, Y., & Rezaie, M. (2017). Comparison study of CBFs and EBFs bracing in steel structures with nonlinear time history analysis. *Civil Engineering Journal, 3*(11), 1157–1165.

Nassani, D. E., Hussein, A. K., & Mohammed, A. H. (2017). Comparative response assessment of steel frames with different bracing systems under seismic effect. *Structures, 11*, 229–242.

Pacific Earthquake Engineering Research Center. (2025). *PEER ground motion database*. University of California, Berkeley. PEER Ground Motion Database

Tremblay, R. (2002). Inelastic seismic response of steel bracing members. *Journal of Constructional Steel Research, 58*(5–8), 665–701.

Türk Standardları Enstitüsü. (1997). *TS 498: Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerleri.* Ankara, Türkiye.

Türk Standardları Enstitüsü. (2005). *TS EN 1991-1-3 Eurocode 1: Yapılar üzerindeki etkiler – Bölüm 1-3: Genel etkiler – Kar yükleri.* Ankara, Türkiye.

Türk Standardları Enstitüsü. (2007). *TS EN 1991-1-4 Eurocode 1: Yapılar üzerindeki etkiler – Bölüm 1-4: Genel etkiler – Rüzgâr etkileri.* Ankara, Türkiye.

Uriz, P., & Mahin, S. A. (2008). *Toward earthquake-resistant design of concentrically braced steel-frame structures* (PEER Report No. 2008/08). Pacific Earthquake Engineering Research Center.

Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 31*(3), 491–514.

Yaman, Z., & Ağcakoca, E. (2017). Dairesel kesite sahip merkezi çelik çaprazların performans analizi. *Sakarya University Journal of Science, 22*, 340–350.

Yıldızhan Sağer, B., & Temel, B. (2022). Moment aktaran ve merkezi çaprazlı çok katlı çelik yapıların 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre analizi ve tasarımı. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37*(4), 1017–1029.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Approximate Solution of the Nonlinear Equation (fKdV) using the Multiple Scale Method

Murat KOPARAN[1]

Abstract

Studies in science and engineering demand the visualization of mathematical models of real-life phenomena and the development of formulas. A wide variety of physical, chemical, and biological phenomena are described by nonlinear evolution equations (NLEEs). The study of exact solutions of nonlinear evolution equations (NLEEs) plays a crucial role in the study of nonlinear physical phenomena. Recently, NLEEs have emerged as an important field of study in applied mathematics. Many nonlinear differential equations may not be exactly solvable. However, approximate solutions can be obtained using numerical methods and perturbations. Perturbations are asymptotic expansions with respect to a small or large parameter or coordinate. This method allows us to find the solution of the given nonlinear equation depending on the solution of the linear part by using multiple scales, which are defined as the slow variables and depend on a parameter in time and space variables. First, Zakharov and Kuznetsov showed that integrable systems can be reduced to other integrable systems using this method. This study relates the multiple scale method, which is known as a perturbation method for nonlinear evolution equations. In this report, a method of multiple scales is presented for the analysis of the (1+1)-dimensional fifth-order Kaup-Kupershmidt (KK) equation, and we derive a nonlinear Schrödinger (NLS) type equation. Finally, we obtain an approximate solution of the fifth-order (1 + 1) dimension Kaup-Kupershmidt (KK) equation.

Keywords: Perturbation, The multiple scales method, Nonlinear Schrödinger (NLS) equation, Fifth-order Korteweg-de Vries equation (fKdV), Kaup-Kupershmidt (KK) equation.

[1] Professor Dr., Anadolu University Faculty of Education, Department of Mathematics and Science Education, Orcıd: 0000-0003-1698-9661.

INTRODUCTION

The multiple scales expansion method is a perturbation method. First applied by Zakharov and Kuznetsov [1], the multiple scales expansion method was developed by reducing the KdV equation to the NLS equation and applying it to a class of nonlinear formation equations. Using this method, they showed that integrable systems can be reduced to other integrable systems. Even if the system we initially take is not an integrable system, the system reduced as a result of applying the method is either integrable or non-integrable. However, if the method is applied to an integrable system, the system obtained at the end of the analysis is always an integrable system. This is the main purpose of applying the multiscale expansion method to integrable systems.

Known for its distinguished role in the development of nonlinear physics, the Korteweg-de Vries (KdV) equation has been derived in a variety of physical contexts. For example, it can be thought of as modeling the unilateral propagation of long-wavelength gravitational waves of small amplitude in a shallow channel. In any case, the Korteweg-de Vries equation is obtained with a certain degree of approximation and, therefore, cannot be considered to represent physical reality with perfect accuracy. Therefore, an important question arises about what would happen to the solutions of the Korteweg-de Vries equation when perturbations from neglected terms in the derivation come into play. For instance, would the perturbed Korteweg-de Vries equation still have a well-localized single-wave solution? The answer, sure, would depend on the nature and physical origin of the perturbation. Currently, studies are underway on the nonlinear fifth-order KdV-type equations, as they can describe real properties in various scientific applications and engineering fields, and have practical and physical significance. The theory of nonlinear dispersive wave motion has recently been the subject of extensive study. We do not attempt to characterize the general form of nonlinear dispersive wave equations [2, 5]. Nonlinear phenomena play a crucial role in applied mathematics and physics [6, 10].

The nonlinear Schrödinger (NLS) equation is an example of a universal nonlinear model because it describes a wide variety of physical systems. As a result, the equation may be used to describe a wide range of nonlinear physical events. The multiple scales analysis of the Korteweg-de Vries (KdV) equation causes the Nonlinear Schrödinger (NLS) equation for the regulated amplitude to be widely known [11-15]. In [1], Zakharov and Kuznetsov indicated a much deeper correspondence between these integrable equations not only at the level of the equation, but also at the level of the linear spectral problem by showing that a multiple scales analysis of the Schrödinger spectral problem leads to the Zakharov-Shabat problem for the Nonlinear Schrödinger (NLS) equation. The nonlinear Schrödinger (NLS) equation is an example of a universal nonlinear model because it describes a wide variety of physical systems. As a result, the equation may be used to describe a wide range of nonlinear physical events [16-18].

MULTİPLE SCALES METHOD

In this section, we consider the application of the multiple scales method to NEEs. Using the technique of Zakharov and Kuznetsov [3], getting the NLS-type equations from KdV-type equations was shown step by step.

Let us consider the general evolution equation in the following form.

$$u_t = K(u, u_x, u_y \ldots) \tag{1}$$

where $K[u]$ is a function of u and its derivatives with respect to the x-spatial variables. The well-known example of this type is the KdV equation.

Let $L[\partial_x, \partial_y]u$ be the linear part of $K[u]$. So, using, $K[u]$ we can reach the dispersion relation for Eq. (1). Substituting the wave solution space

$$\begin{aligned} u_k &= Ae^{i(kx+ry-\omega(k,r)t)} \\ &\equiv Ae^{i\theta} \end{aligned} \tag{2}$$

into the linear part of Eq. (1)

$$u_t = L[\partial_x, \partial_y]u \tag{3}$$

we get the dispersion relation

$$\omega(k,r) = iL[ik, ir] \tag{4}$$

Then, the dispersion relation (4) is substituted in Eq. (1). We assume the following series expansions for the solution of Eq. (1):

$$u(x,y,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n U_n(x,t,\xi,\tau) \tag{5}$$

Based on this solution, we also define slow space ξ and multiple time variables τ with respect to the scaling parameter $\varepsilon > 0$, respectively, as follows.

$$\begin{aligned} \xi &= \varepsilon\left(x - \frac{d\omega(k,r)}{dk}t\right) \\ \tau &= -\tfrac{1}{2}\varepsilon^2\left(\frac{d^2\omega(k,r)}{dk^2}\right)t \end{aligned} \tag{6}$$

A nonlinear equation modulates the amplitude of this plane wave solution in such a way that it may be considered dependent upon the slow variables. If we choose the slow variables' different forms, we can derive higher-order NLS equations. The multiple scales analysis starts with the assumption:

$$u(x,y,t) = U(x,y,t,\xi,\tau) \tag{7}$$

and solution is in the form

$$U(x,y,t,\xi,\tau) = (\varepsilon U_1 + \varepsilon^2 U_2 + \varepsilon^3 U_3 + \ldots) \tag{8}$$

Then, considering transformation (7) and solution (8), using dispersion relation (4) and slow variables (6), we get u and its derivatives with respect to ε in Eq. (1). And we substitute these terms with (7) and (8) in the Eq. (1). Collecting all terms with the same order of ε together, the left-hand side of Eq. (1) is converted into a polynomial in ε. Then setting each coefficient of this polynomial to zero, we get a set of algebraic equations. Using wave solution space (2) and dispersion relation (4), these equations can be solved by iteration and by use of Maple. So, we can get NLS-type equations from Eq. (1). Also, from this procedure, we can reach numerical solutions of KdV-type equations.

THE FIFTH ORDER KdV EQUATİON (fKdV)

The multiple scales expansion method is used to study the standard fifth-order KdV equation (fKdV) of the form [19-22]

$$u_t + u_{xxxxx} + \gamma u u_{xxx} + \beta\, u_x u_{xx} + \alpha\, u^2 u_x = 0 \tag{9}$$

where α, β, and γ are arbitrary nonzero and real parameters, and u = u(x, t) is a sufficiently often differentiable function. The parameters α, β, and γ are arbitrary, which will drastically change the characteristics of the fKdV equation (9). Lots of forms of the fKdV equation can be constructed by changing these parameters, but four forms of the fKdV that are of particular interest, namely:

The Lax equation [23] is given by

$$u_t + u_{xxxxx} + 10 u u_{xxx} + 20 u_x u_{xx} + 30 u^2 u_x = 0 \tag{10}$$

and characterized by $\beta = 2\gamma$, $\alpha = \frac{3}{10}\gamma^2$.

The Sawada–Kotera (SK) [24] equations is given by

$$u_t + u_{xxxxx} + 5 u u_{xxx} + 5 u_x u_{xx} + 5 u^2 u_x = 0 \tag{11}$$

and characterized by $\beta = \gamma$, $\alpha = \frac{1}{5}\gamma^2$.

The Sawada–Kotera–Parker–Dye (SKPD) equation

$$u_t + u_{xxxxx} - 15 u u_{xxx} - 15 u_x u_{xx} + 45 u^2 u_x = 0 \tag{12}$$

obtained by Parker and Dye [2] where γ = -15 was selected to make β = -15 and α = 45 to obtain a second form of the SK equation.

The Kaup–Kupershmidt [25,26] equation

$$u_t + u_{xxxxx} + 10 u u_{xxx} + 25\, u_x u_{xx} + 20 u^2 u_x = 0 \tag{13}$$

and characterized by $\beta = \frac{2}{5}\gamma$, $\alpha = \frac{1}{5}\gamma^2$.

The Kaup–Kupershmidt–Parker–Dye equation (KKPD) [22,25,26] equation

$$u_t + u_{xxxxx} - 15uu_{xxx} - \frac{75}{2}u_x u_{xx} + 45u^2 u_x = 0 \tag{14}$$

established by Parker and Dye [10] where γ = -15 was selected that makes β = $-\frac{75}{2}$ and α = 45 to obtain another form for the KK equation.

The Ito equation [21]

$$u_t + u_{xxxxx} + 3uu_{xxx} + 6\,u_x u_{xx} + 2u^2 u_x = 0 \tag{15}$$

and characterized by β = 2 γ, $\alpha = \frac{2}{9}\gamma^2$.

It was found that the Lax, SK, and KK equations belong to the completely integrable hierarchy of higher-order KdV equations. These three equations have infinite sets of conservation laws [20, 27]. However, the Ito equation is not completely integrable but has a limited number of conservation laws [28].

APPLICATIONS

In this section, we will apply the multiscale expansion method to the (1+1)-dimensional fifth-order nonlinear Kaup–Kupershmidt (KK) (13), where u_{kx} denotes the partial derivative $\partial^k u / \partial x^k$ equation.

To find the dispersion relation for (11), we consider the linear part of (11) in the form

$$u_t = u_{xxxxx} \tag{16}$$

and linear differential equation (16) satisfies the solution

$$u(x,t) = e^{i\theta}, \theta = kx - w(k)t \tag{17}$$

Substituting the solution (17) into the linear differential equation (16), we get

$$we^{i(kx-wt)} = k^5 e^{i(kx-wt)} \tag{18}$$

and from this, we reach the

$$w(k) = k^5 \tag{19}$$

dispersion relation. Thus, the solution of linear differential equation (16) is as follows:

$$u(x,t) = e^{i(kx-k^5 t)} \tag{20}$$

Let the solution of Eq. (11) be in the form

$$u(x,t) = U(x,t,\xi,\tau) \quad , \quad U(x,t,\xi,\tau) = \varepsilon U_1 + \varepsilon^2 U_2 + \varepsilon^3 U_3 + \ldots \tag{21}$$

and slow variables are in the form

$$\begin{aligned} \xi &= \varepsilon(x - \tfrac{dw(k)}{dk}t) \\ &= \varepsilon(x - 5k^4 t) \\ \tau &= -\tfrac{1}{2}\varepsilon^2(\tfrac{d^2w(k)}{dk^2}t) \\ &= -10\varepsilon^2 k^3 t \end{aligned} \tag{22}$$

In this case, the derivative terms in equation (11) are obtained as follows using (20-22).

$$\begin{aligned} D_x &= \partial_x + \varepsilon\partial_\xi \\ D_t &= \partial_t - 5\varepsilon k^4 \partial_\xi - 10\varepsilon^2 k^3 \partial_\tau \\ D_{xx} &= \partial_{xx} + 2\varepsilon\partial_{x\xi} + \varepsilon^2\partial_{\xi\xi} \\ D_{xxx} &= \partial_{xxx} + 3\varepsilon\partial_{xx\xi} + 3\varepsilon^2\partial_{x\xi\xi} + \varepsilon^3\partial_{\xi\xi\xi} \\ D_{xxxx} &= \partial_{xxxx} + 4\varepsilon\partial_{xxx\xi} + 6\varepsilon^2\partial_{xx\xi\xi} + 4\varepsilon^3\partial_{x\xi\xi\xi} + \varepsilon^4\partial_{\xi\xi\xi\xi} \\ D_{xxxxx} &= \partial_{xxxxx} + 5\varepsilon\partial_{xxxx\xi} + 10\varepsilon^2\partial_{xxx\xi\xi} + 10\varepsilon^3\partial_{xx\xi\xi\xi} \\ &\quad + 5\varepsilon^4\partial_{x\xi\xi\xi\xi} + \varepsilon^5\partial_{\xi\xi\xi\xi\xi} \end{aligned} \tag{23}$$

Then, taking into account the transformation (13) and the solution (21), using the dispersion relation (19) and the slow variables (22), we obtain u and its derivatives with respect to ε in Eq. (13). We replace these terms with (20) and (21) in the Eq. (11). By adding together all terms with the same ε-order, the left-hand side of Eq. (13) is turned into a polynomial in ε. After setting each coefficient of this polynomial equal to zero, we obtain a set of algebraic equations. If we let $\varepsilon \to 0$ and vanish the terms at minimal powers of epsilon, by considering the case $n \geq 1$, we obtain the following:

$$\varepsilon = u_{1t} + u_{1xxxxx} = 0 \tag{24}$$

$$\varepsilon^2 = u_{2t} - 5k^4 u_{1\xi} + 10u_1 u_{1xxx} + 25u_{1x}u_{1xx} + u_{2xxxxx} + 5u_{1xxxx\xi} = 0 \tag{25}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon^3 \quad = \quad & u_{3t} - 5k^4 u_{2\xi} - 10k^3 u_{1\tau} + 20u_1^2 u_{1x} + 10u_{1xxx\xi\xi} \\ & + 5u_1\left(u_{2xxx} + 3u_{1xx\xi}\right) + 10u_2 u_{1xxx} - u_{3xxxxx} \\ & + 25u_{1x}\left(u_{2xx} + 2u_{1x\xi}\right) + 25u_{1xx}\left(u_{2x} + u_{1\xi}\right) + 5u_{2xxxx\xi} = 0\end{aligned}$$

(26)

Then, we can find the solution of (24) as follows

$$u_1(x,t,\xi,\tau) = v_1(\xi,\tau)e^{i(kx-k^5t)} + v_{-1}(\xi,\tau)e^{-i(kx-k^5t)} \tag{27}$$

where v_{-1} is the complex conjugate of v_1. Substituting the solution (27) into (25), the solution of (25) is in the form,

$$u_2(x,t,\xi,\tau) = v_2(\xi,\tau)e^{2i(kx-k^5t)} + v_{-2}(\xi,\tau)e^{-2i(kx-k^5t)} + f_1(\xi,\tau) \tag{28}$$

where $f_1(\xi,\tau)$ is an integration constant. Thus, we get

$$v_2(\xi,\tau) \quad = \quad \frac{7v_1^2(\xi,\tau)}{6k^2} \quad , \quad v_{-2}(\xi,\tau) \quad = \quad \frac{7v_{-1}^2(\xi,\tau)}{6k^2} \tag{29}$$

where v_{-1} is the complex conjugate of v_1 and v_{-2} is the complex conjugate of v_2. Substituting solutions (26), (28), and (29) into (26), we find the solution of (26) in the form

$$\begin{aligned}u_3(x,t,\xi,\tau) \quad = \quad & v_3(\xi,\tau)e^{3i(kx-k^5t)} + v_{-3}(\xi,\tau)e^{-3i(kx-k^5t)} \\ & + f_2(\xi,\tau)e^{2i(kx-k^5t)} + f_3(\xi,\tau)e^{-2i(kx-k^5t)}\end{aligned} \tag{30}$$

where $f_2(\xi,\tau)$ and $f_3(\xi,\tau)$ are integration constants. Then we get

$$\mathrm{v}_3(\xi,\tau) \quad = \quad \frac{13\mathrm{v}_1^3(\xi,\tau)}{12\mathrm{k}^4} \quad , \quad \mathrm{v}_{-3}(\xi,\tau) \quad = \quad \frac{13\mathrm{v}_{-1}^3(\xi,\tau)}{12\mathrm{k}^4} \tag{31}$$

and

$$\begin{aligned}f_1(\xi,\tau) \quad &= \quad \frac{6v_1v_{-1}}{k^2} \\ f_2(\xi,\tau) \quad &= \quad \frac{-7iv_{-1}v_{-1\xi}}{3k^3} \\ f_3(\xi,\tau) \quad &= \quad \frac{7iv_1v_{1\xi}}{3k^3}\end{aligned} \tag{32}$$

where v_{-3} and f_3 are the complex conjugates of v_3 and, f_2 respectively. Thus, the solutions of (31) - (32) are obtained as

$$u_1 = v_1(\xi,\tau)e^{i\theta} + v_{-1}(\xi,\tau)e^{-i\theta}$$

$$u_2 = k^{-2}(6v_1(\xi,\tau)v_{-1}(\xi,\tau) + \frac{7}{6}(v_1^2(\xi,\tau)e^{2i\theta} + v_{-1}^2(\xi,\tau)e^{-2i\theta}))$$

$$u_3 = k^{-3}(-\frac{7}{3}iv_{-1}(\xi,\tau)v_{-1\xi}(\xi,\tau)e^{-2i\theta} + \frac{7}{3}iv_1(\xi,\tau)v_{1\xi}(\xi,\tau)e^{2i\theta}) + \frac{13}{12}k^{-4}(v_1^3(\xi,\tau)e^{3i\theta} + v_{-1}^3(\xi,\tau)e^{-3i\theta})$$

(33)

where

$$\theta = \left(kx - k^5 t\right) \tag{34}$$

Finally, substituting the solutions (33) into (26), we get

$$iv_{1\tau} = v_{1\xi\xi} - \frac{2}{k^2}v_1 v_{-1}$$

$$iv_{1\tau} = v_{1\xi\xi} - \frac{2}{k^2}v_1|v_1|^2 \tag{35}$$

Describing as $q = \frac{v_1}{k}$ and $q_{-1} = \frac{v_{-1}}{k}$ (35) equation, we get the dimensional NLS-type equations in the form

$$iq_\tau = q_{\xi\xi} - 2q|q^2| \tag{36}$$

Also, the numerical solution of the (1+1)-dimensional Kaup-Kupershmidt (KK) equation (13) is found as

$$u(x,t) = \varepsilon k(q(\xi,\tau)e^{i(kx-k^5t)} + q_{-1}(\xi,\tau)e^{-i(kx-k^5t)}) + \varepsilon^2(6q(\xi,\tau)q_{-1}(\xi,\tau) + \frac{7}{6}q^2(\xi,\tau)e^{2i(kx-k^5t)} + \frac{7}{6}q_{-1}^2(\xi,\tau)e^{-2i(kx-k^5t)}) + k\varepsilon^3(-\frac{7}{3}iq_{-1}(\xi,\tau)q_{-1\xi}(\xi,\tau)e^{-2i(kx-k^5t)} + \frac{7}{3}iq(\xi,\tau)q_\xi(\xi,\tau)e^{2i(kx-k^5t)}) + \frac{13}{12}k\varepsilon^3(q_1^3(\xi,\tau)e^{3i(kx-k^5t)} + q_{-1}^3(\xi,\tau)e^{-3i(kx-k^5t)})$$

(37)

where q is the solution of the NLS equation.

RESULTS AND DISCUSSIONS

The multiple scales method, which is a perturbation method, is used to find approximate solutions of nonlinear evolution equations. This method allows us to find the solution of the

given nonlinear equation depending on the solution of the linear part by using multiple scales, which are defined as the slow variables and depend on a parameter, in time and space variables. First, Zakharov and Kuznetsov showed that integrable systems can be reduced to other integrable systems using this method. If the initially taken system is not integrable, it is seen that the reduced system is either integrable or non-integrable as a result of the application of the method. However, if the method is applied to an integrable system, it is seen that the system obtained as a result of the analysis is always integrable. This is the main purpose of applying the multiple-scale methods to integrable systems. In this study, we examined how only NLS-type equations are derived from fKdV-type equations using the multiple scales method. We hope this conclusion serves as a valuable resource for researchers, scientists, and engineers interested in nonlinear wave theory, inspiring a deeper desire to explore further and reveal the mysteries still held within the intricate language of the NLS equation. At the same time, we think that the obtained results will form the basis of numerical calculations. Also, the method can be applied to many different NLEE equations.

REFERENCES

[1] Zakharov V, Kuznetsov E.A. (1986). Multiscale expansions in the theory of systems integrable by the inverse scattering transform. Physica D 18, 455-63.

[2] Wazwaz A. M. (2002). Partial Differential Equations: Methods and Applications. Rotterdam: Balkema.

[3] Wazwaz, A. M. (2008). The KdV equation. Handbook of Differential Equations: Evolutionary Equations, 4, 485-568.

[4] Wazwaz A. M. (2009). Partial Differential Equations and Solitary Waves Theory. Springer, Berlin Heidelberg.

[5] Groves M. D. (2004). Study of Water Waves, J. Nonlinear Math. Phys. Vol. 11, 435–460.

[6] Ablowitz M.J. (2011). Nonlinear Dispersive Waves: Asymptotic Analysis and Solitons, Cambridge University Press, New York.

[7] Bruckner M.C. Düll W.P. and G. Schneider. (2014) Validity of The KdV Equation for The Modulation of Periodic Traveling Waves in The NLS Equation, J. Math. Anal. Appl. Vol. 414: 166–175.

[8] Hong Y. Kwak C. and C. Yang (2022). Strichartz estimates for higher-order Schrödinger equations and their applications. J. Differential Equations, 324:41–75.

[9] Saleem, S., Hussain, M. Z., & Aziz, I. (2022). An approximation of the one-dimensional nonlinear Korteweg-de Vries equation of order nine. Plos one, 17(1), e0262157.

[10] Debnath L. (1997). Nonlinear Partial Differential Equations for Scientists and Engineers. Boston: Birkhauser.

[11] Calegora S. F, Degasperis A, Xiaosdo Ji. (2001). Nonlinear Schrödinger-type equations from multiscale reduction of PDEs I. Systematic derivation. J Math Phys 42, 2635-2652.

[12] Degasperis A, Manakov SV, Santini PM. (1997). Multiple-scale perturbation beyond the nonlinear Schrödinger equation I. Physica D 100, 187-211.

[13] Osborne AR, Boffetta G. (1989). The shallow water NLS equation in Lagrangian coordinates. Phys Fluid A 1, 1200-1210.

[14] Osborne A. R, Boffetta G. A. (1991). Summable multiscale expansion for the KdV equation. In: Degasperis A, Fordy AP, Lakshmanan M, editors. Nonlinear evolution equations. Integrability and Spectral Methods. MUP, Manchester and New York, 559-571.

[15] Bruzón Gallego, M. D. L. S., Márquez Lozano, A. D. P., Garrido Letrán, T. M., Recio Rodríguez, E., & Rosa Silva, R. D. L. (2019). Conservation laws for a generalized seventh-order KdV equation.

[16] Seadawy, A. R. (2012). Exact solutions of a two-dimensional nonlinear Schrödinger equation. *Applied Mathematics Letters*, *25*(4), 687-691.

[17] Liu, W. M., & Kengne, E. (2019). *Schrödinger equations in nonlinear systems* (Vol. 37). Springer Singapore.

[18] Al Khawaja, U., & Al Sakkaf, L. (2024). *Handbook of exact solutions to the nonlinear Schrödinger equations*. IOP Publishing.

[19] Wazwaz, A. M. (2006). Abundant soliton solutions for several forms of the fifth-order KdV equation by using the tanh method. *Applied Mathematics and Computation*, *182*(1), 283-300.

[20] Göktaş, Ü., & Hereman, W. (1997). Symbolic computation of conserved densities for systems of nonlinear evolution equations. *Journal of Symbolic Computation*, *24*(5), 591-622.

[21] Ito, M. (1980). An extension of nonlinear evolution equations of the K-dV (mK-dV) type to higher orders. *Journal of the Physical Society of Japan*, *49*(2), 771-778.

[22] Parker, A., & Dye, J. M. (2002). Boussinesq-type equations and switching solitons. *Proc. Inst. NAS Ukraine*, *43*(1), 344-351.

[23] Lax, P. D. (1968). Integrals of nonlinear equations of evolution and solitary waves. *Communications on pure and applied mathematics*, *21*(5), 467-490.

[24] Sawada, K., & Kotera, T. (1974). A method for finding N-soliton solutions of the KdV equation and KdV-like equations. *Progress of theoretical physics*, *51*(5), 1355-1367.

[25] Kaup, D. J. (1980). On the inverse scattering problem for cubic eigenvalue problems of the class $\psi xxx + 6Q\psi x + 6R\psi = \lambda\psi$. *Studies in applied mathematics*, *62*(3), 189-216.

[26] Kupershmidt, B. A. (1984). A super Korteweg-de Vries equation: an integrable system. *Physics Letters A*, *102*(5-6), 213-215.

[27] Hereman, W., & Nuseir, A. (1997). Symbolic methods to construct exact solutions of nonlinear partial differential equations. *Mathematics and Computers in Simulation*, *43*(1), 13-27.

[28] Wazwaz, A. M. (2007). The extended tanh method for new soliton solutions for many forms of the fifth-order KdV equations. *Applied Mathematics and Computation*, *184*(2), 1002-1014.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

A Multiple Scales Method for Solving the Nonlinear (fKdV) Equation

Murat KOPARAN[1]

Abstract

The mathematical models of problems arising in many branches of science are nonlinear evolution equations (NLEEs). For this reason, nonlinear equations of evolution have served as a language in formulating many engineering and scientific problems. Although the origin of nonlinear evolution equations dates back to ancient times, significant developments have been made in these equations up to the present day. The main reason for this situation is that nonlinear equations of evolution involve the problem of nonlinear wave propagation. Therefore, many different and effective techniques have been developed regarding nonlinear evolution equations and solution methods. Studies conducted in recent years show that evolution equations are becoming increasingly important in applied mathematics. This study is about the multiple scales method, known as the perturbation method for nonlinear equations of evolution (NLEE). This method allows us to find the solution of the given nonlinear equation depending on the solution of the linear part by using multiple scales, which are defined as the slow variables and depend on a parameter in time and space variables. First, Zakharov and Kuznetsov showed that integrable systems can be reduced to other integrable systems using this method. In this report, the multiple scales method was applied for the analysis of (1+1)-dimensional fifth-order Korteweg-de Vries (fKdV) equation, and we derived a nonlinear Schrödinger (NLS) type equation. Finally, we obtain an approximate solution of the fifth-order (1 + 1) dimension Sawada-Kotera (SK) equation.

Keywords: Perturbation**,** The multiple scales method, Nonlinear Schrödinger (NLS) equation, Fifth-order Korteweg-de Vries equation (fKdV), Sawada-Kotera equation (SK).

[1] Professor Dr., Anadolu University Faculty of Education, Department of Mathematics and Science Education, Orcıd: 0000-0003-1698-9661.

INTRODUCTION

The multiple scales expansion method is a perturbation method. First applied by Zakharov and Kuznetsov [1], the multiscale expansion method was developed by reducing the KdV equation to the NLS equation and applying it to a class of nonlinear formation equations. Using this method, they showed that integrable systems can be reduced to other integrable systems. Even if the system we initially consider is not integrable, the reduced system obtained by applying the method is either integrable or non-integrable. However, if the method is applied to an integrable system, the system obtained at the end of the analysis is always an integrable system. This is the main purpose of applying the multiscale expansion method to integrable systems.

The Korteweg-de Vries (KdV) equation was derived in various physical contexts. The Korteweg-de Vries (KdV) equation can also be used to model the one-sided breeding of small-amplitude, long-wavelength gravity waves in a shallow channel. In all cases, the Korteweg-de Vries (KdV) equation is attained at a definite approximation degree, so it can't be accepted that it represents physical reality with perfect accuracy. Thus, one important question that emerges is what happens to the solutions of Korteweg-de Vries (KdV) when perturbations, resulting from the terms neglected in its derivation, are applied. For example, whether the perturbed Korteweg-de Vries (KdV) equation has a solitary-wave-type solution can be asked. The answer would be related to the physical origin and nature of the perturbation. The theory of nonlinear dispersive wave motion has recently been the subject of extensive study. We do not attempt to characterize the general form of nonlinear dispersive wave equations [2, 5]. Nonlinear phenomena play a crucial role in applied mathematics and physics [6, 10].

The multiple scales analysis of the Korteweg-de Vries (KdV) equation causes the Nonlinear Schrödinger (NLS) equation for the regulated amplitude to be widely known [11-15]. In [1], Zakharov and Kuznetsov indicated a much deeper correspondence between these integrable equations not only at the level of the equation, but also at the level of the linear spectral problem by showing that a multiple scales analysis of the Schrödinger spectral problem leads to the Zakharov-Shabat problem for the Nonlinear Schrödinger (NLS) equation. The nonlinear Schrödinger (NLS) equation is an example of a universal nonlinear model because it describes a wide variety of physical systems. As a result, the equation may be used to describe a wide range of nonlinear physical events [16-18].

MULTİPLE SCALES METHOD

In this section, we consider the application of the multiple scales method to NEEs. Using the technique of Zakharov and Kuznetsov [3], getting the NLS-type equations from KdV-type equations was shown step by step.

Let us consider the general evolution equation in the following form.

$$u_t = K\left(u, u_x, u_y \ldots\right) \tag{1}$$

where $K[u]$ is a function of u and its derivatives with respect to the x-spatial variables. The well-known example of this type is the KdV equation.

Let $L[\partial_x, \partial_y]u$ be the linear part of $K[u]$. So, using, $K[u]$ we can reach the dispersion relation for Eq. (1). Substituting the wave solution space

$$\begin{aligned} u_k &= Ae^{i(kx+ry-\omega(k,r)t)} \\ &\equiv Ae^{i\theta} \end{aligned} \tag{2}$$

into the linear part of Eq. (1)

$$u_t = L\left[\partial_x, \partial_y\right]u \tag{3}$$

we get the dispersion relation

$$\omega(k,r) = iL[ik, ir] \tag{4}$$

Then, the dispersion relation (4) is substituted in Eq. (1). We assume the following series expansions for the solution of Eq. (1):

$$u(x,y,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n U_n(x,t,\xi,\tau) \tag{5}$$

Based on this solution, we also define slow space ξ and multiple time variables τ with respect to the scaling parameter $\varepsilon > 0$, respectively, as follows.

$$\begin{aligned} \xi &= \varepsilon\left(x - \frac{d\omega(k,r)}{dk}t\right) \\ \tau &= -\tfrac{1}{2}\varepsilon^2\left(\frac{d^2\omega(k,r)}{dk^2}\right)t \end{aligned} \tag{6}$$

A nonlinear equation modulates the amplitude of this plane wave solution in such a way that it may be considered dependent upon the slow variables. If we choose the slow variables' different forms, we can derive higher-order NLS equations. The multiple scales analysis starts with the assumption:

$$u(x,y,t) = U(x,y,t,\xi,\tau) \tag{7}$$

and solution is in the form

$$U(x,y,t,\xi,\tau) = (\varepsilon U_1 + \varepsilon^2 U_2 + \varepsilon^3 U_3 + \ldots) \tag{8}$$

Then, considering transformation (7) and solution (8), using dispersion relation (4) and slow variables (6), we get u and its derivatives with respect to ε in Eq. (1). And we substitute these terms with (7) and (8) in the Eq. (1). Collecting all terms with the same order of ε together, the left-hand side of Eq. (1) is converted into a polynomial in ε. Then setting each coefficient of this polynomial to zero, we get a set of algebraic equations. Using wave solution space (2) and dispersion relation (4), these equations can be solved by iteration and by use of Maple. So, we

can get NLS-type equations from Eq. (1). Also, from this procedure, we can reach numerical solutions of KdV-type equations.

THE FIFTH ORDER KdV EQUATİON (fKdV)

The multiple scales expansion method is used to study the standard fifth-order KdV equation (fKdV) of the form [19-22]

$$u_t + u_{xxxxx} + \gamma u u_{xxx} + \beta\, u_x u_{xx} + \alpha\, u^2 u_x = 0 \tag{9}$$

where α, β, and γ are arbitrary nonzero and real parameters, and u = u(x, t) is a sufficiently often differentiable function. The parameters α, β, and γ are arbitrary, which will drastically change the characteristics of the fKdV equation (9). Lots of forms of the fKdV equation can be constructed by changing these parameters, but four forms of the fKdV that are of particular interest, namely:

The Lax equation [23] is given by

$$u_t + u_{xxxxx} + 10 u u_{xxx} + 20 u_x u_{xx} + 30 u^2 u_x = 0 \tag{10}$$

and characterized by $\beta = 2\,\gamma,\ \alpha = \frac{3}{10}\gamma^2$.

The Sawada–Kotera (SK) [24] equations is given by

$$u_t + u_{xxxxx} + 5 u u_{xxx} + 5 u_x u_{xx} + 5 u^2 u_x = 0 \tag{11}$$

and characterized by $\beta = \gamma,\ \alpha = \frac{1}{5}\gamma^2$.

The Sawada–Kotera–Parker–Dye (SKPD) equation

$$u_t + u_{xxxxx} - 15 u u_{xxx} - 15 u_x u_{xx} + 45 u^2 u_x = 0 \tag{12}$$

obtained by Parker and Dye [2] where γ = -15 was selected to make β = -15 and α = 45 to obtain a second form of the SK equation.

The Kaup–Kupershmidt [25,26] equation

$$u_t + u_{xxxxx} + 10 u u_{xxx} + 25\, u_x u_{xx} + 20 u^2 u_x = 0 \tag{13}$$

and characterized by $\beta = \frac{2}{5}\gamma,\ \alpha = \frac{1}{5}\gamma^2$.

The Kaup–Kupershmidt–Parker–Dye equation (KKPD) [22,25,26] equation

$$u_t + u_{xxxxx} - 15 u u_{xxx} - \frac{75}{2} u_x u_{xx} + 45 u^2 u_x = 0 \tag{14}$$

established by Parker and Dye [10] where γ = -15 was selected that makes $\beta = -\frac{75}{2}$ and α = 45 to obtain another form for the KK equation.

The Ito equation [21]

$$u_t + u_{xxxxx} + 3uu_{xxx} + 6\,u_x u_{xx} + 2u^2 u_x = 0 \tag{15}$$

and characterized by β = 2 γ, $\alpha = \frac{2}{9}\gamma^2$.

It was found that the Lax, SK, and KK equations belong to the completely integrable hierarchy of higher-order KdV equations. These three equations have infinite sets of conservation laws [20, 27]. However, the Ito equation is not completely integrable but has a limited number of conservation laws [28].

APPLICATIONS

In this section, we will apply the multiscale expansion method to the (1+1)-dimensional fifth-order nonlinear Sawada-Kotera (SK) (11) where u_{kx} denotes the partial derivative $\partial^k u / \partial x^k$ equation.

To find the dispersion relation for (11), we consider the linear part of (11) in the form

$$u_t = u_{xxxxx} \tag{16}$$

and linear differential equation (16) satisfies the solution

$$u(x,t) = e^{i\theta}, \theta = kx - w(k)t \tag{17}$$

Substituting the solution (17) into the linear differential equation (16), we get

$$we^{i(kx-wt)} = k^5 e^{i(kx-wt)} \tag{18}$$

and from this, we reach the

$$w(k) = k^5 \tag{19}$$

dispersion relation. Thus, the solution of linear differential equation (16) is as follows:

$$u(x,t) = e^{i(kx-k^5 t)} \tag{20}$$

Let the solution of Eq. (11) be in the form

$$u(x,t) = U(x,t,\xi,\tau) \quad , \quad U(x,t,\xi,\tau) = \varepsilon U_1 + \varepsilon^2 U_2 + \varepsilon^3 U_3 + \ldots \tag{21}$$

and slow variables are in the form

$$\begin{aligned}\xi &= \varepsilon(x-\tfrac{dw(k)}{dk}t)\\ &= \varepsilon(x-5k^4t)\\ \tau &= -\tfrac{1}{2}\varepsilon^2(\tfrac{d^2w(k)}{dk^2}t)\\ &= -10\varepsilon^2k^3t\end{aligned} \quad (22)$$

In this case, the derivative terms in equation (11) are obtained as follows using (20-22).

$$\begin{aligned}D_x &= \partial_x+\varepsilon\partial_\xi\\ D_t &= \partial_t-5\varepsilon k^4\partial_\xi-10\varepsilon^2k^3\partial_\tau\\ D_{xx} &= \partial_{xx}+2\varepsilon\partial_{x\xi}+\varepsilon^2\partial_{\xi\xi}\\ D_{xxx} &= \partial_{xxx}+3\varepsilon\partial_{xx\xi}+3\varepsilon^2\partial_{x\xi\xi}+\varepsilon^3\partial_{\xi\xi\xi}\\ D_{xxxx} &= \partial_{xxxx}+4\varepsilon\partial_{xxx\xi}+6\varepsilon^2\partial_{xx\xi\xi}+4\varepsilon^3\partial_{x\xi\xi\xi}+\varepsilon^4\partial_{\xi\xi\xi\xi}\\ D_{xxxxx} &= \partial_{xxxxx}+5\varepsilon\partial_{xxxx\xi}+10\varepsilon^2\partial_{xxx\xi\xi}+10\varepsilon^3\partial_{xx\xi\xi\xi}\\ &\quad +5\varepsilon^4\partial_{x\xi\xi\xi\xi}+\varepsilon^5\partial_{\xi\xi\xi\xi\xi}\end{aligned} \quad (23)$$

Then, taking into account the transformation (11) and the solution (21), using the dispersion relation (19) and the slow variables (22), we obtain u and its derivatives with respect to ε in Eq. (11). We replace these terms with (20) and (21) in the Eq. (11). By adding together all terms with the same ε-order, the left-hand side of Eq. (11) is turned into a polynomial in ε. After setting each coefficient of this polynomial equal to zero, we obtain a set of algebraic equations. If we let $\varepsilon \to 0$ and vanish the terms at minimal powers of epsilon, by considering the case $n \geq 1$, we obtain the following:

$$\varepsilon = u_{1t}+u_{1xxxxx}=0 \quad (24)$$

$$\varepsilon^2 = u_{2t}-5k^4u_{1\xi}+5u_1u_{1xxx}+5u_{1x}u_{1xx}+u_{2xxxxx}+5u_{1xxxx\xi}=0 \quad (25)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon^3 \quad = \quad & u_{3t} - 5k^4 u_{2\xi} - 10k^3 u_{1\tau} + 5u_1^2 u_{1x} + 10u_{1xxx\xi\xi} \\ & +5u_1\left(u_{2xxx} + 3u_{1xx\xi}\right) + 5u_2 u_{1xxx} - u_{3xxxxx} \\ & +5u_{1x}\left(u_{2xx} + 2u_{1x\xi}\right) + 5u_{1xx}\left(u_{2x} + u_{1\xi}\right) + 5u_{2xxxx\xi} = 0\end{aligned} \tag{26}$$

Then, we can find the solution of (24) as follows

$$u_1(x,t,\xi,\tau) = v_1(\xi,\tau)e^{i(kx-k^5t)} + v_{-1}(\xi,\tau)e^{-i(kx-k^5t)} \tag{27}$$

where v_{-1} is complex conjugate of v_1. Substituting the solution (27) into (25), the solution of (25) is in the form,

$$u_2(x,t,\xi,\tau) = v_2(\xi,\tau)e^{2i(kx-k^5t)} + v_{-2}(\xi,\tau)e^{-2i(kx-k^5t)} + f_1(\xi,\tau) \tag{28}$$

where $f_1(\xi,\tau)$ is integration constant. Thus, we get

$$v_2(\xi,\tau) \quad = \quad \frac{v_1^2(\xi,\tau)}{3k^2} \quad , \quad v_{-2}(\xi,\tau) \quad = \quad \frac{v_{-1}^2(\xi,\tau)}{3k^2} \tag{29}$$

where v_{-1} is the complex conjugate of v_1 and v_{-2} is the complex conjugate of v_2. Substituting solutions (26), (28), and (29) into the (26), we find the solution of (26) in the form

$$\begin{aligned}u_3(x,t,\xi,\tau) \quad = \quad & v_3(\xi,\tau)e^{3i(kx-k^5t)} + v_{-3}(\xi,\tau)e^{-3i(kx-k^5t)} \\ & + f_2(\xi,\tau)e^{2i(kx-k^5t)} + f_3(\xi,\tau)e^{-2i(kx-k^5t)}\end{aligned} \tag{30}$$

where $f_2(\xi,\tau)$ and $f_3(\xi,\tau)$ are integration constants. Then we get

$$v_3(\xi,\tau) \quad = \quad \frac{-10v_1^3(\xi,\tau)}{123k^4} \quad , \quad v_{-3}(\xi,\tau) \quad = \quad \frac{-10v_{-1}^3(\xi,\tau)}{123k^4} \tag{31}$$

and

$$\begin{aligned}f_1(\xi,\tau) \quad &= \quad \frac{3v_1v_{-1}}{k^2} \\ f_2(\xi,\tau) \quad &= \quad \frac{10iv_{-1}v_{-1\xi}}{17k^3} \\ f_3(\xi,\tau) \quad &= \quad -\frac{10iv_1v_{1\xi}}{17k^3}\end{aligned} \tag{32}$$

where v_{-3} and f_3 are the complex conjugates of v_3 and, f_2 respectively. Thus, the solutions of (31) - (32) are obtained as

$$
\begin{aligned}
u_1 &= v_1(\xi,\tau)e^{i\theta} + v_{-1}(\xi,\tau)e^{-i\theta} \\
u_2 &= k^{-2}(3v_1(\xi,\tau)v_{-1}(\xi,\tau) + \frac{1}{3}(v_1^2(\xi,\tau)e^{2i\theta} + v_{-1}^2(\xi,\tau)e^{-2i\theta})) \\
u_3 &= k^{-3}(\frac{10}{17}iv_{-1}(\xi,\tau)v_{-1\xi}(\xi,\tau)e^{-2i\theta} - \frac{10}{17}iv_1(\xi,\tau)v_{1\xi}(\xi,\tau)e^{2i\theta}) \\
&\quad -\frac{10}{123}k^{-4}(v_1^3(\xi,\tau)e^{3i\theta} + v_{-1}^3(\xi,\tau)e^{-3i\theta})
\end{aligned}
\tag{33}
$$

where

$$
\theta = \left(kx - k^5 t\right) \tag{34}
$$

Finally, substituting the solutions (33) into (26), we get

$$
\begin{aligned}
iv_{1\tau} &= v_{1\xi\xi} - \tfrac{2}{k^2}v_1 v_{-1} \\
iv_{1\tau} &= v_{1\xi\xi} - \tfrac{2}{k^2}v_1|v_1|^2
\end{aligned}
\tag{35}
$$

Describing as $q = \frac{v_1}{k}$ and $q_{-1} = \frac{v_{-1}}{k}$ (35) equation we get the $(1+1)$-dimensional NLS type equations in the form

$$
iq_\tau = q_{\xi\xi} - 2q|q^2| \tag{36}
$$

Also, the numerical solution of the (1+1)-dimensional Sawada-Kotera (SK) equation (11) is found as

$$
\begin{aligned}
u(x,t) &= \varepsilon k(q(\xi,\tau)e^{i(kx-k^5t)} + q_{-1}(\xi,\tau)e^{-i(kx-k^5t)}) \\
&\quad +\varepsilon^2(3q(\xi,\tau)q_{-1}(\xi,\tau) + \frac{1}{3}q^2(\xi,\tau)e^{2i(kx-k^5t)} \\
&\quad + \frac{1}{3}q_{-1}^2(\xi,\tau)e^{-2i(kx-k^5t)}) + k\varepsilon^3(\frac{10}{17}iq_{-1}(\xi,\tau)q_{-1\xi}(\xi,\tau)e^{-2i(kx-k^5t)} \\
&\quad -\frac{10}{17}iq(\xi,\tau)q_\xi(\xi,\tau)e^{2i(kx-k^5t)}) \\
&\quad -\frac{10}{123}k\varepsilon^3(q_1^3(\xi,\tau)e^{3i(kx-k^5t)} + q_{-1}^3(\xi,\tau)e^{-3i(kx-k^5t)})
\end{aligned}
\tag{37}
$$

where q is the solution of the NLS equation.

RESULTS AND DISCUSSIONS

The multiple scales method, which is a perturbation method, is used to find approximate solutions of nonlinear evolution equations. This method allows us to find the solution of the given nonlinear equation depending on the solution of the linear part by using multiple scales, which are defined as the slow variables and depend on a parameter, in time and space variables.

First, Zakharov and Kuznetsov showed that integrable systems can be reduced to other integrable systems using this method. If the initially taken system is not integrable, it is seen that the reduced system is either integrable or non-integrable as a result of the application of the method. However, if the method is applied to an integrable system, it is seen that the system obtained as a result of the analysis is always integrable. This is the main purpose of applying the multiple-scale methods to integrable systems. In this study, we examined how only NLS-type equations are derived from fKdV-type equations using the multiple scales method. We hope this conclusion serves as a valuable resource for researchers, scientists, and engineers interested in nonlinear wave theory, inspiring a deeper desire to explore further and reveal the mysteries still held within the intricate language of the NLS equation. At the same time, we think that the obtained results will form the basis of numerical calculations. Also, the method can be applied to many different NLEE equations.

REFERENCES

[1] Zakharov V, Kuznetsov E.A. (1986). Multiscale expansions in the theory of systems integrable by the inverse scattering transform. Physica D 18, 455-63.

[2] Wazwaz A. M. (2002). Partial Differential Equations: Methods and Applications. Rotterdam: Balkema.

[3] Wazwaz, A. M. (2008). The KdV equation. Handbook of Differential Equations: Evolutionary Equations, 4, 485-568.

[4] Wazwaz A. M. (2009). Partial Differential Equations and Solitary Waves Theory. Springer, Berlin Heidelberg.

[5] Groves M. D. (2004). Study of Water Waves, J. Nonlinear Math. Phys. Vol. 11, 435–460.

[6] Ablowitz M.J. (2011). Nonlinear Dispersive Waves: Asymptotic Analysis and Solitons, Cambridge University Press, New York.

[7] Bruckner M.C. Düll W.P. and G. Schneider. (2014) Validity of The KdV Equation for The Modulation of Periodic Traveling Waves in The NLS Equation, J. Math. Anal. Appl. Vol. 414: 166–175.

[8] Hong Y. Kwak C. and C. Yang (2022). Strichartz estimates for higher-order Schrödinger equations and their applications. J. Differential Equations, 324:41–75.

[9] Saleem, S., Hussain, M. Z., & Aziz, I. (2022). An approximation of the one-dimensional nonlinear Korteweg-de Vries equation of order nine. Plos one, 17(1), e0262157.

[10] Debnath L. (1997). Nonlinear Partial Differential Equations for Scientists and Engineers. Boston: Birkhauser.

[11] Calegora S. F, Degasperis A, Xiaosdo Ji. (2001). Nonlinear Schrödinger-type equations from multiscale reduction of PDEs I. Systematic derivation. J Math Phys 42, 2635-2652.

[12] Degasperis A, Manakov SV, Santini PM. (1997). Multiple-scale perturbation beyond the nonlinear Schrödinger equation I. Physica D 100, 187-211.

[13] Osborne AR, Boffetta G. (1989). The shallow water NLS equation in Lagrangian coordinates. Phys Fluid A 1, 1200-1210.

[14] Osborne A. R, Boffetta G. A. (1991). Summable multiscale expansion for the KdV equation. In: Degasperis A, Fordy AP, Lakshmanan M, editors. Nonlinear evolution equations. Integrability and Spectral Methods. MUP, Manchester and New York, 559-571.

[15] Bruzón Gallego, M. D. L. S., Márquez Lozano, A. D. P., Garrido Letrán, T. M., Recio Rodríguez, E., & Rosa Silva, R. D. L. (2019). Conservation laws for a generalized seventh-order KdV equation.

[16] Seadawy, A. R. (2012). Exact solutions of a two-dimensional nonlinear Schrödinger equation. *Applied Mathematics Letters*, *25*(4), 687-691.

[17] Liu, W. M., & Kengne, E. (2019). *Schrödinger equations in nonlinear systems* (Vol. 37). Springer Singapore.

[18] Al Khawaja, U., & Al Sakkaf, L. (2024). *Handbook of exact solutions to the nonlinear Schrödinger equations*. IOP Publishing.

[19] Wazwaz, A. M. (2006). Abundant soliton solutions for several forms of the fifth-order KdV equation by using the tanh method. *Applied Mathematics and Computation*, *182*(1), 283-300.

[20] Göktaş, Ü., & Hereman, W. (1997). Symbolic computation of conserved densities for systems of nonlinear evolution equations. *Journal of Symbolic Computation*, *24*(5), 591-622.

[21] Ito, M. (1980). An extension of nonlinear evolution equations of the K-dV (mK-dV) type to higher orders. *Journal of the Physical Society of Japan*, *49*(2), 771-778.

[22] Parker, A., & Dye, J. M. (2002). Boussinesq-type equations and switching solitons. *Proc. Inst. NAS Ukraine*, *43*(1), 344-351.

[23] Lax, P. D. (1968). Integrals of nonlinear equations of evolution and solitary waves. *Communications on pure and applied mathematics*, *21*(5), 467-490.

[24] Sawada, K., & Kotera, T. (1974). A method for finding N-soliton solutions of the KdV equation and KdV-like equations. *Progress of theoretical physics*, *51*(5), 1355-1367.

[25] Kaup, D. J. (1980). On the inverse scattering problem for cubic eigenvalue problems of the class $\psi xxx + 6Q\psi x + 6R\psi = \lambda\psi$. *Studies in applied mathematics*, *62*(3), 189-216.

[26] Kupershmidt, B. A. (1984). A super Korteweg-de Vries equation: an integrable system. *Physics Letters A*, *102*(5-6), 213-215.

[27] Hereman, W., & Nuseir, A. (1997). Symbolic methods to construct exact solutions of nonlinear partial differential equations. *Mathematics and Computers in Simulation*, *43*(1), 13-27.

[28] Wazwaz, A. M. (2007). The extended tanh method for new soliton solutions for many forms of the fifth-order KdV equations. *Applied Mathematics and Computation*, *184*(2), 1002-1014.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

A Multiple Scales Method for Solving the Nonlinear (fKdV) Equation

Murat KOPARAN[1]

Abstract

The mathematical models of problems arising in many branches of science are nonlinear evolution equations (NLEEs). For this reason, nonlinear equations of evolution have served as a language in formulating many engineering and scientific problems. Although the origin of nonlinear evolution equations dates back to ancient times, significant developments have been made in these equations up to the present day. The main reason for this situation is that nonlinear equations of evolution involve the problem of nonlinear wave propagation. Therefore, many different and effective techniques have been developed regarding nonlinear evolution equations and solution methods. Studies conducted in recent years show that evolution equations are becoming increasingly important in applied mathematics. This study is about the multiple scales method, known as the perturbation method for nonlinear equations of evolution (NLEE). This method allows us to find the solution of the given nonlinear equation depending on the solution of the linear part by using multiple scales, which are defined as the slow variables and depend on a parameter in time and space variables. First, Zakharov and Kuznetsov showed that integrable systems can be reduced to other integrable systems using this method. In this report, the multiple scales method was applied for the analysis of (1+1)-dimensional fifth-order Korteweg-de Vries (fKdV) equation, and we derived a nonlinear Schrödinger (NLS) type equation. Finally, we obtain an approximate solution of the fifth-order (1 + 1) dimension Sawada-Kotera (SK) equation.

Keywords: Perturbation**,** The multiple scales method, Nonlinear Schrödinger (NLS) equation, Fifth-order Korteweg-de Vries equation (fKdV), Sawada-Kotera equation (SK).

[1] Professor Dr., Anadolu University Faculty of Education, Department of Mathematics and Science Education, Orcıd: 0000-0003-1698-9661.

INTRODUCTION

The multiple scales expansion method is a perturbation method. First applied by Zakharov and Kuznetsov [1], the multiscale expansion method was developed by reducing the KdV equation to the NLS equation and applying it to a class of nonlinear formation equations. Using this method, they showed that integrable systems can be reduced to other integrable systems. Even if the system we initially consider is not integrable, the reduced system obtained by applying the method is either integrable or non-integrable. However, if the method is applied to an integrable system, the system obtained at the end of the analysis is always an integrable system. This is the main purpose of applying the multiscale expansion method to integrable systems.

The Korteweg-de Vries (KdV) equation was derived in various physical contexts. The Korteweg-de Vries (KdV) equation can also be used to model the one-sided breeding of small-amplitude, long-wavelength gravity waves in a shallow channel. In all cases, the Korteweg-de Vries (KdV) equation is attained at a definite approximation degree, so it can't be accepted that it represents physical reality with perfect accuracy. Thus, one important question that emerges is what happens to the solutions of Korteweg-de Vries (KdV) when perturbations, resulting from the terms neglected in its derivation, are applied. For example, whether the perturbed Korteweg-de Vries (KdV) equation has a solitary-wave-type solution can be asked. The answer would be related to the physical origin and nature of the perturbation. The theory of nonlinear dispersive wave motion has recently been the subject of extensive study. We do not attempt to characterize the general form of nonlinear dispersive wave equations [2, 5]. Nonlinear phenomena play a crucial role in applied mathematics and physics [6, 10].

The multiple scales analysis of the Korteweg-de Vries (KdV) equation causes the Nonlinear Schrödinger (NLS) equation for the regulated amplitude to be widely known [11-15]. In [1], Zakharov and Kuznetsov indicated a much deeper correspondence between these integrable equations not only at the level of the equation, but also at the level of the linear spectral problem by showing that a multiple scales analysis of the Schrödinger spectral problem leads to the Zakharov-Shabat problem for the Nonlinear Schrödinger (NLS) equation. The nonlinear Schrödinger (NLS) equation is an example of a universal nonlinear model because it describes a wide variety of physical systems. As a result, the equation may be used to describe a wide range of nonlinear physical events [16-18].

MULTİPLE SCALES METHOD

In this section, we consider the application of the multiple scales method to NEEs. Using the technique of Zakharov and Kuznetsov [3], getting the NLS-type equations from KdV-type equations was shown step by step.

Let us consider the general evolution equation in the following form.

$$u_t = K\left(u, u_x, u_y \ldots\right) \tag{1}$$

where $K[u]$ is a function of u and its derivatives with respect to the x-spatial variables. The well-known example of this type is the KdV equation.

Let $L[\partial_x, \partial_y]u$ be the linear part of $K[u]$. So, using, $K[u]$ we can reach the dispersion relation for Eq. (1). Substituting the wave solution space

$$\begin{aligned} u_k &= Ae^{i(kx+ry-\omega(k,r)t)} \\ &\equiv Ae^{i\theta} \end{aligned} \tag{2}$$

into the linear part of Eq. (1)

$$u_t = L[\partial_x, \partial_y]u \tag{3}$$

we get the dispersion relation

$$\omega(k,r) = iL[ik, ir] \tag{4}$$

Then, the dispersion relation (4) is substituted in Eq. (1). We assume the following series expansions for the solution of Eq. (1):

$$u(x,y,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n U_n(x,t,\xi,\tau) \tag{5}$$

Based on this solution, we also define slow space ξ and multiple time variables τ with respect to the scaling parameter $\varepsilon > 0$, respectively, as follows.

$$\begin{aligned} \xi &= \varepsilon\left(x - \frac{d\omega(k,r)}{dk}t\right) \\ \tau &= -\tfrac{1}{2}\varepsilon^2\left(\frac{d^2\omega(k,r)}{dk^2}\right)t \end{aligned} \tag{6}$$

A nonlinear equation modulates the amplitude of this plane wave solution in such a way that it may be considered dependent upon the slow variables. If we choose the slow variables' different forms, we can derive higher-order NLS equations. The multiple scales analysis starts with the assumption:

$$u(x,y,t) = U(x,y,t,\xi,\tau) \tag{7}$$

and solution is in the form

$$U(x,y,t,\xi,\tau) = (\varepsilon U_1 + \varepsilon^2 U_2 + \varepsilon^3 U_3 + \ldots) \tag{8}$$

Then, considering transformation (7) and solution (8), using dispersion relation (4) and slow variables (6), we get u and its derivatives with respect to ε in Eq. (1). And we substitute these terms with (7) and (8) in the Eq. (1). Collecting all terms with the same order of ε together, the left-hand side of Eq. (1) is converted into a polynomial in ε. Then setting each coefficient of

this polynomial to zero, we get a set of algebraic equations. Using wave solution space (2) and dispersion relation (4), these equations can be solved by iteration and by use of Maple. So, we can get NLS-type equations from Eq. (1). Also, from this procedure, we can reach numerical solutions of KdV-type equations.

THE FIFTH ORDER KdV EQUATİON (fKdV)

The multiple scales expansion method is used to study the standard fifth-order KdV equation (fKdV) of the form [19-22]

$$u_t + u_{xxxxx} + \gamma u u_{xxx} + \beta\, u_x u_{xx} + \alpha\, u^2 u_x = 0 \tag{9}$$

where α, β, and γ are arbitrary nonzero and real parameters, and u = u(x, t) is a sufficiently often differentiable function. The parameters α, β, and γ are arbitrary, which will drastically change the characteristics of the fKdV equation (9). Lots of forms of the fKdV equation can be constructed by changing these parameters, but four forms of the fKdV that are of particular interest, namely:

The Lax equation [23] is given by

$$u_t + u_{xxxxx} + 10 u u_{xxx} + 20 u_x u_{xx} + 30 u^2 u_x = 0 \tag{10}$$

and characterized by $\beta = 2\gamma$, $\alpha = \frac{3}{10}\gamma^2$.

The Sawada–Kotera (SK) [24] equations is given by

$$u_t + u_{xxxxx} + 5 u u_{xxx} + 5 u_x u_{xx} + 5 u^2 u_x = 0 \tag{11}$$

and characterized by $\beta = \gamma$, $\alpha = \frac{1}{5}\gamma^2$.

The Sawada–Kotera–Parker–Dye (SKPD) equation

$$u_t + u_{xxxxx} - 15 u u_{xxx} - 15 u_x u_{xx} + 45 u^2 u_x = 0 \tag{12}$$

obtained by Parker and Dye [2] where γ = -15 was selected to make β = -15 and α = 45 to obtain a second form of the SK equation.

The Kaup–Kupershmidt [25,26] equation

$$u_t + u_{xxxxx} + 10 u u_{xxx} + 25\, u_x u_{xx} + 20 u^2 u_x = 0 \tag{13}$$

and characterized by $\beta = \frac{2}{5}\gamma$, $\alpha = \frac{1}{5}\gamma^2$.

The Kaup–Kupershmidt–Parker–Dye equation (KKPD) [22,25,26] equation

$$u_t + u_{xxxxx} - 15 u u_{xxx} - \frac{75}{2} u_x u_{xx} + 45 u^2 u_x = 0 \tag{14}$$

established by Parker and Dye [10] where γ = -15 was selected that makes $\beta = -\frac{75}{2}$ and α = 45 to obtain another form for the KK equation.

The Ito equation [21]

$$u_t + u_{xxxxx} + 3uu_{xxx} + 6\,u_x u_{xx} + 2u^2 u_x = 0 \tag{15}$$

and characterized by β = 2 γ, $\alpha = \frac{2}{9}\gamma^2$.

It was found that the Lax, SK, and KK equations belong to the completely integrable hierarchy of higher-order KdV equations. These three equations have infinite sets of conservation laws [20, 27]. However, the Ito equation is not completely integrable but has a limited number of conservation laws [28].

APPLICATIONS

In this section, we will apply the multiscale expansion method to the (1+1)-dimensional fifth-order nonlinear Sawada-Kotera (SK) (11) where u_{kx} denotes the partial derivative $\partial^k u / \partial x^k$ equation.

To find the dispersion relation for (11), we consider the linear part of (11) in the form

$$u_t = u_{xxxxx} \tag{16}$$

and linear differential equation (16) satisfies the solution

$$u(x,t) = e^{i\theta}, \theta = kx - w(k)t \tag{17}$$

Substituting the solution (17) into the linear differential equation (16), we get

$$we^{i(kx-wt)} = k^5 e^{i(kx-wt)} \tag{18}$$

and from this, we reach the

$$w(k) = k^5 \tag{19}$$

dispersion relation. Thus, the solution of linear differential equation (16) is as follows:

$$u(x,t) = e^{i(kx-k^5 t)} \tag{20}$$

Let the solution of Eq. (11) be in the form

$$u(x,t) = U(x,t,\xi,\tau) \quad , \quad U(x,t,\xi,\tau) = \varepsilon U_1 + \varepsilon^2 U_2 + \varepsilon^3 U_3 + \ldots \tag{21}$$

and slow variables are in the form

$$\begin{aligned}\xi &= \varepsilon(x-\tfrac{dw(k)}{dk}t)\\ &= \varepsilon(x-5k^4t)\\ \tau &= -\tfrac{1}{2}\varepsilon^2(\tfrac{d^2w(k)}{dk^2}t)\\ &= -10\varepsilon^2k^3t\end{aligned} \quad (22)$$

In this case, the derivative terms in equation (11) are obtained as follows using (20-22).

$$\begin{aligned}D_x &= \partial_x+\varepsilon\partial_\xi\\ D_t &= \partial_t-5\varepsilon k^4\partial_\xi-10\varepsilon^2k^3\partial_\tau\\ D_{xx} &= \partial_{xx}+2\varepsilon\partial_{x\xi}+\varepsilon^2\partial_{\xi\xi}\\ D_{xxx} &= \partial_{xxx}+3\varepsilon\partial_{xx\xi}+3\varepsilon^2\partial_{x\xi\xi}+\varepsilon^3\partial_{\xi\xi\xi}\\ D_{xxxx} &= \partial_{xxxx}+4\varepsilon\partial_{xxx\xi}+6\varepsilon^2\partial_{xx\xi\xi}+4\varepsilon^3\partial_{x\xi\xi\xi}+\varepsilon^4\partial_{\xi\xi\xi\xi}\\ D_{xxxxx} &= \partial_{xxxxx}+5\varepsilon\partial_{xxxx\xi}+10\varepsilon^2\partial_{xxx\xi\xi}+10\varepsilon^3\partial_{xx\xi\xi\xi}\\ &\quad +5\varepsilon^4\partial_{x\xi\xi\xi\xi}+\varepsilon^5\partial_{\xi\xi\xi\xi\xi}\end{aligned} \quad (23)$$

Then, taking into account the transformation (11) and the solution (21), using the dispersion relation (19) and the slow variables (22), we obtain u and its derivatives with respect to ε in Eq. (11). We replace these terms with (20) and (21) in the Eq. (11). By adding together all terms with the same ε-order, the left-hand side of Eq. (11) is turned into a polynomial in ε. After setting each coefficient of this polynomial equal to zero, we obtain a set of algebraic equations. If we let $\varepsilon \to 0$ and vanish the terms at minimal powers of epsilon, by considering the case $n \geq 1$, we obtain the following:

$$\varepsilon = u_{1t}+u_{1xxxxx}=0 \quad (24)$$

$$\varepsilon^2 = u_{2t}-5k^4u_{1\xi}+5u_1u_{1xxx}+5u_{1x}u_{1xx}+u_{2xxxxx}+5u_{1xxxx\xi}=0 \quad (25)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon^3 \quad = \quad & u_{3t} - 5k^4 u_{2\xi} - 10k^3 u_{1\tau} + 5u_1^2 u_{1x} + 10u_{1xxx\xi\xi} \\ & +5u_1\left(u_{2xxx} + 3u_{1xx\xi}\right) + 5u_2 u_{1xxx} - u_{3xxxxx} \\ & +5u_{1x}\left(u_{2xx} + 2u_{1x\xi}\right) + 5u_{1xx}\left(u_{2x} + u_{1\xi}\right) + 5u_{2xxxx\xi} = 0\end{aligned} \tag{26}$$

Then, we can find the solution of (24) as follows

$$u_1(x,t,\xi,\tau) = v_1(\xi,\tau)e^{i(kx-k^5t)} + v_{-1}(\xi,\tau)e^{-i(kx-k^5t)} \tag{27}$$

where v_{-1} is complex conjugate of v_1. Substituting the solution (27) into (25), the solution of (25) is in the form,

$$u_2(x,t,\xi,\tau) = v_2(\xi,\tau)e^{2i(kx-k^5t)} + v_{-2}(\xi,\tau)e^{-2i(kx-k^5t)} + f_1(\xi,\tau) \tag{28}$$

where $f_1(\xi,\tau)$ is integration constant. Thus, we get

$$v_2(\xi,\tau) \quad = \quad \frac{v_1^2(\xi,\tau)}{3k^2} \quad , \quad v_{-2}(\xi,\tau) \quad = \quad \frac{v_{-1}^2(\xi,\tau)}{3k^2} \tag{29}$$

where v_{-1} is the complex conjugate of v_1 and v_{-2} is the complex conjugate of v_2. Substituting solutions (26), (28), and (29) into the (26), we find the solution of (26) in the form

$$\begin{aligned}u_3(x,t,\xi,\tau) \quad = \quad & v_3(\xi,\tau)e^{3i(kx-k^5t)} + v_{-3}(\xi,\tau)e^{-3i(kx-k^5t)} \\ & + f_2(\xi,\tau)e^{2i(kx-k^5t)} + f_3(\xi,\tau)e^{-2i(kx-k^5t)}\end{aligned} \tag{30}$$

where $f_2(\xi,\tau)$ and $f_3(\xi,\tau)$ are integration constants. Then we get

$$v_3(\xi,\tau) \quad = \quad \frac{-10v_1^3(\xi,\tau)}{123k^4} \quad , \quad v_{-3}(\xi,\tau) \quad = \quad \frac{-10v_{-1}^3(\xi,\tau)}{123k^4} \tag{31}$$

and

$$\begin{aligned}f_1(\xi,\tau) \quad &= \quad \frac{3v_1v_{-1}}{k^2} \\ f_2(\xi,\tau) \quad &= \quad \frac{10iv_{-1}v_{-1\xi}}{17k^3} \\ f_3(\xi,\tau) \quad &= \quad -\frac{10iv_1v_{1\xi}}{17k^3}\end{aligned} \tag{32}$$

where v_{-3} and f_3 are the complex conjugates of v_3 and, f_2 respectively. Thus, the solutions of (31) - (32) are obtained as

$$
\begin{aligned}
u_1 &= v_1(\xi,\tau)e^{i\theta} + v_{-1}(\xi,\tau)e^{-i\theta} \\
u_2 &= k^{-2}(3v_1(\xi,\tau)v_{-1}(\xi,\tau) + \tfrac{1}{3}(v_1^2(\xi,\tau)e^{2i\theta} + v_{-1}^2(\xi,\tau)e^{-2i\theta})) \\
u_3 &= k^{-3}(\tfrac{10}{17}iv_{-1}(\xi,\tau)v_{-1\xi}(\xi,\tau)e^{-2i\theta} - \tfrac{10}{17}iv_1(\xi,\tau)v_{1\xi}(\xi,\tau)e^{2i\theta}) \\
&\quad -\tfrac{10}{123}k^{-4}(v_1^3(\xi,\tau)e^{3i\theta} + v_{-1}^3(\xi,\tau)e^{-3i\theta})
\end{aligned}
\tag{33}
$$

where

$$
\theta = \left(kx - k^5 t\right) \tag{34}
$$

Finally, substituting the solutions (33) into (26), we get

$$
\begin{aligned}
iv_{1\tau} &= v_{1\xi\xi} - \tfrac{2}{k^2}v_1 v_{-1} \\
iv_{1\tau} &= v_{1\xi\xi} - \tfrac{2}{k^2}v_1|v_1|^2
\end{aligned}
\tag{35}
$$

Describing as $q = \frac{v_1}{k}$ and $q_{-1} = \frac{v_{-1}}{k}$ (35) equation we get the $(1+1)$-dimensional NLS type equations in the form

$$
iq_\tau = q_{\xi\xi} - 2q|q^2| \tag{36}
$$

Also, the numerical solution of the (1+1)-dimensional Sawada-Kotera (SK) equation (11) is found as

$$
\begin{aligned}
u(x,t) &= \varepsilon k(q(\xi,\tau)e^{i(kx-k^5t)} + q_{-1}(\xi,\tau)e^{-i(kx-k^5t)}) \\
&\quad +\varepsilon^2(3q(\xi,\tau)q_{-1}(\xi,\tau) + \tfrac{1}{3}q^2(\xi,\tau)e^{2i(kx-k^5t)} \\
&\quad +\tfrac{1}{3}q_{-1}^2(\xi,\tau)e^{-2i(kx-k^5t)}) + k\varepsilon^3(\tfrac{10}{17}iq_{-1}(\xi,\tau)q_{-1\xi}(\xi,\tau)e^{-2i(kx-k^5t)} \\
&\quad -\tfrac{10}{17}iq(\xi,\tau)q_\xi(\xi,\tau)e^{2i(kx-k^5t)}) \\
&\quad -\tfrac{10}{123}k\varepsilon^3(q_1^3(\xi,\tau)e^{3i(kx-k^5t)} + q_{-1}^3(\xi,\tau)e^{-3i(kx-k^5t)})
\end{aligned}
\tag{37}
$$

where q is the solution of the NLS equation.

RESULTS AND DISCUSSIONS

The multiple scales method, which is a perturbation method, is used to find approximate solutions of nonlinear evolution equations. This method allows us to find the solution of the given nonlinear equation depending on the solution of the linear part by using multiple scales, which are defined as the slow variables and depend on a parameter, in time and space variables.

First, Zakharov and Kuznetsov showed that integrable systems can be reduced to other integrable systems using this method. If the initially taken system is not integrable, it is seen that the reduced system is either integrable or non-integrable as a result of the application of the method. However, if the method is applied to an integrable system, it is seen that the system obtained as a result of the analysis is always integrable. This is the main purpose of applying the multiple-scale methods to integrable systems. In this study, we examined how only NLS-type equations are derived from fKdV-type equations using the multiple scales method. We hope this conclusion serves as a valuable resource for researchers, scientists, and engineers interested in nonlinear wave theory, inspiring a deeper desire to explore further and reveal the mysteries still held within the intricate language of the NLS equation. At the same time, we think that the obtained results will form the basis of numerical calculations. Also, the method can be applied to many different NLEE equations.

REFERENCES

[1] Zakharov V, Kuznetsov E.A. (1986). Multiscale expansions in the theory of systems integrable by the inverse scattering transform. Physica D 18, 455-63.

[2] Wazwaz A. M. (2002). Partial Differential Equations: Methods and Applications. Rotterdam: Balkema.

[3] Wazwaz, A. M. (2008). The KdV equation. Handbook of Differential Equations: Evolutionary Equations, 4, 485-568.

[4] Wazwaz A. M. (2009). Partial Differential Equations and Solitary Waves Theory. Springer, Berlin Heidelberg.

[5] Groves M. D. (2004). Study of Water Waves, J. Nonlinear Math. Phys. Vol. 11, 435–460.

[6] Ablowitz M.J. (2011). Nonlinear Dispersive Waves: Asymptotic Analysis and Solitons, Cambridge University Press, New York.

[7] Bruckner M.C. Düll W.P. and G. Schneider. (2014) Validity of The KdV Equation for The Modulation of Periodic Traveling Waves in The NLS Equation, J. Math. Anal. Appl. Vol. 414: 166–175.

[8] Hong Y. Kwak C. and C. Yang (2022). Strichartz estimates for higher-order Schrödinger equations and their applications. J. Differential Equations, 324:41–75.

[9] Saleem, S., Hussain, M. Z., & Aziz, I. (2022). An approximation of the one-dimensional nonlinear Korteweg-de Vries equation of order nine. Plos one, 17(1), e0262157.

[10] Debnath L. (1997). Nonlinear Partial Differential Equations for Scientists and Engineers. Boston: Birkhauser.

[11] Calegora S. F, Degasperis A, Xiaosdo Ji. (2001). Nonlinear Schrödinger-type equations from multiscale reduction of PDEs I. Systematic derivation. J Math Phys 42, 2635-2652.

[12] Degasperis A, Manakov SV, Santini PM. (1997). Multiple-scale perturbation beyond the nonlinear Schrödinger equation I. Physica D 100, 187-211.

[13] Osborne AR, Boffetta G. (1989). The shallow water NLS equation in Lagrangian coordinates. Phys Fluid A 1, 1200-1210.

[14] Osborne A. R, Boffetta G. A. (1991). Summable multiscale expansion for the KdV equation. In: Degasperis A, Fordy AP, Lakshmanan M, editors. Nonlinear evolution equations. Integrability and Spectral Methods. MUP, Manchester and New York, 559-571.

[15] Bruzón Gallego, M. D. L. S., Márquez Lozano, A. D. P., Garrido Letrán, T. M., Recio Rodríguez, E., & Rosa Silva, R. D. L. (2019). Conservation laws for a generalized seventh-order KdV equation.

[16] Seadawy, A. R. (2012). Exact solutions of a two-dimensional nonlinear Schrödinger equation. *Applied Mathematics Letters*, *25*(4), 687-691.

[17] Liu, W. M., & Kengne, E. (2019). *Schrödinger equations in nonlinear systems* (Vol. 37). Springer Singapore.

[18] Al Khawaja, U., & Al Sakkaf, L. (2024). *Handbook of exact solutions to the nonlinear Schrödinger equations*. IOP Publishing.

[19] Wazwaz, A. M. (2006). Abundant soliton solutions for several forms of the fifth-order KdV equation by using the tanh method. *Applied Mathematics and Computation*, *182*(1), 283-300.

[20] Göktaş, Ü., & Hereman, W. (1997). Symbolic computation of conserved densities for systems of nonlinear evolution equations. *Journal of Symbolic Computation*, *24*(5), 591-622.

[21] Ito, M. (1980). An extension of nonlinear evolution equations of the K-dV (mK-dV) type to higher orders. *Journal of the Physical Society of Japan*, *49*(2), 771-778.

[22] Parker, A., & Dye, J. M. (2002). Boussinesq-type equations and switching solitons. *Proc. Inst. NAS Ukraine*, *43*(1), 344-351.

[23] Lax, P. D. (1968). Integrals of nonlinear equations of evolution and solitary waves. *Communications on pure and applied mathematics*, *21*(5), 467-490.

[24] Sawada, K., & Kotera, T. (1974). A method for finding N-soliton solutions of the KdV equation and KdV-like equations. *Progress of theoretical physics*, *51*(5), 1355-1367.

[25] Kaup, D. J. (1980). On the inverse scattering problem for cubic eigenvalue problems of the class $\psi xxx + 6Q\psi x + 6R\psi = \lambda\psi$. *Studies in applied mathematics*, *62*(3), 189-216.

[26] Kupershmidt, B. A. (1984). A super Korteweg-de Vries equation: an integrable system. *Physics Letters A*, *102*(5-6), 213-215.

[27] Hereman, W., & Nuseir, A. (1997). Symbolic methods to construct exact solutions of nonlinear partial differential equations. *Mathematics and Computers in Simulation*, *43*(1), 13-27.

[28] Wazwaz, A. M. (2007). The extended tanh method for new soliton solutions for many forms of the fifth-order KdV equations. *Applied Mathematics and Computation*, *184*(2), 1002-1014.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Effects of Salinity and Drought Stress on Morphological Parameters in Wheat (Triticum Aestivum L.)

Seymen CIMBIZ[1]
Ergun KAYA[2]

Abstract

Wheat (Triticum aestivum L.) is one of the major staple crops worldwide due to its contribution to approximately 20% of the global human energy requirement. However, its productivity is severely affected by abiotic stress factors such as drought and salinity. Increasing soil salinization and water scarcity associated with climate change pose significant threats to sustainable agricultural production. In this study, it was aimed to investigate the morphological changes in wheat plants exposed to drought and salinity stress. Wheat seeds were cultivated under controlled in vivo pot conditions and subjected to salinity stress using different NaCl concentrations (10, 25, 50, and 100 mM). For drought stress, water restriction was established by completely withholding irrigation. On the 7th day of stress application, root and shoot lengths were measured and morphological analyses were performed. Preliminary morphological findings demonstrated that both salinity and drought stress caused significant alterations in wheat seedling development compared to the control group. While drought stress resulted in reductions in root and shoot development, increasing salt concentrations exerted varying levels of suppression on root architecture and shoot elongation. The obtained findings indicate that wheat develops different adaptive response mechanisms under drought and salinity conditions. This study is expected to contribute to the understanding of stress tolerance mechanisms in wheat and provide valuable data for future breeding studies. The morphological data presented in this study were derived from the master's thesis entitled "Investigation of Transcriptional Responses of Wheat (Triticum aestivum L.) Under Salinity and Drought Stress Conditions" conducted by Seymen CIMBIZ.

Keywords: Wheat (Triticum aestivum L.), drought stress, salinity stress, abiotic stress, morphological analysis.

[1] MSc Student, Muğla Sıtkı Koçman University, Institute of Science, Department of Molecular Biology and Genetics, ORCID: 0009-0002-3631-1938
[2] Professor Dr., Muğla Sıtkı Koçman University, Faculty of Science, Department of Molecular Biology and Genetics, ORCID: 0000-0003-4255-3802

Introduction

Wheat (Triticum aestivum L.) is one of the most widely cultivated cereal crops globally, contributing approximately 20% of the total caloric intake worldwide (Iqbal et al., 2018: 2). However, global wheat production faces unprecedented challenges from abiotic stress factors, particularly drought and salinity, which are increasingly exacerbated by climate change.

Approximately 45% of global agricultural areas are under continuous or recurrent drought risk, while soil salinity affects approximately 954 million hectares of land worldwide (El Sabagh et al., 2021: 3). Both drought and salinity stress directly suppress seed germination, vegetative growth, root-shoot development, and photosynthetic efficiency in wheat plants (Ahmed et al., 2022: 2).

Salinity stress imposes both osmotic and ionic toxicity effects on wheat plants. The accumulation of sodium ions (Na^+) in plant tissues leads to reduced water uptake, nutrient imbalance, and specific ion toxicity that disrupts cellular metabolism (Ashraf et al., 2023: 4403). Initially, salt stress causes osmotic stress, followed by ionic stress as Na^+ accumulates to toxic levels, resulting in chlorosis, necrosis, and reduced photosynthetic capacity (Saddiq et al., 2021: 3).

Drought stress primarily induces cellular dehydration, leading to loss of turgor pressure, reduced cell expansion and division, and ultimately growth inhibition. Under water-limited conditions, wheat plants exhibit reduced shoot elongation, smaller leaf area, altered root architecture, and premature senescence (Tavangar et al., 2021: 2).

The aim of this study was to investigate the morphological changes in wheat seedlings exposed to different concentrations of salinity stress and drought stress under controlled in vivo conditions, and to compare the severity and nature of morphological alterations induced by each stress type.

Method

Plant Material Acquisition

Wheat (Triticum aestivum L.) seeds were obtained from the Muğla Menteşe Seed Center in Muğla, Turkey. Seeds were aerated and imbibed in distilled water for 24 hours before sowing in plastic pots containing a peat:perlite mixture (2:1 ratio) at a depth of approximately 2 cm.

Growth Conditions

Plants were grown in a climate-controlled room at 25 ± 2 °C, 60-70% relative humidity, 16/8 hour photoperiod, and light intensity of approximately 200 µmol m^{-2} s^{-1}. Adequate irrigation was provided for 10-15 days for germination and establishment. Control samples were collected in three biological replicates.

Salinity Stress Application

Fifteen pots were prepared with three biological replicates per treatment: Control, 10 mM NaCl, 25 mM NaCl, 50 mM NaCl, and 100 mM NaCl. After seedling establishment, salinity stress was applied by gradual irrigation with NaCl solutions. Samples were collected on day 1, day 3, and day 7 of stress application.

Drought Stress Application

For drought stress, water supply was completely withheld from three pots following control sample collection. Samples were collected on day 1, day 3, and day 7.

Morphological Measurements

On day 7, root and shoot lengths were measured using a digital caliper. Root length was measured from the root-shoot junction to the tip of the longest seminal root. Shoot length was measured from the root-shoot junction to the tip of the longest leaf. Qualitative observations regarding plant vigor, root architecture, and chlorosis were recorded.

Results and Discussion

Control Conditions

Control plants exhibited vigorous growth with mean root length of 4.0 cm and mean shoot length of 8.7 cm. Plants displayed a well-developed, deeply penetrating root system with abundant lateral roots and healthy green shoots, indicating optimal water status and photosynthetic activity (Ahmed et al., 2022: 5).

Low-Level Salinity (10 mM NaCl)

At 10 mM NaCl, mean root length was 4.22 cm (slight increase vs. control) while mean shoot length was 6.32 cm (27.4% reduction). Plants maintained growth form close to control, but subtle signs of root elongation suppression were noted. These findings align with Ashraf et al. (2023: 4410), who reported that some wheat genotypes maintain near-normal growth at low salinity through osmotic adjustment.

Moderate-Level Salinity (25 mM NaCl)

At 25 mM NaCl, mean root length was 3.9 cm (2.5% reduction) and mean shoot length was 6.7 cm (23.0% reduction). Root systems exhibited reduced branching and sparseness, with initial chlorosis at leaf bases. These findings corroborate Saddiq et al. (2021: 6), who demonstrated that moderate salt stress induces chlorophyll degradation and nutrient imbalance.

High-Level Salinity (50 mM NaCl)

At 50 mM NaCl, mean root length was 3.67 cm (8.3% reduction) and mean shoot length was 7.65 cm (12.1% reduction). Dramatic growth inhibition was observed with visible ionic toxicity symptoms including leaf tip burn, marginal chlorosis, and reduced turgor. This indicates that 50 mM NaCl approaches the tolerance threshold for the accession used (Iqbal et al., 2018: 5).

Severe Salinity (100 mM NaCl)

At 100 mM NaCl, mean root length was 4.35 cm and mean shoot length was 7.37 cm (15.3% reduction). Plants exhibited extreme chlorosis, necrotic lesions, and largely destroyed root systems with substantial root tip death. This represents near-complete growth arrest, consistent with Sen et al. (2022: 8), who reported that 100 mM NaCl induces severe ion toxicity and oxidative damage inhibiting cellular processes.

Drought Stress

Drought stress produced the most severe alterations. Mean root length was 3.4 cm (15.0% reduction) with roots exhibiting a short but dense, clustered "survival network" rather than deep penetration. Mean shoot length was 6.5 cm (25.3% reduction), the lowest among all treatments. Plants showed severe turgor loss, wilting, leaf rolling, and desiccation symptoms. The adaptive root response reflects prioritization of compact root systems for maximum water absorption from remaining soil moisture (El Sabagh et al., 2021: 7; Kizilgeci et al., 2020: 8596).

Comparative Analysis

Drought stress induced the most severe shoot suppression and a unique adaptive root response. Low salinity (10-25 mM) caused subtle changes, moderate salinity (50 mM) caused dramatic inhibition, and severe salinity (100 mM) caused near-complete growth arrest. Under low salinity, shoot growth was more suppressed than root growth, reflecting greater shoot sensitivity to osmotic stress. Under drought, shoot suppression was also more severe, prioritizing root maintenance for water acquisition.

The differential root response is particularly noteworthy: severe salinity destroyed root systems due to ion toxicity, while drought allowed roots to maintain functional integrity and implement adaptive architectural changes (Ashraf et al., 2023: 4415; Tavangar et al., 2021: 5). These findings align with El Sabagh et al. (2021: 9), who described osmotic adjustment, ion compartmentalization, and architectural plasticity as primary adaptation mechanisms in wheat.

Future Perspectives

Future studies should integrate morphological analysis with physiological measurements (relative water content, chlorophyll fluorescence) and molecular approaches (expression of stress-responsive genes such as DREB, NAC, SOS pathway genes) to elucidate mechanisms underlying observed morphological changes (Ahmed et al., 2022: 8). Root architectural traits represent promising targets for breeding stress-tolerant wheat varieties (Sen et al., 2022: 11). As climate change intensifies drought and salinity, developing stress-resilient wheat varieties is essential for global food security (Iqbal et al., 2018: 10).

Conclusion

This study demonstrated that salinity and drought stress induce significant alterations in wheat root and shoot development with distinct morphological signatures. Salinity produced dose-dependent effects from subtle changes at 10-25 mM to near-complete growth arrest at 100 mM. Drought induced the most severe shoot suppression and a unique adaptive root response of dense, clustered networks. These findings contribute to understanding stress tolerance mechanisms and provide baseline data for future molecular and breeding studies.

References

Ahmed, H. G. M. D., Zeng, Y., Raza, H., Muhammad, D., Iqbal, M., Uzair, M., & El Sabagh, A. (2022). Characterization of wheat (Triticum aestivum L.) accessions using morpho-physiological traits under varying levels of salinity stress at seedling stage. Frontiers in Plant Science, *13*, 953670.

Ashraf, M. A., Hafeez, A., Rasheed, R., Hussain, I., Farooq, U., Rizwan, M., & Ali, S. (2023). Evaluation of physio-morphological and biochemical responses for salt tolerance in wheat (Triticum aestivum L.) cultivars. Journal of Plant Growth Regulation, *42*(7), 4402-4422.

El Sabagh, A., Islam, M. S., Skalicky, M., Ali Raza, M., Singh, K., Anwar Hossain, M., & Arshad, A. (2021). Salinity stress in wheat (Triticum aestivum L.) in the changing climate: Adaptation and management strategies. Frontiers in Agronomy, *3*, 661932.

Iqbal, M., Irshad, S., Nadeem, M., Fatima, T., & Itrat, A. B. (2018). Salinity effects on wheat (Triticum aestivum L.) characteristics: A review article. International Journal of Agriculture and Biology, *12*, 1-15.

Kizilgeci, F., Mokhtari, N. E. P., & Hossain, A. (2020). Growth and physiological traits of five bread wheat (Triticum aestivum L.) genotypes are influenced by different levels of salinity and drought stress. Fresenius Environmental Bulletin, *29*(9A), 8592-8599.

Saddiq, M. S., Iqbal, S., Hafeez, M. B., Ibrahim, A. M., Raza, A., Fatima, E. M., & Ciarmiello, L. F. (2021). Effect of salinity stress on physiological changes in winter and spring wheat. Agronomy, *11*(6), 1193.

Sen, A., Islam, M. M., Zaman, E., Ghosh, U. K., Momtaz, M. B., Islam, M. A., & Murata, Y. (2022). Agro-morphological, yield and biochemical responses of selected wheat (Triticum aestivum L.) genotypes to salt stress. Agronomy, *12*(12), 3027.

Tavangar, A., Karami, L., Hedayat, M., & Abdi, G. (2021). Effect of salinity and drought stress on morphological and biochemical properties of two Iranian fenugreek (Trigonella foenum-graecum) populations. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, *49*(2), 12038.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Doğu Karadeniz (Trabzon ve Rize) Bölgesinin doğal peyzaj özelliklerinin kırsal turizm potansiyeli açısından incelenmesi

Selvinaz Gülçin BOZKURT[1]

Abstract

The effects of intense industrialization and urbanization have led to a greater need for natural areas. This situation has resulted in the diversification of tourism activities in natural areas. The natural assets of an area play an important role in the development of that region. In the Eastern Black Sea Region, especially the provinces of Trabzon and Rize, are among the most important rural tourism centers in Turkey with their natural landscape values. The aim of this study is to examine the natural landscape features of the region in terms of rural tourism potential using the SWOT analysis method. In this research, a method was applied to identify the natural and cultural landscape assets of Trabzon and Rize provinces on-site and based on literature, and to determine the strengths, weaknesses, opportunities, and threats of these assets in terms of rural tourism using SWOT analysis. The findings revealed that the region possesses strong natural resources (natural vegetation, climatic characteristics, marine and coastal features, hydrology, topographical structure) and that these resources have a significant impact on tourism. Based on these findings, it is predicted that these resources could pose a significant problem for the region if not managed with appropriate planning strategies. Therefore, the study recommends implementing tourism activities that consider the ecological balance and sustainability of the natural assets of the area.

Keywords: Natural landscape, Rural tourism, Landscape potential, SWOT analysis, Eastern Black Sea Region

[1] Doç.Dr., Biruni Üniversitesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü, İstanbul-TÜRKİYE, sbozkurt@biruni.edu.tr, sbozkurt00@gmail.com, Orcıd: 0000-0003-0775-2005

1.Giriş

Kentleşme, nüfus yoğunluğunun artmasıyla birlikte doğal alanların yerleşim, sanayi, ulaşım ve diğer insan faaliyetleri için dönüştürülmesi demektir. Bu süreç, doğal ve kültürel peyzajın yapısını, işleyişini ve görünümünü önemli ölçüde değiştirmektedir. Bu gelişmeler insanların yaşam şekillerini değiştirmekte, doğal alanlara olan özlemi artırmakta ve böylece kırsal turizm faaliyetleri daha fazla önem kazanmaktadır.

Kırsal turizm terimi, içerdiği kırsal alanları nedeniyle yayla turizmi, avcılık turizmi, mağara turizmi, ekoturizm ve açık hava doğa sporlarıyla benzer şekilde değerlendirilmektedir. Bu doğru olsa da, kırsal turizmin temel hedefi, bir köyde, çiftlikte veya dağ evinde konaklayarak kırsal hayatın kültürünü tanıyıp bu kültürle iç içe bir tatil yapmaktır. Kırsal turizm, doğal kaynaklara dayanan ve kırsal yerleşimlerle bağlantılı bir turizm türüdür (Soykan, 2003). Uzmanlar, kırsal turizmi çiftlik turizmi, köy turizmi, yayla turizmi, tarımsal turizm, ekoturizm ve alternatif turizm gibi farklı tanımlamalarla sınıflandırmaktadır. Ancak, kırsal turizmin esasını doğal yaşam ve tarımsal değerlere olan ilgi oluşturur (Köroğlu ve Köroğlu, 2008). Bu nedenle, kırsal turizmde kültürel unsurlar, yerel miras, peyzaj (flora çeşitliliği, doğal peyzaj etkisi, orman kaynağı, su unsurları, renk canlılığı, emsalsiz oluşu vb.), doğa, çevre koruma ve sosyo-ekonomik bütünlük gibi unsurlar önemli rol oynamaktadır (Şerefoğlu, 2010). Kırsal alanlar, bu özellikler aracılığıyla ziyaretçilere yerel, tarihi, coğrafi ve kültürel açıdan etkileyici bir deneyim sunmaktadır. Turizm cazibeleri, Weaver ve Opperman (2000) tarafından doğal ve kültürel cazibeler olarak iki ana gruba ayrılmıştır.

Doğal cazibeler arasında arazinin yapısı (dağ-tepe oluşumu, vadiler, kumsallar, mağara oluşumları, volkanik alanlar, fosil alanları vb.), iklimsel veriler (sıcaklık, yağış, nem vb.), hidroloji (göller, nehirler, dereler, şelaleler, sıcak su kaynakları vb.), yaban hayatı (fauna), bitki örtüsü (flora) ve konum (merkezî olma durumu) gibi unsurlar yer almaktadır (Weaver ve Opperman, 2000; Mill ve Morrison, 1992). Kültürel cazibeler ise tarihi sit alanları, kırsal yapılar, arkeolojik bölgeler, sanayi mirası ve etnografik özellikler olarak tanımlanmaktadır. Soykan (1999)'a göre, bir doğal alanda kırsal turizmin geliştirilmesi amacıyla o bölgenin farklı doğal peyzaj özelliklerine (hidrolojisi, doğal güzellikleri çekici bulunmalı ve korunmalı, spor etkinliklerine uygun alanları bulunmalı vb.) sahip olması koşuldur. Bu bağlamda, Avrupa ve Uzak Doğu'daki birçok kırsal bölge (Örn: İtalya'daki Toscana ve Fransa'daki Ardeche gibi) doğal zenginlikleri ile kırsal turizme önemli katkılarda bulunmaktadır (Halbway ve Taylor, 2006). Dolayısıyla, turizm planlamalarında doğal peyzaj unsurlarının belirleyici ve yönlendirici bir rolü olduğu gözlemlenmektedir. Bu nedenle, kırsal alanlarda yapılacak düzenlemelerde yerleşim yerlerinin kırsal özelliklerini ön plana çıkaran, doğal ve kültürel potansiyeli artıracak rekreasyonel kullanım hedefleri ile uyum sağlamalıdır. Ancak burada dikkat edilmesi gereken, kırsal bölgelerin sahip olduğu doğal ve kültürel değerlerin ekolojik prensiplere uygun bir şekilde korunmasıdır. Bu nedenle, herhangi bir bölgenin kırsal turizme açılmadan önce, o alanın doğal ve kültürel peyzaj özelliklerinin kırsal turizm aktiviteleri açısından değerlendirilmesi büyük bir önem taşımaktadır.

Bu araştırma, Doğu Karadeniz (Trabzon-Rize) Bölgesi'ndeki doğal peyzaj elementleri ile kırsal yerleşim alanları arasındaki etkileşimleri incelemeyi amaçlamaktadır. Bu hedef doğrultusunda, bölgenin değişken topoğrafisi, kıyı özellikleri, doğal bitki örtüsü ve yerel mimari gibi unsurların kırsal turizm üzerindeki etkileri değerlendirilecektir. Bu kapsamda,

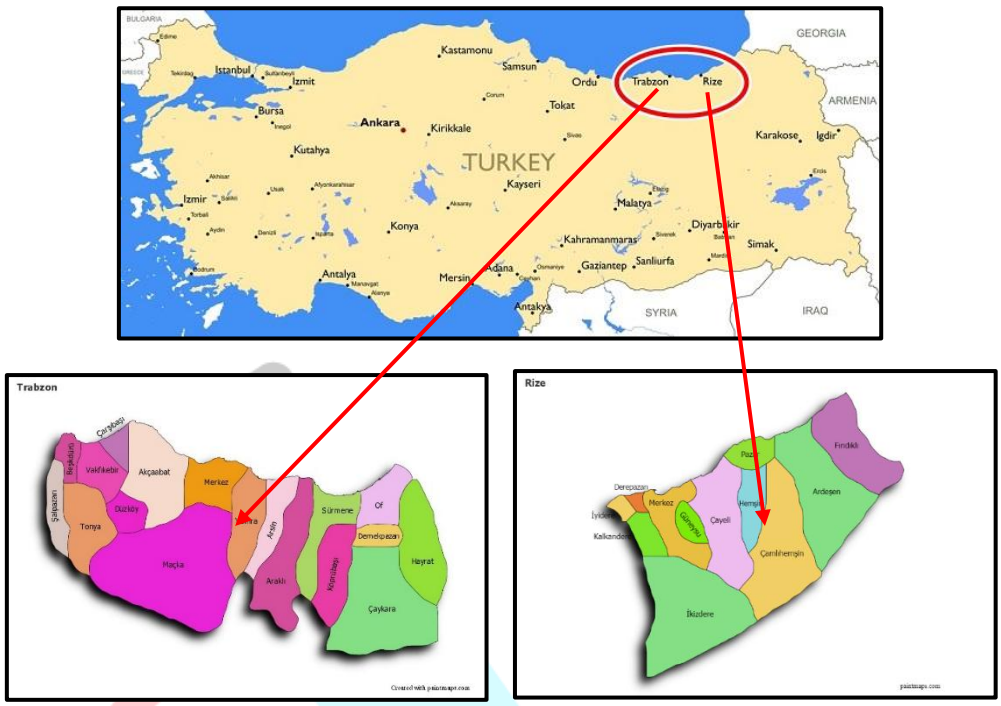
araştırma yeri olarak Trabzon ve Rize illerindeki kırsal yerleşimler (köyler) seçilmiştir. İlk olarak, bu alanlardaki doğal peyzaj unsurları belirlenerek elde edilen bilgilerin kırsal turizm üzerinde nasıl bir etkisi olduğu analiz edilmiştir. Çalışmanın sonunda, bölgedeki doğal peyzaj potansiyelinin oldukça zengin olduğu ve bu potansiyelin sürdürülebilir hale getirilmesi amacıyla kırsal turizmin dikkatli ve planlı bir şekilde geliştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

2.Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Araştırma alanı, Doğu Karadeniz'deki Trabzon ve Rize illerinin idari sınırlarını kapsamaktadır. Dağlık ve yüksek bir yapıya sahip olan Trabzon ili, doğu boylamları 38° 30' - 40° 30' ve kuzey enlemleri 40° 30' - 41° 30' arasında bulunmaktadır (Trabzon İl Planı, 2024-2028). Trabzon'un batısında Giresun, doğusunda Rize, güneyinde Gümüşhane ve Bayburt, kuzeyinde ise Karadeniz yer almaktadır.

Rize, kuzeydoğu Anadolu'da; Doğu Karadeniz'in sahil kısmının doğusunda, 40° 22' - 41° 28' doğu boylamları ile 40° 20' - 41° 20' kuzey enlemleri arasında konumlanmıştır (Rize İl Tarım ve Orman Müdürlüğü, 2025). Rize'nin batısında Trabzon, doğusunda Artvin, güneyinde Erzurum ve kuzeyinde Karadeniz bulunmaktadır (Şekil 1). Araştırma bölgesinin belirlenmesinde, bölgenin tarihi, kültürel ve doğal yönlerinin yanı sıra kırsal turizm açısından taşıdığı potansiyel ile turizmin, bölgedeki ekonomik kaynakları çeşitlendirebileceği görüşü etkili olmuştur. Bölgenin doğal, kültürel ve sosyo-ekonomik özellikleri, Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2014), Trabzon ve Rize Valilikleri (2024), Trabzon ve Rize Belediyeleri (2025), Trabzon ve Rize İl Kültür ve Turizm Müdürlükleri (2024), TÜİK (2024), Trabzon ve Rize Tarım Orman Müdürlükleri (2024) tarafından yapılan araştırmalarla, çeşitli akademisyenlerin konuyla ilgili çalışmaları ve yerel halkla gerçekleştirilen görüşmelerden elde edilen verilerle sunulmuştur.



Şekil 1. *Trabzon ve Rize illerinin coğrafi konumu (URL-1, URL-2)*

2.2. Yöntem

Çalışmada kullanılan yöntemler; inceleme, veri toplama, veri işleme ve değerlendirme aşamalarını kapsamaktadır. İnceleme sürecinde; araştırmanın yapıldığı alanın doğal peyzaj yapısı (flora örtüsü, peyzaj noktaları, su kaynakları vb.) yerinde incelenmiş ve fotoğraflarla kaydedilmiştir. Veri toplama aşamasında ise, araştırma bölgesi ve konusu ile ilgili kaynaklar gözden geçirilmiş ve bilgiler toplanmıştır. Ayrıca, yerel halkla yapılan görüşmeler sayesinde çeşitli bilgiler elde edilmiştir. Analiz bölümünde, Trabzon ve Rize illerinin doğal peyzaj potansiyelinin kırsal turizm açısından incelenmesi için SWOT analizi yapılmıştır (Tablo 1). SWOT analizinin hedefi, bölgenin doğal peyzaj potansiyelinin kırsal turizm açısından ne denli önemli olduğunu belirlemek amacıyla güçlü yanlar ve fırsatları ortaya koymak, zayıf noktaları ve tehditleri azaltmaya yönelik yeni stratejiler geliştirmektir.

3.Bulgular ve Tartışma

3.1. Doğal özellikler

Trabzon'un doğal yapısı; Trabzon ilinin temel doğal oluşumları, güneyde su bölümü hattı boyunca doğu-batı yönünde yayılan dağlık alanlar ile bu arazide şekillenmeyi etkileyen önemli dış etken olan Solaklı, Yomra, Değirmendere, Sera, Kalenima ve Foldere gibi akarsuların oluşturduğu vadiler ve deltalarıdır. Nehirlerin yarattığı vadiler, özellikle yan kolların ve onlara katılan diğer akarsuların bulunduğu yerlerde oldukça dar bir yapı göstermektedir. Bu durum, bölgenin geniş bir alanına yayılmaktadır. Bölgenin yüksek nem oranı, havzaların hızlı su akışı ve taşıdığı fazla malzeme, derin aşınma süreçlerinde önemli bir etki yapmıştır. Trabzon'daki en gelişmiş vadiler, batıda güney-kuzey doğrultusunda uzanan Foldere Vadisi, Değirmendere suyun bulunduğu güneybatı-kuzeydoğu yönündeki Karadere Vadisi ve doğuda güney-kuzey yönünde uzanan Solaklı Deresi vadisidir. Trabzon ilinin en

önemli akarsuları, Foldere, Değirmendere, Karadere ve Solaklı dereleridir. İl sınırları içindeki öne çıkan göller; Uzungöl, Balıklı, Aygır, Kara Göl ve Haldizen Dağları'ndaki diğer buzul gölleriyle birlikte Sera heyelan set gölüdür. Dağlık alanlar, doğu-batı doğrultusunda uzanır ve en yüksek kısmı doğudaki Haldizen Dağlarıdır. Önemli yükseklikler; Demirkapı (3376 m.), Kayışkıran (3156 m.) ve Karakaya (3139 m.) zirveleridir.

Trabzon bölgesinde yaz ayları ılımandır, nem seviyesi yüksektir ve hava genelde açık olur; kışlar ise uzun, soğuk ve bulutludur. Yıl boyunca sıcaklıklar genellikle 5°C ile 27°C arasında değişmekte ve nadiren 1°C'nin altına düşmekte ya da 29°C'ye ulaşmaktadır. Trabzon'da en fazla yağış alan ay Ekim olup ortalama yağış miktarı 89 milimetre civarındadır. En az yağış alan ay ise Temmuz'dur ve bu ayda ortalama yağış miktarı 21 milimetreye düşmektedir.

Yağışların şekli, kıyıya yakın bölgelerde genellikle yağmur, daha yüksek alanlarda ise kar biçimindedir. Bu bölgedeki iklim, ılıman ve her mevsim yağışlı bir iklim yapısına sahiptir. Bu durum, çeşitli bitki örtüsü kuşaklarının oluşmasına neden olmuştur. 0-300 m yüksekliğinde Akdeniz bitkilerine ait psöudomaki türleri (Trabzon hurması, akçaağaç, şimşir, karayemiş, defne, prekanta, muşmula, katran ardıcı, ve kocayemiş) baskındır; kıyıya yakın yerlerde ise geniş yapraklı etek ormanları (kızılağaç, kestane, meşe çeşitleri, dışbudak, ıhlamur, adi fındık, beyaz söğüt, kavak ve doğu çınarı gibi) bulunmaktadır. Bunun üstünde geniş yapraklı ve iğne yapraklı ağaçların karışımı olan ormanlar (Avrupa kestanesi, adi kızılağaç, adi gürgen, adi fındık, doğu gürgeni, meşe, akçaağaç, üvez, çitlenbik, defne, mor çiçekli ormangülü, kayın, ladin ve köknar) yer alırken, daha yüksek kesimlerde iğne yapraklı ormanlar (sarıçam, ladin, mor çiçekli ormangülü ve bazı çalı türleri) bulunmaktadır. Alt kuşakta kıyı bölgelerinde orman örtüsü neredeyse tam iken, daha yüksek alanlarda tarım ve yerleşim alanları açılması nedeniyle arada boşluklar bulunmaktadır. Ancak 500-1850 m yüksekliklerde hâlâ zengin ve yoğun bir orman örtüsü gözlemlenmektedir. Daha yukarı kısımlar ise ağaç yetişmesine uygun olmadığından Alpin çayır alanlarıdır. Doğu Karadeniz Bölgesi, Kırmızı-Sarı Podzolik olarak bilinen büyük toprak varyetelerinden oluşmaktadır. Araştırmalar sonucunda bu bölgede 127 endemik ile 198 yaygın otsu ve odunsu tür tespit edilmiştir. Ayrıca, 43 farklı hayvan türü de bulunmuştur. Şehirde dikkat çeken yaylalardan bazıları; Kadırga, Sazalanı, Kadıralak, Çakırgöl, Şolman, Mavura, Kiraz, Sisdağı, Sultan Murat ve Düzköy yaylalarıdır. Trabzon ilinin çevresi su kaynakları bakımından oldukça fazladır. Şehirdeki su akışları çok yüksek debilere sahip olmamakla birlikte, yıl boyu su akışı devam eden birçok dere ve kaynak bulunmaktadır. Bu akarsulardan bazıları; İyidere, Baltacı, Solaklı, Gelincik, Kastel, Musali, Zarha, Sürmene (Manahoz), Çakaloğlu, Küçükdere, Karadere, Zerdali, Kankol, Yanbolu, Falkoz, Rızvan, Kendirli, Arsin, Selen, Çavuşlu, Harmanlı, Yomra ve Şana (İkisu) dereleridir. Ayrıca, Zil, Devletçeşmesi, Çamaşır, Şehirbatlı, Değirmendere, Kuzgun (Tabakhane) ve Zağnos (Kisarna) dereleri de şehir içinden kapalı kanallarla geçerken evsel atık taşımaktadır. Diğer önemli dereler ise; Zincirli, Kirli, Hacıbeşir, Yıldızlı, Söğütlü, Lazlar, Kavaklı, Sargana, Pana, Rosto, Zavana, Çatalzeytin, Gökçekaya, Güneşli, Taşlıca, Üzümlü, Liman, Çifteçeşme, İskefiye, Kilit, Kirazlık, Yıldız, Fol Deresi, Çamlık, Kurbağalı ve Akhisar Deresi'dir. Trabzon ilinin başlıca gölleri ise; Uzungöl (12 ha), Sera Gölü (14 ha) ve Çakırgöl'dür (7 ha) (Trabzon Büyükşehir Belediyesi, 2025) (Şekil 2-a).

Rize'nin doğal yapısı; Doğu Karadeniz kıyılarındaki dağların kuzey eteklerinde yer alan Rize arazisi, genel olarak engebeli ve dağlık bir karakter taşır. Kıyı çizgileri, küçük asimetrik girinti ve çıkıntılarla doludur. Arazi, dar akarsu vadileri sayesinde derin yarıklar halindedir. Hem ana akarsular hem de bu akarsuların yan kolları, bu bölgenin erozyonuna sebep olmuş ve karmaşık bir görüntü kazandırmıştır. Keskin ve birbirine yakın sıralardan meydana gelen dik yamaçlı vadiler, 2000 metre yüksekliğin üstünden itibaren bu bölgenin özgün topoğrafik yapısını sergiler. 3000-3200 metreye ulaşan yüksekliklerde ise, topoğrafya, düz sırtlar ve dik "U" profilli vadilerle şekillenmektedir. Rize'nin en yüksek noktaları arasında Kaçkar (3937m), Verçenik (3709m), Gudashevsivrisi (3406m), Koyunsokağı (3342m), Marsis (3334m), Aşağı Karataş Tepesi (3322m) ve Koyunsokağı Vacakar Dağı (3458m) bulunur. Dördüncü jeolojik dönemin buzul dönemlerinde önemli derecede buzul aşındırmalarına uğramış bu alanda pek çok küçük buzyalağı ve moren set gölleri mevcuttur. Rize Dağları'nın 2400 metreden yüksek bölgelerinde, buzul erozyonu ve tortul birikim neticesinde meydana gelmiş 19 küçük göl keşfedilmiştir. Bu göllerin en büyükleri, 0. 07 km² yüzölçümüne sahip Ambar Gölü (2950m) ve Büyük Deniz Gölü (2900m) olarak öne çıkmaktadır. 2400-3000 metre yükseklik aralığında bulunan bu göllerin en küçüğü ise 0. 01 km² yüzölçümü ile Öküzyatağı Gölü'dür (2775m). Bu göllerden bir kısmı buzyalağı, diğer kısmı ise moren seti gölü özelliği taşımaktadır.

Rize, yağışlı iklimi ve bol yer altı su varlığı sayesinde zengin bir hidrolojik yapıya sahiptir. Rize'de doğu-batı yönünde neredeyse her 250-300 metrede büyük ya da küçük bir su kaynağına ulaşmak mümkündür. Bu kaynakların en önemlileri İyi Dere (78. 4 km) ve Fırtına Deresi'dir (1149. 3 km) (Rize İl Tarım ve Orman Müdürlüğü, 2025) (Şekil 2-b).

Rize, yaz mevsiminde serin, kış mevsiminde ise ılımandır ve yıl boyunca yağış alır. Elli yıllık gözlemler sonucunda, Rize'nin yıllık ortalama sıcaklığı 14 oC civarındadır. Türkiye'de en fazla yağışın düştüğü yer olan Rize'de, yıllık toplam yağış miktarı 2300 mm'yi aşmakta ve yağışlar mevsimler arasında eşit şekilde dağılmaktadır. Bu nedenle Rize'de kurak mevsim yaşanmaz. Mevsimsel farklılıklar olsa da, Rize'nin nem oranı her zaman % 75'in üzerindedir. Yıl boyunca 150 gün kapalı, 163 gün ise bulutlu geçmektedir. Rize'de kar ortalama 14 gün yerde kalmakta, don günlerinin sayısı ise ortalama 10'dur. Donlu gün sayısının az olması ve en düşük sıcaklık ortalamasının -7 oC'nin altında olmaması, Rize'de narenciye yetiştirmeyi mümkün kılmıştır. Bol yağış alan ve ılıman bir iklimi olan Rize, yoğun ve zengin bir bitki örtüsüne sahiptir. Kıyıdan yaklaşık 750 metre yüksekliğe kadar olan alan, geniş yapraklı ormanlarla kaplıdır. İlin önemli bitki türleri arasında sakallı kızılağaç, kayın, kestane, ıhlamur, gürgen, karaağaç, doğu ladini, Kafkas köknarı, yabani Trabzon hurması, karaçam, yabani karayemiş, yabani kiraz, defne, çınar, tesbih ağacı, meşe, dişbudak ve orman gülü yer almaktadır. Rize'de yapılan araştırmalarda, 88'i endemik olmak üzere toplam 1552 tohumlu bitki türü ile 600 tohumsuz bitki türü tespit edilmiştir. Fauna bakımından ise; 61 memeli, 239 kuş, 18 balık, 23 sürüngen, 9 çift yaşar ve 669 omurgasız hayvan türü kaydedilmiştir. Bu bölgedeki en dikkat çeken yayla Ayder'dir. Diğer yaylalar ise Handüzü, Çağrankaya, Vaşa, Petran, Demirkapı, Sivrikaya, Anzer, Ovit, Gölyayla, Sal, Pokut, Hazindağ, Samistal, Golezana, Palovit, Elevit, Amlakit, Çat, Verçenik, Hacivanak, Aşağı Kavron, Yukarı Kavron ile Ambarlı ve Kito yaylasıdır. Rize ilinin en önemli akarsuları İyidere, Taşlıdere, Büyükdere, Yeşildere,

Fırtına, Çağlayan ve Ortaköy Deresi'dir. Ayrıca ilin en dikkate değer gölleri Büyükdeniz, Göleteği, Sarıncaf, Balıklı, Çınacar, Sefkar, Kapılı, Suluk ve Anbar Gölü'dür (Rize Valiliği, 2025).

a b c

Şekil 2.*Trabzon Uzungöl, Rize Fırtına Deresi ve Elevit Yaylası (Bozkurt, 2025).*

3.2 Kültürel özellikler

Trabzon'un kültürel özellikleri: Tarihi en az 4000 yıl öncesine dayanan Trabzon, stratejik coğrafi konumu sayesinde tarih boyunca dünyanın gözünde özel bir şehir olmuştur. Geçmişten bugüne birçok medeniyete ev sahipliği yapan Trabzon, eğitim, kültür ve ticaret merkezleri ile çevresiyle birlikte zengin bir kültürel yapı oluşturmuştur. Bu nedenle Trabzon, kültürel mirası açısından oldukça zengin bir şehir olarak öne çıkmaktadır. Günümüzde bu miras, hem yerli hem yabancı birçok turist tarafından ilgi gören yerler arasındadır. Trabzon'da kültürel kimlik açısından öne çıkan başlıca yapılar şunlardır;

• Sümela Manastırı: Maçka ilçesine bağlı Altındere Köyü sınırları içinde, Altındere Vadisi'ni gören Karadağ'ın yamaçlarında dik bir kayalıkta bulunan Sümela Manastırı, halk arasında "Meryem Ana" olarak bilinir. Vadinin yaklaşık 300 metre yukarısında konumlanan bu yapı, manastırların genellikle şehir dışında, ormanlık veya mağara gibi doğal alanlarda inşa edilmesi geleneğini devam ettirmektedir. Günümüze kadar ulaşan yapının, 13-14. yüzyılda Trabzon Komnenosları (Pontus) dönemine ait olduğu bilinmektedir (Tüfek, 1978) (Şekil 3-a).

• Vezalon (Yahya) Manastırı: Maçka ilçesinin Kiremitli Köyü'nün 7 kilometre batısında yer alan bu manastır, çam ağaçlarıyla dolu bir ormanın içinde konumlanmaktadır. Ayrıca burada bir mağara ve bir su kaynağı da bulunmaktadır. İlk inşa edilen manastır, mağaranın ön kısmına yapılmıştır. Günümüzde var olan kilise ve keşiş odaları, 19. yüzyıla aittir ve mağaranın önünde yer alır. Kompleksin 9 kilometre kuzeyinde bulunan küçük şapel ise 15. yüzyıl dönemine dayanmakta olup, önemli freskler içermektedir.

• Kızlar (Panagia Theokephastros) Manastırı: Şehir merkezinin sınırları içinde bulunan bu manastır, Boztepe'nin yamaçlarında oldukça baskın bir konumda inşa edilmiştir. İki ayrı teras üzerine yapılan bu manastır kompleksi, yüksek bir koruma duvarı ile sarılmıştır. III. Alexios döneminde (1349-1390) inşa edilen yapının birkaç kez onarıldığı ve 19. yüzyılda mevcut halini aldığı bilinmektedir.

• Kızlar Manastırı (Panagia Keramesta): Bu manastır, Maçka ilçesinin Kiremitli Köyü vadisi üzerinde bulunmaktadır. İlk kez kimin tarafından ziyaret edildiğine dair bir yazıt mevcut

değildir. Sümela ya da Vazelon manastırlarının bir minyatürü olarak değerlendirilen bu yapıda, kutsal bir mağara da bulunmaktadır. Günümüze kadar ulaşabilen taş kısımları, bu manastırın Orta Çağ döneminde yapıldığı izlenimini verse de aslında 1858 yılında inşa edilmiştir.

• Trabzon Kalesi: Trabzon ilinin merkezinde yer alan bu kale, şehrin en yüksek alanında bulunur ve Trabzon'da günümüze kadar en iyi korunmuş yapılar arasında yer alır. Deniz kıyısından başlayarak şehrin arkasındaki tepelere kadar uzanan Trabzon Kalesi, Bizans Dönemi'ne ait eski temeller üzerine inşa edilmiştir. Kale, Yukarı Hisar, Orta Hisar ve Aşağı Hisar olmak üzere üç bölümden oluşmakta ve bu kısımlar, tarihi yapılar için kullanılan taşlarla inşa edilmiştir.

• Atatürk Köşkü: Bu köşk, 19. yüzyılın başlarında Trabzon'un Soğuksu Sırtları'nda Konstantin Kabayanidis tarafından yazlık olarak yapılmıştır. Yapının mimarisi, Avrupa ve Batı Rönesansı'nın etkilerini taşımakta ve içerisinde dikkat çekici Avrupa sembolleri barındırmaktadır. Dış kısımdaki taş işçiliğiyle öne çıkan köşkün bahçesi çam ağaçlarıyla çevrilmiştir. Atatürk, Trabzon'a ikinci gelişinde bu köşkte kalmış ve burada tüm mülkünü Türk milletine bağışlama kararı vermiştir (Şekil 3-b).

• Trabzon Müzesi: Trabzon müzesi olarak işlev gören konak, Zeytinlik Caddesi'nde banker Kostaki Thopylaktos tarafından 1900'lerin başlarında büyük bir konut olarak inşa edilmiştir (1889-1913). Bu yapı, 1937'de Milli Eğitim Bakanlığı'na devrildi ve 50 yıl boyunca Kız Meslek Lisesi olarak kullanıldı. 1987 yılında müze olarak dönüşmesi amacıyla Kültür Bakanlığı'na geçmiştir.

• Ayasofya Müzesi: Günümüzde müze olarak hizmet veren Trabzon Ayasofya Kilisesi, Trabzon İmparatorluğu'nun kralларından I. Manuel Komnenos zamanında (1238-1263) yapılmıştır. I. Dünya Savaşı döneminde depo, hastane ve ardından cami olarak kullanılmıştır. 1958-1962 yılları arasında Vakıflar Genel Müdürlüğü ve Edinburg Üniversitesi'nin işbirliğiyle restorasyon çalışmaları yapılmış ve 1964'ten itibaren müze olarak ziyaretçilerin ilgisine sunulmuştur.

• Diğer öne çıkan müzeler arasında Cevdet Sunay Müzesi ve Trabzonspor Müzesi bulunmaktadır.

• Önemli geleneksel yapılar arasında Memişoğlu ve Nemlizade Konağı, Yarımbıyıkoğlu Evi, Kundupoğlu Evi, Çakıroğlu İsmail Ağa Konağı, Ortahisar Evleri (Trabzon) ve Orta Mahalle (Akçaabat) sayılabilir.

• Önemli camiler ve türbeler: Gülbahar Hatun, Ortahisar Fatih, Yeni Cuma, İskender Paşa, Ahi Evren Dede, Hızırbey, Çarşı, Erdoğdu Bey, Tavanlı Camii, Ahi Evren Dede, Gülbaharhatun, Emir Mehmet, Hamza Paşa (Açık Türbe) Türbesi bulunmaktadır.

• Diğer tarihi ve kültürel öneme sahip yapılar: Santa Harabeleri, Taşhan, Vakıf Han (Gön Han, Attar Han), Alaca Han, Sekiz Direkli Hamam, Paşa Hamamı, Meydan Hamamı, Zağnospaşa Köprüsü, Tabakhane Köprüsü, Değirmendere Köprüsü, Abdullah Paşa Çeşmesi, Abdülhamit Çeşmesi, İmaret Deresi Su Kemeri, Kuzgundere Su Kemerleri ve Kavaklı Su Kemeridir (Trabzon Valiliği, 2025).

a b c

Şekil 4. *Trabzon Sümela Manastırı, Ayasofya Müzesi ve Atatürk Köşkü (Bozkurt, 2025).*

Rize'nin kültürel özellikleri: Rize'nin tarihi yerleri arasında, şehir merkezindeki Rize Kalesi, Fırtına Vadisi'ndeki Zil Kale, Çamlıhemşin ilçesindeki Kız Kalesi, İslampaşa Camii, Hacı Şeyh Camii ve Işıklı Camii gibi yapılar sayılabilir. Rize'nin tarihi dokusunu yansıtan bu eserler, ziyaretçilerin ilgisini çekmektedir. İlde müze olarak; Etnografya Müzesi, Atatürk Evi Müzesi ve Çaykur Çay İçim Müzesi ve Çayeli Doğal Yaşam Müzesi olmak üzere 4 adet müze bulunmaktadır.

Rize Etnografya müzesi: Sarı Ev ya da Tuzcuoğlu Konağı adıyla tanınan yapı, bodrum katının üstünde yer alan iki katlı bir yapı olarak 19. yüzyılda inşa edilmiştir. Sivil mimarinin en etkileyici örneklerinden biri olan Sarı Ev, sonrasında müze haline getirilerek 27/06/1998 tarihinde ziyaretçilere açılmıştır (Rize Müzesi, 2025).

Çaykur Çay İçim Müzesi: Çaykur Çay Müzesi ya da Beyaz Ev olarak adlandırılan bina, Rize'nin Merkez ilçesindeki Rize Müzesi'nin hemen yanında yer alan bir çay müzesidir. 2019 yılında müze olarak düzenlenen bu yapı, Türkiye'deki ilk çay müzesidir ve 19. yüzyılda inşa edilmiştir. Bina, bir bodrum katı ve iki normal kat içermektedir. Çay üretiminde kullanılan aletlerin sergilendiği bu çay teknoloji müzesi, aynı zamanda bölgesel, ulusal ve uluslararası çay içme ve demleme yöntemlerinin sergilendiği çay kültürü müzesi olarak işlev görmektedir.

Çayeli Doğal Yaşam Müzesi: Müze, 20. yüzyılda Çayeli ve civarında yaşayan halkın günlük hayatını konu alan eserler ve canlandırmalardan oluşmakta olup taş temel üzerine ahşap tek katlı olarak inşa edilmiş bir yapıdır. Yapı, sergi alanı ve hediyelik eşya mağazasından oluşmaktadır.

Rize Kalesi: Şehir merkezinin güneybatısına inşa edilmiş bir kaledir. Bir koy ve bu koyun arkasında bulunan tepe üstünde yükselen Kale, Fatih Sultan Mehmet'in 1461 yılında Trabzon'u fethiyle Osmanlı İmparatorluğu'na dâhil olmuştur (Rize İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2025).

Zil Kale: Bölgedeki en dikkat çekici yapılardan biridir. Kale, birinci derece arkeolojik sit alanı içerisinde konumlanmaktadır. Zil Kale, kervan yolunun üstünde, stratejik bir konumdadır. Güvenlik amacıyla kalenin Osmanlı Dönemi'nde de kullanıldığı ifade edilmektedir (Rize İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2025).

Kız Kalesi: Pazar ilçe merkezinin batısında yer alan küçük bir yarımada üzerine inşa edilmiştir. Kayalık zemin üzerinde bulunan kalenin kara ile bağlantısı kopmuş durumdadır.

Duvarlarındaki düzenli taş işçiliği oldukça dikkat çekicidir. İnşa tarihi net olarak bilinmemekle birlikte, 13. veya 14. yüzyıllarda yapıldığı öngörülmektedir. Günümüzde yalnızca bir gözetleme kulesi kalmıştır (Rize İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2025).

Hemşin evleri: Genellikle konak mimarisine sahip olan yapılar, taş malzemeler kullanılarak inşa edilen üç katlı binalardan oluşmaktadır. Hemşin Evleri'nin üst kısımlarında ahşap işçilik bulunurken, alt katlarında taş detaylar göze çarpmaktadır. Bazı evlerin üst katları ise dolma taş tekniğiyle, ahşapla taş doldurularak inşa edilmiştir. Ahır bölmesi taş olan bazı evlerin üst katları, ahşap malzeme kullanılarak boğaz geçme yöntemiyle yapılmıştır. Mutfak bölümleri, ateşin yakılabilmesi amacıyla yontma taşlarla işlenmiş ve dumanın dışarı çıkması için kemer bağlantılı baca sistemleri oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra Hemşin Evleri'nde, aile bireylerinin oturduğu ve yemek yediği avlu, yiyeceklerin depolandığı maran adı verilen ambar, misafirlerin ağırlanması için düzenlenmiş başoda, bu odalarda yer alan şömine ile banyo da bulunmaktadır. Ahşap yapı tekniğiyle inşa edilen bu evlerde oyma sanatının en detaylı teknikleri kullanılmıştır; kapı ve menteşelerin dışında hiç çivi kullanılmadan geçme yöntemiyle montaj yapılmıştır.

3.3 Sosyo-ekonomik özellikler

18 ilçesi bulunan Trabzon'un 2024 yılı TÜİK verilerine göre toplam nüfusu 822. 270 kişidir. Bu nüfusun 414. 143'ü kadın, 408. 127'si ise erkeklerden oluşmaktadır. 4. 689 km²'lik bir alana sahip olan Trabzon, km² başına düşen 176 kişiyle, nüfus yoğunluğu açısından Türkiye'deki 81 il arasında 11. sırada yer almaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), kentin kırsal nüfus verilerine göre nüfusun 406. 061'i yoğun yerleşim alanlarında, 204. 229'u orta yoğunluktaki bölgelerde ve 234. 611'i de kırsalda yaşamaktadır (TÜİK, 2024).

Trabzon, Osmanlı İmparatorluğu sürecinde vilayet haline gelmiştir. Trabzon'un ekonomik yapısı, ülkenin diğer şehirleriyle karşılaştırıldığında, bu bölgenin ekonomik gelişimde çok fazla ilerleme katedemediği ve geri kaldığı söylenebilir. Osmanlı İmparatorluğu öncesi ve dönemi açısından sosyo-ekonomik olarak önemli bir konumda bulunan Trabzon'un bu stratejik önemi son yıllarda sürekli bir düşüş göstermiştir. Şehir, kültürel ve sosyal yönden bir gelişim yaşamış olsa da, beklenen ekonomik atılımı gerçekleştirememiştir. Trabzon'un ekonomisi hâlâ büyük ölçüde tarım ve hayvancılığa dayanmakta. Ticaret, sanayi, geleneksel el sanatları, taşımacılık, inşaat ve diğer hizmet sektörlerindeki istihdam ise daha az bir orana sahiptir. Son zamanlarda artan yayla turizmi, Trabzon'un turizm alanına yeni bir boyut katmıştır. Ancak, Trabzon'un sanayi üretiminin ulusal düzeydeki payı her yıl azalmaktadır. Şehrin ekonomik kalkınması için bazı resmi ve özel kuruluşlar, turizmin geliştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Trabzon'un iklim şartları turizm açısından bir dezavantaj olarak görülse de, özellikle yayla ve doğa turizminin arttırılması şehrin ekonomik refahı açısından faydalı bir seçenek olabilir.

İmalat sanayisinin il ekonomisine katkısı, güncel verilere göre GSYİH içinde %15, istihdamda ise %6 oranındadır. İl genelinde büyük ölçekli üretim tesisleri oldukça azdır. En dikkat çekici imalat sanayi tesisi, 1992 yılında özelleştirilen ve yıllık 455 bin ton kapasiteye sahip olan Çimento Fabrikasıdır. Diğer imalat tesisleri genellikle tarımsal ürünlere yönelik faaliyetler yürütmektedir. Özellikle orta ölçekli işletmeler, ilin önemli iki tarımsal ürünü olan fındık ve çayın işlenmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. İldeki imalat sanayi ürün grupları arasında un, kepek, süt ürünleri, balık unu ve yağı, hazır giyim, mefruşat, ayakkabı, kereste,

lastik ve plastik ürünler, PVC borular, bakır, çinko, kurşun, alüminyum ve kurşun mamulleri, boru, galvanizli sac, metal, otomotiv yan sanayi ve cerrahi dikiş malzemeleri yer almaktadır. Hızla inşa edilen Organize Sanayi Bölgesi'nin il ekonomisine önemli bir katkı sağlaması bekleniyor. Deneme üretimine geçmiş 5 firma, inşaat aşamasındaki 27 firma ve yatırım süreçlerinde olan 25 firma ile birlikte, Organize Sanayi Bölgesi tam anlamıyla faaliyete geçtiğinde yaklaşık 4500 kişiye iş imkanı sunması öngörülmektedir.

Ayrıca, Sürmene'de geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilen tekne ve gemi yapım sektörü de il açısından önemli bir konumdadır. Yeni kurulan Trabzon Silah Sanayi'nin de il ekonomisinin geleceğinde önemli katkılar sunması beklenmektedir (Trabzon Büyükşehir Belediyesi, 2025).

Rize'de toplam 344. 016 insan yaşamaktadır; bu nüfusun 106. 555'i yoğun yerleşim alanlarında, 112. 940'ı orta yoğunluktaki şehirlerde ve 124. 521'i ise kırsal bölgelerde bulunmaktadır. 3919 km² yüzölçümüne sahip olan Rize ilinde, her bir kilometrekareye ortalama 89 kişi düşmektedir (TÜİK, 2024). Rize'nin geçmişi Sakalar'a dek uzanmakta olup, Osmanlı döneminde liman, nahiye ve kaza merkezi olarak büyük bir önem taşımıştır. Genelde balıkçılık ve tarıma dayalı bir bölge olan Rize'de sanayi de önemli bir gelişim göstermiştir. Rize, Türkiye'nin çay üretiminde anahtar bir yere sahiptir ve çay üretiminde önemli organizasyonlardan biri olan Çay İşletmeleri Genel Müdürlüğü'nü bünyesinde barındırmaktadır. Tarih boyunca Rize'de tarım, hayvancılık, arıcılık, dokuma ve balıkçılık öncelikli geçim kaynakları olmuştur. Binlerce yıl önce tanınan kenevir bitkisinin liflerinden elde edilen iplerle yapılan dokuma, Rize'ye özgü bir kumaş türü haline gelerek popülaritesini artırmıştır.

Rize'de tarım için uygun alanlar genellikle küçük bahçeler şeklindedir. Bu bahçelerde genellikle mısır yetiştirilmektedir. Bunun yanı sıra birçok sebze ve meyve, fasulye ve turunçgillerle birlikte ceviz ve fındık da üretilmektedir. Bu bölgelerde ekilen kenevirin işlenmesiyle elde edilen keten bezleri hem yerli hem de yabancı ziyaretçilerin dikkatini çekmektedir. Tarımla uğraşan kişiler, aynı zamanda hayvancılıkla da meşguldür. Eski köy evlerinin alt katları sıklıkla ahır olarak kullanılarak burada 2 veya 3 büyükbaş hayvan bakılmaktadır. Kıyı kesimlerde yaşayanlar, demircilik ve bakırcılıkla beraber balıkçılıkla da ilgilenmektedir. Rize'de tarımsal alanlar sınırlı olmasına rağmen, ilin ekonomisi büyük ölçüde tarıma bağlıdır. Çayın yanı sıra son yıllarda ekonomik değeri artan kivi, mısır, lahana, hıyar ve kabak gibi mahsuller genellikle aileler tarafından tüketim için yetiştirilmekte, az bir kısmı ise yerel pazarlara sunulmaktadır. Ayrıca ilin önemli bir bölümü ormanlık alanlarla kaplı olduğundan, küçük atölyelerde ahşap işçiliği ve marangozluk faaliyetlerine yer verilmektedir. Rize'de son zamanlarda yayla turizmi ve doğal güzellikler için gelenlerin sayısı artsa da, ulaşım ve mevcut konaklama ile beslenme imkanları turizmin gelişimini kısıtlamaktadır. Bu durum, turizmin yatırımcılar ve çalışanlar için çekici bir sektöre dönüşmesini zorlaştırmaktadır.

Rize'de sanayi gelişimi, 1940'lı yıllarda çay üretimine başlanmasıyla birlikte bu alanda tesislerin açılmasıyla hız kazanmıştır. Rize'deki ilk modern sanayi tesisi, 1947 yılında faaliyet göstermeye başlayan Zihni Derin Çay Fabrikasıdır. 1984 yılına kadar sanayileşme, büyük ölçüde devletten sağlanan destekle ilerlemiş, 1985'ten sonra ise özel sektör çay sanayisine girerek daha fazla ön plana çıkmıştır. İl genelindeki, 10 veya daha fazla çalışanı bulunan sanayi tesislerinin %70. 6'sı (137 tesis) gıda sektöründe, %9. 3'ü (18 tesis) taş ve toprak temelli

sanayide, %8. 2'si (16 tesis) metal eşya ve makine üretiminde, %6. 2'si (12 tesis) orman ürünleri ve mobilya sektöründe, %5. 2'si (10 tesis) plastik sanayisinde ve %0. 5'i (1 tesis) de metal ana sanayisinde faaliyet göstermektedir (Çavuş, 2016).

3.4. Doğu Karadeniz Bölgesinde (Trabzon ve Rize) kırsal turizm olanaklarının SWOT analizi tekniği ile irdelenmesi

Güçlü yönler (S)

Her iki şehirde de doğal ya da doğala yakın alanların fazla bulunması,

Ormanlık alanların yoğun olması ve orman içinde ya da yakınında pek çok köyün bulunması,

Köylerin veya kırsal yerleşim yerlerinin kendilerine özgü Karadeniz mimarisi ile kültürel unsurlara sahip olup bunları koruması,

Kırsal yerleşim alanlarının (özellikle ilçeler, köyler ve yaylalar) doğal ve kültürel özelliklerini sürdürmesi,

Arazinin topoğrafyasından dolayı büyük tarım alanları olmasa da bölgeye özgü tarımsal ürünlerin (çay ve fındık gibi) yetişmesine imkan tanıması,

Topoğrafik özellikler doğrultusunda yayla gezileri, günübirlik dinlenme etkinlikleri, avcılık ve dağ yürüyüşü, rafting, yamaç paraşütü gibi alternatif turizm olanaklarının mevcut olması,

Doğal, tarihsel ve kültürel kaynakların kırsal turizm faaliyetlerine elverişli olması,

Flora ve fauna çeşitliliğinin fazla olması ve bu sebeple ekoturizm açısından ilgi çekmesi.

Zayıf yönler (W)

Doğal, kültürel ve tarihi değerlerin korunması ile ilgili toplumun bilgi seviyesinin yetersiz kalması,

Bölge sakinlerinin turizm ve hizmet alanındaki deneyim eksikliği,

Kırsal turizm alanlarında ulaşım imkanlarının ve özellikle altyapı dahil sunulan hizmetlerin yetersizliği,

Kırsal nüfusun giderek azalması,

Rize'nin kırsal turizmi destekleme programı çerçevesinde yeterince desteklenmemesi.

Fırsatlar (O)

Küresel ölçekte ve Türkiye genelinde doğa ve kültür temelli turizme yönelik talebin artış göstermesi,

Kırsal Turizm Destekleme Programı kapsamında Trabzon'un desteklenen iller arasında yer alması ve Rize'nin Trabzon'a komşu il olması nedeniyle bu desteklerden yararlanabilme potansiyelinin bulunması,

Kıyı turizmine ek olarak farklı turizm türlerinin geliştirilmesine olanak tanınması,

İç turizmi hareketlendirmeye yönelik çalışmaların artırılması,

Ekoturizm başta olmak üzere alternatif turizm türlerinin gelişmesiyle yeni istihdam alanlarının ortaya çıkması,

Turizm amaçlı kullanılan alanların kapasitesindeki artışın yerel ekonomiyi olumlu yönde etkilemesi.

Tehditler ve Tehlikeler (T)

Kırsal alanların turizm faaliyetlerine açılmasının doğal ve kültürel değerler üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmesi,

Orman alanlarının tahrip edilmesi ve çeşitli nedenlerle azalması,

Geleneksel mimari ve yaşam biçimlerinin zamanla değişime uğraması,

Koruma ve kullanım arasındaki dengenin yeterince sağlanamaması, insan faaliyetlerinin yoğunluğunun artması,

- İşsizlik ve istihdam olanaklarının sınırlı olması nedeniyle yerel halkın bölgeden göç etmesi,
- Turizm faaliyetlerinin ön plana çıkmasıyla birlikte geleneksel tarım, balıkçılık, dokumacılık ve ahşap işçiliği gibi yerel üretim faaliyetlerinin geri planda kalması.

4.Sonuçlar

Bu çalışmada Doğu Karadeniz Bölgesinin (Trabzon ve Rize) doğal peyzaj potansiyeli, kırsal turizm olanakları açısından SWOT analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, bölgenin doğal, kültürel ve biyolojik çeşitlilik bakımından Türkiye'nin önde gelen kırsal turizm alanlarından biri olduğunu ortaya koymaktadır. Zengin topoğrafya, yoğun orman örtüsü, su kaynakları, yaylalar ve flora–fauna çeşitliliği, bölgenin özellikle ekoturizm, yayla turizmi ve doğa temelli rekreasyon faaliyetleri açısından yüksek bir çekiciliğe sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, literatürde doğal peyzaj unsurlarının turizm gelişimi üzerindeki belirleyici rolünü vurgulayan çalışmalarla örtüşmektedir (Soykan, 1999; Şerefoğlu, 2010; Weaver ve Opperman, 2000).

Bununla birlikte SWOT analizinde belirlenen zayıf yönler ve tehditler, söz konusu potansiyelin plansız ve kontrolsüz kullanımı halinde önemli riskler barındırdığını ortaya koymaktadır. Özellikle altyapı ve ulaşım yetersizlikleri, yerel halkın turizm konusunda deneyim eksikliği ve koruma bilincinin sınırlı olması, kırsal turizmin sürdürülebilirliği açısından temel sorun alanları olarak öne çıkmaktadır. Nitekim son yıllarda yaylalarda artan yapılaşma baskısı, doğal peyzaj bütünlüğünün bozulmasına ve geleneksel mimarinin bozulmasına yol açmaktadır. Bu durum, kırsal turizmin ekonomik beklentiler doğrultusunda artış göstermesinin, doğal ve kültürel kaynaklar üzerinde geri dönüşü zor etkiler yaratabileceğini göstermektedir.

Çalışmada belirlenen tehditler arasında yer alan orman alanlarının tahribi, geleneksel tarım ve yerel üretim faaliyetlerinin geri planda kalması ve kırsal nüfusun göç etmesi, kırsal turizmin yalnızca turizm odaklı değil, çok sektörlü bir kırsal kalkınma aracı olarak ele alınması gerektiğine işaret etmektedir. Aksi halde, turizmin gelişmesi beklenirken yerel yaşam biçimlerinin zayıflaması ve kırsal kimliğin kaybolması gibi çelişkili sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Bu durum, koruma–kullanma dengesinin sağlanamadığı alanlarda kırsal turizmin sürdürülebilirliğini doğrudan tehdit etmektedir. Fırsatlar açısından

değerlendirildiğinde ise doğa ve kültür temelli turizme olan talebin artması, Trabzon ve Rize için önemli bir avantaj sunmaktadır.

Ancak bu fırsatların kalıcı kazanımlara dönüşebilmesi, yerel halkın karar alma süreçlerine aktif olarak dahil edilmesi ve turizm gelirlerinden doğrudan fayda sağlaması ile mümkündür. Yerel katılımın sağlanamadığı durumlarda, turizm yatırımlarının dış girişimcilerin kontrolüne geçmesi ve kırsal alanların özgünlüğünü kaybetmesi riski artmaktadır.

Bu bağlamda çalışma, kırsal turizmin yerel ölçekli, küçük kapasiteli ve çevreyle uyumlu biçimde planlanmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Trabzon ve Rize illeri, Türkiye'de turizm çeşitliliğinin artırılması açısından dikkate değer bir potansiyele sahiptir. Bölgedeki halkın doğal ve kültürel kaynaklardan ekonomik kazanç sağlaması ve kırsal turizm alanında gelişim gösterilmesi oldukça önemlidir. Ayrıca, bölgede gerçekleştirilecek alternatif turizm faaliyetlerinin sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesi için bilimsel araştırmaların dikkate alınması, ekolojik ve sosyolojik verileri temel alan düzenli bir yaklaşımın benimsenmesi gerekmektedir. Trabzon ve Rize'nin nüfus yapısına bakıldığında, şehir merkezi dışındaki yerleşimlerde kırsal nüfusun giderek azaldığı ve yerel halkın genellikle şehir merkezlerinde yaşamayı tercih ettiği anlaşılmaktadır. Bu durum, köyler ve yaylalardaki geleneksel yaşam tarzlarının korunmasının önemini göstermektedir. Her iki ilin sunduğu doğal çeşitlilik, bakir alanlar ve kültürel peyzaj zenginlikleri bir arada değerlendirildiğinde; Trabzon ve Rize için öne çıkan turizm alternatifleri arasında yayla, köy ve çiftlik turizmi; akarsu ve göllerde rafting ile balıkçılık; doğa yürüyüşleri ve botanik geziler; ayrıca kış sporları ve dağcılık faaliyetleri bulunmaktadır. Bu bağlamda, Kadırga, Sisdağı, Sultan Murat, Ayder, Anzer, Pokut ve Elevit yaylaları; Uzungöl, Balıklı Göl ve Fırtına Deresi; Fırtına Vadisi, Şimşir Ormanı, Çağlayan ve Tunca vadileri ile Ovit Dağı ve Handüzü Yaylası gibi alanlar büyük bir turizm potansiyeli taşımaktadır.

Gerekli koruma önlemleri alındığında ve uygun planlamalar gerçekleştirildiğinde, Trabzon ve Rize illerinde yayla turizmi, sağlık turizmi, av turizmi, kış turizmi ve doğa sporlarına dayanan birçok alternatif turizm türü geliştirilebilir. Bu süreçte, planlanan turizm faaliyetlerine başlamadan önce ilgili meslek gruplarından uzmanların bulunduğu ekipler tarafından detaylı analizlerin gerçekleştirilmesi, doğal ve kültürel değerlerin sürdürülebilirliği açısından son derece önemlidir. Sonuç olarak, bu araştırma Doğu Karadeniz Bölgesi'nde kırsal turizmin geliştirilmesinde doğal peyzaj potansiyelinin temel belirleyici unsur olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Ancak bu potansiyelin korunarak kullanılabilmesi; ekolojik dengeyi gözeten, geleneksel mimari ve yaşam biçimlerini destekleyen ve uzun vadeli planlama yaklaşımlarına dayanan politikaların uygulanmasına bağlıdır.

Kaynaklar

Çavuş A., 2016. Rize ilinde sanayi, Pegem Akademik Yayıncılık, Ankara, ISBN 978-605-318-442-3.

Halbway, C.J. ve N. Taylor, 2006. The business of tourism seventh edition. Prentice Hall England, s.199.

Köroğlu A., Köroğlu, Ö., 2006. Kırsal Turizmin Yöre Kalkınmasındaki Rolü: Buldan Yöresi Kırsal Turizm Potansiyeli. Buldan Sempozyumu, s. 233-242, Denizli.

Mill, C.R. ve Morrison, A., 1992. The tourism system: an ıntroductory text. Second Edition, Prentice Hall International.

Özyazıcı, M.A., Aydoğan, M., Bayraklı, B., Dengiz, O., 2013. Doğu Karadeniz Bölgesi kırmızı-sarı podzolik toprakların temel karakteristik özellikleri ve verimlilik durumu, Anadolu Tarım Bilim. Derg., 2013,28(1):24-32

Rize İl Tarım ve Orman Müdürlüğü, 2025. https://rize.tarimorman.gov.tr/Menu/12/Cografi-Yapi

https://www.trabzon.bel.tr/Web/Yaylalar

Rize Çevre Durum Raporu, 2023. https://webdosya.csb.gov.tr/db/rize/icerikler/2023-yili-r-ze-il--cevre-durum-raporu-20241008082009.pdf

Rize Valiliği, 2025. https://www.rize.gov.tr/sehrimiz

Rize Müzesi, 2025. https://muze.gov.tr/muze-detay?SectionId=RZM01&DistId=MRK

Rize İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2025. https://rize.ktb.gov.tr/TR

Soykan, F., 2003. Kırsal Turizm ve Türkiye Turizmi için Önemi. Ege Coğrafya Drg., 12:1-11.

Soykan, F., 1999. Doğal çevre ve kırsal kültürle bütünleşen bir turizm türü: kırsal turizm. Anatolia Turizm Araştırmaları Dergisi, Mart Haziran, Ankara.

Şerefoğlu, Ç., 2010. AB'nde kırsal turizm ve Türkiye'ye yönelik öneriler. Ekev Akademi Dergisi, 14 (45): 297-310.

Trabzon İl Tarım ve Orman Müdürlüğü, 2025. https://trabzon.tarimorman.gov.tr/Menu/53/Bitkisel-Uretim

Trabzon Çevre Durum Raporu, 2021. https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/trabzon-ilcdr-2021-20221229100316.pdf

Trabzon Büyükşehir Belediyesi, 2025. https://kurumsal.trabzon.bel.tr/Upload/WebAdmin/BasitBaglanti/20241001081412g6XpK.pdf)

Trabzon Valiliği, 2025. https://www.trabzon.gov.tr/

Trabzon İl Planı, 2024-2028. https://www.trabzon.gov.tr/2024-2028-trabzon-il-plani

Tüfek, Ö., 1978. Sumela-Meryemana, Trabzon.

Weaver, D. ve M. Opperman, 2000. Tourism management. John Wiley & Sons, Australia, 468 p.

URL-1: https://www.turkeyhomes.com/blog/post/trabzon-and-rize-touring-the-north-east-black-sea-of-turkey

URL-2: https://paintmaps.com/tr/harita

URL-3: https://tr.weatherspark.com/y/101287/Trabzon

Weaver, D.&M. Opperman, 2000. Tourism management. John Wiley & Sons, Australia, p.468.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Manisa Kenti Kentsel Açık ve Yeşil Alan Yeterliliğinin İncelenmesi

Şevval VARLIK[1]
Nurhan KOÇAN[2]

Özet

Kentsel açık ve yeşil alanlar, kent ekosisteminin temel bileşenlerinden biri olarak üstlendikleri ekolojik ve sosyo-kültürel işlevleriyle kentlerin yaşanabilirliğinin önemli göstergesidir. Bu çalışma, Manisa kentinde mevcut kentsel açık ve yeşil alanların miktar, dağılım ve yeterlilik durumunu değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, Dünya Sağlık Örgütü'nün kişi başına en az 9 m² yeşil alan önerisi ve Türkiye Mekansal Planlar Yapım Yönetmeliği'nde belirtilen 10 m²/kişi standardı esas alınmıştır. Veriler, Manisa Belediyesi ve TÜİK'in açık kaynaklarından, ayrıca Google Earth uydu görüntülerinden elde edilmiştir. Analiz sonucunda, Manisa kentinde kişi başına düşen açık ve yeşil alan miktarının bu standartların altında kaldığı, mevcut yeşil alanların ise kent merkezinde yoğunlaştığı belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, kentteki açık ve yeşil alanların niceliksel ve niteliksel olarak geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Çalışma sonuçları, kentsel yeşil alanların öneminin vurgulanması ve kentlerde yeşil alan miktarlarının yeterliliğine yönelik yapılacak araştırmalara veri oluşturması açısından önemli görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kentsel yeşil alan, açık alan yeterliliği, sürdürülebilir kent, Manisa.

[1]Bartın Üniversitesi Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü
sevvalvrlk6@gmail.com, ORCID: 0009-0003-8954-0432
[2]Prof. Dr. Bartın Üniversitesi Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü
nkocan@bartin.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9433-7007

MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma Alanı Doğal Peyzaj Analizi

Bu çalışma, Ege Bölgesi'nde yer alan Manisa ili kentsel yerleşimini kapsamaktadır.

Manisa ili, Ege Bölgesi'nde yer almakta olup yeryüzü şekilleri bakımından oldukça çeşitlidir (Şekil 1). İl, Batı Anadolu'nun karakteristik yapısı olan horst-graben sistemi içerisinde yer almakta ve topoğrafyası doğu-batı doğrultusunda uzanan çöküntü alanları ile bu alanları çevreleyen dağ sıralarından oluşmaktadır (Manisa İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2023). İl yüzölçümünün yaklaşık %54'ünü dağlık alanlar, %27,8'ini platolar ve %17,9'unu ovalar oluşturmaktadır (AFAD, 2021). Bu durum ilin genel olarak engebeli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

Şekil 1. Manisa ilinin Türkiye içindeki konumu

Manisa ili, genel olarak Akdeniz ikliminin etkisi altındadır. Ancak ilin iç kesimlerinde karasallığın etkisi de hissedilmekte, bu nedenle kıyıya göre daha sert iklim koşulları görülebilmektedir. Yazlar sıcak ve kurak, kışlar ise ılık ve yağışlı geçmektedir. Kış aylarında ise yağışlar genellikle yağmur şeklinde olup nadiren kar yağışı görülmektedir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024). İlde yıllık ortalama sıcaklık yaklaşık 16-17°C civarındadır. Yaz aylarında sıcaklık ortalamaları 30°C'nin üzerine çıkabilmekte, bazı günlerde aşırı sıcaklık değerleri görülmektedir. Kış aylarında ise sıcaklıklar genellikle 5-10°C arasında değişmektedir (AFAD, 2021).

Manisa'da yağışların büyük bir kısmının kış ve ilkbahar aylarında gerçekleşmektedir. Yaz aylarında uzun süreli kuraklık yaşanmaktadır. Yıllık ortalama yağış miktarı yaklaşık 600-700 mm civarındadır. İlin topoğrafik yapısı iklim üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle Gediz Ovası gibi çöküntü alanlarında yaz sıcaklıkları daha yüksek hissedilirken, dağlık alanlarda sıcaklıklar daha düşük ve yağış miktarı daha fazladır. Bu durum mikroklima farklılıklarının oluşmasına neden olmaktadır (Manisa Büyükşehir Belediyesi, 2025).

Manisa ili genelinde doğal bitki örtüsü olarak maki formasyonu görülmektedir. Maki bitki örtüsü, yaz kuraklığına dayanıklı, herdem yeşil çalı ve ağaççıklardan oluşmaktadır. Manisa'da yaygın olarak görülen maki türleri arasında zeytin, keçiboynuzu, defne ve kocayemiş gibi türler yer almaktadır. Bu bitki örtüsü özellikle alçak kesimlerde ve kıyıya yakın alanlarda yoğunlaşmaktadır (Orman Genel Müdürlüğü, 2023). Yükseltinin artmasıyla birlikte dağlık alanlarda kızılçam başta olmak üzere karaçam ve yer yer meşe türlerinden oluşan ormanlık alanlar yaygındır. Özellikle ilin kuzey ve doğusunda yüksek alanlarda orman formasyonları dikkat çekmektedir (AFAD, 2021).

Çalışma Alanı Kültürel Peyzaj Analizi

Tablo 1. Manisa ili nüfusunun yaş gruplarına göre dağılımı (TUİK, 2026)

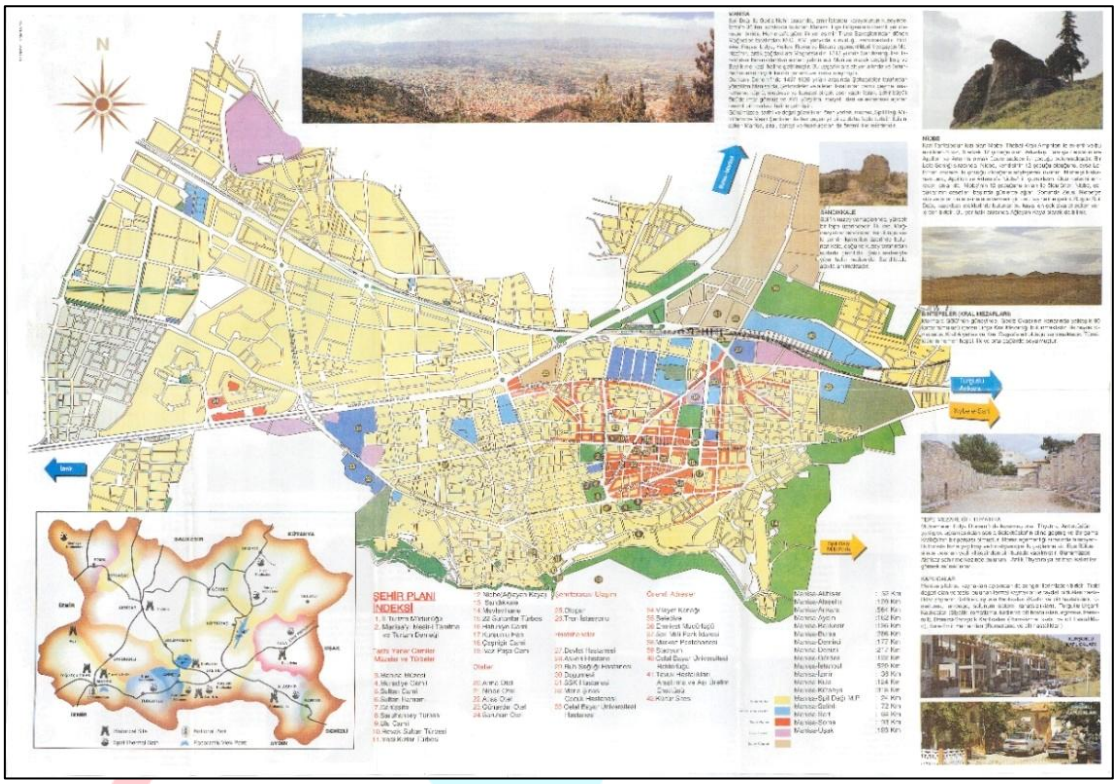
MANİSA NÜFUSUNUN YAŞ GRUPLARINA GÖRE DAĞILIMI			
Yıl	Yaş Grubu	Nüfus	Nüfus Yüzdesi %
2025	0 - 4 Yaş	80.004	5,42
2025	5 - 9 Yaş	98.537	6,68
2025	10 - 14 Yaş	101.950	6,91
2025	15 - 19 Yaş	98.147	6,65
2025	20 - 24 Yaş	93.842	6,36
2025	25 - 29 Yaş	103.242	7,00
2025	30 - 34 Yaş	101.374	6,87
2025	35 - 39 Yaş	107.143	7,26
2025	40 - 44 Yaş	115.182	7,81
2025	45 - 49 Yaş	105.254	7,13
2025	50 - 54 Yaş	98.665	6,69
2025	55 - 59 Yaş	90.495	6,13
2025	60 - 64 Yaş	87.496	5,93
2025	65 - 69 Yaş	71.577	4,85
2025	70 - 74 Yaş	52.772	3,58
2025	75+ Yaş	69.673	4,72

Manisa ili 2024 yılı itibarıyla yaklaşık 1,47 milyon nüfusa sahip olup (TÜİK, 2024), tarımsal üretim potansiyeli, tarihi dokusu ve son yıllarda artan sanayi faaliyetleriyle hızlı bir kentleşme süreci yaşamaktadır. Kentin merkez ilçesi Şehzadeler ve Yunus Emre, açık ve yeşil alan planlaması açısından değerlendirmenin odak noktasını oluşturmaktadır. Nüfusun büyük bir bölümü il ve ilçe merkezlerinde yaşamakta olup kırsal nüfus oranı giderek azalmaktadır. Bu durum, Türkiye genelinde görülen kentleşme eğilimi ile paralellik göstermektedir (Türkiye İstatistik Kurumu, 2023) (Tablo 1).

Yardımcı Materyaller

Araştırmada kullanılan başlıca veriler aşağıda sıralanmaktadır:

- Manisa Büyükşehir Belediyesi ile Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından sağlanan mevcut imar planı verileri (Şekil 2)
- CORINE arazi örtüsü (CLC 2018) ve Copernicus Sentinel uydu görüntüleri
- TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu) nüfus ve alan verileri
- Literatür taraması kapsamında ulusal ve uluslararası kaynaklar



Şekil 2. Manisa ili kent merkezi planı

Bu materyaller, Manisa kentinde kişi başına düşen yeşil alan miktarını belirlemek, mevcut dağılımı mekansal olarak analiz etmek ve plan kararlarının yeterliliğini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

Yöntem

Çalışma, nicel analiz ve mekansal değerlendirme yöntemleriyle yürütülmüştür. Araştırmanın yöntemi üç aşamadan oluşmaktadır:

1. **Literatür Taraması:** Kentsel açık ve yeşil alan kavramı, planlama standartları, sürdürülebilirlik kriterleri ve uluslararası karşılaştırmalar üzerine kapsamlı bir literatür incelemesi yapılmıştır. Bu inceleme, açık yeşil alanların planlama ilkelerini belirlemede referans oluşturmaktadır.

2. **Veri Toplama ve Mekansal Analiz:** Manisa kent bütününe ait sayısal harita ve uydu görüntüleri CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) ortamında analiz edilmiştir. ArcGIS 10.8 yazılımı kullanılarak yeşil alanların büyüklüğü ve dağılımı tespit edilmiş ve kişi başına düşen yeşil alan miktarı hesaplanmıştır. Elde edilen veriler, WHO (2016) tarafından önerilen kişi başına en az 9 m² aktif yeşil alan standardı ve UN-Habitat'ın (2020) kentsel erişilebilirlik kriterleriyle karşılaştırılmıştır.

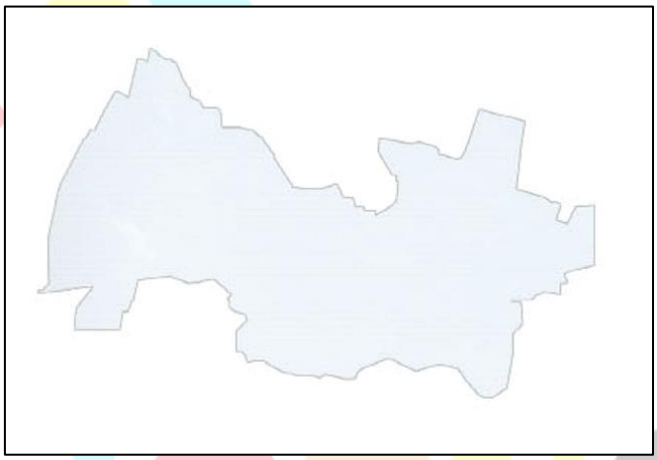
3. **Değerlendirme ve Karşılaştırma:** Analiz sonuçları, Manisa İmar Planı kararları ve mevcut uygulamalarla karşılaştırılarak kentteki açık ve yeşil alan yeterliliği irdelenmiştir. Bulgular, yeşil alan miktarı, dağılım dengesi ve erişilebilirlik düzeyi açısından yorumlanmıştır.

Araştırma, mevcut veri setleri ve uzaktan algılama temelli analizlerle sınırlandırılmıştır. Yerinde gözlem ve anket çalışması yapılmamış olup değerlendirme sayısal ve plan verileri

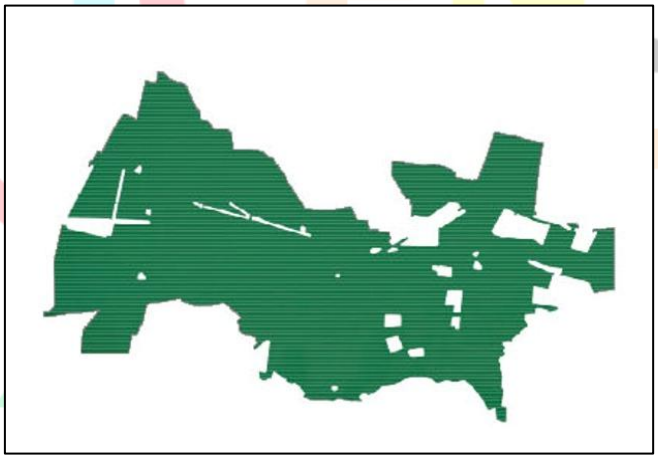
üzerinden yürütülmüştür. Bu nedenle sonuçlar, mekansal ölçekte genel eğilimleri yansıtmakta, mikro düzey kullanıcı davranışlarını kapsamamaktadır.

BULGULAR

Manisa'da özellikle sanayileşme ve hızlı kentleşme süreçleri, kentsel açık yeşil alanların dağılımı ve sürekliliği üzerinde önemli etkiler yaratmıştır. Yapılan akademik çalışmalar, 1990-2018 yılları arasında kentteki yeşil alanların mekansal yapısının değiştiğini ve bu alanlar arasındaki ekolojik bağlantılılığın zamanla azaldığını ortaya koymaktadır. Bu durum, yeşil alanların parçalanmasına ve sürekliliğinin zayıflamasına yol açmıştır (Gülçin, 2020). Manisa kentsel açık yeşil alanları, kentte yaşayan nüfusun rekreasyon, dinlenme, sosyal etkileşim ve ekolojik denge ihtiyaçlarını karşılayan önemli mekansal unsurlardır. Bu alanlar; parklar, çocuk oyun alanları, rekreasyon alanları, mesire yerleri, spor alanları ve refüjler gibi farklı kullanım türlerini kapsamaktadır.



Şekil 3. Çalışma alanı olarak belirlenen Manisa kenti toplam kentsel alanı (1.516.551 m²)



Şekil 4. Manisa kenti konut alanları (1.362.116 m²)

Şekil 5. Manisa kenti açık ve yeşil alanları (154.435 m^2)

Son yıllarda Manisa'da park ve bahçe projeleri ile kentsel açık yeşil alanların artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bu alanların kentlilerin sosyal yaşamına katkı sağladığı görülmektedir. Yeşil alanlar, hem rekreasyonel kullanım hem de doğayla temas açısından kent yaşam kalitesini olumlu yönde etkilemektedir.

Manisa'da kentsel açık yeşil alanlar; kentleşme baskısı altında değişim gösteren ancak sürdürülebilir kentsel gelişim için kritik öneme sahip alanlardır. Bu alanların artırılması, birbirleriyle bağlantılı hale getirilmesi ve erişilebilirliğinin iyileştirilmesi, sağlıklı ve yaşanabilir bir kent oluşturulması açısından gereklidir.

Çalışmada Manisa kentinde konut alanı 1362.116 m^2, yeşil alan ise 154.435 m^2 olarak belirlenmiştir. Bu değerlere göre yeşil alanların konut alanlarına oranı %8.81'tir. Bu, konut alanlarının yeşil alanlardan yaklaşık 9 kat fazla yer kapladığını göstermektedir. Bu durum yerleşim alanlarının baskın olduğunu ve yeşil alanların kent içinde daha sınırlı bir dağılıma sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 3, 4).

Manisa'da toplam kentsel alan 1.516.551 m^2 olarak belirlenirken, yeşil alan miktarı 154.435 m^2'dir. Bu veriler doğrultusunda yeşil alanlar toplam kentsel alanın yaklaşık %9.81'ini oluşturmaktadır. Böylece toplam kent alanı, yeşil alanın yaklaşık 10 katı büyüklüğündedir. Bu da kentte yeşil alan oranının oldukça sınırlı olduğunu göstermektedir.

Manisa'da kentsel yeşil alan miktarı 154.435 m^2 olarak belirlenmiş olup kent nüfusu 2024 yılı sayımlarına göre 1.471.041 kişidir. Mevcut durumda kişi başına düşen yeşil alan 1,049 m^2'dir. Önerilen yeşil alanlarla kişi başına eklenecek değer 2,583 m^2 olup toplamda kişi başına düşen yeşil alan miktarı 3,632 m^2'ye yükselecektir. Planlanan düzenlemelerle birlikte kentte yeşil alan erişiminin önemli ölçüde artırılmasının hedeflendiği görülmektedir. Ancak yine de ulaşılan değer standartlardan çok düşük kalmaktadır (Şekil 5).

Bu çalışmanın literatür tabanlı değerlendirmesi ve Manisa özelindeki mevcut çalışmaların analizi sonucunda elde edilen başlıca bulgular aşağıda özetlenmektedir.

1. **Kişi başına düşen yeşil alan hedefleri ile ulusal gerçeğin uyumsuzluğu:** Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2016) ve uluslararası çalışmalara göre erişilebilir, güvenli ve fonksiyonel kentsel yeşil alan için asgari öneri 9 m^2/kişi; ideal değer ise çalışmalarda ~50 m^2/kişi olarak ifade edilmektedir (Russo ve Cirella, 2018; WHO, 2016). Buna karşın Türkiye mevzuatında ve uygulamasında farklı asgari değerler benimsenmekte; Planlı Alanlar İmar

Yönetmeliği ve Mekansal Planlar Yapım Yönetmeliği çerçevesinde aktif yeşil alan için 10 m²/kişi gibi asgari nicel hedefler öngörülmektedir (MPYY, 2014; PAİY, 2017; Bostancı ve Keçecioğlu Dağlı, 2019; Gül vd., 2020). Mevcut ulusal uygulama ve ölçümler çoğu kentin bu standartları yakalayamadığını göstermektedir (Gül vd., 2020).

2. **Türkiye genelinde yeşil alan dağılımı ve miktarındaki heterojen yapı:** 2024 dönemi verilerine göre Türkiye genelinde kişi başına düşen ağaçlık/yeşil alan miktarlarının ölçümleri ve Bakanlık projeleri, ölçülen ortalama değerlerin bölgesel farklılık gösterdiğini; ülke geneli için ağaçlık yeşil alanın kişi başına ortalama 12,6 m² civarında raporlandığını göstermektedir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024). Ancak bu rakam aktif kamusal yeşil alan erişimi ile birebir örtüşmeyip; kent içi erişilebilirlik, nitelik ve eşit dağılım sorunlarını maskeleyebilmektedir (Gül vd., 2020).

3. **Manisa özelinde mekansal süreklilik ve erişilebilirlik sıkıntıları:** Manisa merkez ilçelerinin peyzajını inceleyen yerel çalışmalar, kent içinde önemli doğal ve kültürel yeşil kaynakların (Spil Dağı, Mesir Tabiat Parkı vb.) bulunmasına rağmen kent içinde yeşil sürekliliğin planlı ve eşit dağıtılmış bir yapıda olmadığı; ekolojik koridorların ve aktif kamusal yeşil altyapının yeterince bütüncül planlanmadığı yönünde bulgular raporlamıştır. Bu çalışmalarda özellikle mahalle ölçeğinde erişilebilir park/çocuk bahçesi gibi tipolojik dağılımın dengesiz olduğu vurgulanmaktadır (Yetisen et al., 2022).

4. **Yerel uygulama ve yönetim dinamikleri-süreklilik eksikliği ama bakım çalışmaları:** Manisa Büyükşehir Belediyesi ve yerel plan dokümanlarında yeşil alanların arttırılmasına yönelik planlama çabaları ve bakım uygulamaları bildirilse de (ör. kentin bakım-onarım faaliyetleri haberleri), bu uygulamaların mekansal yayılımı, niceliksel hedeflere ulaştırma potansiyeli ve ekolojik bağlantılılığı güçlendirme kapasitesi konusunda literatürde şüpheler bulunmaktadır (Gül et al., 2020; Manisa Büyükşehir Belediyesi, 2025).

5. **Ekolojik bağlantı ve ekosistem hizmetleri açısından riskler:** Manisa'daki kent formu ve artan yapılaşma baskısı; habitat parçalanması ve yeşil altyapı bağlantılarının bozulması riski taşımaktadır. Mevcut çalışmalarda ekolojik bağlantının güçlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Yetisen et al., 2022).

(Özet olarak: uluslararası önerilerle (WHO vb.) karşılaştırınca Türkiye için önerilen/mecburi asgari standartlar ile Manisa'daki mekansal dağılım, erişilebilirlik ve ekolojik süreklilik konusunda uyumsuzluk ve iyileştirme ihtiyacı saptanmıştır.)

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu bölüm, bulguların literatürle, standartlarla ve Manisa özelindeki planlama dinamikleriyle ilişkilendirilmesi; sonuçların yorumlanması ve önerilerin sunulması amacıyla yazılmıştır.

1. **Standartların yorumu ve yerel adaptasyon gereksinimi:** WHO'nun kişi başı en az 9 m² (ideal 50 m²'ye kadar) önerisi, küresel sağlık, erişilebilirlik ve ekosistem servisi perspektiflerinden türetilmiş bir referans noktası sağlar (Russo ve Cirella, 2018; WHO, 2016). Türkiye mevzuatında ise Mekansal Planlar Yapım Yönetmeliği ve Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği'nde aktif yeşil alan için 10 m²/kişi gibi bir asgari rakam bulunmakta; fakat uygulamada kentlerin büyük çoğunluğu bu hedefi düzenli ve eşit şekilde sağlayamamaktadır

(Gül et al., 2020). Manisa örneğinde de (Yetisen et al., 2022) yerel yeşil varlıkların niceliği ile erişilebilirlik ve tipolojik dağılım arasında farklar olduğu görülmüştür. Bu durum, ulusal asgari rakamların sadece niceliksel hedef olarak kalmasının ötesinde; erişilebilirlik (yürüme mesafesi), nitelik (çocuk oyun alanı, kent parkı vs.) ve ekolojik bağlantı gibi boyutların da planlama sürecine entegre edilmesi gerektiğini göstermektedir.

2. **Erişilebilirlik-mesafe ve eşit dağılımın önemi:** Literatürde sadece kişi başı metrekare hedeflerinin yeterli olmadığı, yeşil alana erişim mesafesi (ör. 300–500 m yürüme mesafesi) ve fonksiyonel çeşitliliğin de ölçülmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Russo ve Cirella, 2018; Gül et al., 2020). Manisa çalışmaları, kentin bazı bölgelerinde büyük doğal/şehir parklarının varlığına rağmen mahalle ölçeğinde küçük ölçekli kamusal alan eksikliği olduğunu göstermektedir. Bu da sosyal adalet ve günlük kullanım açısından sorun yaratır (Yetisen et al., 2022). Bu nedenle Manisa için öneri; büyük ölçekli rekreatif alanların korunmasıyla birlikte mahalle ölçeğinde dağıtık, erişilebilir ve çok işlevli mikro-yeşil alanların sistematik olarak planlanmasıdır.

3. **Ekolojik bağlantılılık ve yeşil altyapı yaklaşımı:** Manisa'daki doğal alanlar (Spil vb.) önemli ekolojik kaynaklar sağlarken, kent içi yeşil bantlar ve koridorlar vasıtasıyla kent peyzajının sürekliliği sağlanmalıdır. Aksi halde habitat parçalanması devam eder ve ekosistem hizmetleri azalır (Yetisen et al., 2022). Bu bağlamda Yeşil Altyapı (Green Infrastructure) yaklaşımı, kentin hem biyolojik çeşitliliğini hem de insan odaklı rekreatif ihtiyaçlarını bir arada çözebilecek bir çerçeve önerir (Gül et al., 2020).

4. **Yönetişim, bakım ve finansman boyutları:** Türkiye genelinde yapılan envanterler ve Bakanlık projeleri (ör. millet bahçeleri çalışmaları, 2023-2024 hedefleri) kişi başı yeşil alan rakamlarını iyileştirme niyetini göstermektedir. Fakat sürdürülebilir başarı için uzun vadeli bakım, katılımcı planlama, yerel yönetim kapasitelerinin güçlendirilmesi ve veri-temelli planlama gereklidir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024; Gül et al., 2020). Manisa için uygulama önerisi, proje/tasarımdan sonra eylem planı + yıllık bakım bütçesi + performans göstergeleri (erişilebilirlik oranı, kişi başı aktif yeşil alan, ekolojik bağlantı endeksi vb.) oluşturulmasıdır.

5. **Araştırmanın sınırlılıkları ve gelecek çalışmalar:** Bu çalışma literatür ve mevcut yerel çalışmaların sentezine dayanmaktadır. Manisa'ya özgü nicel analiz (ör. güncel kişi başı aktif yeşil alan metriği, nüfus-yeşil alan haritalaması, erişilebilirlik analizleri/GIS çıktıları) ile sonuçlar daha güçlü hale gelecektir. Önerilen ileri analizler:

(a) Manisa mahalle düzeyinde kişi başı aktif yeşil alan haritalaması,

(b) 300–500 m erişilebilirlik analizleri (yaya ağı üzerinden),

(c) Ekolojik bağlantılılık modellemesi (koridor/patch analizleri),

(d) Kullanıcı memnuniyeti/algı anketleri.

Mevcut literatür ve yerel çalışmalar, Manisa'da kentsel açık ve yeşil alanların niceliksel ve niteliksel olarak güçlendirilmesi gerektiğini, özellikle erişilebilirlik, tipolojik dağılım ve ekolojik bağlantılılık boyutlarında iyileştirmeler yapılmasının şehre yaşam kalitesi ve ekosistem hizmetleri açısından önemli katkı sağlayacağını göstermektedir. Politikaların sadece

“m²/kişi” hedefiyle sınırlı kalmayıp bütüncül yeşil altyapı planlamasını ve uzun dönemli bakım-yönetimi içermesi önerilir.

KAYNAKÇA

1. AFAD (2021). Manisa İl Afet Risk Azaltma Planı (İRAP).

2. Bostancı, G., Keçecioğlu Dağlı, P. (2024). Review of Personal Space and The Factors Affecting its Perception in Open Green Areas From The Perspective of Landscape Architecture. Journal of Infrastructure, Policy and Development, 8(9), 7678. https://doi.org/10.24294/jipd.v8i9.7678.

3. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2017). Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği. Resmî Gazete. https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/07/20170703-8.htm

4. Gül, A., Dinç, G., Akın, T., Koçak, A. İ. (2020). Kentsel Açık ve Yeşil Alanların Mevcut Yasal Durumu ve Uygulamadaki Sorunlar. İdealkent, 11, (Özel Sayı) 1281-1312. https://doi.org/10.31198/idealkent.650461 Dergipark+2Dergipark+2

https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/861201 Dergipark

5. Gülçin, D. (2020). Yeşil Alanların Ekolojik Bağlantılılığının Mekansal Zamansal Değerlendirilmesi: Manisa Örneği. Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences.

6. Manisa Büyükşehir Belediyesi. (2023). Manisa İl Çevre Durumu Raporu. https://www.manisa.bel.tr

7. Manisa Büyükşehir Belediyesi. (2025). Büyükşehir'den Yeşil Alanlar İçin Sonbahar Hazırlığı (Kamu Duyurusu/Haber).

https://www.manisa.bel.tr/Haberler/45294_buyuksehirden-yesil-alanlar-icin-sonbahar-hazirlig.aspx Dergipark+1

8. Manisa Büyükşehir Belediyesi (2025). Nazım İmar Planı Açıklama Raporu. Manisa Büyükşehir Belediyesi

9. Manisa İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü (2023). Manisa Coğrafyası. https://manisa.ktb.gov.tr/TR-72944/genel-bilgiler.html

10. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2024). İklim Verileri.

https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=F

11. Orman Genel Müdürlüğü (2023). Türkiye Orman Varlığı ve Bitki Örtüsü Raporları. Orman Genel Müdürlüğü

12. Russo, A., Cirella, G. T. (2018). Modern Compact Cities: How Much Greenery Do We Need? International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(10), 2180. https://doi.org/10.3390/ijerph15102180

13. T.C. Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi (2014). Mekansal Planlar Yapım Yönetmeliği, (MPYY), (Resmi Gazete 14 Haziran 2014 ve 29030 Sayılı Madde 5-(1).i). https://www.mevzuat.gov.tr/File/GeneratePdf?mevzuatNo=19788&mevzuatTur=KurumVeKurulusYonetmeligi&mevzuatTertip=5.

14. T.C. Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi (2017). Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği, (PAİY), (Resmi Gazete 3 Temmuz 2017 ve 30113 Sayılı Madde 4.vvvv).

https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=23722&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5.

15. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (12 Ocak 2024). Türkiye'de Kişi Başına Düşen Ağaçlık Yeşil Alan Miktarı… (Bakanlık duyurusu). https://csb.gov.tr/turkiyede-kisi-basina-dusen-agaclik-yesil-alan-miktari-12-63-metrekare-oldu-bakanlik-faaliyetleri-39952 Dergipark+2avesis.sdu.edu.tr+2

16. TÜİK. (2024). Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları. https://data.tuik.gov.tr

17. Türkiye İstatistik Kurumu (2023). Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi (ADNKS) Sonuçları.

18. UN-Habitat. (2020). World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization. https://unhabitat.org

19. WHO. (2016). Urban Green Spaces and Health. Regional Office for Europe https://iris.who.int/handle/10665/345751

20. World Health Organization (WHO). (2017). Urban Green Spaces: A Brief for Action. WHO Regional Office for Europe. https://www.who.int

https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-022-01523-z

21. Yetisen, A., Pirli, A., Gülgün, B. (2022). Manisa İli Merkez İlçeleri Kent Peyzajının Ekolojik Bağlantılılık Çerçevesinde Değerlendirilmesi. K. Yazıcı (Ed.), Güncel Gelişmeler Işığında Peyzaj Mimarlığı Çalışmaları-2022 (s. 3-28). İksad Publishing House.https://iksadyayinevi.com/wp-content/uploads/2022/07/GUNCEL-GELISMELER-ISIGINDA-PEYZAJ-MIMARLIĞI-CALISMALARI-2022-.pdf iksadyayinevi.com+1

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Silver-Boron Based İnorganic Pigments: Synthesis, Structural, Morphological and Optical Properties

Dilek ÇANAKÇI

Abstract

Three different inorganic pigments were synthesized by doping copper, cobalt, and nickel oxides into silver oxide and boron oxide phases. UV-vis, XRD, FTIR, SEM/EDX, and color measurements of the pigments were performed at room temperature. XRD data showed that the pigments consisted of different phases, while FTIR spectra indicated that they were composed of different metal oxide structural units. SEM images revealed that the morphology of the pigments varied depending on the type and amount of metal oxide they contained. The pigments have formed agglomerations and crystalline structures of varying sizes. EDX analysis was performed to determine the chemical composition and elemental content of all pigments at the microscopic level. It was observed that changes in the percentages of elements in the pigments directly affected their morphology. Adding three different metal oxides to the boron and silver oxide base structure caused changes in the micro/nano-level external structural properties and surface topography of the pigments. When the chromatic parameters of pigments are compared It is seen that the highest C* and b* parameters are in Pg/Co, and the L* and a* parameters are in Pg/Cu. When the h^{o} color parameter is examined, it is observed that Pg/Cu and Pg/Ni have a negative angle, while Pg-Cu has a positive angle

Keywords: Inorganic pigment; Sol-gel synthesis; XRD; Silver Acetate.

1. Introduction

Pigments are durable substances, usually carbon-free, derived from minerals or composed of metal oxides. Silver-containing inorganic pigments are functional materials containing silver ions or silver oxides, developed in modern materials science to impart antimicrobial properties or achieve special optical effects [1-3]. Silver-containing pigments are produced by encapsulating silver within an inorganic matrix [4, 5].

Silver ions halt DNA replication and disrupt cell structure by binding to bacterial cell membranes [6]. Silver nanoparticles, through a continuous free-release mechanism on the surface, kill microorganisms upon contact within the paint film, reducing the risk of infection, especially in environments where hygiene is crucial, such as hospitals and schools [7, 8]. Unlike organic antimicrobial agents, silver incorporated into an inorganic matrix (e.g., glass or ceramic) is highly resistant to high temperatures (plastic processing, ceramic firing) and chemical corrosion [9-10]. Furthermore, silver ions create a colorless or slightly whitening effect within the matrix, allowing for the creation of transparent antimicrobial coatings without altering the material's color [11].

Boron oxide can exist in two different crystalline forms: amorphous and glassy. The amorphous form is a colorless, odorless, hard, glassy solid and is usually produced by the dehydration of boric acid. It is generally used as a structuring agent or additive in glass, ceramics, and borate-based products, rather than directly as a coloring pigment [12]. It is used in boron-modified paints and plastics to provide flame-retardant and smoke-reducing properties.

Copper(II) oxide (CuO) is one of the two stable oxides of copper (the other being Cu_2O – red copper oxide). It is an inorganic compound in the form of a black crystalline powder, widely used in chemistry and materials science. Commonly known as black copper oxide, it is a strong oxidizing agent with high thermal stability. It is used as an inorganic pigment, particularly in the ceramics, glass, and enamel industries: depending on the application rate and kiln atmosphere in ceramics and glazes, it can produce blue, green, black, or reddish tones. It provides a lasting antimicrobial effect in textile, leather, and paint formulations [13-14].

CoO (Cobalt(II) oxide) is an important inorganic pigment component widely used in pigment technology. This compound can be used alone or combined with other compounds to form the basis for obtaining specific shades of blue. It is particularly used in the ceramics and glass industries as a blue coloring agent in the production of various compounds (e.g., cobalt aluminate - cobalt blue). NiO (Nickel Oxide) is generally used not as a pigment on its own, but as a stabilizing or coloring component in the structure of complex inorganic pigments. NiO is particularly used in the formulation of high-performance pigments such as Titanium Yellow. In these pigments, nickel oxide combines with antimony oxide and titanium dioxide to form a stable structure. Pigments containing NiO are preferred for providing long-lasting and fade-resistant colors in demanding conditions such as exteriors, building materials, and plastics. Inorganic pigments containing NiO tend to have higher opacity and better chemical resistance compared to their organic alternatives.

2. Experimental details

2.1. Materials and method

Reagents used in the synthesis of pigments: Silver Acetate ($AgC_2H_3O_2$, Merck)), boric acid (H_3BO_3, Merck), copper(II) acetate monohydrate ($Cu(CH_3COO)_2.H2O$, Merck), nickel(II) chloride ($NiCl_2$, Merck), cobalt(II) chloride ($CoCl_2$, Merck), glycerol ($C_3H_8O_3$, Sigma-Aldrich), citric acid ($C_6H_8O_7$, Sigma-Aldrich), ethyl alcohol (C_2H_5OH, Sigma-Aldrich). Dimethyl sulfoxide (DMSO, Merck) was used as a solvent in UV-Vis spectroscopy.

2.2. Characterization details

Different analytical methods were used in the characterization of the pigments. The phase purity and structural crystallization of the synthesized pigments were investigated using powder X-ray diffraction (XRD) data. XRD data were collected with a Rigaku SmartLab X-ray diffractometer equipped with CuKα radiation (λ = 1.5405 Å) at room temperature. Scanning electron microscopy was used to obtain high-resolution, three-dimensional morphological images of the pigments at the nanometer scale and to determine their atomic/weight percentage (SEM/EDX-ZEISS & EVO LS 10). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy was performed using an Perkin Elmer-Spectrum 100 instrument in the wavelength range of 300-4500 cm^{-1} to provide information about phaseand identification of functional groups, and various bond formations. The UV-vis absorption spectra of the pigments were recorded in three solvents with different polarities at room temperature in an acidic environment (JASCO V-670). The colour of the synthesized pigments was measured using the CIE Lab* system (NR145 Colorimeter).

2.3. Method of pigment synthesis

Silver acetate (0.5 g) was placed in a beaker, and HNO_3 (2 mL) and ethyl alcohol (40 mL) were added to obtain a silver acetate solution. A solution of boric acid (6.2 g) dissolved in ethyl alcohol (20 mL) was added to this solution. Copper(II) acetate monohydrate (2.2 g), nickel(II) chloride (2.8 g) and cobalt(II) chloride (1.5 g) were prepared in separate beakers and the silver acetate/boric acid solution was added to them. The solutions were stirred at room temperature for 30 minutes. A gelling solution was prepared in another beaker (glycol (30 mL) and citric acid (4.5 g)). Both solutions were combined and stirred at 80 °C for 3 hours. To remove excess water, the solutions were left in the oven at 105 °C for 12 hours. After this time, the resulting gels were transferred to a crucible and calcined in a ash oven at 800°C for 3 hours. The resulting pigments were ground and sieved to obtain homogeneous powders (Figure 1).

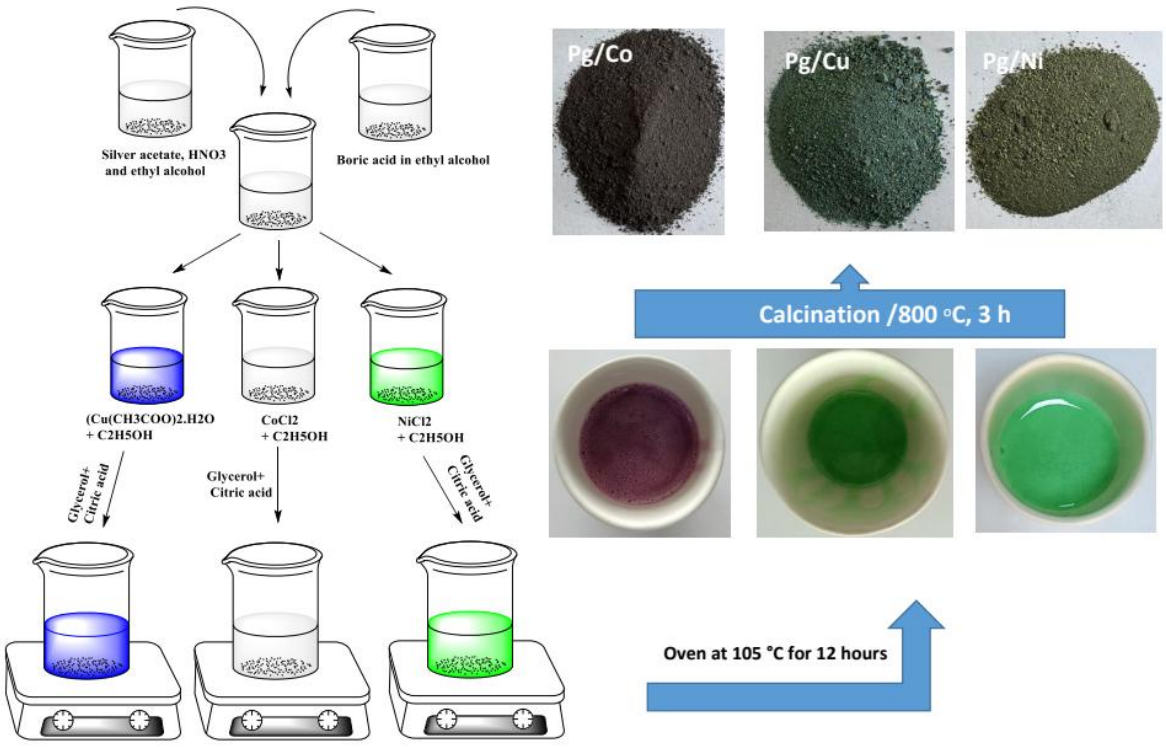


Figure 1. Synthesis of pigments

3. Results and discussion

3.1. Powder X-ray diffraction analysis

One of the best ways to understand the character of synthesized pigments is by examining their X-ray diffraction patterns. Using these patterns, information about the material's crystal structure, lattice parameters, and phases can be obtained. XRD analysis patterns performed in the range of $0° \leq 2\theta \leq 80°$ are given in Figure 2. Each pigment formed its own unique XRD pattern. The XRD pattern of Pg/Cu showed more peaks than other pigments. The pattern contains 19 peaks with varying intensities. The XRD spectrum of the Pg/Cu pigment shows numerous diffraction peaks of varying intensities indicating the presence of CuO. The positions of these peaks are: $2\theta = 33.3°$, 42.3°, 48.0°, 57.2° and 76.4° (JCPDS No.01-074-1021). Furthermore, characteristic difraction peaks of AgO are evident at 2θ values of 22°, 31.9°, 37.4°, 54.0° and 67.2°, corresponding to (110), (111), (200), (020) and (311) (JCPDS No: 75–0969). The diffraction peaks observed at 19.3°, 27.5°, 41.2°, and 54.0° confirm the presence of B_6O, B_2O_3, and B_4C (JCPDS No:01–080–2254, 01–079–1550, 00–035–0798). The diffraction peaks confirming the presence of Co_3O_4 occurred at 32.1°, 38° and 44.2° (JCPDS No: 42–1467). In the Pg/Co spectrum, Ag_2O diffraction peaks appeared instead of AgO. Diffraction peaks were observed at 25.4°, 33.0°, 46.1°, and 54.6° (JCPDS No:76–1393). In contrast to the Pg/Cu spectrum, only peaks belonging to B_6O are seen in the Pg/Co spectrum. The positions of the B_6O peaks are: 2θ = 29.7°, 42.1°, 49.9° and 52.9° (JCPDS No.01-080-2254).

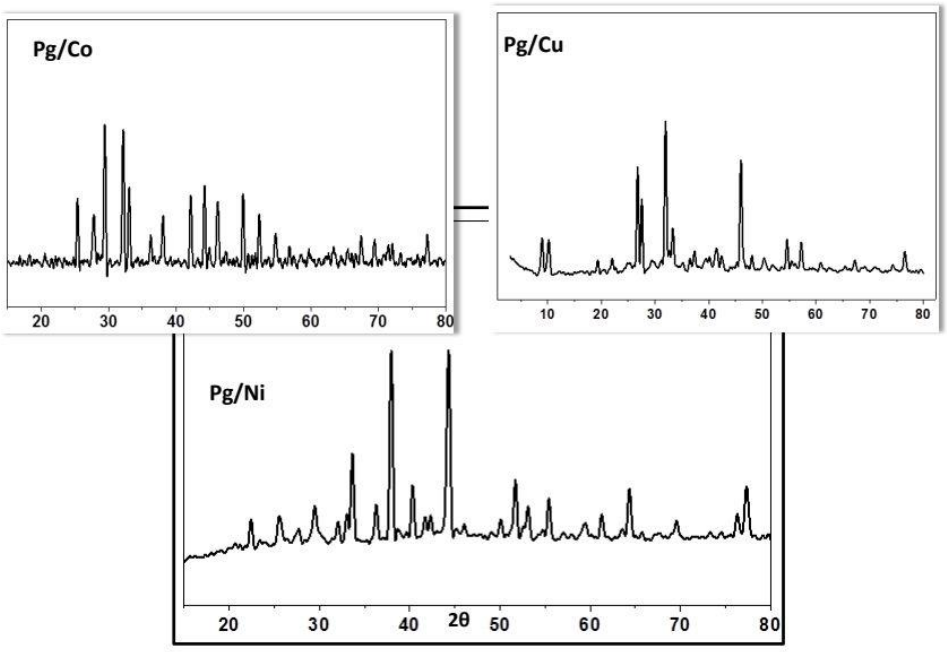


Figure 2. X-ray diffraction patterns of pigments

The diffraction peaks of Pg/Ni pigment are of medium intensity. The diffraction peaks at 22.4°, 33.6°, 36.2°, 37.9°, 42.3°, 51.7°, 61.2° and 76.2° were indexed to the phase of NiO (JCPDS No. 73–1523). In the Pg/Ni structure, silver formed two different oxide compounds. Diffraction peaks corresponding to AgO and Ag_2O were observed at 25.4°, 27.6°, 32.0°, 33.0°, 44.3°, 55.3°, 64.2° and 77.2° in the spectrum (JCPDS No. 75–0969 and 00–041–1104). Furthermore, diffraction peaks at 40.3°, 50.1°, 53.0° and 69.6° indicate the presence of B_6O and B_2O_3 phases in the pigment.

3.2. Fourier transform infrared analysis

FTIR (Fourier Transform Infrared) spectroscopy was used in the structural investigation of the pigments. The analysis results show that the spectrum of Pg/Co is quite different from the spectra of Pg/Cu and Pg/Ni. The peaks in the Pg/Co spectrum are wider (Fig. 3). Also, the peak at 3198 cm^{-1} is not present in the other pigments. This peak belongs to the OH group. The presence of absorption of OH group may be due to the presence of water absorbed into the Pg/Co structure. The FTIR result shows that a strong peak is formed at wave numbers of 653 cm^{-1}, which is the vibration for the Co-O bond [15].

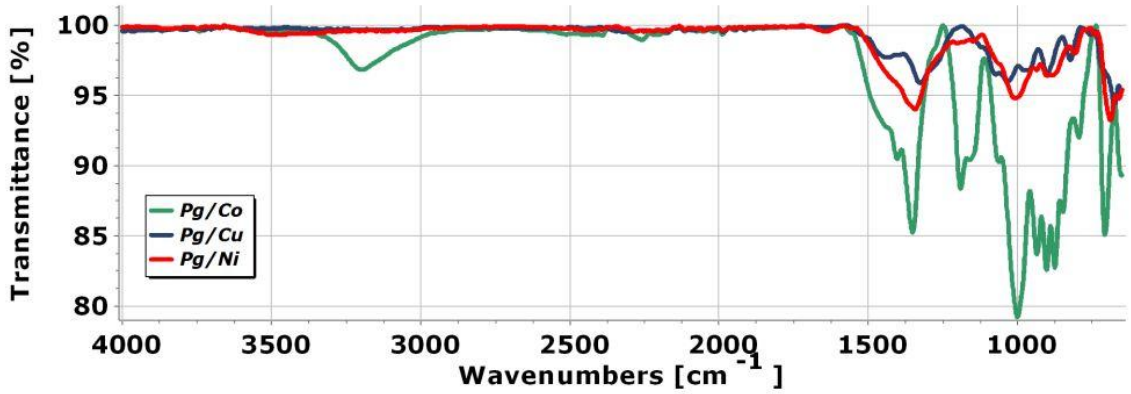


Figure 3. FTIR spectrum of pigments.

The distinctive peaks of silver oxide are observed in the range of 400–1100 cm^{-1}. In Pg/Co, characteristic strain vibration peaks corresponding to Ag-O bond vibrations are observed at 1001 cm^{-1} and 704 cm^{-1}. The peak at 1191 cm^{-1} is formed as a result of B–O strain vibration. In the spectrum of Pg/Cu, the characteristic peaks observed between 600 and 1100 cm^{-1}, corresponding to 677 cm^{-1}, 829 cm^{-1}, and 900 cm^{-1}, belong to Cu-O stretching vibrations. The stress vibration peaks of Ag-O and B-O occurred at 1438, 1327, and 1033 cm^{-1}, respectively. Two strong peaks at 1642 cm^{-1} and 689 cm^{-1} in the Pg/Ni spectrum are assigned to the Ni–O stretching band, confirming the presence of NiO nanoparticles. The peaks at 1005 cm^{-1} and 888 cm^{-1} resulted from the stretching of B-O, while the peak at 1348 cm^{-1} resulted from the stretching of Ag-O.

3.3. Morphological analysis

SEM analysis was performed to examine the external structural properties (morphology) and surface topography of the pigments at the micro and nano levels. The pigments formed different morphologies due to differences in the types and ratios of metals they contained Figure 4. Inorganic pigments can exist in cubic, acicular, spherical, or lamellar forms, depending on their crystal structure. SEM images clearly show that all pigments have their own unique morphologies. The pigments formed laminar structures in varying proportions. Although the most laminar structure is seen in the Pg/Ni pigment, the amount of granules in its laminar layers is low. Among pigments Pg/Co has the most granular structure. These granules are of different sizes and are found in clusters. SEM images of Pg/Cu show numerous holes within the laminar structures. Granular structure is quite low and is distributed throughout the structure.

EDX analysis was performed to determine the types and proportions of elements in the pigments. The data obtained show that all the metal ions expected to be present in the pigments' structure are available. In EDX spectra, in addition to Ag and B, Cu peaks are observed in Pg/Cu, Co peaks in Pg/Co, and Ni peaks in Pg/Ni (Fig. 5). The metal ratios in the pigments are as follows: Ag: 6.07, B: 19.3, Cu: 41.6 for Pg/Cu; Ag: 23.8, B: 19.3, Co: 14.8 for Pg/Co; and Ag: 4.02, B: 42.5, Ni: 20.2 for Pg/Ni.

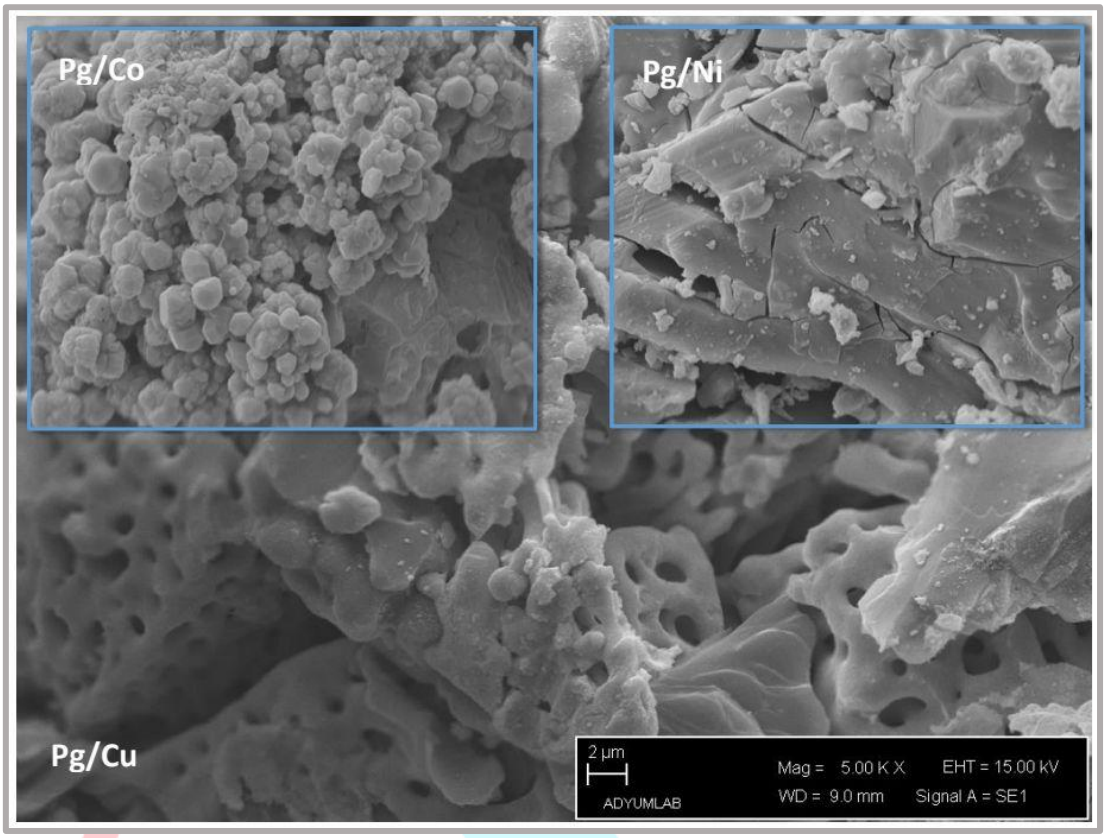


Figure 4. SEM image of pigments

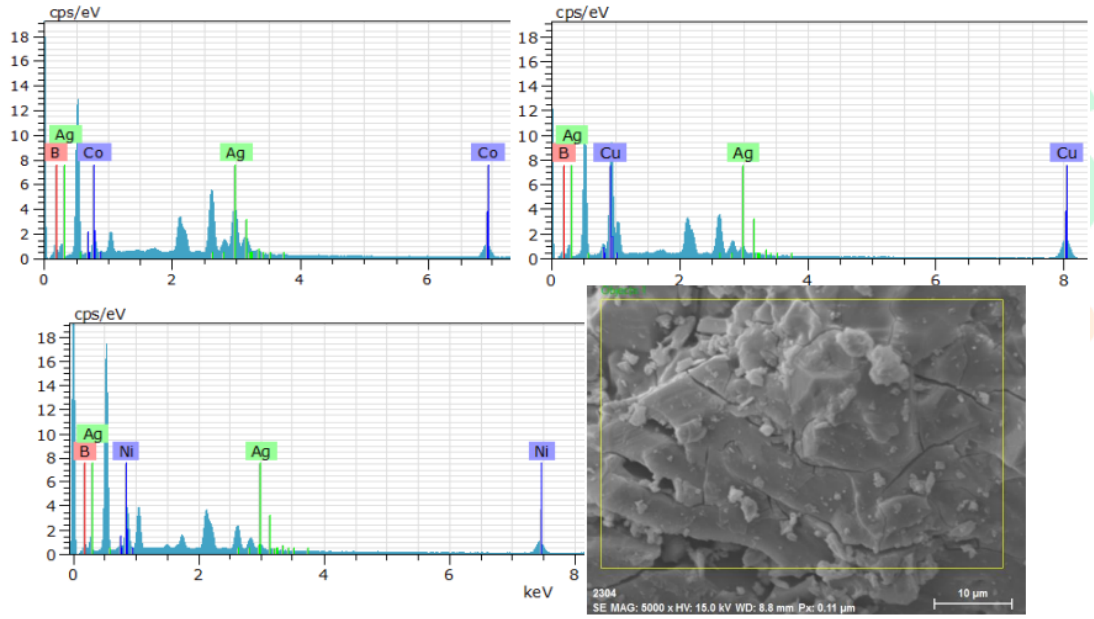


Figure 5. EDX spectra of pigments

3.4. UV–vis spectroscopy

UV-vis absorption spectroscopy is an analytical method that helps in chemical analysis by measuring the light absorption or scattering properties of substances. In this study, the absorption properties of metal oxides in pigments in solvents of different polarities were investigated (Water, ethyl alcohol, dmso). They produced different spectra depending on the

solvent used. After dissolving the pigments in nitric acid, new solutions were prepared for UV-vis analysis by mixing them separately with water, ethyl alcohol, and dmso.

All three pigments formed bands around 300 nm in aqueous solution. This result indicates that the absorption properties of the pigments in aqueous solution are similar. The absorption bands formed at 306 nm, 307 nm and 308 nm for Pg/Co, Pg/Cu and Pg/Ni, respectively, resulted from charge transfer transitions (LMCT or MLCT) between metal oxides. In these transitions, electrons moved from ligand-like molecular orbitals (MO) to metal-like empty orbitals.

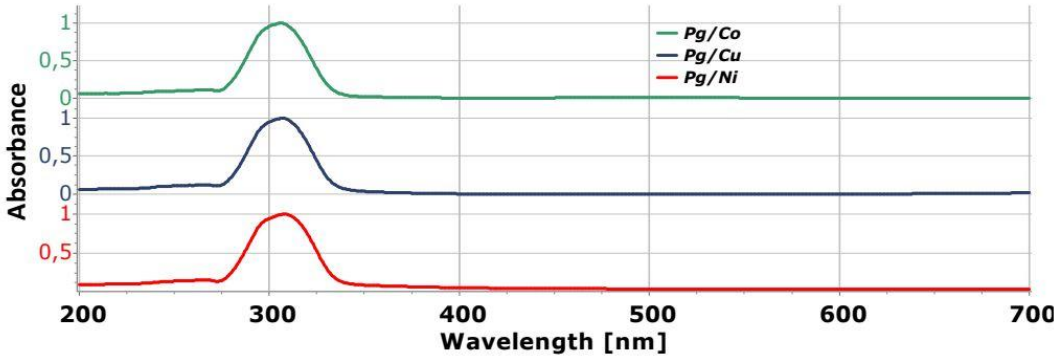


Figure 6. UV-vis absorption spectra of pigments in water

However, in ethyl alcohol solution, Pg/Cu, unlike the other pigments, exhibited a band at 415 nm resulting from d–d ($t_2g \rightarrow eg$) transitions. This is because Pg/Cu interacts differently with ethyl alcohol. The biggest difference is the presence of CuO in the pigment and the fact that its Ag/B oxide content differs from other pigments. The bands formed as a result of charge transfer transitions were formed at 306, 297 and 305 nm for Pg/Co, Pg/Cu and Pg/Ni, respectively.

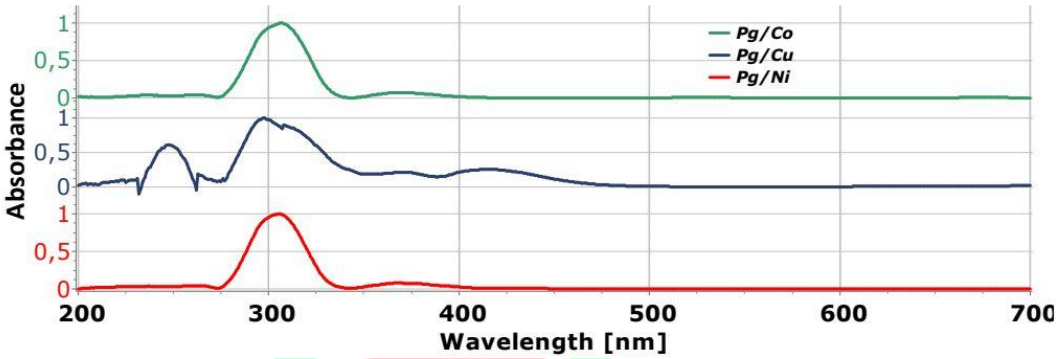


Figure 7. UV-vis absorption spectra of pigments in ethyl alcohol

The results show that a band shift occurred, especially in Pg/Cu, except for Pg/Co. The spectra of pigments in dmso are quite different from those in other solvents. The lower polarity of dmso compared to water and ethyl alcohol has differentiated its interaction with the pigments. The spectra of the pigments in dmso showed bands corresponding to both charge transfer transition and d-d transition. Pg/Co formed one band (307 nm) representing the charge transfer transition and two bands (607 nm, 675 nm) representing the d–d transition. Pg/Cu, on the other hand, formed one band at 297 nm and three bands at 371 nm, 440 nm and 682 nm. In the Pg/Ni spectrum, charge transfer and d–d transition bands were formed at 313 nm and 682 nm.

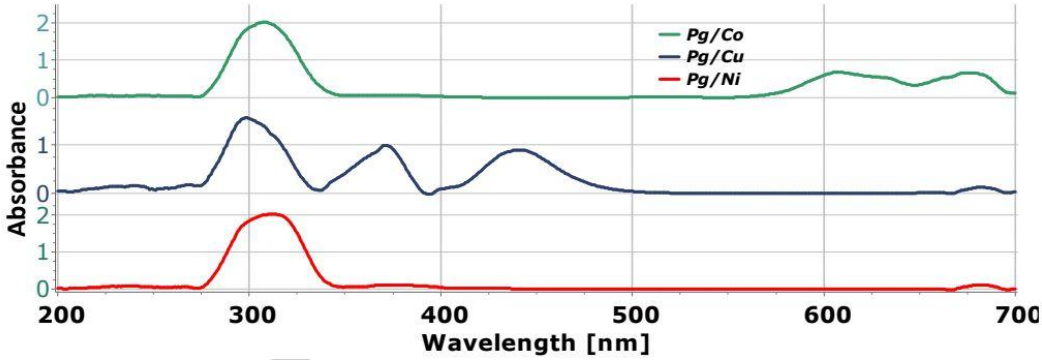


Figure 8. UV-vis absorption spectra of pigments in dmso

3.5. Colour parameters of pigments

Three different inorganic pigments were synthesized by keeping the amounts of silver and boron metal ions constant, and by doping them with cobalt, copper, and nickel. The colors of the resulting pigments are close to cedar brown for cobalt, seaweed green for copper, and hunter green for nickel. Chromatic parameters are presented in the table. The color of the synthesized pigments was measured using the CIE Lab* system.

Table 1. The color parameters of pigments.

Pigments	L*	a*	b*	C*	h°
Pg/Co	47.82	-4.53	15.63	16.27	- 74
Pg/Cu	93.63	0.13	3.98	3.98	88
Pg/Ni	46.81	-4.15	15.61	16.15	-75

The C* (chromaticity) parameter represents color saturation. When comparing the C* values of the pigments, it is seen that Pg/Cu has the smallest value (3.98) and Pg/Co has the largest value (16.27). The C* value of Pg/Ni is quite close to that of Pg/Co. This result shows that Pg/Co and Pg/Ni have brighter and more vibrant colors than Pg/Cu. The L* parameter indicates the lightness (+ L*) or darkness (− L*) of the color. In all three pigments, the L* parameter is positive, indicating that the pigments have a light color. The L* values, ordered from smallest to largest, are Pg/Cu› Pg/Co› Pg/Ni. In the parameter a* (green-red axis), Pg/Co and Pg/Ni have negative values while Pg/Cu has a positive value. A positive value indicates red tones; as the value increases, the redness intensifies, while a negative value intensifies the greenness. The results show that Pg/Co and Pg/Ni have a green intensity, while Pg/Cu has a red intensity. The b* parameter represents the color's value on the yellow-blue axis. Values can be positive or negative. Positive values represent yellow tones, and negative values represent blue tones. A positive b* parameter for pigments indicates that the colors are close to yellow tones. In color parameters, the h° (Hue) angle is an angular measurement that indicates which pure color, such as red, yellow, green, or blue, a color is closest to. Pg/Cu and Pg/Ni have a negative angle, while Pg/Cu has a positive angle.

Conclusion

To develop new inorganic pigments in different colors, three pigments with base structures of Ag and B, doped with Cu, Co and Ni, were synthesized using the sol-gel method. In the FTIR spectrum, peaks corresponding to the tensile and bending vibrations of metals are

formed in the expected regions. XRD patterns clearly show us that the pigments consist of different phases. SEM images demonstrate that pigments form different morphologies under the influence of metal oxide types. While Pg/Co contains more granular particles than other pigments, Pg/Cu forms a more layered structure. The different distribution of metal oxides within the lattice structure also caused variations in their absorption properties in solvents of different polarities. When comparing the color parameters L*a*b*C* and h^o, the highest values belong to Pg/Cu for L*, a* and h^o, and to Pg/Co for b* and C*.

References

Sati, A., Ranade, T.N., Mali, S.N., Yasin H.K.A., Pratap, A. Silver nanoparticles (AgNPs): comprehensive ınsights into bio/synthesis, key ınfluencing factors, Multifaceted Applications, and Toxicity. ACS Omega 2025 (10) 7549−7582.

Singh, K.R.B., Natarajan, A., Pandey, S.S. Bioinspired multifunctional silver nanoparticles for optical sensing applications: A sustainable approach. ACS Appl. Bio Mater. 2023 (6) 4549–4571.

Zhang, H., Jixing Cui, J., Yang, J., Yan H., Zhu X., Shao Y., Effect of carrier materials for active silver in antibacterial powder coatings. Coatings 2024 (14) 297.

Das, D., Paul, P. Environmental impact of silver nanoparticles and its sustainable mitigation by novel approach of green chemistry. Plant Nano Biology 2025, (14) 100210.

Tawiah, B., Asinyo, B.K., Frimpong, C., Howard, E.K., Seid, R.K. An overview of the science and art of encapsulatedpigments: Preparation, performance and application, Coloration Technology 2022 (138) 224–247.

Mohamed, D.S., Abd El-Baky, R.M., Sandle, T. Antimicrobial activity of silver-treated bacteria against other multi-drug resistant pathogens in their environment. Antibiotics 2020 (9) 181.

Vanlalveni, C., Ralte, V., Zohmingliana, H., Das, S., Lallianrawna, S., Rokhum, S.L. A review of microbes mediated biosynthesis of silver nanoparticles and their enhanced antimicrobial activities. Heliyon 2024 (10) e32333.

Dube E., Okuthe, G.E. Silver nanoparticle-based antimicrobial coatings: sustainable strategies for microbial contamination control, Microbiol. Res. 2025 (16) 110.

Mohamed, D.S., Abd El-Baky, R.M., Sandle, T., Mandour, S.A. Ahmed, E.F. Antimicrobial activity of silver-treated bacteria against other multi-drug resistant pathogens in their environment. Antibiotics 2020 (9) 181.

Cui, J., Shao, Y., Zhang, H., Zhang, H., Zhu, J. Development of a novel silver ions-nanosilver complementary composite as antimicrobial additive for powder coating. Chemical Engineering Journal 2021 (420) 127633.

Hosseini, M., Chin, A.W.H., Williams, M.D., Behzadinasab, S., Falkinham, J.O. Transparent Anti-SARS-CoV-2 and antibacterial silver oxide coatings. ACS Appl Mater Interfaces 2023 (7) 8718–8727.

Zhang, X., Li, L., Hassan, Q., Pan, D., Zhu, G. Preparation and characterization of glass ceramics synthesized from lead slag and lead-zinc tailings. Ceramics International, 2023 (49) 16164–16173.

Peng, I., Kimball, K.H., Lovelace, I.M., Wang, J., Rios, M., Chen, O., Wang, L. Exploring the colors of copper-containing pigments, copper (II) oxide and malachite, and their origins in ceramic glazes. Colorants 2022 (1) 376–387.

Akter, T., Sarker, S.S., Sujan, S., Parveen, S. Antimicrobial activity of natural and synthetic dyes used in leather dyeing: A comparative study. Textıle & Leather Revıew 2023 (6) 387–400.

Manteghi, F., Kazemi, S.H., Peyvandipour, M., Asghari, A. Preparation and application of cobalt oxide nanostructures as electrode materials for electrochemical supercapacitors. RSC Adv 2015 (5) 76458–76463.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Akdamar Kilisesi Çevresi İçin Peyzaj Tasarım Önerisi

Safiye Münevver SİVRİTEPE[1]
Nurhan KOÇAN[2]

Özet

Kutsal Haç adına Vaspurakan Kralı I. Gagik tarafından Keşiş Manuel'e yaptırılan Akdamar Anıt Müzesi (Kilisesi), Abbasilere bağlı olarak 908–1021 yılları arasında Van ve çevresinde hüküm süren Vaspurakan Krallığının kültürel çeşitliliği ve etkileşimini bütünüyle yansıtan, hem mimarisi hem de süslemeleri ile Dünya mimarlık tarihi içinde önemli bir yere sahip olan bir yapıdır. Akdamar Kilisesi varoluşundan bugüne kadar çeşitli toplumların ilgisini çekmiş ve Türkiye'de turizm kapsamında da önemli bir çekim merkezi olmuştur. Akdamar Kilisesi hem kültürel miras turizmi hem kültür turizmi hem de inanç turizmi açısından Türkiye için önem arz etmektedir. Bu çalışmada, önemli kültürel değerlerimizden biri olan Akdamar Kilisesi geçmişten bugüne tarihsel gelişimi ve kültürel miras turizmi açısından önemi bağlamında incelenmiştir. Çalışmada anıt müze etrafındaki açık alan kısmı için kullanım önerileri ve bitkisel tasarım önerileri sunulmuştur. Çalışma sonucunda oluşturulan öneri projeler ile alanın ziyaretçiler için daha etkin kullanılabileceği, çevresiyle görsel zenginliği kurulmuş bu alanda alanın korunması ve turizm gelişiminin olumlu yönde artacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Somut kültürel miras, peyzaj tasarımı, Akdamar Kilisesi, Van.

[1]Bartın Üniversitesi Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Bartın. Orcıd: 0009-0008-2512-2940
[2]Bartın Üniversitesi Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Bartın. Orcıd: 0000-0001-9433-7007

GİRİŞ

Günümüzde toplumların öz benliği ile bütünleşmelerinde tarih şuurunu kazanmaları büyük önem taşımaktadır. Köklerinden, kendi özünden uzaklaşan toplumlar, zaman içerisinde kendi kimliklerine de uzaklaşacaklardır. Tarihi çevreler bireylere kendi geçmişlerini daha iyi görebilme, onunla bütünleşebilme imkanı tanımakla birlikte, bireylerin özüne dönmeleri konusunda onlara yardımcı olabilecek ipuçları ve çeşitli yaşanmışlıklar sunmaktadır. Özellikle tarihi çevrenin korunarak gelecek kuşaklara güven içinde ulaştırılmasını hedefleyen koruma ve geliştirme çalışmaları bu bağlamda çok önemli bir araç olmaktadır.

Turizm, kültürel miras varlıklarını turizm ürünü olarak kullanarak ziyaretçilerin ilgisini çekmektedir. Turizm sayesinde kültürel miras varlıklarının korunması ve gelecek nesillere aktarılması sağlanmaktadır. Kültürel miras varlıklarının turizm amacıyla kullanılması turizm çeşitliliği yaratarak faaliyetlerin tüm yıl gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır.

Kültürel miras varlıklarının turizm amaçlı kullanımı sonucu elde edilen gelirler ile ülke ekonomisine olumlu katkılar sağlanır. Turizmden elde edilen gelir ile kültürel miras varlıklarının belgelenmesi, planlanması ve yönetimine yeniden yatırım yapılabilir. Bu yatırımlar kültürel varlıkların sürdürülebilirliği için önemlidir (McKercher, 2002). Kültürel miras varlıklarının öğrenilmesi ve ziyaret edilmesi sonucunda toplumdaki bireylerin eğitim ve bilgi düzeylerinin artmasıyla sosyo-kültürel gelişme de sağlanmış olur (Süer, 2021).

Bu çalışmanın amacı, tarihi çevrenin ve kültürel mirasın korunmasının önemini Akdamar Kilisesi örneğinde vurgulamaktır.

MATERYAL-YÖNTEM

Van Gölü'ndeki Akdamar Adası, Van ilinin Gevaş ilçesi sınırlarında kıyıdan yaklaşık 4 km uzaklıkta konumludur (Güney, 2000). Akdamar Adası, Van merkezine 52 km uzaklıktadır. Gevaş'tan deniz yoluyla yaklaşık 25 dakika mesafededir ancak Ekim-Mart ayları arasında hava şartlarından dolayı rutin seferler aksayabilmektedir (Aslan ve Kıykaç, 2025).

Adanın yüzölçümü yaklaşık 163.753 m^2'dir. Adanın toplam kıyı uzunluğu 3 kilometreyi bulmaktadır. En yüksek noktası deniz seviyesinden 1912 metre yüksekte bulunan adanın batı uçlarında yüksekliği 80 metreye ulaşan dik kayalıklar vardır (Wikipedia, 2026) (Şekil 1, 2).

Şekil 1, 2. Çalışma Alanının Konumu

Adanın yer şekilleri oldukça karstiktir. Yer yer küçük tepelere ev sahipliği yapmaktadır. Yer şekilleri zaman zaman meydana gelen yoğun yağışa bağlı olarak çatlayabilmektedir. Ada göl seviyesine oldukça yüksekte yer almaktadır (Yılmaz, 2014).

Van ve Akdamar Adası'nda kara iklimi hakimdir. Yazlar sıcak ve kurak, kışlar soğuk ve kar yağışlıdır. Ancak Van gölü buradaki yerleşim merkezlerinin havasına etki ederek kışların yumuşak geçmesine sebep olur. Yılın 80 günü, toprak yüzeyi karla kaplıdır. Don ile geçen günlerin sayısı 133 dür. Van'ın yıllık sıcaklık ortalaması, 8,8°C'dir. Merkezde en soğuk geçen ay Ocak, en Sıcak geçen aylar Temmuz ve Ağustos'tur. Van gölünün etkisiyle Doğu Anadolu bölgesinin birçok bölgesi kadar sıcak değildir (Kalelioğlu, 1991).

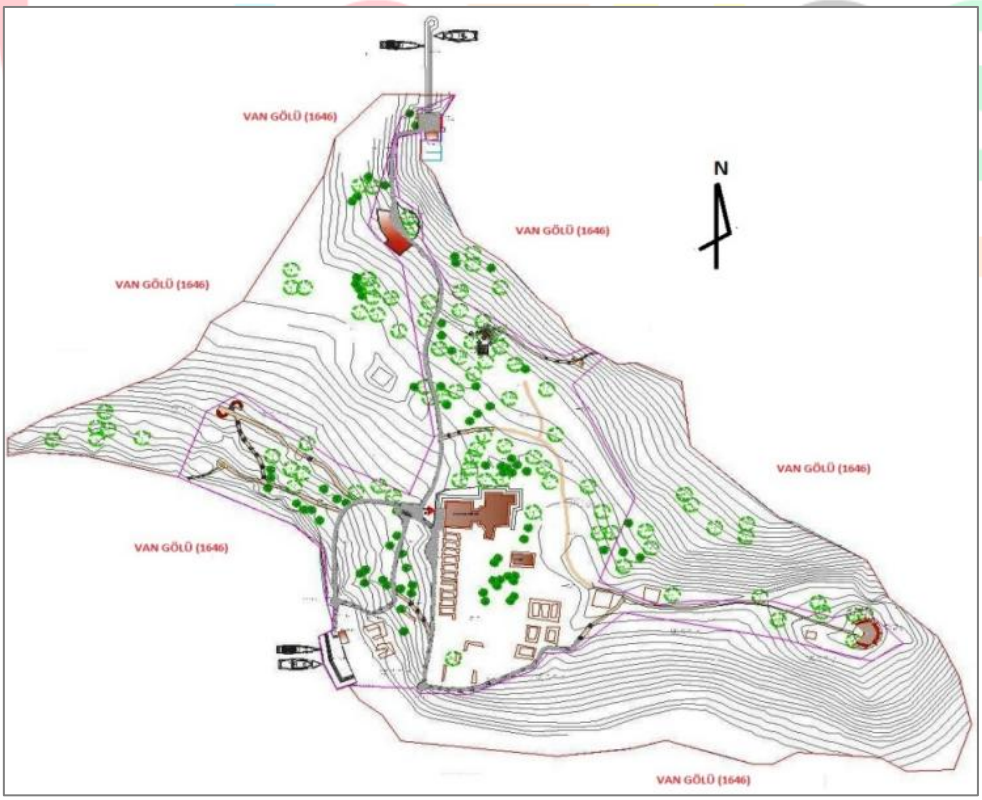
Van, iklime bağlı bitki örtüsü bakımından pek zengin değildir. Bozkır bitkileri yaygındır ve Akarsu boylarında küçük ormanlar göze çarpar. Ağaç türleri olarak, Kavak (Populus), Söğüt (Salix) ve Karaağaç (Ulmus) en önemlileridir. Akdamar Adası'na gelindiğinde ise kayısı ve badem ağaçları göze çarpar. Özellikle Mayıs ayı geç ilkbahar döneminde ada önce ağaçların beyaz çiçekleriyle bezenir, ardından renk değiştirerek lila ve mor tonlarına ve en sonunda da yeşile döner ve Eylül ayına kadar bu şekilde kalır (Karaca, 2023).

Akdamar Adası Ermeni tarihi kaynaklarındaki en belirgin ismi ise Rstunin olarak geçmektedir. Rivayete göre Akdamar Adası üzerinde 705 tarihinde Rstunin adında Ermeni bir hükümdar yaşamıştır. Ancak sonraki zamanlarda öldürülmüş ve daha sonrasında kesin tarihi bilinmemekle birlikte Ağbak vilayetinde hüküm süren Gagik Artsruni kralı tarafından ele geçirilmiştir. Bu süreçten itibaren ada üzerinde uzun yıllar hüküm süren kral Gagik, ada üzerinde tam bir hakimiyete sahip olabilmek adına ilk olarak bazı müslüman hükümdarlar ve Ermeni hükümdarlar ile antlaşmalar yapmıştır. Antlaşmalar sonrasında yönetim merkezini adaya taşıyarak tüm yönetimleri ada üzerinden gerçekleştirmiştir. Bu arada ada üzerinde birçok yerleşim merkezleri kurmuştur. Ada 16. yüzyıl başlarında canlı olarak yerleşim merkezi haline gelmiştir. Ancak 1535 Osmanlı-İran savaşının başlamasıyla birlikte adada bulunan yerleşim merkezleri tamamen yok edilmiştir. Savaş sonrasında geriye kalan merkezi yönetim yerleri de tamamen ortadan kaldırılmış ve yalnızca günümüzde halen daha adada yer alan tarihi manastıra dokunulmamıştır. Bu sebeple 19. yüzyılın sonlarına doğru kiliseyi 300 keşiş ziyaret etmiş ve dini faaliyetlerini burada devam ettirmiştir. Ancak bu durum da uzun sürmemiş; 1895-1915 savaşlarının başlamasıyla birlikte 300 keşiş, can güvenliğinin olmaması sebebiyle kiliseyi terk etmiştir (Wikipedia, 2026) (Şekil 3-5).

Mimari yapılar kral tarafından bizzat kendisi tasarlamış, uygulama ise keşiş mimar Manuel tarafından yapılmıştır. 1021 yılında Vaspurakan Krallığı ortadan kalkınca, 1113'de yapılar manastıra dönüştürülmüş, bu tarihten 1895 yılına kadar bölgedeki Ermeni Patrikliğinin merkezi haline gelmiştir. XIII. yüzyılın sonlarında Katholikos III. Stephanus kilisenin doğusundaki şapeli, 1296 yılında I. Zacharias güneybatısına bitişik şapeli yaptırmıştır. 1763 yılında kilisenin batısına Jamatun 19. yüzyılın başlarında ise güney kapısı önüne giriş bölümü ile çan kulesi inşa edilmiştir (İbşiroğlu, 1997). 1882 yılında itibaren kilisenin güneyine müştemilat bölümlerinden avlu, iki katlı öğrenci konaklama bölümleri, sarnıç, ruhban okulu ve servis bölüm inşa edilerek, kilisenin manastıra dönüşüm sağlamıştır (Kevorkıam ve Paboudjran, 2013).

Şekil 3. Akdamar Kilisesi Eski Görünüşü (Öztürk, 2019)

1918 yılında bölgede yaşayan insanlar, adayı terk ederek, zorunlu göçe tabi olmuşlardır (Güzeloğlu, 1996; Hovannısıan, 2016). Bu tarihten sonra 2005 yılına kadar kullanılmayan manastır yapıları, doğanın olumsuz etkisi altında kalarak, güney müştemilat bölümlerinin düz dam örtü sistemi tamamen, beden ve iç duvarlarının da büyük bir bölümü yıkılarak tahrip olmuştur. Akdamar Kilisesi temizlik, bilimsel kazı, restorasyon, konservasyon, çevre düzenleme ve peyzaj proje uygulama çalışmaları Kültür Bakanlığı ve Van Valiliği tarafından 2005-2009 yılları arasında yapılarak tamamlanmıştır. Günümüzde dört mevsim yerli ve yabancı binlerce turiste hizmet eden yapı, ülke ve bölge kültür turizmine büyük katkılar sağlamaktadır (Öztürk ve ark., 2007). Akdamar Kilisesi ana binası olan Kutsal Haç Kilisesi, sarnıç, ruhban okulu, Jamaton bölümü, çan kulesi, şapel, servis bölümü, hizmet odaları, teraslı bahçeler, mezarlık ve limandan oluşmaktadır (Cuneo, 1988; Kökler, 2005) (Şekil 6).



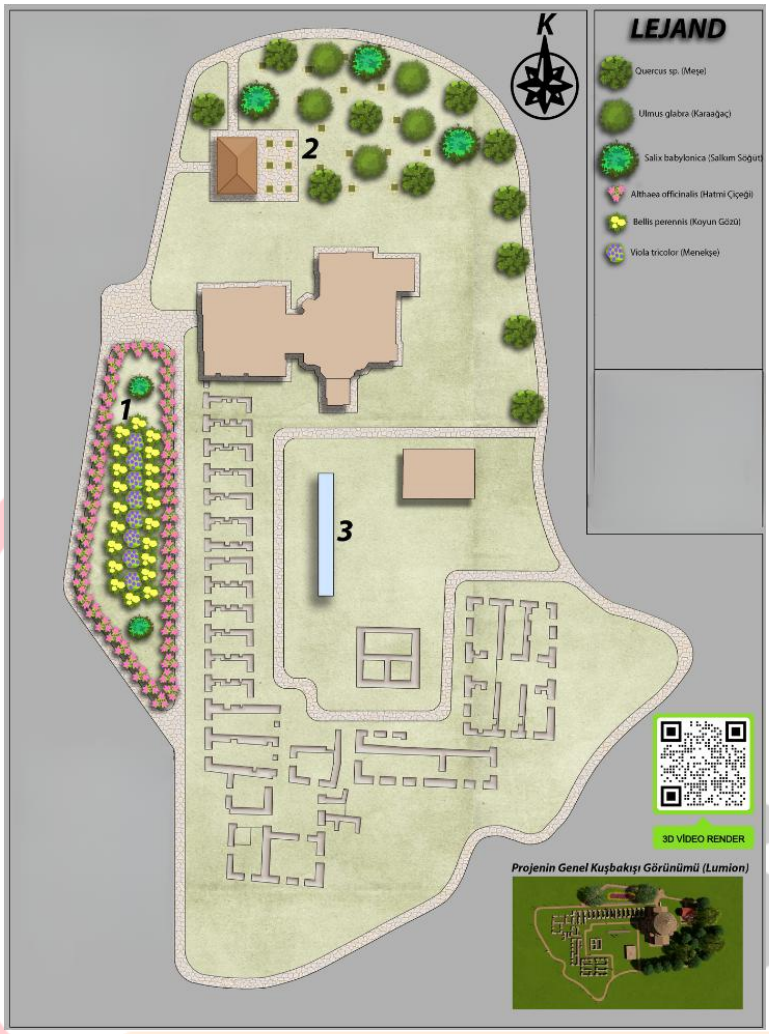
Şekil 4. Akdamar Adası Vaziyet Planı (Öztürk, 2007)

Şekil 5. Akdamar Kilisesi Kazı Sonrası Vaziyet Planı (Öztürk, 2007)

Şekil 6. Akdamar Kilisesi ve Çevresinden Görünümler

BULGULAR

Çalışma kapsamında proje alanı için iki öneri peyzaj tasarım projesi hazırlanmıştır. Projelerin yapısal ve bitkisel uygulama önerilerine ilişkin detaylar plan ve 3D görüntüler şeklinde sunulmuştur.



Şekil 7. 1. Öneri Peyzaj Tasarım Projesi

Şekil 8. 1. Öneri Plan Görünümü

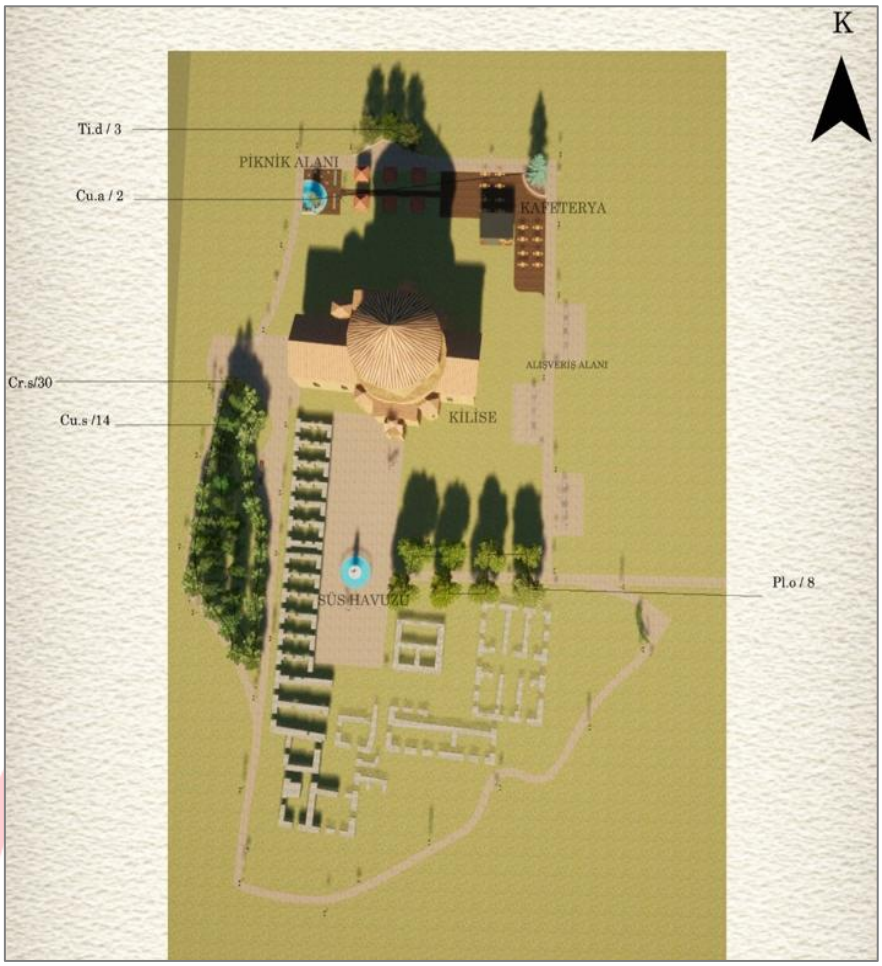
Şekil 9. Giriş Karşılama Alanı

Şekil 10. Kapalı Oturma Alanı

Şekil 11. Kafeterya Açık Alanı

Şekil 12. Sergi Alanı

Şekil 13. Cam Fanus Sergi Alanı



Şekil 14. 2. Öneri Peyzaj Tasarım Projesi

Şekil 15. Alışveriş Alanı

Şekil 16. Kilise Önü Çok Amaçlı Toplanma Yeri

Şekil 17. Piknik Alanı

Şekil 18. Yürüyüş Yolu

Şekil 19. Kafeterya

SONUÇ

Proje, Akdamar Kilisesi çevresinde ziyaretçi deneyimini artırmak, rekreasyon olanakları sunmak ve tarihi dokuya uyumlu bir peyzaj oluşturmak amacıyla tasarlanmıştır. Alan, fonksiyonel olarak ana kullanım alanlarına ayrılmıştır.

Giriş ve Karşılama Alanı

Her iki projede de kullanıcıların alana kontrollü ve estetik bir şekilde giriş yapabilmesi amacıyla karşılama alanları oluşturulmuştur. Bu alanlarda yönlendirme, görsel odak ve dolaşım sürekliliği ön planda tutulmuştur.

Bu alanda:

- Yaya yürüyüş yolları
- Çiçek parterleri
- Süs bitkileri ve yer örtücü bitkisel tasarımlar
- Karşılama ve geçiş aksları kullanılmıştır.

Dinlenme ve Sosyal Kullanım Alanı

Projelerde ziyaretçilerin dinlenebileceği, sosyalleşerek birlikte vakit geçirebileceği ortak rekreasyon alanları tasarlanmıştır. Tasarımlarda kullanıcı konforu ve gölgelendirme dikkate alınmıştır.

Bu alanda:

- Oturma alanları
- Gölgelik ağaç grupları
- Sert zemin kaplamaları oluşturulan yürüme ve etkinlik alanları
- Açık dinlenme alanları bulunmaktadır.

Rekreasyon ve Piknik Alanı

Her iki projede de kullanıcıların açık havada zaman geçirebileceği rekreatif kullanım alanlarına yer verilmiştir. Alanlar doğal peyzaj dokusuyla uyumlu şekilde planlanmıştır.

Bu alanda:

- Piknik alanları
- Çim dinlenme alanları
- Açık kullanım ve dolaşım alanları
- Gölgelik ağaçlandırmalar yer almaktadır.

Kültürel / Sergi Amaçlı Açık Alan Kullanımı

Projelerde tarihsel ve görsel değerleri ön plana çıkarmak amacıyla açık sergileme ve meydan kullanımları oluşturulmuştur.

Bu alanda:

- Açık sergi alanları
- Toplanma alanları
- Sert zemin meydanlar
- Dolaşım aksları bulunmaktadır.

Bitki Önerileri

Projelerde hem estetik hem de ekolojik uyum gözetilerek aşağıdaki bitkiler tercih edilmiştir:

- *Quercus* sp. (Meşe) (11 adet) → Gölge ve güçlü peyzaj etkisi
- *Ulmus glabra* (Karaağaç) (5 adet) → Alan bütünlüğü ve doğal görünüm
- *Salix babylonica* (Salkım Söğüt) (5 adet) → Su etkisi ve görsel odak
- *Althaea officinalis* (Hatmi Çiçeği) (50 adet) → Çiçeklenme ve renk katkısı
- *Bellis perennis* (Koyun Gözü) (21 adet) → Yer örtücü ve mevsimlik etki
- *Viola tricolor* (Menekşe) (8 adet)→ Renkli vurgu ve bordür bitkisi
- *Platanus orientalis* (Doğu Çınarı) (8 adet) → Gölge ve odak etkisi
- *Tilia domestica* (Gümüşi Ihlamur) (3 adet) → Estetik ve hoş koku sağlama
- *Cupressus arizonica* (Arizona Servisi) (2 adet) → Rüzgar kırıcı ve sınır elemanı
- *Cupressus sempervirens* (Akdeniz Servisi) (14 adet) → Dikey vurgu ve yönlendirme
- *Crataegus* spp. (Alıç Çalısı) (30 adet) → Doğal sınır ve görsel çeşitlilik etkisi

KAYNAKLAR

Aslan, H., Kıykaç, B. (2025). Van-Akdamar Adası ve Kilisesi Ziyaretçi Deneyimleri Üzerine Netnografik Bir Araştırma: Tripadvisor Örneği. *Uluslararası Güncel Turizm Araştırmaları Dergisi*, 9(1), 25-37.

Cuneo, P. (1988). *Architettura Armena, Roma*: Printed in Italy.

Güney, Ç. (2000). Akdamar Adası ve Kilisesi. *Travel Dergisi*, 50.

Güzeloğlu, S. (1996). *Van ve Çevresine Tarihi ve Arkeolojik Bir Bakış*, İstanbul: Kent Matbaası.

Hovannısıan, G. R. (2016). *Tarihi Kentler ve Ermeniler Van, İstanbul*: Aras Yayıncılık.

İbşiroğlu, M. Ş. (1997). *Akdamar Kilisesi Işıkla Canlanan Duvarlar.* İstanbul: Yapı Kredi Yayınları.

Kalelioğlu, E. (1991). Van Ovasının İklim Özellikleri. *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi,* 35(2), 155-166.

Karaca, S., Sarğın, B., Alaboz, P., Dengiz, O. (2023). Van Edremit İlçesi Elma Bahçelerinde Çok Kriterli Karar Verme Analizi-CBS ile Toprak Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. *Tarım ve Doğa Dergisi*, 26(2), 393.

Kevorkıam, R. H., Paboudjran, P. B. (2013). 1915 *Öncesinde Osmanlı İmparatorluğu'nda Ermeniler,* İstanbul: Aras Yayıncılık.

Kökler, O. (2005). *100 Yıl Önce Türkiye'de Ermeniler*, İstanbul: Bir Zamanlar Yayıncılık.

Mckercher, B. (2002). Towards Classification of Cultural Tourists, *International Journal of Tourism Research*, 4: 29-38.

Öztürk, Ş. (2019). Akdamar Kilisesi 2005 ve Sonrası Onarım Çalışmaları Hakkında Bir Değerlendirme. *Kent Akademisi*, 12(4), 860-874.

Öztürk, Ş., Biber, H., Çavuşoğlu, R., Karaca, Y. (2007). Akdamar Kilisesi Restorasyon ve Kazı Çalışmaları. *Mimarlık,* 336, 60-65.

Süer, S. (2021). Kültürel Mirasın Turizm Amaçlı Kullanımı: Bergama İlçesi Örneği. *Journal of Humanities and Tourism Research*, 11(3), 479-502.

Yılmaz, M. (2014). Erçek Gölü Havzası'ndaki Köy Yerleşmelerinin Coğrafi Özellikleri. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 18(1), 299-328.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Gıdalarda Antioksidan Kapasitesinin Belirlenmesinde Voltametrik Yöntem Uygulamaları
Applications of Voltammetric Methods for the Determination of Antioxidant Capacity in Foods

Leyla DOĞDU UZUNLAR [1]
Abdullah Sinan ÇOLAKOĞLU [2]
Mustafa ÇEŞME [3]

Abstract

The determination of antioxidant capacity in foods is of importance for both food quality control and nutritional science. Phenolic compounds of plant origin neutralize reactive oxygen species (ROS) through their hydroxyl groups and exert protective functions against oxidative stress. In this context, phenolic compounds stand out as molecules with high redox potential that can directly participate in electrochemical processes.

Although traditional spectrophotometric methods provide reliable results for antioxidant capacity determination, they are associated with drawbacks including long analysis times, high chemical consumption, and elevated costs. In recent years, electrochemical approaches have emerged as a compelling alternative, offering distinct advantages in terms of speed, sensitivity, and cost-effectiveness.

In this study, the fundamental principles, electrode systems, and analytical parameters of voltammetric methods are systematically discussed. The applications of cyclic voltammetry (CV), differential pulse voltammetry (DPV), and square wave voltammetry (SWV) in food matrices are comprehensively reviewed. The application of voltammetric methods for determining antioxidant capacity in foods, as well as for detecting adulteration in olive oil and contaminants in foods, has been discussed, and the effectiveness of these techniques has been evaluated through current applications reported in the literature. The findings indicate that voltammetric techniques represent a sustainable and powerful alternative for routine quality control processes in the food industry.

Keywords: phenolic compounds, antioxidant capacity, voltammetry, food quality control, electrochemical biosensors

[1] Doktora Öğrencisi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü, leyladogdu000@gmail.com, Orcıd: 0009-0006-6477-7611
[2] Dr. Öğr. Üyesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü, sinanaysun@yahoo.com, Orcıd: 0000-0002-5928-3581
[3] Doç. Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Kimya Bölümü, mcesme@ksu.edu.tr, Orcıd: 0000-0002-2020-5965

Giriş

Serbest radikaller ve reaktif oksijen türleri (ROS), lipitler, proteinler ve nükleik asitler başta olmak üzere pek çok biyomoleküle etkileşime girerek zincirleme oksidasyon reaksiyonları tetikleyebilmekte ve bu süreç; gerek insan sağlığını tehdit eden kronik patolojilerin gelişimini kolaylaştırmakta, gerekse gıdalardaki raf ömrünü kısaltmaktadır. Antioksidanlar, bu serbest radikalleri baskılayan ve zincir reaksiyonlarını durduran bileşikler olarak bilinmekte olup; sebze, meyve, çikolata, çay, kahve ve baharatlar gibi çok sayıda gıda ve içecekte doğal olarak bulunmaktadır (Brito vd., 2017: 1-2; Oroian ve Escriche, 2015: 3). Antioksidanca zengin beslenme örüntülerinin diyabet, obezite, kardiyovasküler hastalıklar ve bazı kanser türleri gibi kronik hastalık riskini azalttığına dair güçlü epidemiyolojik kanıtlar mevcuttur (Steinmetz ve Potter, 1996: 1).

Bitkisel kaynaklarda yaygın olarak bulunan fenolik bileşikler, ikincil metabolitler olarak sentezlenmekte ve sahip oldukları yüksek redoks potansiyeli sayesinde indirgeyici ajan, hidrojen verici ve singlet oksijen söndürücü işlevlerini yerine getirmektedir (Kahkonen vd., 1999: 1; Manach vd., 2004: 1). Bu bileşiklerin fenolik halka yapısındaki hidroksil grupları, elektron ya da hidrojen atomu transferi yoluyla ROS'u nötralize edebilmektedir; dolayısıyla fenolik bileşikler, elektrokimyasal ölçüm için doğal birer substrat niteliği taşımaktadır.

Antioksidan kapasitenin tayininde DPPH, ABTS, FRAP ve ORAC gibi spektrofotometrik yöntemler referans olarak kullanılmaktadır. Bu teknikler tek elektron transferi veya hidrojen atomu transferi mekanizmalarına dayanmakta olup, uzun inkübasyon süreleri, pahalı reaktifler, yoğun renkli veya bulanık örneklerdeki matris girişimleri ve düşük otomasyon kapasitesi gibi ciddi kısıtları beraberinde getirmektedir (Hoyos-Arbeláez vd., 2017: 6; Osorio-Valencia vd., 2023: 2). Bu sorunların üstesinden gelmek amacıyla elektrokimyasal yöntemler, özellikle voltametrik teknikler, analitik kimya alanında giderek artan bir ilgi görmektedir.

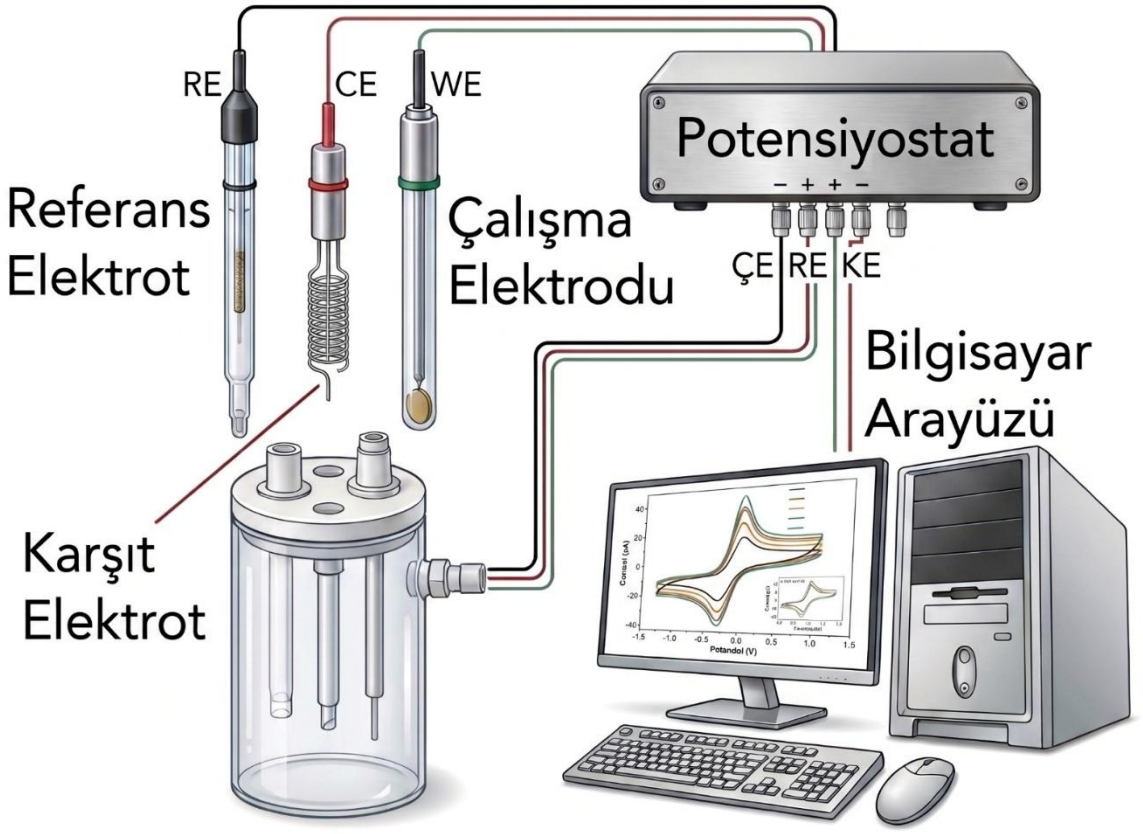
Voltametri, çalışma elektroduna uygulanan potansiyelin sistemli olarak değiştirilmesi ve oluşan akımın ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Elektrot yüzeyindeki oksidasyon-redüksiyon tepkimeleri aracılığıyla hem toplam antioksidan kapasitenin nicel olarak belirlenmesi hem de fenolik bileşen profilinin karakterize edilmesi mümkün olmaktadır. Yöntemin minimal numune hazırlama gerektirmesi, gerçek zamanlı veri sağlaması ve düşük işletim maliyeti gibi özellikleri; onu gıda analizleri için cazip kılmaktadır (Hoyos-Arbeláez vd., 2017: 7; Wang, 2000:4-5).

Bu çalışma, voltametrik yöntemlerin temel ilkelerini, bileşenlerini ve analitik parametrelerini sistematik biçimde ele almakta; başlıca voltametrik tekniklerin gıda matrislerindeki antioksidan kapasite tayinine yönelik uygulamalarını kapsamlı olarak incelemektedir. Bunun yanı sıra çalışma, voltametrik yaklaşımların zeytinyağında tağşiş tespiti ve kontaminant analizi gibi gıda güvenliği alanlarındaki potansiyelini de irdelemektedir.

Voltametri: Temel İlkeler ve Sistem Bileşenleri

Voltametri, bir çalışma elektroduna kontrollü biçimde uygulanan potansiyelin değiştirilmesi ve bu değişime karşılık oluşan akımın zamana ya da potansiyele göre izlenmesi işlemine dayanmaktadır. Elektrot yüzeyindeki redoks reaksiyonlarından kaynaklanan akım sinyali; analitin kimliği (pik potansiyeli) ve konsantrasyonu (pik akımı) hakkında doğrudan

kantitatif bilgi sunmaktadır. Ölçümler, potansiyostat kontrolündeki bir elektrokimyasal hücrede üç elektrotlu bir düzenek aracılığıyla gerçekleştirilmektedir (Şekil 1) (Wang, 2000: 4-5).



Şekil 1. *Voltametri Sistemi*

Elektrokimyasal Hücrenin Temel Bileşenleri.

Çalışma elektrodu, yüzeyinde redoks reaksiyonlarının gerçekleştiği ve analitik sinyalin üretildiği kritik bileşendir (Wang, 2000: 100). Elektrot seçimi, hedef analitin redoks davranışı, arka plan akımı, potansiyel aralığı, elektriksel iletkenlik, yüzey tekrarlanabilirliği ve maliyet gibi çok sayıda parametreye bağlı olarak yapılmaktadır. Civa elektrotlar negatif potansiyellerde üstün performans sergilerken; camsı karbon, karbon pasta ve karbon fiber gibi karbon temelli elektrotlar geniş bir potansiyel penceresi ve düşük maliyet avantajıyla ön plana çıkmaktadır. Platin ve altın elektrotlar ise yüksek pozitif potansiyellerde etkin çalışma imkânı tanımaktadır (Wang, 2000: 107). Bunlara ek olarak, elektrot yüzeyinin ince bir film tabakasıyla kaplanmasıyla elde edilen modifiye elektrotlar; seçicilik ve elektroaktif alan açısından standart elektrotların ötesinde performans sunabilmektedir (Durmuş, 2020: 26).

Referans elektrot, ölçüm boyunca sabit ve tekrarlanabilir bir potansiyel referansı sağlamak amacıyla kullanılmaktadır; bu amaçla en yaygın biçimde gümüş/gümüş klorür (Ag/AgCl) ve doygun kalomel elektrotlara başvurulmaktadır. Yardımcı elektrot (karşı elektrot) ise genellikle platin tel veya grafit çubuk gibi inert iletken bir malzemeden üretilmekte ve

akımın çalışma elektrodu ile bu elektrot arasından geçmesini sağlayarak referans elektrotun potansiyelini koruyan devre tamamlayıcı işlevini üstlenmektedir (Wang, 2000: 100-101).

Çözücü seçimi, analitin çözünürlüğü, dielektrik sabiti ve kimyasal reaktivite parametrelerine göre belirlenmekte olup sulu ortamlarda su, susuz uygulamalarda ise asetonitril, dimetilsülfoksit (DMSO) ve metanol gibi organik çözücüler tercih edilmektedir. Destekleyici elektrolit, çözelti direncini azaltmak ve iyonik şiddeti sabitlemek amacıyla sisteme katılmakta; sulu ortamlarda potasyum klorür veya fosfat tamponları kullanılırken, organik ortamlarda tetraalkilamonyum tuzlarına başvurulmaktadır (Wang, 2000: 102-103).

Temel Analitik Parametreler.

Voltametrik yanıtın karakterini belirleyen ve sonuçların analitik güvenilirliğini doğrudan etkileyen iki temel parametre özellikle ön plana çıkmaktadır. Bu parametreler tarama hızı ve çözelti pH'ıdır.

Tarama hızı; difüzyon tabakasının kalınlığını, elektrot yüzeyindeki konsantrasyon gradyanını ve elektron aktarım kinetiğini doğrudan biçimlendiren en kritik operasyonel değişkendir. Tersinir sistemlerde pik akımının (i_p) tarama hızının kareköküyle ($v^{1/2}$) sergilediği doğrusal ilişki, sürecin difüzyon kontrollü olduğunun kanıtıdır. Tarama hızının artırılması, elektron aktarım dinamiklerini sorgulamaya olanak tanır: düşük hızlarda tersinir görünen bir sistem, yüksek hızlarda yarı-tersinir ya da tersinmez bir davranış sergileyebilir (Wang, 2000: 29-33).

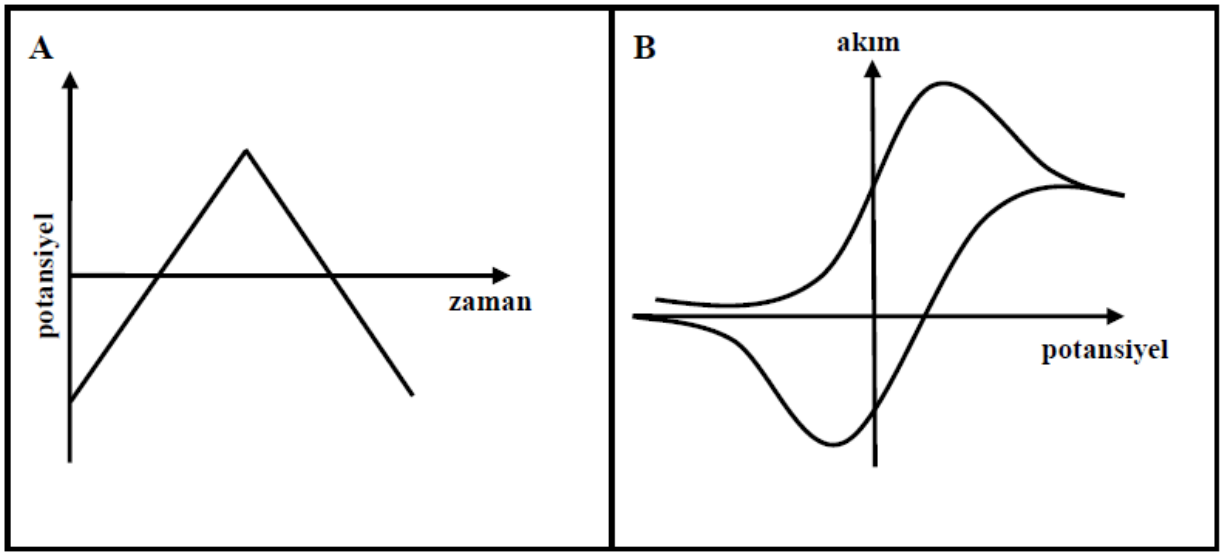
pH ve tampon çözeltisi, özellikle organik bileşiklerin redoks tepkimelerinde proton aktarımının merkezi bir rol üstlenmesi nedeniyle belirleyici öneme sahiptir. Pik potansiyeli (E_p), pH'a doğrusal bağımlılık göstermektedir; bu bağımlılık, reaksiyona katılan elektron ve proton sayılarına ilişkin mekanistik bilgi sunmaktadır (Wang, 2000: 95). Belirli pH aralıklarında analit molekülleri daha elektroaktif bir konformasyona bürünebilir ya da elektrot yüzeyinde daha etkin adsorpsiyon sergileyerek akım yanıtını artırabilir. Elektrot yüzeyinde pH dalgalanmalarını engellemek ve tekrarlanabilir pik potansiyelleri elde etmek için yeterli tampon kapasitesine sahip sistemlerin kullanımı zorunludur (Wang, 2000: 130-131).

Voltametrik Teknikler.

Voltametrik yöntemler, çalışma elektroduna uygulanan potansiyelin zaman içindeki dalga formuna göre iki temel kategoride değerlendirilmektedir: Potansiyelin doğrusal rampa biçiminde sürekli tarandığı teknikler (CV gibi) öncelikle kalitatif ve mekanistik bilgi sağlarken; darbe temelli teknikler (DPV, SWV gibi) kapasitif arka plan akımını eleyerek analitik duyarlılığı ve eser miktar tayini kapasitesini önemli ölçüde artırmaktadır.

Döngüsel Voltametri (CV).

Döngüsel voltametri (CV), çalışma elektroduna ileri ve geri yönde üçgen dalga formunda bir potansiyel taraması uygulanması esasına dayanmaktadır. Elde edilen voltamogram, anodik ve katodik pik akımlarını ile bunlara karşılık gelen pik potansiyellerini içermekte; bu veriler bir redoks sisteminin termodinamik özellikleri, elektron aktarım kinetiği ve reaksiyon mekanizması hakkında kapsamlı bilgi sunmaktadır (Şekil 2). Bu özelliğiyle CV, elektrokimyasal bir sistemin ilk karakterizasyonunda başvurulan vazgeçilmez teknik konumundadır (Wang, 2000: 28).



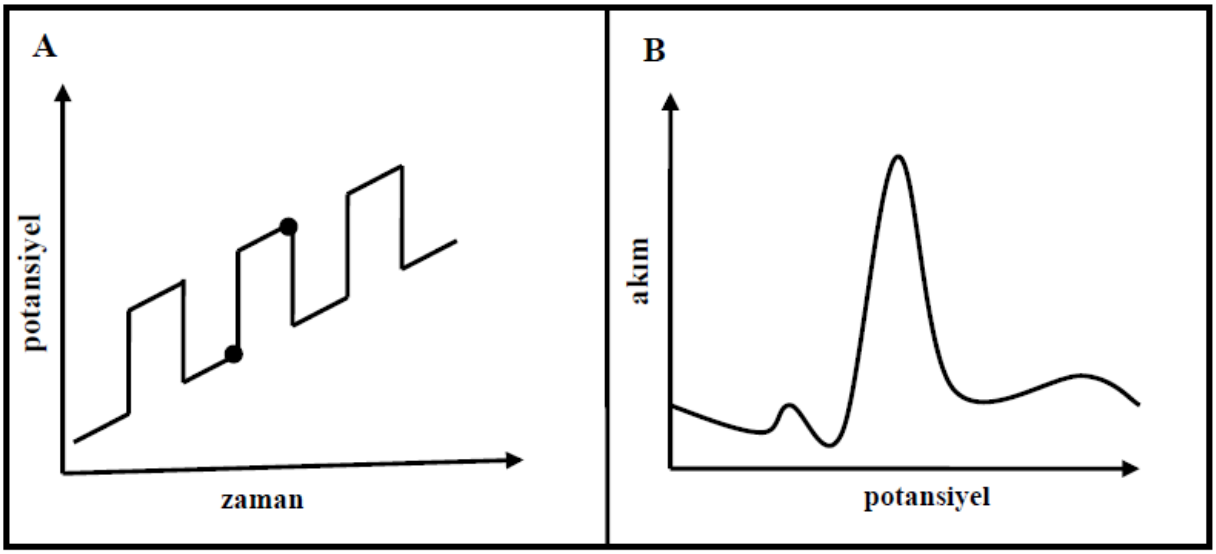
Şekil 2. *A) Döngüsel voltametri için kullanılan uyarma sinyali B) Döngüsel voltametriye ait bir voltamogram (Durmuş, 2020: 33)*

Son yıllarda yapılan çalışmalar, CV'nin meyve özleri, bal, şarap, çay ve kahve gibi karmaşık gıda matrislerinde fenolik bileşiklerin belirlenmesinde etkin biçimde kullanılabildiğini ortaya koymaktadır. Yöntemin kantitatif uygulamalardaki sınırlamaları, SWV ve DPV gibi daha ileri tekniklerle büyük ölçüde aşılabilmektedir (Arteaga vd., 2012; Jiao vd., 2018).

Diferansiyel Darbe Voltametrisi (DPV).

Diferansiyel Darbe Voltametrisi (DPV), doğrusal bir potansiyel rampası üzerine sabit büyüklükteki potansiyel darbelerinin bindirilmesiyle çalışmaktadır. Ölçüm prensibi, darbe öncesi ve sonrasındaki iki akım değerinin farkının alınmasına dayanmaktadır; bu diferansiyel yaklaşım, kapasitif arka plan akımını etkin biçimde elemine ederek saf faradaik sinyali ön plana çıkarmaktadır (Şekil 3). Kapasitif akımın faradaik akımdan çok daha hızlı sönümlenmesi, bu elemenin temel mekanistik dayanağını oluşturmaktadır.

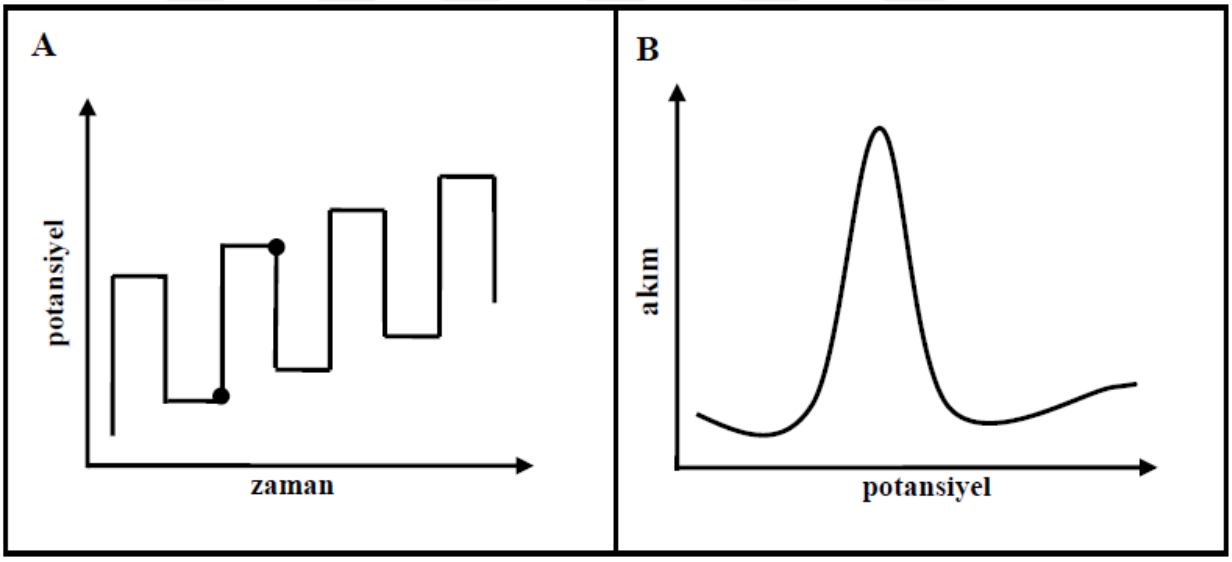
DPV, CV ile karşılaştırıldığında dar tabanlı ve simetrik pikler üretmekte; bu özellik hem pik akımı ile konsantrasyon arasındaki doğrusal ilişkinin belirlenmesini kolaylaştırmakta hem de birbirine yakın potansiyellerde sinyal veren farklı antioksidan bileşenlerinin ayrımını mümkün kılmaktadır. Teknik, 10^{-7} M ve altına inen saptama sınırlarıyla gıda analizlerinde eser miktar tayini için baskın bir tercih haline gelmiştir (Wang, 2000: 68-71).



Şekil 3. *A) Diferansiyel darbe voltametrisi için kullanılan uyarma sinyali B) Diferansiyel darbe voltametrisine ait bir voltamogram (Durmuş, 2020: 38)*

Kare Dalga Voltametrisi.

Kare Dalga Voltametrisi (SWV), bir basamak potansiyel rampası üzerine simetrik kare dalgaların bindirilmesi prensibine dayanmaktadır. Her bir potansiyel basamağında hem ileri (oksidasyon) hem de geri (redüksiyon) yönde akım kaydedilerek elde edilen net akım piki, her iki bileşeni bünyesinde barındırdığından geleneksel tekniklere kıyasla belirgin biçimde yüksek bir analitik sinyal üretmektedir (Şekil 4). SWV, DPV ile paylaştığı kapasitif arka plan akımını eleme yeteneğine ek olarak saniyeler içinde tamamlanan voltamogram kaydı avantajıyla öne çıkmaktadır; bu durum, zaman bağımlı gürültü kaynaklarının da minimize edilmesine olanak tanımaktadır (Wang, 2000: 72-74). Yüksek analitik duyarlılığı ve hızı sayesinde SWV, kompleks gıda matrislerinde eser miktardaki biyoaktif bileşenler ile vitaminlerin tayininde ve elektrokimyasal sensörlerin performansının optimize edilmesinde tercih edilen bir teknik konumundadır.

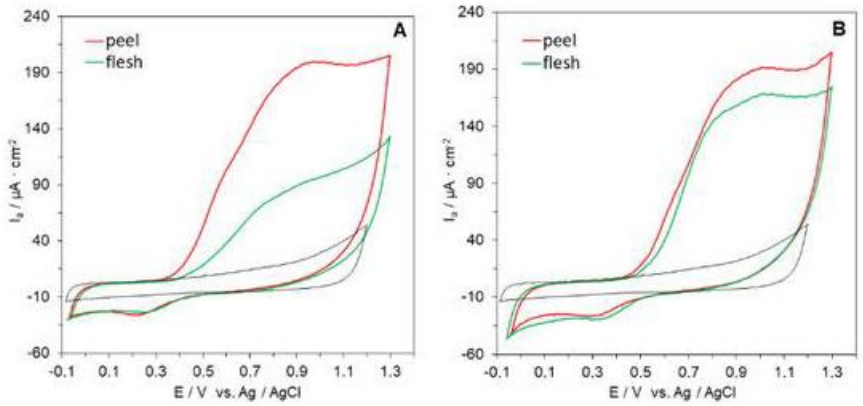


Şekil 4. *A) Kare dalga voltametrisi için kullanılan uyarma sinyali B) Kare dalga voltametrisine ait bir voltamogram (Durmuş, 2020)*

Gıda Analizlerinde Voltametrik Yöntemlerin Uygulamaları

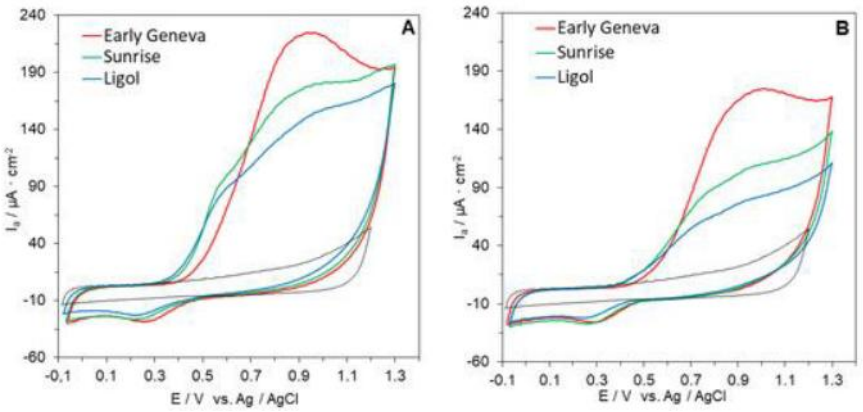
Antioksidan Kapasite Tayini.

Zielińska ve Turemko (2020), 11 farklı elma kültüvarının kabuk ve meyve eti kısımlarındaki fenolik bileşimleri HPLC-DAD-MS/MS ve CV teknikleriyle karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmada sunulan Şekil 5 ve 6'da farklı elma çeşitlerinin kabuk ve etine ait anodik pik akımlarında (Ipa) gözlenen sistematik artış, CV yönteminin kantitatif analiz kapasitesini doğrulamıştır.



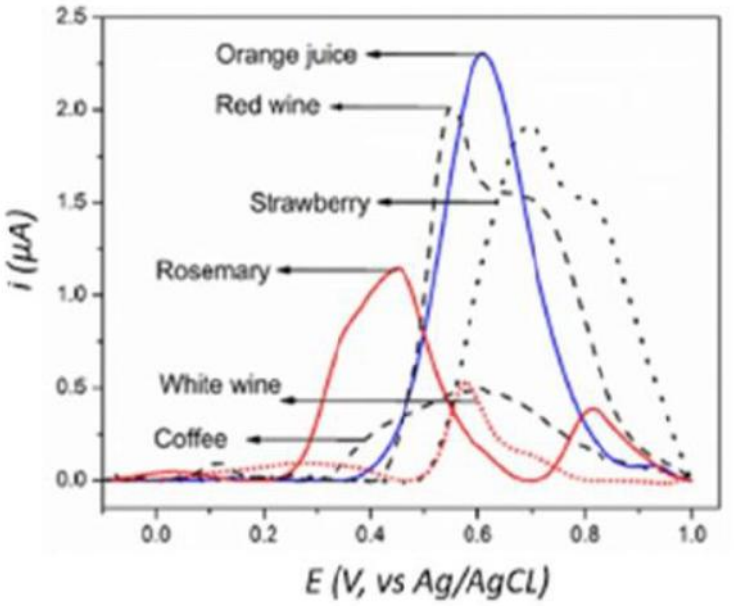
Şekil 5. *Seçili elma çeşitlerinin kabuk ve et özütlerinin döngüsel voltamogramları: (A) Jonagored, (B) Antonówka. Elektrolit çözeltisinin CV'si noktalı gri çizgiyle gösterilmiştir. Çalışma koşulları: özüt konsantrasyonu 25 mg/mL; pH 6,0; tarama hızı 0,1 V/s (Zielińska ve Turemko, 2020)*

Çalışmada, elma kabuklarının konsantrasyona bağlı sistematik bir oksidasyon piki sergilediği ve bu pikin fenolik asitler ile flavonoidler gibi farklı redoks aktif bileşenlerden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Önemli bir sonuç olarak, voltametrik pik akımı ile toplam fenolik ve toplam flavonoid içerikleri arasında güçlü bir korelasyon ($r > 0,90$) belirlenmiş; bu bulgu, voltametrinin karmaşık örneklerde hızlı ve düşük maliyetli bir antioksidan indeksi oluşturmada etkin bir araç olduğunu kanıtlamıştır.



Şekil 6. *Seçilmiş elma çeşitlerinin döngüsel voltamogramları: (A) kabuktan elde edilen özütler; (B) meyve etinden elde edilen özütler. Elektrolit çözeltisinin CV'si noktalı gri çizgiyle gösterilmiştir. Çalışma koşulları: özüt konsantrasyonu 25 mg/mL; pH 6,0; tarama hızı 0,1 V/s (Zielińska ve Turemko, 2020)*

Osorio-Valencia vd. (2023), çeşitli gıda matrislerinde DPV ile ölçülen antioksidan kapasite değerlerinin spektrofotometrik FRAP, ABTS ve toplam fenol yöntemleriyle yüksek düzeyde korelasyon (r > 0,79) gösterdiğini ortaya koymuştur. Çalışmada, DPV'nin özellikle optik bulanıklık veya yoğun renk içeren numunelerde spektrofotometrik tekniklerin karşılaştığı matris girişimlerinden bağımsız, güvenilir bir alternatif sunduğunu vurgulanmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. *PBS pH 7 ve koşullarında farklı değerlendirilen ekstraktlar için diferansiyel darbe voltamagramları, potansiyel aralığı −0,2 ila 1,0 V, ΔEs = 5 mV, modülasyon genliği = 25 mV, modülasyon süresi = 50 ms ve aralık süresi = 0,5 s (Osorio-Valencia vd., 2023)*

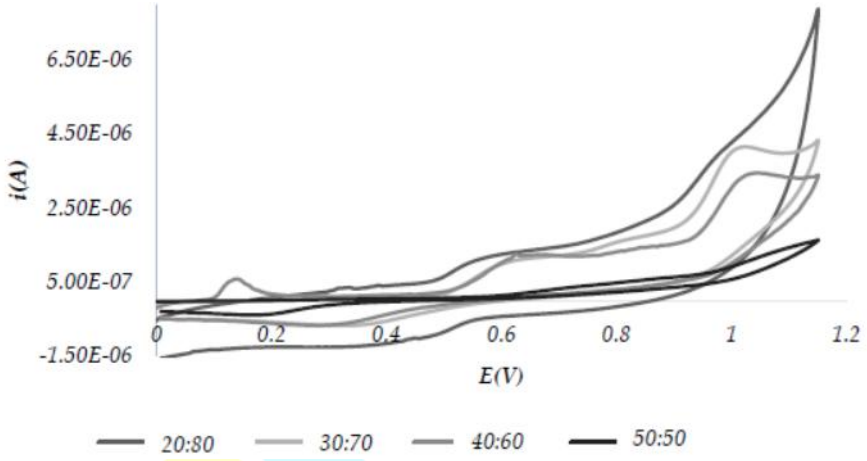
Yıldırım vd. (2020), az, orta ve koyu kavrulmuş Türk ve filtre kahve örneklerinin toplam antioksidan kapasitelerini CV, SWSV ve DPSV teknikleriyle analiz etmiştir. Karbon pasta elektrot ve pH 4,0 Britton-Robinson tampon çözeltisi koşullarında gallik asit ve kuersetin standartları referans alınarak gerçekleştirilen analizlerde en yüksek antioksidan kapasitenin az kavrulmuş çekirdeklerde bulunduğu ve kavurma derecesinin artışıyla TAC değerlerinin belirgin biçimde düştüğü görülmüştür.

Korkmaz vd. (2023) ise kalem grafit elektrot (PGE) temelli bir SWV yöntemiyle kateşinin (CAT) fizyolojik koşullarla uyumlu pH 7,0 fosfat tamponunda (PBS) 1-100 µM aralığında başarılı biçimde tayin edildiğini bildirmiştir (R^2 = 0,9895). PGE'nin ekonomik, tek kullanımlık ve çevre dostu yapısı, bu platformu gıda bileşeni analizinde pratik bir çözüm olarak öne çıkarmaktadır. Bunların yanı sıra Silveri vd. (2023) ve Rojas vd. (2019), sızma zeytinyağındaki oleuropein ve hidroksitirozol gibi spesifik orto-difenollerin tayinine yönelik nano-modifiye elektrotlar geliştirerek herhangi bir ön işlem gerektirmeksizin DPV ile yüksek özgüllükte antioksidan ölçümü yapabilen sensörler literatüre kazandırmıştır.

Tağşiş Tespiti.

Voltametrik yöntemler, zeytinyağı gibi yüksek değerli gıdalardaki tağşişin tespitinde güçlü bir analitik araç olarak değerlendirilmektedir. Giacomino vd. (2023), farklı botanik kökenli zeytinyağlarının CV profillerini karbon pasta elektrotlar kullanarak incelemiş ve yaklaşık 0,4-0,6 V potansiyellerindeki pikleri polifenollere, 1,1 V civarındaki pikleri ise

tokoferollere atfetmiştir. Bu voltametrik parmak izi verileri kemometrik yöntemlerle entegre edilerek yağların botanik kökenleri başarıyla sınıflandırılmıştır.



Şekil 8. *Farklı yağ:grafit oranları (20:80, 30:70, 40:60 ve 50:50) kullanılarak CV ile elde edilen voltamogramlar (Giacomino vd., 2023)*

Tsopelas vd. (2018), CV ile elde edilen voltametrik parmak izlerini Temel Bileşen Analizi (PCA) ve Kısmi En Küçük Kareler (PLS) yöntemleriyle birleştirerek sızma zeytinyağındaki tohum yağı tağşişini %2 gibi düşük bir tespit limitiyle belirlemiştir. Karagözlü vd. (2024) ise PGE üzerinde DPV tekniğiyle alfa-tokoferol oksidasyon pikini analiz ederek herhangi bir ön işlem gerektirmeksizin tohum yağı katışımlarını hızlı biçimde tespit edebilmiştir.

Kontaminant Analizleri ve Gıda Güvenliği.

Mikrobiyolojik kontaminasyon tespiti açısından Panhwar vd. (2019), L-sistein ile fonksiyonelleştirilmiş manyetik demir nanopartikülleriyle (Fe_3O_4NPs) kaplı bir camsı karbon elektrot (GCE) tabanlı biyosensör geliştirmiştir. Pozitif yüklü L-sistein ile bakteri hücre zarının negatif yüklü yüzeyi arasındaki elektrostatik etkileşime dayanan bu sensör, CV tekniği aracılığıyla 10^1-10^5 CFU/mL aralığında *Escherichia coli*'yi 90 dakika gibi kısa bir sürede tespit edebilmiştir.

Gıda kalite kontrolü alanında Navarro vd. (2020), ısıl işlemli nişastalı gıdalarda oluşan akrilamidin tayini için hemoglobin modifiyeli karbon pasta biyosensörü geliştirmiştir. Akrilamidin elektrot yüzeyinde hemoglobin ile oluşturduğu birikime bağlı akım azalmasının CV ile izlenmesine dayanan bu yöntem, 0,06 nmol L^{-1} gibi olağanüstü düşük bir saptama sınırı sunmakta ve patates kızartması örneklerinde kızartma süresine bağlı akrilamid değişimini gerçek zamanlı olarak takip edebilmektedir.

Voltametrik Yöntemlerin Avantajları ve Sınırlılıkları

Voltametrik yöntemler, gıdalarda antioksidan kapasite tayinine yönelik geleneksel yaklaşımlara kıyasla bir dizi belirgin avantaj sunmaktadır. Kapsamlı numune hazırlama işlemlerine olan gereksinimin ortadan kalkması ya da önemli ölçüde azalması, analiz sürecini hızlandırmakta ve operasyonel maliyeti düşürmektedir. Optik bulanıklık veya yoğun renk içeren örneklerde UV-Vis spektrofotometrisinin maruz kaldığı matris girişimlerinin elektrokimyasal ölçümlerde yaşanmaması, analitik güvenilirliği artıran önemli bir avantajdır.

Bunun yanı sıra tek bir potansiyel taramasıyla polifenoller ve tokoferoller gibi farklı antioksidan sınıflarının redoks davranışları eş zamanlı olarak izlenebilmekte; elde edilen bu "voltametrik parmak izi" hem nicel analizlerde hem de coğrafi ya da botanik köken belirleme çalışmalarında değerli bir araç olmaktadır. DPV ve SWV gibi darbe temelli tekniklerin 10^{-7} M ve altına inen saptama sınırları, eser miktardaki biyoaktif bileşenlerin izlenmesini mümkün kılmaktadır.

Bununla birlikte, voltametrik yöntemlerin gıda matrislerindeki uygulamalarında göz ardı edilemeyecek bazı teknik sınırlılıklar bulunmaktadır. Örneklerdeki proteinler veya oksidasyon ürünleri elektrot yüzeyinde birikerek fouling (yüzey kirlenmesi) olgusuna yol açabilmekte ve bu durum sinyalin tekrarlanabilirliğini olumsuz etkileyebilmektedir. Birbirine yakın oksidasyon potansiyellerine sahip farklı antioksidan bileşenlerinin pik sinyallerinin üst üste binmesi, moleküler düzeydeki ayrımı güçleştirmektedir. Elektrot materyali, destek elektrolit bileşimi, pH ve tarama hızı gibi parametrelerin optimizasyonunun sonuçlar üzerinde belirleyici etkileri bulunduğundan, yöntemler arası karşılaştırılabilirliğin sağlanabilmesi için analiz koşullarının dikkatle standartlaştırılması gerekmektedir. Matrise bağlı olarak değişkenlik gösteren numune hazırlama protokolleri de evrensel bir uygulama prosedürünün oluşturulmasını zorlaştırmaktadır.

Sonuç

Voltametrik yöntemler, gıda matrislerinde antioksidan kapasitenin belirlenmesi için analitik performans, pratiklik ve maliyet etkinliği açısından güçlü bir alternatif sunmaktadır. CV, DPV ve SWV gibi tekniklerin hem gerçek örneklerde hem de çeşitli referans yöntemlerle karşılaştırmalı değerlendirmelerde tutarlı sonuçlar verdiği görülmektedir. Spektrofotometrik yöntemlerin getirdiği matris etkilerinden büyük ölçüde bağımsız olan voltametrik teknikler, özellikle optik olarak karmaşık numuneler için belirgin avantajlar sağlamaktadır.

Literatürden derlenen bulgular, voltametrik yöntemlerin salt antioksidan kapasite tayiniyle sınırlı kalmadığını; tağşiş tespiti, kontaminant analizi ve mikrobiyolojik güvenlik izleme gibi geniş bir uygulama yelpazesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Sensör teknolojilerindeki süregelen ilerlemeler ve nano-modifiye elektrotların geliştirilmesiyle birlikte, bu yöntemlerin analitik performansının daha da iyileştirileceği ve gıda endüstrisinde rutin kullanım kapsamının genişleyeceği öngörülmektedir.

Mevcut sınırlılıkların aşılması için yöntemsel standardizasyonun güçlendirilmesi, fouling sorununa yönelik yüzey modifikasyon stratejilerinin geliştirilmesi ve multivaryat kemometrik analizlerle entegrasyon ön plana çıkmaktadır. Tüm bu gelişmelerin ışığında, voltametrik yaklaşımların gıda kalite kontrolü ve güvenliği alanında vazgeçilmez araçlar olarak konumlanmaya devam edeceği değerlendirilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma KSÜ-BAP 2026/7-50 ÖNAP numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

Arteaga, J. F., Ruiz-Montoya, M., Palma, A., Alonso-Garrido, G., Pintado, S., Rodriguez-Mellad, J. M. (2012). Comparison of the simple cyclic voltammetry (CV) and DPPH assay for the determination of antioxidant capacity of active principles. *Molecules, 17*(5), 5126–5138.

Brito, R. E., González-Rodríguez, J., Montoya, M. R. (2017). Comparison of volatile antioxidant contents in aqueous and methanolic extracts of a range of commercial spices and condiments. *European Food Research and Technology, 243*(8), 1439–1445. https://doi.org/10.1007/s00217-017-2854-x

Durmuş, N. (2020). *Yeni karbonsu sensör elektrotların hazırlanması ve karakterizasyonları: Antioksidanların elektrokimyasal analizleri.* Doktora tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 119s.

Giacomino, A., Inaudi, P., Silletta, G., Diana, A., Bertinetti, S., Gaggero, E., Malandrino, M., Stilo, F., Abollino, O. (2023). Analytical methods for the characterization of vegetable oils. *Molecules, 28*(1), 153. https://doi.org/10.3390/molecules28010153

Hoyos-Arbeláez, J., Vázquez, M., Contreras-Calderón, J. (2017). Electrochemical methods as a tool for determining the antioxidant capacity of food and beverages: A review. *Food Chemistry, 221*, 1371–1381.

Jiao, Y., Kilmartin, P. A., Fan, M., Quek, S. Y. (2018). Assessment of phenolic contributors to antioxidant activity of new kiwifruit cultivars using cyclic voltammetry combined with HPLC. *Food Chemistry, 268*, 77–85.

Kahkonen, M. P., Hopia, A. I., Vuorela, H. J., Rauha, J. P., Pihlaja, K., Kujala, T. S., Heinonen, M. (1999). Antioxidant activity of plant extracts containing phenolic compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 47*(10), 3954–3962.

Karagözlü, M., Adun, P., Ozsoz, M., Aşır, S. (2024). Detection of adulteration in cold-pressed olive oil by voltammetric analysis of alpha-tocopherol on single-use pencil graphite electrode. *International Journal of Food Science and Technology, 59*(3), 1781–1788. https://doi.org/10.1111/ijfs.16931

Korkmaz, Ş., Bosnalı, W., Yılmaz, E., Mülazımoğlu, İ. E., Mülazımoğlu, A. D. (2023, 14-17 Haziran). Kare dalga voltametri (SWV) tekniği ile kalem grafit elektrot (PGE) yüzeyinde kateşin'in elektrokimyasal tayini [Konferans bildirisi]. 3. Uluslararası Lisansüstü Çalışmalar Kongresi *(IGSCONG'23)*, 318-322.

Manach, C., Scalbert, A., Morand, C., Rémésy, C., Jiménez, L. (2004). Polyphenols: Food sources and bioavailability. *The American Journal of Clinical Nutrition, 79*(5), 727–747. https://doi.org/10.1093/ajcn/79.5.727

Navarro, K. M., Silva, J. C., Ossick, M. V., Nogueira, A. B., Etchegaray, A., Mendes, R. K. (2020). Low-cost electrochemical determination of acrylamide in processed food using a hemoglobin–iron magnetic nanoparticle–chitosan modified carbon paste electrode. *Analytical Letters, 54*(6), 960–972. https://doi.org/10.1080/00032719.2020.1795668

Oroian, M., Escriche, I. (2015). Antioxidants: Characterization, natural sources, extraction and analysis. *Food Research International, 74*, 10–36.

Osorio-Valencia, A. I., de Jesús Franco-Mejía, J., Hoyos-Arbeláez, J. A., Sierra-Espinosa, Z., González-Arias, D. M. (2023). Differential pulse voltammetry evaluation of antioxidant capacity in different food matrices and its correlation with spectrophotometric methods. *Journal of Applied Electrochemistry, 53*, 2495–2505.

Panhwar, S., Hassan, S. S., Mahar, R. B., Carlson, K., Rajput, M. H., Talpur, M. Y. (2019). Highly sensitive and selective electrochemical sensor for detection of *Escherichia coli* by using L-cysteine functionalized iron nanoparticles. *Journal of The Electrochemical Society, 166*(4), B227–B235. https://doi.org/10.1149/2.0691904jes

Rojas, D., Della Pelle, F., Del Carlo, M., Fratini, E., Escarpa, A., Compagnone, D. (2019). Nanohybrid carbon black-molybdenum disulfide transducers for preconcentration-free voltammetric detection of the olive oil o-diphenols hydroxytyrosol and oleuropein. *Microchimica Acta, 186*(6), 363. https://doi.org/10.1007/s00604-019-3418-5

Silveri, F., Scroccarello, A., Della Pelle, F., Del Carlo, M., Compagnone, D. (2023). Rapid pretreatment-free evaluation of antioxidant capacity in extra virgin olive oil using a laser-nanodecorated electrochemical lab-on-strip. *Food Chemistry, 420*, 136112. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136112

Steinmetz, K. A., Potter, J. D. (1996). Vegetables, fruit, and cancer prevention: A review. *Journal of the American Dietetic Association, 96*(10), 1027–1039. https://doi.org/10.1016/S0002-8223(96)00273-8

Tsopelas, F., Konstantopoulos, D., Kakoulidou, A. T. (2018). Voltammetric fingerprinting of oils and its combination with chemometrics for the detection of extra virgin olive oil adulteration. *Analytica Chimica Acta, 1015*, 8–19. https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.02.042

Wang, J. (2000). *Analytical electrochemistry*. New York, Wiley-VCH, 209s.

Yıldırım, S., Demir, E., Gök, İ. (2020). Türk ve filtre kahve örneklerindeki toplam antioksidan kapasitelerin elektrokimyasal yöntemlerle belirlenmesi. *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 7*(1), 382-393. https://doi.org/10.35193/bseufbd.736123.

Zielińska, D., Turemko, M. (2020). Electroactive phenolic contributors and antioxidant capacity of flesh and peel of 11 apple cultivars measured by cyclic voltammetry and HPLC-DAD-MS/MS. *Antioxidants, 9*(11), Article 1054. https://doi.org/10.3390/antiox9111054

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Effect of the addition of starch and collagen to donkey milk on physicochemical, microbiological and sensory properties of yoghurt

Sude ALKAN[1]
Ece GÜNAL[1]
Kaan UYSAL[2]
Aybüke AVKIRAN[2]
Gülsen KANDEMİR[2]
Furkan HAYTAOĞLU[3]
Zeynep YILDIRIM[4]
Firuze ERGİN ZEREN[5]
Ahmet KÜÇÜKÇETİN[6]

Abstract

Cow's milk is one of the most common food allergens in infants and children. Donkey milk offers a safe alternative for individuals with a Cow Milk Protein Allergy. Donkey milk closely mimics human milk and possesses a lower casein concentration than cow's milk, hence significantly reducing its allergic potential. Moreover, its unique macronutrient composition-characterized by low levels of fat and cholesterol, with high concentrations of lactose, calcium, selenium, and vitamin D_3-provides essential nourishment for early childhood development.

As the most widely consumed fermented dairy product worldwide, yoghurt provides a highly advantageous strategy for the dietary inclusion of donkey milk. The low levels of proteins and fats in donkey milk adversely affect the consistency and viscosity of yoghurts. Various thickener agent can be utilized to address this issue.

This study aimed to develop donkey milk yoghurt with enhanced physicochemical properties through the incorporation of varying concentrations (2.0 or 4.0%) of rice starch and collagen. The total solids, protein, fat and ash content of yoghurt samples ranged between 8.65-12.37%, 2.02-5.46%, 0.90-1.00% and 0.41-0.61%, respectively. The highest titratable acidity and apparent viscosity values were found in yoghurt samples produced with donkey milk incorporating 4.0% starch. The incorporation of collagen into donkey milk did not enhance the apparent viscosity of the yoghurts. The viability of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus* remained above 10^8 cfu/g during 28 days of storage. The incorporation of starch in the composition of donkey milk represents an effective technological strategy.

Keywords: Allergy, Apparent viscosity, Donkey, Yoghurt

[1] Bachelor's student. Akdeniz University, Department of Food Engineering
[2] Food Engineer, Akdeniz University, Department of Food Engineering
[3]Master's Student, Akdeniz University, Department of Food Engineering, 0009-0001-8854-9895
[4]Master's Student, Akdeniz University, Department of Food Engineering, 0009-0008-5533-5461
[5]Associate Professor, Akdeniz University, Department of Food Engineering, 0000-0002-9751-1020
[6]Professor, Akdeniz Universiy, Department of Food Engineering, 0000-0002-0132-1581

Introduction

The prevalence of food allergy has increased over the last years. Cow's milk is one of the most prevalent food allergens (Zepeda-Ortega et al., 2021). Donkey milk is recognized as a safe and viable dietary alternative for infants diagnosed with cow's milk protein allergy (Baloš et al., 2023). Studies on donkey milk have shown that its proteins are more similar to human milk homologs than those of cow's milk (Lajnaf et al., 2023). Furthermore, while cow's milk can trigger immune responses mediated by immunoglobulin E (IgE), one of its protein-related allergic mechanisms, the risk of such reactions is considerably lower with donkey milk consumption (Derdak et al., 2020). Donkey milk contains various protective proteins, including α-lactalbumin, lysozyme, lactoferrin, lactoperoxidase, and immunoglobulins. Studies indicate that the essential amino acid content of donkey milk proteins is higher than that of mare's milk and cow's milk. Donkey milk is considered a functional food, particularly in view of its fatty acid profile, which is highly beneficial for cardiovascular health. In addition, its high concentrations of vitamins such as vitamin C and folic acid, together with its notable selenium content, have been reported to contribute to the maintenance of the immune system (Gubić et al., 2015). Donkey milk has been reported to exhibit antioxidant, antibacterial, antiviral, antifungal, hypoglycemic, and antiparasitic properties and to exert beneficial effects on growth, development, and the prevention of aging (Baloš et al., 2023).

Yoghurt is one of the most popular and widely consumed fermented dairy products in Türkiye (Ibrahim et al., 2021). Yoghurt is a dairy product produced through the fermentation of milk by *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* (Arab et al., 2023). Milk from buffalo, cow, sheep, goat, camel, and donkey can be utilised in the manufacture of yoghurt. The variations in composition of these animal's milk are essential factors influencing fermentation efficiency, texture development, and sensory quality in yoghurt manufacture (Demirhan et al., 2026). The low level of solid contents (protein and fat) in donkey milk causes difficulties in obtaining optimal yield and viscosity in yoghurt. The viscosity plays a critical role in determining yoghurt quality and sensory acceptance and consequently affects consumer preference (Salgado et al., 2021).

In literature, studies have been investigating the use of polysaccharides and proteins to improve the rheological properties of yoghurt (Huang et al., 2021). In a study evaluating the use of donkey milk in yoghurt production, the viscosity of yoghurt was enhanced using fibers derived from inulin, apple, or passion fruit. A passion fruit fiber increased the apparent viscosity of yoghurt because of its high pectin content and superior water-holding capacity (Salgado et al., 2021). Yoghurt or acid milk gels whose viscosity has been increased by starch addition are considered systems composed of intact starch granules and milk constituents, predominantly proteins. In such systems, starch granules are present in suspension together with dispersed spherical casein micelles. In recent years, the addition of starch to milk for increasing yoghurt viscosity has been frequently preferred in order to obtain favorable structural and sensory characteristics and improve overall hedonic acceptance (Wong et al., 2020).

Similar to polysaccharides, animal-derived proteins also possess the ability to increase the viscosity of fermented dairy products by preventing the separation of whey from the milk acid gel (Szopa et al., 2022). Collagen hydrolysate (hydrolyzed collagen) has been reported to improve food texture through its ability to enhance gel formation and water-holding capacity,

as well as its potential use as a fat replacer while increasing protein content. Furthermore, collagen hydrolysate is utilized in fermented dairy beverages to improve viscosity, microbiological quality, and sensory acceptance (Soutelino et al., 2024). In their study, Znamirowska et al. (2020) inoculated milk supplemented with 3% collagen protein hydrolysate with the probiotic bacteria *Bifidobacterium animalis* ssp. *lactis* Bb-12 and *Lactobacillus rhamnosus*, producing probiotic dairy products. They determined that the use of collagen protein hydrolysate did not adversely affect the sensory properties of the products, and increased gel firmness.

Although studies have investigated the use of donkey milk in the production of fermented dairy products, further research is needed to improve both the sensory and health-related properties of the products. In this context, the present study aims to produce yoghurts with improved physicochemical, microbiological and sensory properties through the incorporation of rice starch and collagen at different concentrations.

Materials and methods

The donkey milk, collagen, rice starch, and vanilla to be used in yoghurt production from donkey milk were purchased from commercial sources. The donkey milk was obtained from the Donkey Milk Farm in Antalya, Türkiye. A yoghurt starter culture (YO-FLEX M790®) was supplied from Chr. Hansen A/S (Istanbul, Turkey). Yoghurt production from donkey milk was carried out in the laboratories of the Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, Akdeniz University.

Yoghurt production from donkey milk

Donkey milk was stored at -80°C until yoghurt production. After thawing at 4°C, the milk samples were divided into five groups. The first group was used for yoghurt production without the addition of rice starch or collagen. Rice starch or collagen was added to the remaining groups at concentrations of 2% and 4%. Following the addition of 0.1% vanilla extract, the prepared donkey milk samples were pasteurized at 68°C for 30 minutes. The milk was then cooled to 43 ± 2°C and inoculated with the yoghurt starter culture. Incubation was terminated when the pH of the milk reached 4.6. The yoghurts were filled into 300 mL glass bottles and stored at 4 ± 0.2°C for 28 days (Ergin & Küçükçetin, 2024).

Analyses performed on donkey milk

The total solids, protein, fat, and ash content was determined using the gravimetric, the Kjeldahl, Gerber, and gravimetric methods, respectively (AOAC, 2000). The pH value was measured using a pH meter (Orion 2 Star, Thermo Scientific, Singapore). Titratable acidity was determined as percent lactic acid according to the method described by Erkaya et al. (2015). Ash content was determined using the gravimetric method (Kurt et al., 2012).

Analyses performed on yoghurt samples

The total solids, protein, fat and ash content of the yoghurt samples was determined according to the method described by Metin and Öztürk (2012), Özel et al. (2025), Metin and Öztürk (2012) and (Kurt et al., 2012), respectively. These analyses were performed only on the first day of storage. The pH values of all yoghurt samples were measured using a Thermo Scientific Orion 2 Star pH meter. Titratable acidity (%) was determined according to the

reference method reported by the International Dairy Federation (IDF, 1991). The apparent viscosity values of the samples were determined using a Brookfield DV II+ viscometer (Brookfield Engineering Laboratories Inc., Middleboro, United States of America) according to the method described by Shihata and Shah (2002). The syneresis values of the samples were determined according to the method described by Amatayakul et al. (2006). The pH, titratable acidity, apparent viscosity and syneresis values were determined on the 1s^{t}, 14th, and 28th days of storage.

For the preparation of dilutions in microbiological analyses, quarter-strength Ringer's solution was used. For the enumeration of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, samples were plated on MRS Agar using the pour-plate method, and Petri dishes were incubated anaerobically at 42°C for 72 hours. For the enumeration of *Streptococcus thermophilus*, samples were plated on M17 Agar using the pour-plate method, and Petri dishes were incubated at 37°C for 48 hours (İnal & Uysal, 2022). These analyses were conducted on the 1st, 14th, and 28th days of storage.

Sensory analyses

Sensory evaluation of the yoghurt samples was carried out on the 1st, 14th, and 28th days of storage by an 11-member trained panel consisting of staff members from the Department of Food Engineering, Akdeniz University, according to the method of Bodyfelt et al. (1988).

Statistical Analyses

All analyses were performed in parallel. The obtained data were subjected to analysis of variance (ANOVA), and statistically significant differences among means were compared using Duncan's Multiple Range Test (Düzgüneş et al., 1987).

Results and discussion

The mean total solids, protein, fat, and ash contents of donkey milk was found as 8.89%, 2.08%, 1.00%, and 0.43%, respectively.

Table 1. Composition of yoghurt samples

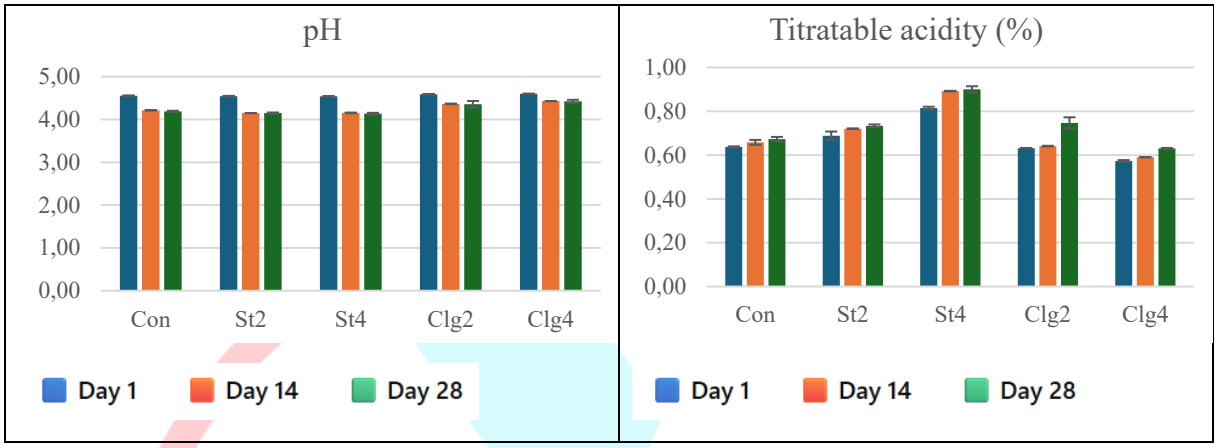
Samples	Total solids (%)	Protein (%)	Fat (%)	Ash (%)
Control (Con)	8.65±0.69	2.02±0.17	1.00±0.00	0.41±0.04
Starch 2% (St2)	10.19±0.77	2.18±0.25	0.95±0.07	0.51±0.02
Starch 4% (St4)	12.37±0.36	2.03±0.01	0.95±0.07	0.54±0.01
Collagen 2% (Clg2)	10.20±1.00	4.35±0.08	0.95±0.07	0.56±0.12
Collagen 4% (Clg4)	12.37±0.04	5.46±0.35	0.90±0.00	0.61±0.03

In the present study, the addition of starch and collagen increased the total solids content (Table 1). The lowest protein content was determined in the control sample at 2.02%, whereas the highest protein content was observed in the yoghurt produced with donkey milk supplemented with 4% collagen. Since collagen is a protein-based ingredient, the addition of 4% collagen increased the total protein content by more than twofold. These findings indicate that collagen supplementation increased the protein content and, particularly at higher

concentrations, contributes positively to the nutritional value of yoghurt. The starch or collagen additions to donkey milk caused higher ash content in the yoghurt samples.

The pH values of the yoghurt samples ranged from 4.60 to 4.54 on the first day of storage and from 4.43 to 4.14 after 30 days of storage. The titratable acidity values varied from 0.57% to 0.81% for the yoghurt samples stored for one day and from 0.63% to 0.90% for the yoghurt samples stored for 30 days (Figure 1).

Figure 1. pH and titratable acidity values of yoghurt samples



The highest pH value was found in the yoghurt samples obtained from donkey milk supplemented with collagen. Several studies reported that the addition of collagen to milk and dairy products increases pH values. In a study conducted by León-López et al. (2020), hydrolyzed collagen was added to a milk at concentrations ranging from 0.3% to 1.0% to produce whey-based beverage and reported that the sample containing 1% collagen had the higher protein and pH values than control group. Similarly, another study observed that collagen addition increased the post-fermentation pH of sheep milk and reduced lactic acid production compared with the control samples (Szopa et al., 2022). Our results agreed with these studies.

Table 2. pH and titratable acidity values of yoghurt samples

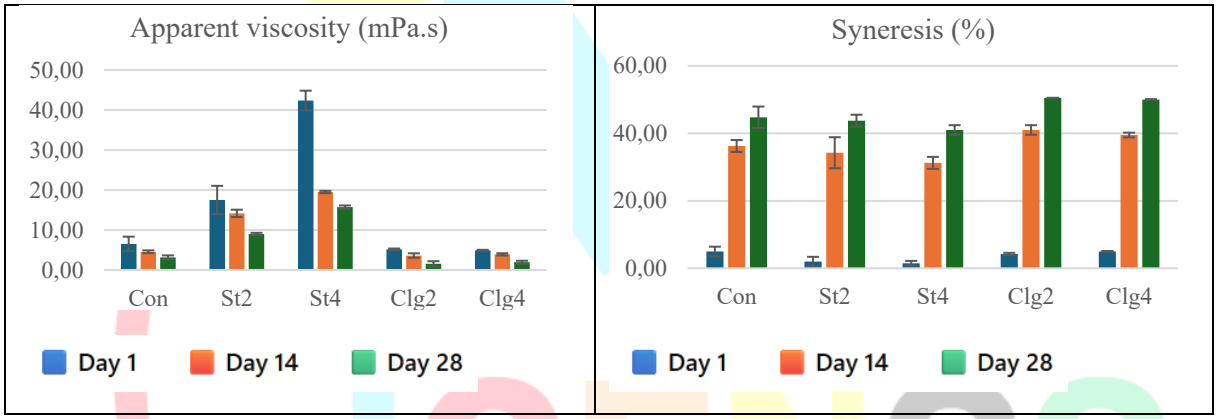
	pH	Titratable acidity (%)
Samples	***	***
Control	4.32±0.18a	0.66±0.02b
Starch	4.28±0.19c	0.79±0.09a
Collagen	4.46±0.11b	0.64±0.06b
Storage Period	***	ns
Day 1	4.57±0.03a	0.67±0.09b
Day 14	4.26±0.12b	0.70±0.11ba
Day 28	4.25±0.13b	0.74±0.10a

Values are the means ± standard deviations; different letters for each parameter in a column show significant differences using Duncan's multiple range test ($P < 0.05$). ns; not significant and $P < 0.001$, respectively.

The pH and the titratable acidity values showed a decreasing and increased trend throughout storage, respectively, because lactic acid bacteria continue their metabolic activity during storage (Table 2). Lactose is broken down, lactic acid is produced, the environment becomes more acidic, and consequently the acidity increase (Atik et al., 2026).

The St4 sample containing 4% starch, which exhibited the highest apparent viscosity value of 42.35 mPa·s on the first day of storage (Figure 2). The apparent and syneresis results demonstrated that starch supplementation was more effective than collagen supplementation in improving the viscosity properties of donkey milk yoghurt. It may be attributed to water-binding capacity of starch, which leads strengthens the yoghurt structure (Zhang et al., 2024).

Figure 2. Apparent viscosity and syneresis values of yoghurt samples



The lowest apparent viscosity value (1.55 mPa·s) was recorded in the Clg2 sample on the 28th day of storage (Figure 2). The collagen supplementation of donkey milk did not improve the viscosity values of the yoghurt samples (Table 3). The high pH and low titratable acidity values of yoghurt samples produced from donkey milk supplemented with collagen may have resulted in low apparent viscosity values. Göçer et al. (2016) demonstrated that the higher pH values led to a decrease in the viscosity of the probiotic yoghurt samples.

Table 3. Apparent viscosity and syneresis values of yoghurt samples

	Apparent viscosity (mPa.s)	Syneresis (%)
Samples	***	***
Control	4.74±1.74b	28.67±18.80b
Starch	19.70±11.19a	25.63±18.23c
Collagen	3.51±1.45b	31.71±20.46a
Storage Period	**	***
Day 1	15.28±15.17a	3.55±1.74c
Day 14	9.14±6.87b	36.45±4.13b
Day 28	6.27±5.73b	46.00±4.10a

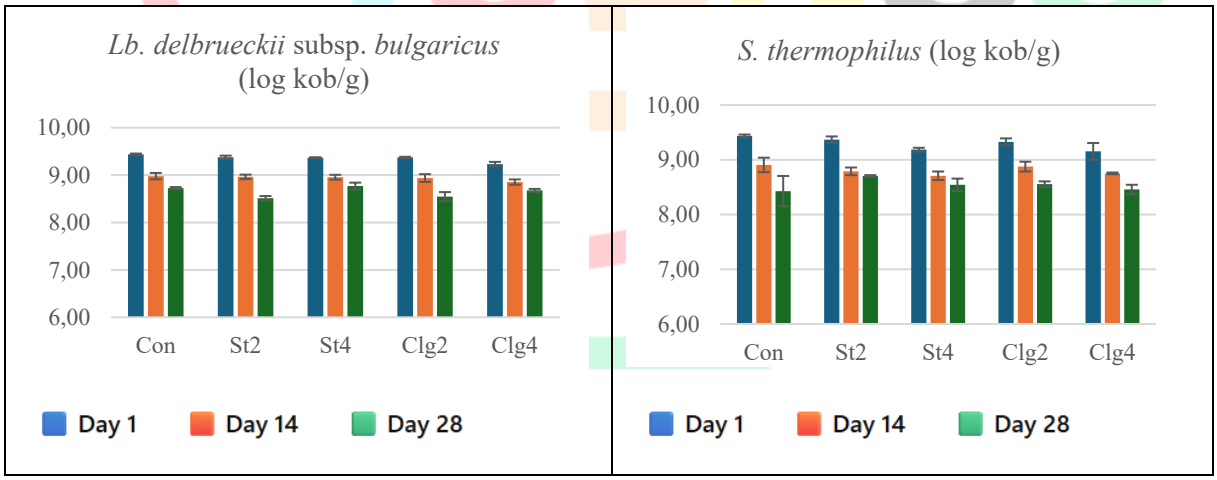
Values are the means ± standard deviations; different letters for each parameter in a column show significant differences using Duncan's multiple range test ($P < 0.05$). **, *** significantly different at $P < 0.01$ and $P < 0.001$, respectively.

Syneresis of yoghurt samples obtained from donkey milk supplemented with collagen and starch was evaluated throughout the storage period. Starch supplementation of donkey milk particularly at the 4% level, was observed to significantly improve the syneresis stability of the yoghurt. In contrast, collagen supplementation of donkey milk had only a limited effect on reducing syneresis values of yoghurt samples (Table 3)

Previous studies have reported that starch reduces syneresis and increases the apparent viscosity of yoghurt-like products. In a similar study conducted by Saleh et al. (2020), the addition of 1% starch significantly reduced syneresis in yoghurt samples ($p < 0.05$) and enhanced the water-holding capacity of the product. In another study, Ualema et al. (2024) demonstrated that the addition of modified cassava and taro starches increased the apparent viscosity of yoghurt at all shear rates, resulting in a thicker product consistency. A similar study reported that increasing starch concentration caused the continuous phase to become thicker as swollen starch granules absorbed and retained water (Wong et al., 2020). In the present study, all yoghurt samples exhibited increased syneresis during storage period.

The counts of *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus and Streptococcus thermophilus* remained at approximately 10^8 CFU/g (Figure 3). According to the Turkish Food Codex, yoghurt must contain at least 10^7 CFU/g of live yoghurt starter bacteria until the end of shelf life (Turkish Food Codex Communiqué on Fermented Milk Products, 2022). In the present study, the viable counts of yoghurt bacteria in the yoghurt samples were compliant with the Turkish Food Codex.

Figure 3. Counts of Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus and Streptococcus thermophilus in yoghurt samples



In the present study, although significant differences were found in counts of *Lb. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* among the yoghurt samples (Table 4), these differences among the results were lower than 0.5 log CFU/g, which was considered to have no practical relevance and could be attributed to minor variations in plate counts (Scott et al., 2015).

Table 4. Counts of Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus and Streptococcus thermophilus in yoghurt samples

	Lb. delbrueckii subsp. *bulgaricus* (log kob/g)	*S. thermophilus* (log kob/g)
Samples	*	-
Control	9.05±0.32a	8.92±0.47a
Starch	8.99±0.32ab	8.88±0.31a
Collagen	8.94±0.31b	8.85±0.33a
Storage Period	***	***
Day 1	9.36±0.07a	9.29±0.13a
Day 14	8.94±0.07b	8.81±0.10b
Day 28	8.64±0.12c	8.54±0.15b

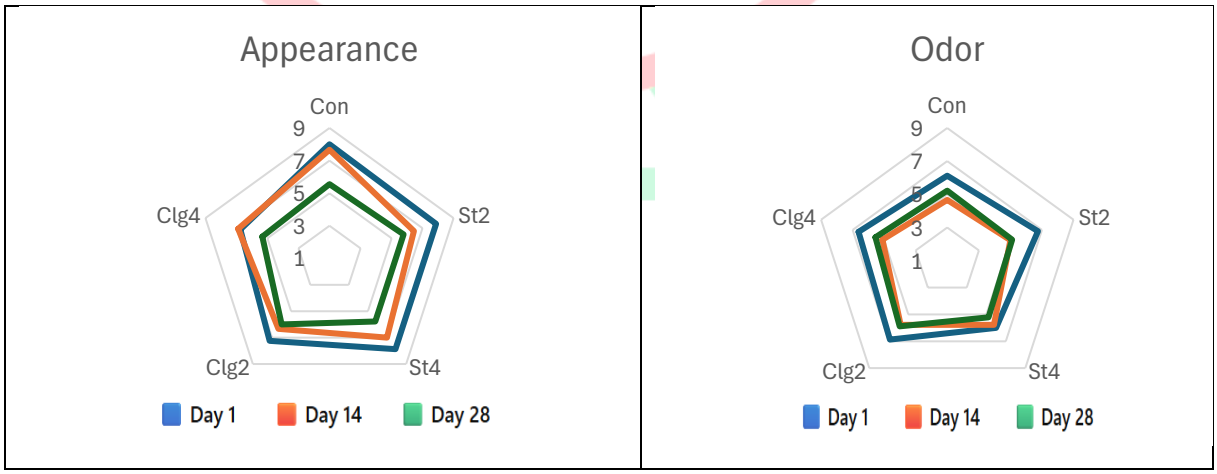
Values are the means ± standard deviations; different letters for each parameter in a column show significant differences using Duncan's multiple range test ($P < 0.05$). ns; not significant, **, *** significantly different at $P < 0.01$ and $P < 0.001$, respectively.

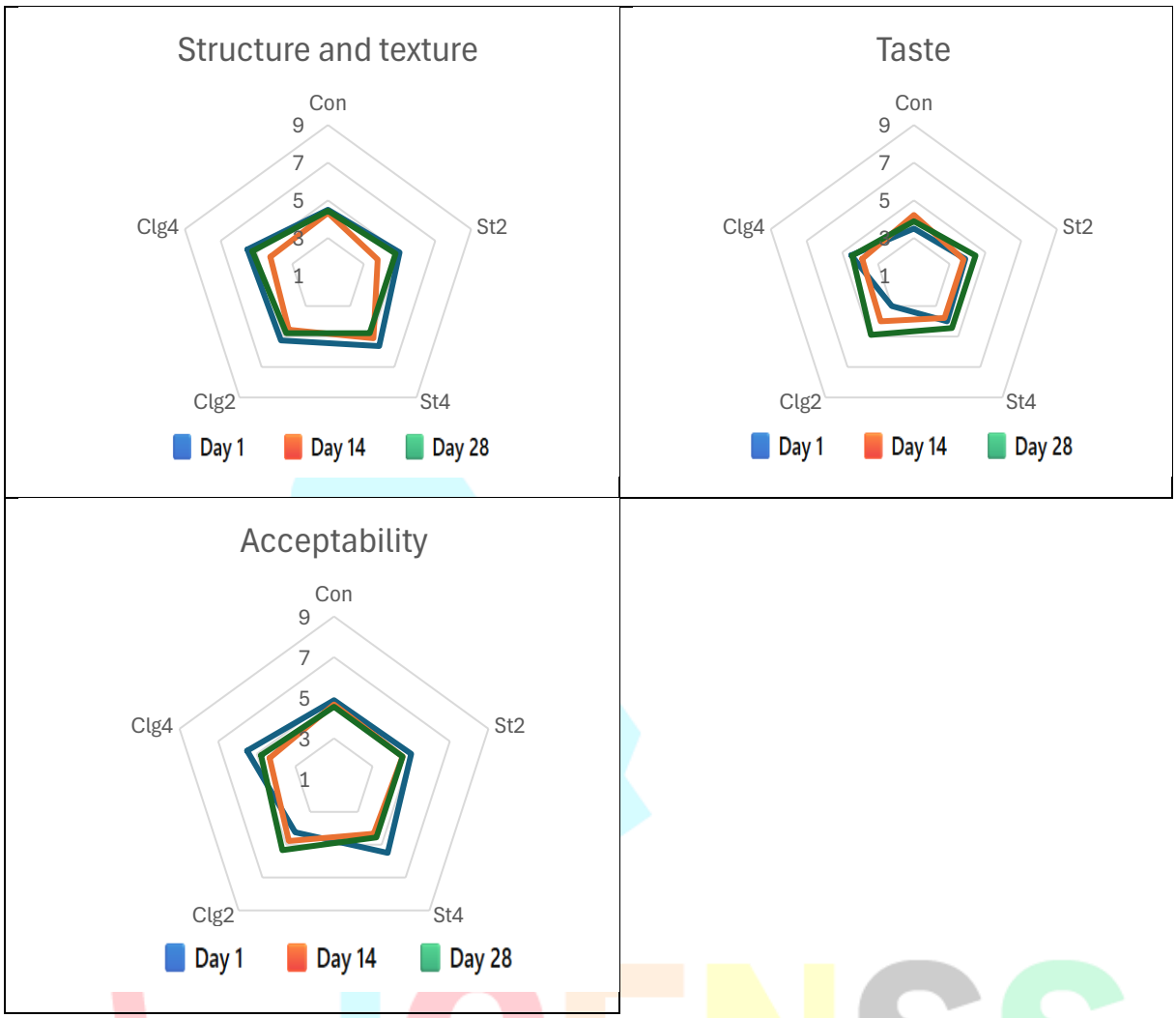
The decrease in counts of *Lb. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus* in the yoghurt samples during storage may be attributed to the decrease.

Sensory Analyses

The sensory analysis, including appearance, taste, odor, structure, texture, and overall acceptability, was evaluated for yoghurt samples produced from donkey milk. The St4 samples had the highest appearance scores on day 1, day 14, and day 28 of storage. The Clg2 sample showed the highest odor scores on day 1 and day 28, while the St4 sample achieved the highest odor score on day 14 (Figure 4).

Figure 4. Sensory analysis results of yoghurt produced from donkey milk





The yoghurt samples produced from donkey milk supplemented with starch had the highest structure and texture scores. However, the yoghurt samples produced from donkey milk supplemented with collagen showed the highest taste scores on day 1, day 14, and day 28 of storage. The panellist gave the highest overall acceptability scores to the St4 samples. However, the Clg2 samples achieved the highest overall acceptability scores on days 14 and 28 of storage.

Conclusions

The analysis results of the yoghurt samples produced from donkey milk demonstrated that the addition of 4% starch into donkey milk had a pronounced positive effect on the physicochemical properties of the product. Consequently, the starch supplementation of donkey milk had a more positive effect on the quality characteristics of yoghurt compared with collagen addition.

References

Amatayakul, T., Sherkat, F., & Shah, N. P. (2006). Syneresis in set yogurt as affected by EPS starter cultures and levels of solids. *International Journal of Dairy Technology, 59*(3), 216-221, https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2006.00264.x.

AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 2000. "Fat content of raw and pasteurized whole milk. method no. 2000.18." https://www.scribd.com/document/912361195/AOAC-Official-Method-2000-18-Fat-content-of-raw-and-pasteurized-whole-milk

Arab, M., Yousefi, M., Khanniri, E., Azari, M., Ghasemzadeh-Mohammadi, V., & Mollakhalili-Meybodi, N. (2023). A comprehensive review on yogurt syneresis: Effect of processing conditions and added additives. *Journal of Food Science and Technology, 60*(6), 1656-1665, https://doi.org/10.1007/s13197-022-05403-6.

Atik, A., Atik, İ., & Akarca, G. (2026). Determining Changes in Quality Criteria During Storage in Kefir Produced from Raw Milk Treated with Non-Thermal UV-C Radiation: Comparison of Starter Culture and Kefir Grains in Fermentation. *Fermentation, 12*(4), 181, https://doi.org/10.3390/fermentation12040181.

Baloš, M. Ž., Pelić, D. L., Jakšić, S., & Lazić, S. (2023). Donkey milk: An overview of its chemical composition and main nutritional properties or human health benefit properties. *Journal of Equine Veterinary Science, 121*, 104225, https://doi.org/10.1016/j.jevs.2023.104225.

Bodyfelt, F. W., Tobias, J., & Trout, G. M. (1988). *The Sensory Evaluation of Dairy products*. New York, USA: Van Nostrand Reinhold, https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19890431836

Derdak, R., Sakoui, S., Pop, O. L., Muresan, C. I., Vodnar, D. C., Addoum, B., Vulturar, R., Chis, A., Suharoschi, R., Soukri, A., & El Khalfi, B. (2020). Insights on health and food applications of Equus asinus (Donkey) milk bioactive proteins and peptides—an Overview. *Foods*, *9*(9), 1302, https://doi.org/10.3390/foods9091302.

Demirhan, Ş. Ş., Andiç, S., & Oğuz, Ş. (2026). Comparison of physicochemical, microbiological, and sensory properties of yogurt made from cow, goat, sheep, and buffalo milk with and without probiotic cultures. *Food Science & Nutrition*, 14(4), e71743. https://doi.org/10.1002/fsn3.71743

Düzgüneş, O., Kesici, T., Kavuncu, O., & Gürbüz, F. (1987). Araştırma ve Deneme Metotları (2. Baskı). Ankara: *Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları.*

Ergin, F., & Küçükçetin, A. (2024). Effects of changes in homogenization sequence and temperature for milk on physicochemical properties of stirred yoghurt. *Food Science and Technology International, 30*(1), 73-84, https://doi.org/10.1177/10820132221138827.

Erkaya, T., Başlar, M., Şengül, M., & Ertugay, M. F. (2015). Effect of thermosonication on physicochemical, microbiological and sensorial characteristics of ayran during storage. *Ultrasonics sonochemistry, 23*, 406-412, https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.08.009.

Göçer, E. M. Ç., Ergin, F., Arslan, A. A., & Küçükçetin, A. (2016). Farklı inkübasyon sıcaklığı ile inkübasyon sonlandırma pH'sının probiyotik yoğurdun fizikokimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri üzerine etkisi. *Akademik Gıda, 14*(4), 341-350, https://izlik.org/JA68JG23AM

Gubić, J., Milovanović, I., Iličić, M., Tomić, J., Torbica, A., Šarić, L., & Ilić, N. (2015). Comparison of the protein and fatty acid fraction of Balkan donkey and human milk. Mljekarstvo: *Dairy Experts Journal, 65*(3), 168-176, https://doi.org/10.15567/mljekarstvo.2015.0303.

Huang, T., Tu, Z., Shangguan, X., Wang, H., Zhang, L., & Bansal, N. (2021). Characteristics of fish gelatin-anionic polysaccharide complexes and their applications in yoghurt: Rheology and tribology. *Food Chemistry, 343*, 128413, https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128413.

Ibrahim, A., Naufalin, R., Muryatmo, E., & Dwiyanti, H. (2021, April). Comparative study between cow and goat milk yogurt based on composition and sensory evaluation. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 746, No. 1, p. 012001). IOP Publishing,* https://doi:10.1088/1755-1315/746/1/012001.

IDF. (1991). Yogurt: Determination of titratable acidity, https://books.google.com.tr/books/about/Yogurt.html?id=thEPtwAACAAJ&redir_esc=y

İnal, C., & Uysal, H. R. (2022). Belirli oranlarda eşek sütü katılmış inek sütlerinden üretilen yoğurtların bazı kimyasal ve mikrobiyolojik özelliklerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma. *Journal of Agriculture Faculty of Ege University, 59*(4), 661-668, https://doi.org/10.20289/zfdergi.1121102.

Kurt, A., Çakmakçı, S., & Çağlar, A., (2012). *Süt ve Mamülleri Muayene ve Analiz Metotları Rehberi* . Erzurum: Atatürk Üniv. Ziraat Fak. Ofset Basım, https://avesis.atauni.edu.tr/yayin/d3316be4-9b53-4ed5-a0f0-75fc6e2e9558/sut-ve-mamulleri-muayene-ve-analiz-metotlari-rehberi

Lajnaf, R., Feki, S., Ameur, S. B., Attia, H., Kammoun, T., Ayadi, M. A., & Masmoudi, H. (2023). Cow's milk alternatives for children with cow's milk protein allergy-Review of health benefits and risks of allergic reaction. *International Dairy Journal, 141*, 105624, https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105624.

León-López, A., Pérez-Marroquín, X. A., Campos-Lozada, G., Campos-Montiel, R. G., & Aguirre-Álvarez, G. (2020). Characterization of whey-based fermented beverages supplemented with hydrolyzed collagen: Antioxidant activity and bioavailability. *Foods, 9*(8), 1106, https://doi.org/10.3390/foods9081106.

Metin, M., & Öztürk, G. F. (2012). Süt ve mamülleri analiz yöntemleri. *Baskı, Ege Üniversitesi Yayınları, İzmir.*

Özel, E., Kızılay, H. K., Al, M., Zeren, F. E., & Küçükçetin, A. (2025). Physicochemical and Microbiological Properties of Ayran Produced from Milk Treated with Different Microbial Transglutaminase. *Akademik Gıda, 23*(2), 101-110, https://doi.org/10.24323/akademik-gida.1746609.

Saleh, A., Mohamed, A. A., Alamri, M. S., Hussain, S., Qasem, A. A., & Ibraheem, M. A. (2020). Effect of different starches on the rheological, sensory and storage attributes of non-fat set yogurt. *Foods*, *9*(1), 61, https://doi.org/10.3390/foods9010061.

Salgado, M. J. G., Ramos, M. S., Assis, D. J., Otero, D. M., Oliveira, R. L., Ribeiro, C. D. M., Costa, M. P., & Oliveira, C. A. A. (2021). Impact of fiber-rich donkey milk yogurt on apparent viscosity and sensory acceptance. *Lwt, 145*, 111494, https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111494.

Scott, B. R., Yang, X., Geornaras, I., Delmore, R. J., Woerner, D. R., Reagan, J. O., Morgan, J. B., Belk, K. E. (2015). Antimicrobial efficacy of a sulfuric acid and sodium sulfate blend, peroxyacetic acid, and cetylpyridinium chloride against Salmonella on inoculated chicken wings. *Journal of Food Protection*, *78*, 1967-1972, https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-15-170

Shihata, A., & Shah, N. P. (2002). Influence of addition of proteolytic strains of Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus to commercial ABT starter cultures on texture of yoghurt, exopolysaccharide production and survival of bacteria. *International Dairy Journal, 12*(9), 765-772, https://doi.org/10.1016/S0958-6946(02)00071-7.

Soutelino, M. E. M., Silva, A. C. D. O., & Rocha, R. D. S. (2024). Natural antimicrobials in dairy products: benefits, challenges, and future trends. *Antibiotics, 13*(5), 415, https://doi.org/10.3390/antibiotics13050415.

Szopa, K., Znamirowska-Piotrowska, A., Szajnar, K., & Pawlos, M. (2022). Effect of collagen types, bacterial strains and storage duration on the quality of probiotic fermented sheep's milk. *Molecules, 27*(9), 3028, https://doi.org/10.3390/molecules27093028.

Türk Gıda Kodeksi Fermente Süt Ürünleri Tebliği. (2022). Resmî Gazete (Sayı: 32029). Erişim adresi: Resmî Gazete PDF

Ualema, N. J. M., Muchanga, E. L., & Jeje, I. (2024). Evaluation of the rheological properties of stirred yogurt thickened with modified cassava (Manihot esculenta, Crantz) and taro (Colocasia sp.) starch. *Research, Society and Development, 13*(5), e5613545432-e5613545432, http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v13i5.45432.

Wong, S. S., Wicklund, R., Bridges, J., Whaley, J., & Koh, Y. B. (2020). Starch swelling behavior and texture development in stirred yogurt. *Food Hydrocolloids, 98*, 105274, https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105274.

Zhang, J., Tao, L., Yang, S., Li, Y., Wu, Q., Song, S., & Yu, L. (2024). Water absorption behavior of starch: A review of its determination methods, influencing factors, directional modification, and food applications. *Trends in Food Science & Technology, 144*, 104321, https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104321.

Zepeda-Ortega, B., Goh, A., Xepapadaki, P., Sprikkelman, A., Nicolaou, N., Hernandez, R. E. H., Latiff, A. H. A., Yat, M. T., & Warner, J. O. (2021). Strategies and future opportunities for the prevention, diagnosis, and management of cow milk allergy. *Frontiers in Immunology, 12*, 608372, https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.608372.

Znamirowska, A., Szajnar, K., & Pawlos, M. (2020). Probiotic fermented milk with collagen. *Dairy, 1*(2), 126-134, https://doi.org/10.3390/dairy1020008.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Friction Identification and Compensation for Enhanced Torque Control in Collaborative Robotic Actuation Systems

Ghaith ALKADDOUR[1]
Kenan IŞIK[2]

Abstract

Collaborative robots increasingly rely on compliant actuation and impedance control to achieve safe and intuitive human–robot interaction. However, static friction in servo drive systems degrades low-torque responsiveness, reduces control bandwidth, and negatively affects force transparency and interaction performance, particularly during delicate physical human–robot interaction tasks. This study presents a real-time friction identification and feedback compensation for a DC servomotor torque control system implemented on a Raspberry Pi 4 running the PREEMPT_RT real-time Linux kernel together with the Simple Open EtherCAT Master (SOEM) library. EtherCAT communication was operated in Cyclic Synchronous Torque (CST) mode to achieve deterministic communication and stable 1 kHz control cycles. Experimental analysis showed that significant static friction prevented smooth motion generation at low torque commands, requiring approximately 3–4 Nm of torque before motion initiation. To characterize this behavior, friction identification experiments were conducted using motor current and velocity measurements within the 0–29 rpm operating range. The identified static friction model was then incorporated into the control loop as a real-time friction compensation term. Following compensation, the servomotor demonstrated substantially improved low-torque response and more accurate torque tracking performance, which are critical for high-fidelity impedance control and compliant robotic interaction. System bandwidth was evaluated by integrating the DC motor in a series elastic actuator and by applying a chirp signal test with a 5 Nm amplitude and a frequency sweep from 0.1 Hz to 200 Hz over a 40-second interval. Experimental results showed that the proposed method achieved a bandwidth of 10.39 Hz while maintaining stable torque tracking characteristics. The results demonstrate that friction compensation can significantly enhance the dynamic performance, control transparency, and interaction quality of collaborative robotic systems operating under impedance control.

Keywords: Series Elastic Actuator, Friction Compensation, Real-Time Control, Torque Control

[1] M.Sc. Student, Karabük University, Department of Mechatronics Engineering, ORCID: 0009-0009-1686-0922
[2] Assist. Prof. Dr., Karabük University, Department of Mechatronics Engineering, ORCID: 0000-0002-0973-5180

Introductıon

Accurate torque control is a fundamental requirement in modern robotic actuation systems, particularly in applications involving collaborative robotics, compliant actuation, and force-controlled interaction. The quality of torque control directly affects actuator responsiveness, control bandwidth, force regulation, and overall system performance. Consequently, improving torque tracking accuracy remains an important research topic in robotic and mechatronic systems (Franklin et al., 2019; Åström & Murray, 2021).

Despite significant advances in servo drive technology, friction continues to be one of the primary factors limiting control performance. Friction introduces nonlinear effects such as dead zones, stick–slip motion, tracking errors, and reduced control bandwidth, especially during low-speed operation. Static friction is particularly problematic because a portion of the commanded torque is consumed in overcoming friction before useful motion can be generated (Armstrong-Hélouvry et al., 1994). As a result, actuator responsiveness deteriorates and torque tracking performance is significantly degraded.

To address these challenges, numerous friction modeling and compensation techniques have been proposed. Among them, the LuGre friction model has become one of the most widely adopted approaches due to its ability to represent Coulomb friction, static friction, and Stribeck effects within a unified dynamic framework (Canudas de Wit et al., 1995). Previous studies have demonstrated that accurate friction identification combined with model-based compensation can substantially improve motion control performance and tracking accuracy (Olsson et al., 1998; Freidovich et al., 2010; Lischinsky et al., 1999).

The main contribution of this work is the development and experimental validation of a real-time friction identification and compensation for Bandwidth Enhancement in Series Elastic Actuators a servo-driven torque control system operating in EtherCAT Cyclic Synchronous Torque (CST) mode. Low-speed friction characteristics were experimentally identified within the 0–29 rpm operating range, and the collected data were used to estimate the parameters of a LuGre friction model. The identified model was subsequently incorporated into the control loop as a real-time compensation term. System performance was evaluated through torque tracking experiments and chirp-based bandwidth analysis to assess the effectiveness of the proposed approach in improving low-torque responsiveness and dynamic performance.

2. Method

2.1 Experimental Platform

The experimental platform consisted of a DC servomotor torque control system implemented on a Raspberry Pi 4 running the PREEMPT_RT real-time Linux kernel. Real-time communication between the controller and the servo drive was established using the Simple Open EtherCAT Master (SOEM) library operating in EtherCAT Cyclic Synchronous Torque (CST) mode. The control loop was executed at a frequency of 1 kHz to ensure deterministic communication and stable torque control performance.

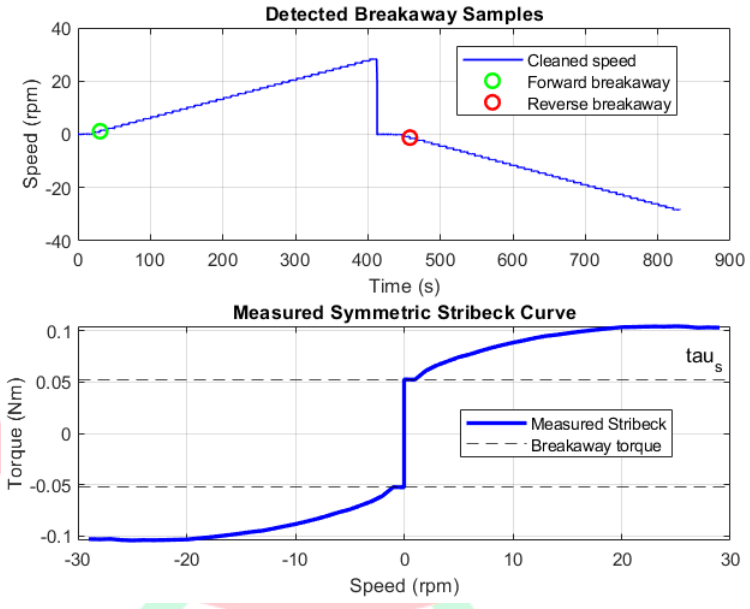
The control architecture was designed to enable direct torque control while simultaneously recording motor operating data for friction analysis. Motor velocity and current measurements were continuously monitored and logged for subsequent offline processing and parameter identification.

2.2 Friction Identification Procedure

The friction identification process was conducted to determine the static friction characteristics of the actuator and to quantify the torque required to initiate motion. Preliminary observations indicated limited actuator responsiveness at low command levels, suggesting the presence of significant friction effects near zero velocity.

To characterize this behavior, a series of low-speed experiments were performed within the operating range of 0–29 rpm. During the tests, motor speed and current measurements were continuously recorded while the actuator was gradually accelerated and decelerated in both positive and negative directions. MATLAB-based post-processing was subsequently applied to analyse the collected data and identify the breakaway points corresponding to the transition from standstill to motion.

The detected breakaway samples were used to determine the minimum current required to overcome static friction. Using the motor torque constant (K_t), the measured current values were converted into friction torque values. Figure 1 illustrates the identified breakaway samples together with the experimentally obtained symmetric Stribeck friction curve. The resulting speed–torque characteristics provided the basis for subsequent LuGre model parameter estimation.



0

Figure 21:Detected breakaway samples and experimentally measured symmetric Stribeck friction curve.

Using the motor torque constant (K_t), the measured current values were converted into torque values according to:

$$\tau_f = K_t * I$$

where τ_f represents the friction torque, K_t denotes the motor torque constant, and I represents the measured motor current.

The resulting speed–torque data provided the basis for subsequent friction modelling and parameter estimation.

2.3 LuGre Friction Modelling

Following friction identification, the experimentally obtained speed–torque data were analyzed using the LuGre friction model. The LuGre model was selected because it provides an effective representation of static friction, Coulomb friction, viscous friction, and Stribeck effects while remaining suitable for real-time implementation. The LuGre friction model can be expressed as:

$$\tau_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \omega$$

$$g_{(v)} = F_c + (F_s - F_c)e^{-(\frac{v}{v_s})^2}$$

The experimentally measured friction data were subsequently fitted to the LuGre model using MATLAB-based parameter estimation techniques. This procedure enabled the identification of the model parameters required to accurately reproduce the observed friction behaviour of the actuator over the investigated operating range. The identified LuGre model parameters were determined as F_c = 0.0842 Nm, F_s = 0.0525 Nm, V_s= 0.4979 rad/s, $\sigma_0 = 0.789\ \left(\frac{Nm}{rad}\right), \sigma_1 = 7.289618e-15\ \left(\frac{Nm*s}{rad}\right)$ and $\sigma_2 = 0.00849\ \left(\frac{Nm}{rad/s}\right)$where F_c represents the Coulomb friction torque, F_s denotes the static friction torque, and V_s corresponds to the Stribeck velocity parameter.

Figure 3 presents the comparison between the experimentally measured friction characteristics and the fitted LuGre friction curve. The close agreement between the measured data and the identified model demonstrates the capability of the LuGre model to accurately capture the friction behavior of the actuator and provides a reliable basis for the subsequent real-time friction compensation strategy.

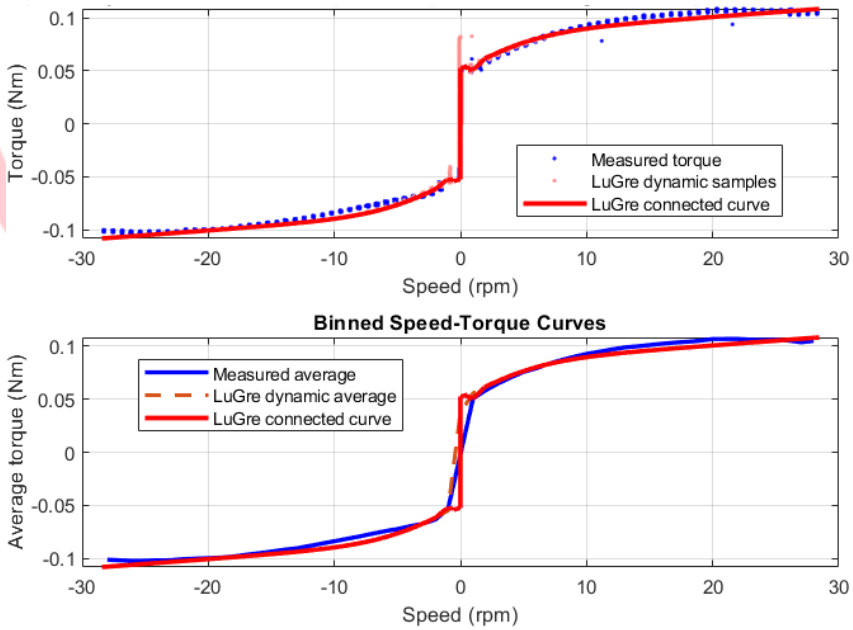


Figure 3:Experimental friction data and fitted LuGre friction model obtained from parameter estimation.

3. Results

3.1 Real-Time Friction Compensation

Following parameter identification, the estimated LuGre friction model was integrated into the torque control loop as a real-time feedback compensation term. The friction torque was continuously estimated using the identified LuGre model parameters and the measured motor velocity. The estimated friction torque was then added to the torque reference signal before transmission to the servo drive through the EtherCAT network.

This compensation approach was designed to counteract the adverse effects of friction, particularly in the low-speed operating region where static friction significantly affects actuator responsiveness. By reducing friction-induced disturbances within the torque control loop, improved motion initiation, enhanced low-speed operation, and more accurate torque tracking performance were achieved.

3.2 Bandwidth Evaluation

Before implementing the proposed friction compensation framework, the torque control system was evaluated using a chirp excitation signal to investigate its tracking performance over a wide frequency range. As shown in Figure 4, a significant tracking error was observed, particularly at low torque levels where static friction adversely affected the actuator response. The measured torque failed to accurately follow the reference signal, indicating that friction effects masked the true dynamic behaviour of the system and limited control performance.

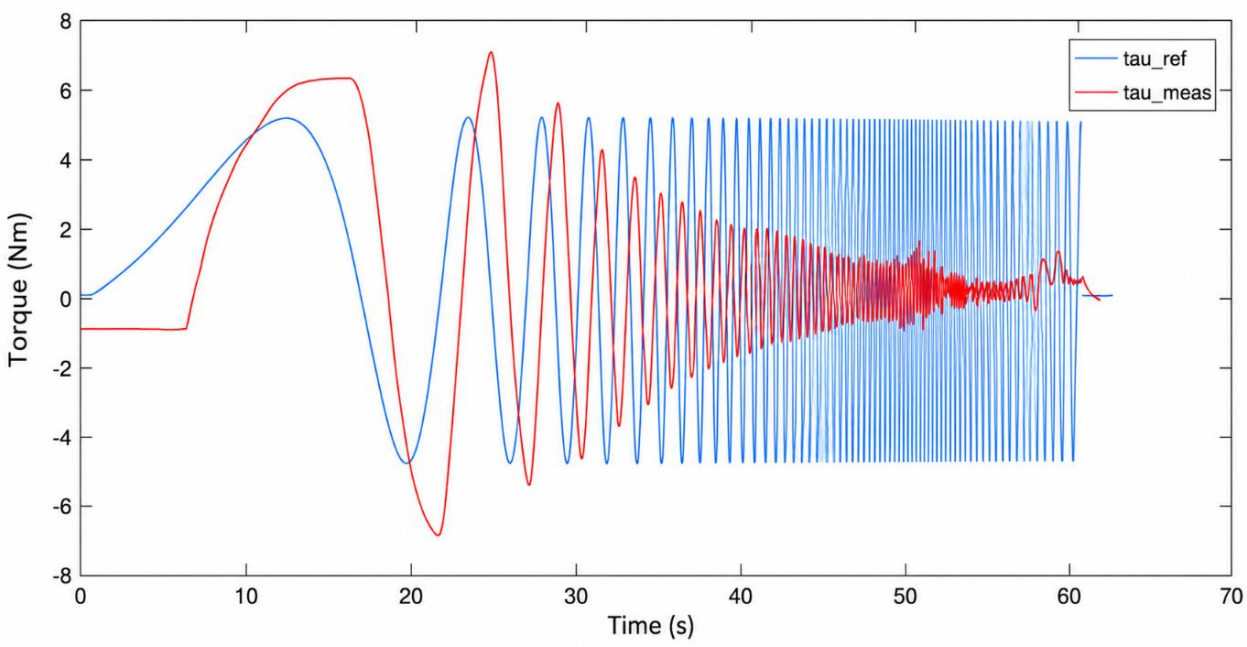


Figure 4:Tracking Performance Before Friction Compensation

To overcome this limitation, the LuGre-based friction compensation method was implemented within the torque control loop. Following compensation, the system was re-evaluated using a chirp excitation signal with an amplitude of 5 Nm. Figure 5 presents the comparison between the reference chirp signal and the measured torque response obtained during the experiment. The measured response closely follows the reference signal at low frequencies, while a gradual reduction in response amplitude can be observed as the excitation

frequency increases. The substantial improvement in tracking performance demonstrates the effectiveness of the proposed friction compensation strategy in reducing friction-induced errors and enhancing torque control accuracy.

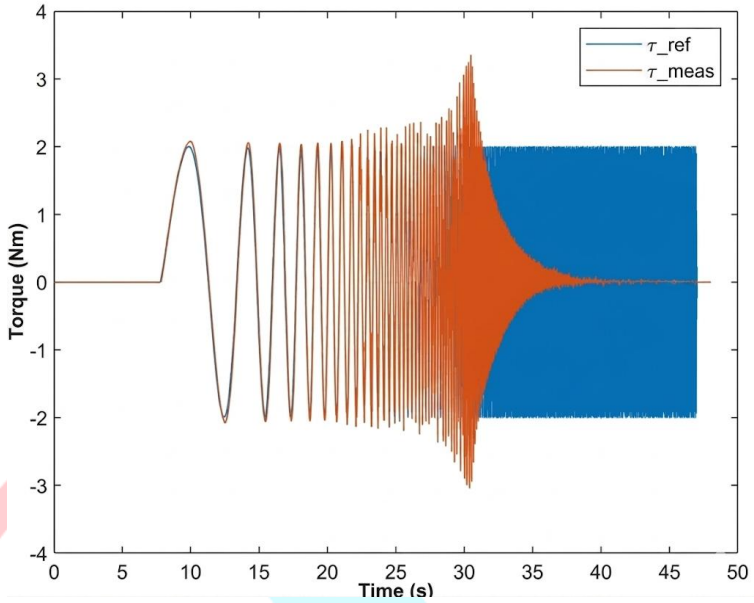


Figure 5:Comparison between the Reference Chirp Signal and the Measured Torque Response After Friction Compensation

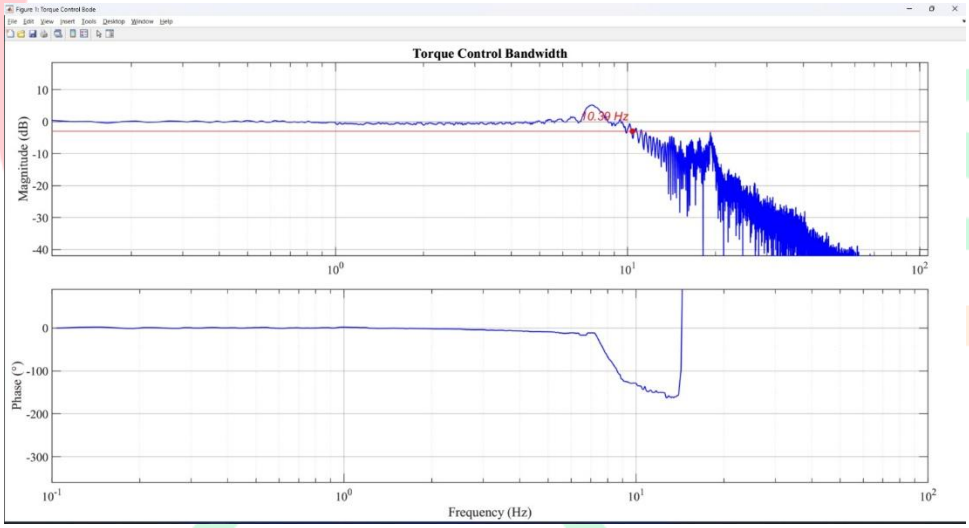


Figure 6:Bode Diagram

Before friction compensation was implemented, the servomotor exhibited significant static friction, preventing motion generation at low torque commands. Experimental results indicated that approximately 3–4 Nm of torque was required to overcome the breakaway friction and initiate movement. Following the friction identification and compensation process, the low-torque tracking performance was significantly improved. Therefore, a chirp test with an amplitude of 2 Nm was selected to evaluate the closed-loop dynamic response and determine the bandwidth of the torque control system.

During this experiment, the excitation frequency was continuously increased while the corresponding torque response was recorded throughout the test duration. The recorded

response was then analyzed in the frequency domain to determine the closed-loop bandwidth of the torque control system. The chirp-based evaluation procedure enabled the dynamic characteristics of the actuator to be assessed under realistic operating conditions and provided a quantitative measure of the effectiveness of the proposed friction compensation strategy.

Tablo 1:

Parameter	**Value**	**Unit**
Coulomb friction coefficient (Fc)	0.0842	Nm
Static friction coefficient (Fs)	0.0525	Nm
Stribeck velocity (V_s)	0.4979	rad/s
Closed-loop bandwidth	10.39	Hz
Bristle stiffness (σ_0)	0.7895	$\frac{Nm}{rad}$
Bristle damping (σ_1)	$7.289618e-15$	$\frac{Nm*s}{rad}$
Viscous friction coefficient (σ_2)	0.00849	$\frac{Nm}{(\frac{rad}{s})}$

3. CONCLUSION

This study presented a real-time friction identification and compensation framework for a servo-driven torque control system operating in EtherCAT Cyclic Synchronous Torque (CST) mode. Experimental investigations revealed that static friction significantly degraded low-torque performance, requiring approximately 3–4 Nm of torque before motion initiation and causing substantial torque tracking errors. To address this limitation, friction characteristics were experimentally identified within the 0–29 rpm operating range and modeled using the LuGre friction model.

The identified friction model was incorporated into the control loop as a real-time compensation term implemented on a Raspberry Pi 4 running the PREEMPT_RT real-time Linux kernel together with the SOEM EtherCAT master library. Experimental results demonstrated that the proposed compensation method effectively reduced friction-induced nonlinearities, improved low-torque responsiveness, and significantly enhanced torque tracking

accuracy. Comparison of the system behavior before and after compensation showed a substantial reduction in tracking errors, particularly in the low-torque operating region where static friction effects were most pronounced.

Furthermore, chirp-based bandwidth analysis demonstrated that the compensated system achieved a closed-loop bandwidth of 10.39 Hz while maintaining stable torque tracking characteristics over the tested frequency range. These results confirm that friction compensation can effectively improve the dynamic performance and transparency of torque-controlled servo systems.

Future work will focus on integrating the proposed friction compensation framework with advanced impedance control strategies and evaluating its effectiveness during physical human–robot interaction tasks in collaborative robotic applications.

REFERENCES

Canudas de Wit, C., Olsson, H., Åström, K. J., & Lischinsky, P. (1995). A New Model for Control of Systems with Friction. IEEE Transactions on Automatic Control, 40(3), 419–425.

Armstrong-Hélouvry, B., Dupont, P., & Canudas de Wit, C. (1994). A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction. Automatica, 30(7), 1083–1138.

Freidovich, L., Robertsson, A., Shiriaev, A., & Johansson, R. (2010). LuGre-Model-Based Friction Compensation. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 18(1), 194–200.

Hensen, R. H. A., Velardocchia, M., Canudas de Wit, C., & Steinbuch, M. (2003). A Comparison Between the LuGre and Switch Friction Model. Automatica, 39(12), 2131–2137.

Olsson, H., Åström, K. J., Canudas de Wit, C., Gäfvert, M., & Lischinsky, P. (1998). Friction Models and Friction Compensation. European Journal of Control, 4(3), 176–195.

Alvarez-Icaza, L., & Canudas de Wit, C. (2007). An Identifiable Control-Oriented Dynamic Friction Model. IFAC Proceedings Volumes, 40(12), 203–208.

Armstrong-Hélouvry, B. (1991). Control of Machines with Friction. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers.

Lischinsky, P., Canudas de Wit, C., & Morel, G. (1999). Friction Compensation for an Industrial Hydraulic Robot. IEEE Control Systems Magazine, 19(1), 25–32.

Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (2019). Feedback Control of Dynamic Systems (8th ed.). Pearson Education.

Åström, K. J., & Murray, R. M. (2021). Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton University Press.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Bagaj Eşik Kaplama Bileşenlerinde Yapısal Tasarım Optimizasyonu ile EPP Malzemelerinin Eliminasyonu

Reşat Oğuzhan SÜMER [1]
Orhun BOSTAN [2]

Abstract

Trunk scuff components are essential parts that ensure the aesthetic integrity of the rear body while protecting it from mechanical impacts during loading and unloading operations. To improve the strength and stiffness of these plastic components, support materials such as EPP, PU, and EPDM are commonly used. However, these additional materials increase part weight and production costs, while also introducing complexity in manufacturing and assembly processes. This study aims to eliminate the use of such support materials by implementing design improvements in the doghouse and rib (feather) structures of the trunk scuff component. Finite element analysis (FEA) was employed to validate the proposed design modifications. The simulation results show that the displacement values remain below the target limit of 10 mm, indicating that the structural performance requirements are satisfied. With the optimized design, the component maintains its structural integrity while achieving significant improvements in weight and cost efficiency.

Keywords: Trunk scuff, weight reduction, cost reduction, finite element analysis (FEA), structural optimization

[1] TOFAŞ, Arge, Orcıd: 0000-0002-7656-473X
[2] TOFAŞ, Arge, Orcıd: 0009-0008-1742-034X

1. GİRİŞ

Otomotiv sektörü son yıllarda hafifletme, maliyet azaltma, sürdürülebilirlik ve üretim verimliliği konularına yoğun şekilde odaklanmaktadır. Özellikle elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte araç ağırlığının azaltılması daha kritik hale gelmiştir. Araç ağırlığındaki her düşüş; yakıt tüketimi, enerji verimliliği, emisyon değerleri ve sürüş performansı üzerinde doğrudan olumlu etki yaratmaktadır (Mallick, 2010).

Bu kapsamda yalnızca taşıyıcı gövde elemanları değil, iç ve dış trim parçaları da optimizasyon çalışmalarının önemli bir parçası haline gelmiştir. Bagaj eşiği (trunk scuff) parçaları da bu trim bileşenlerinden biridir. Bagaj yükleme alanında konumlanan bu parçalar, kullanıcıların yükleme sırasında oluşturduğu darbeler, sürtünmeler ve mekanik zorlanmalara sürekli maruz kalmaktadır. Bu nedenle hem estetik hem de mekanik açıdan belirli performans kriterlerini karşılaması gerekmektedir (Harper, 2006).

Şekil 1 *– Bagaj Eşik Kaplama*

Bagaj eşiği parçaları genellikle polipropilen (PP) bazlı plastik malzemelerden enjeksiyon yöntemiyle üretilmektedir. Ancak plastik malzemelerin düşük rijitlik özellikleri nedeniyle, yapısal dayanımı artırmak amacıyla ek destek malzemeleri kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan destek malzemeleri şunlardır:

Expanded Polypropylene (EPP)

Polyurethane (PU)

Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM)

(Strong, 2006).

Bu destek elemanları parçanın rijitliğini artırsa da beraberinde bazı dezavantajlar getirmektedir. Öncelikle ek malzeme kullanımı toplam araç ağırlığını artırmaktadır. Ayrıca ek parça ihtiyacı; montaj operasyonlarını, üretim karmaşıklığını ve lojistik süreçlerini zorlaştırmaktadır. Çok malzemeli yapıların geri dönüşüm süreçleri de daha karmaşık hale gelmektedir (Ashby, 2011).

***Şekil 2** – Destek malzemeli çözüm ile optimize tasarım karşılaştırması*

Günümüzde Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) araçlarının gelişmesi sayesinde yapısal performans yalnızca geometri optimizasyonu ile de sağlanabilmektedir. Rib yapıları, doghouse tasarımları ve duvar kalınlığı dağılımı gibi parametreler optimize edilerek ek destek malzemelerine olan ihtiyaç azaltılabilmektedir (Rao, 2017).

Bu çalışmada, bagaj eşiği parçasındaki destek malzemelerini tamamen elimine etmek amacıyla doghouse ve rib yapılarında tasarım iyileştirmeleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan tasarım değişikliklerinin performansı Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ile doğrulanmıştır (Altair Engineering Inc., 2021).

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Hafif araç tasarımı, modern otomotiv mühendisliğinin temel araştırma alanlarından biri haline gelmiştir. Mallick (2010), araç ağırlığındaki azalmanın yakıt tüketimi ve emisyon değerleri üzerinde doğrudan etkili olduğunu belirtmiştir. Bu nedenle plastik esaslı parçaların kullanımı otomotiv sektöründe giderek artmaktadır (Mallick, 2010).

Enjeksiyonla üretilen plastik parçalarda rib yapıları rijitliği artırmak amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır. Beaumont (2007), doğru tasarlanmış rib geometrilerinin minimum ağırlık artışı ile yüksek yapısal dayanım sağlayabileceğini ifade etmiştir. Ancak yanlış rib tasarımları sink mark, çarpılma ve gerilme yoğunlaşması gibi üretim problemlerine neden olabilmektedir (Beaumont, 2007).

Doghouse yapıları ise genellikle bağlantı noktaları ve lokal destek bölgeleri oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır. Rosato ve Rosato (2000), doghouse geometrisinin yük dağılımı üzerinde önemli etkisi olduğunu belirtmiştir. Özellikle taban geçiş radiusları ve duvar kalınlıklarının optimize edilmesi, gerilme yoğunlaşmalarının azaltılmasında kritik rol oynamaktadır (Rosato ve Rosato, 2000).

Sonlu Elemanlar Analizi (FEA), otomotiv parçalarının geliştirme süreçlerinde standart doğrulama yöntemi haline gelmiştir. FEA sayesinde fiziksel prototip üretimi öncesinde gerilme, deformasyon ve dayanım davranışları analiz edilebilmektedir. Bu yaklaşım geliştirme süresini ve maliyetleri önemli ölçüde azaltmaktadır (Rao, 2017).

Literatürde rib ve doghouse optimizasyonu üzerine çeşitli çalışmalar bulunmasına rağmen, bagaj eşiği parçalarında destek malzemelerinin tamamen elimine edilmesine yönelik

çalışmalar sınırlıdır. Bu nedenle çalışma, endüstriyel uygulama açısından literatüre katkı sağlamaktadır (Gibson, 2016).

3. YÖNTEM

3.1 Parça Tanımı

Çalışma kapsamında incelenen bagaj eşiği parçası, enjeksiyon yöntemiyle üretilen PP bazlı plastik bir trim bileşenidir. Mevcut tasarımda rijitliği artırmak amacıyla parça altına EPP destek elemanları yerleştirilmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, ek destek malzemelerini tamamen kaldırarak yalnızca geometrik optimizasyon ile gerekli performansı sağlamaktır (Harper, 2006).

3.2 Tasarım Optimizasyonu

Optimizasyon çalışmaları temel olarak iki yapısal unsur üzerinde yoğunlaştırılmıştır.

3.2.1 Rib (Feather) Optimizasyonu

Rib yapıları yük transferini iyileştirmek amacıyla yeniden tasarlanmıştır. Yapılan geliştirmeler şunlardır:

Rib sürekliliğinin artırılması

Rib yükseklik/kalınlık oranının optimize edilmesi

Yük yönlerine uygun rib yerleşimi

Kritik bölgelerde çapraz rib kullanımı

Bu düzenlemeler sayesinde yüklerin daha homojen şekilde dağıtılması hedeflenmiştir.

3.2.2 Doghouse Optimizasyonu

Doghouse yapılarında lokal rijitliği artırmak amacıyla çeşitli iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir:

Geçiş radiuslarının artırılması

Duvar kalınlığı dağılımının optimize edilmesi

Doghouse-gövde bağlantılarının güçlendirilmesi

Destek yüzeylerinin iyileştirilmesi

Bu değişiklikler sayesinde gerilme yoğunlaşmalarının azaltılması amaçlanmıştır.

3.3 Sonlu Elemanlar Analizi (FEA)

Tasarım doğrulama çalışmaları ticari bir CAE yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizde kullanılan temel parametreler aşağıda verilmiştir:

Parametre	Değer
Malzeme	Talk dolgulu PP
Analiz Türü	Statik Yapısal Analiz

Parametre	Değer
Mesh Tipi	Tetrahedral
Sınır Şartı	Sabit montaj noktaları
Yükleme	Düşey yayılı yük
Hedef Yer Değiştirme < 10 mm	

Uygulanan yükleme senaryosu, gerçek kullanım koşullarındaki bagaj yükleme etkilerini temsil etmektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Mevcut Tasarımın İncelenmesi

Mevcut tasarımda kullanılan EPP destek yapıları parçanın rijitliğini artırmakta ve hedef deformasyon kriterlerini sağlamaktadır. Ancak bu yapı çeşitli dezavantajlara neden olmaktadır:

Parça ağırlığında artış

Ek üretim maliyeti

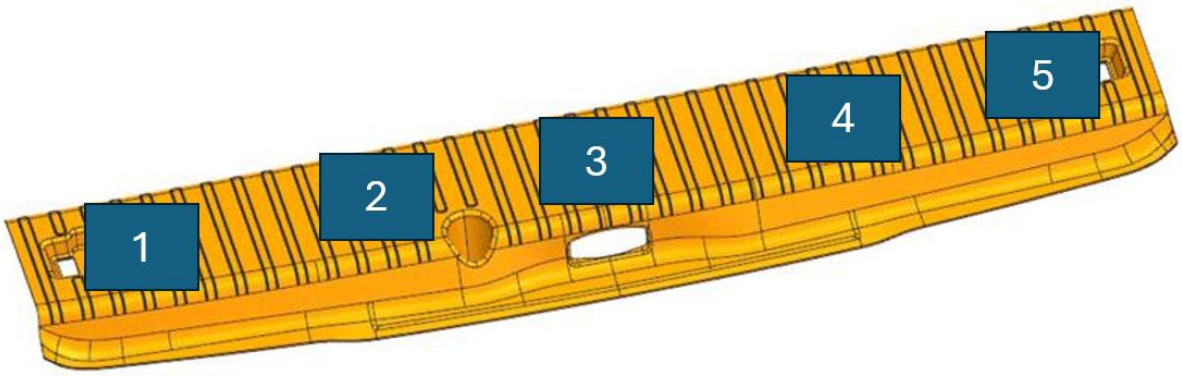
İlave montaj operasyonları

Tedarik zinciri karmaşıklığı

Geri dönüşüm zorlukları

Bu nedenle alternatif çözüm ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

EPP ilave edilmiş mevcut bagaj eşiği parçası üzerine 5 farklı noktadan 100x100 mm'lik alanlara 1100 N'luk yük uygulanmıştır, parça 6 noktadan sabitlenmiştir. Şekil 4' te parça üzerine yük uygulanan bölgeler gösterilmiştir. Tablo1' de ise ilgili bölgeler için max. yer değiştirme değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3 *– Yük uygulanan bölgeler*

Noktalar	Max. Yer Değiştirme (mm)
Nokta 1	1.67
Nokta 2	1.53
Nokta 3	1.83
Nokta 4	3.93
Nokta 5	1.39

***Tablo 1** – Mevcut tasarımın bölgelere göre yer değiştirme miktarları*

4.2 Optimize Edilmiş Tasarımın Performansı

Rib ve doghouse optimizasyonlarından sonra gerçekleştirilen FEA sonuçları, yeni tasarımın hedef kriterleri başarıyla sağladığını göstermiştir. Tablo 2'de EPP destek malzemelerinin iptal edilip tasarım optimizasyonu yapılan bagaj eşiği parçasının yer değiştirme değerleri gösterilmiştir.

Noktalar	Max. Yer Değiştirme (mm)
Nokta 1	0.33
Nokta 2	0.78
Nokta 3	0.88
Nokta 4	0.77
Nokta 5	0.4

***Tablo 2** – Optimize edilmiş tasarımın bölgelere göre yer değiştirme miktarları*

Analiz sonuçlarına göre:

Maksimum yer değiştirme değeri 10 mm sınırının altında kalmıştır.

Gerilme dağılımı daha homojen hale gelmiştir.

Kritik bölgelerdeki lokal deformasyonlar azalmıştır.

Yük transferi daha verimli gerçekleşmiştir.

Optimize edilen rib yapıları, plastik parçanın eğilme dayanımını önemli ölçüde artırmıştır. Ayrıca doghouse bölgelerinde yapılan iyileştirmeler sayesinde bağlantı noktalarındaki gerilme yoğunlaşmaları azaltılmıştır.

4.3 Ağırlık Kazancı

Destek malzemelerinin kaldırılmasıyla birlikte sistem seviyesinde önemli ağırlık avantajı elde edilmiştir. Her ne kadar bazı bölgelerde rib yoğunluğu artırılmış olsa da toplam sistem ağırlığı mevcut tasarıma göre daha düşük kalmıştır.

Ağırlık azaltımının avantajları şunlardır:

Yakıt tüketiminde azalma

Elektrikli araçlarda menzil artışı

Daha düşük karbon emisyonu

- Taşıma ve lojistik avantajı

4.4 Üretim Avantajları

Yeni tasarım üretim süreçlerinde de önemli avantajlar sağlamıştır. Destek malzemelerinin kaldırılmasıyla aşağıdaki operasyonlar ortadan kaldırılmıştır:

- Köpük parça üretimi
- İkincil montaj operasyonları
- Yapıştırıcı uygulamaları
- Ek kalite kontrol süreçleri

Bu durum üretim hattında sadeleşme ve çevrim süresinde iyileşme sağlamıştır.

4.5 Maliyet Analizi

Optimize edilen tasarım aşağıdaki nedenlerle maliyet avantajı sağlamaktadır:

- Daha düşük malzeme kullanımı
- Daha az operasyon ihtiyacı
- Daha basit lojistik süreçleri
- Azalan işçilik maliyeti

Seri üretim ölçeğinde değerlendirildiğinde küçük maliyet avantajları bile toplam proje bütçesinde ciddi tasarruf sağlayabilmektedir.

4.6 Sürdürülebilirlik Etkisi

Otomotiv sektöründe sürdürülebilirlik giderek daha önemli hale gelmektedir. Çok malzemeli sistemlerin geri dönüşümü daha karmaşık olduğu için tek malzemeli yapılar tercih edilmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen optimize tasarım şu avantajları sunmaktadır:

Daha kolay geri dönüşüm

Daha düşük atık miktarı

Daha düşük karbon ayak izi

Çevre dostu üretim yaklaşımı

Bu nedenle çalışma yalnızca teknik değil çevresel açıdan da önemli katkılar sunmaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada otomotiv bagaj eşiği parçasında kullanılan destek malzemelerinin, geometrik tasarım optimizasyonu ile elimine edilmesi incelenmiştir. Çalışma kapsamında rib ve doghouse yapıları yeniden tasarlanmış ve yapısal performans Sonlu Elemanlar Analizi ile doğrulanmıştır.

Analiz sonuçları optimize edilen tasarımın maksimum 10 mm yer değiştirme kriterini başarıyla sağladığını göstermiştir. Böylece EPP, PU veya EPDM gibi ek destek malzemelerine ihtiyaç duyulmadan gerekli rijitlik performansı elde edilmiştir.

Çalışma sonucunda aşağıdaki kazanımlar elde edilmiştir:

Parça ağırlığında azalma

Üretim maliyetinde düşüş

Daha basit montaj süreci

Geliştirilmiş geri dönüşüm kabiliyeti

Üretim verimliliğinde artış

Sonuç olarak, CAE destekli geometrik optimizasyon yöntemlerinin otomotiv trim parçalarında yüksek potansiyele sahip olduğu görülmüştür. Gelecek çalışmalarda fiziksel test doğrulamaları, yorulma analizleri ve topoloji optimizasyonu yöntemleri kullanılarak daha ileri geliştirmeler yapılabilir.

Kaynakça

Mallick, P. K., *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, Woodhead Publishing, 2010.

Beaumont, J. P., *Runner and Gating Design Handbook*, Hanser Publishers, 2007.

Rosato, D. V. ve Rosato, M. G., *Injection Molding Handbook*, Springer, 2000.

Harper, C. A., *Handbook of Plastics Technologies*, McGraw-Hill, 2006.

Strong, A. B., *Plastics: Materials and Processing*, Pearson Education, 2006.

Osswald, T. A. ve Menges, G., *Material Science of Polymers for Engineers*, Hanser Publications, 2012.

Rao, S. S., *The Finite Element Method in Engineering*, Butterworth-Heinemann, 2017.

Ashby, M. F., *Materials Selection in Mechanical Design*, Elsevier, 2011.

Gibson, R. F., *Principles of Composite Material Mechanics*, CRC Press, 2016.

Altair Engineering Inc., *Finite Element Analysis Theory Manual*, 2021.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

TEDARİK ZİNCİRİNDE YER ALAN FİRMALARİN ÜRETİM VE ÜRÜN GELİŞTİRME SÜRECİNE ENTEGRASYONU

Ali AKTAŞ[1]
Sami SAYER[2]
Aydın ÜLKER[3]

Özet

Endüstride rekabet, bireysel firmaların performansından çok tedarik zinciri yapılanmalarının verimliliği ve inovasyon kapasitesi tarafından belirlenmektedir. Bu çalışma, tedarik zincirindeki firmalarının üretim ve ürün geliştirme süreçlerine entegrasyonunu stratejik ve örgütsel bir bakış açısıyla incelemektedir. Bu kapsamda OEM'ler, tedarikçi ve yardımcı endüstriler ile stratejik ortakların entegre üretim alanlarındaki rolleri ele alınmaktadır.

OEM'lerin yalnızca nihai ürün montajı yapan yapılar olmaktan çıkarak karmaşık tedarik ağlarını yöneten "ekosistem düzenleyicileri" haline geldiği vurgulanmaktadır. Bu çerçevede 1., 2. ve 3. kademe tedarikçiler, Erken Tedarikçi Katılımı (ESI) yaklaşımı sayesinde ürün geliştirme süreçlerine aktif katkı sağlayarak maliyet optimizasyonu, kalite artışı, tasarım hatalarının azaltılması ve pazara sunma süresinin kısaltılması gibi faydalar yaratmaktadır. Ayrıca yardımcı endüstriler operasyonel süreklilik ve üretim verimliliği açısından kritik rol oynamaktadır.

Bu çalışma, teknolojik yetkinliklerin geliştirilmesi ve risk paylaşımı amacıyla kurulan stratejik ortaklıkların önemine de dikkat çekmektedir. Bu iş birliklerinin başarısı; teknik yeterlilik, finansal sürdürülebilirlik ve uzun vadeli stratejik uyum gibi çok boyutlu kriterlere bağlıdır. Sonuç olarak, etkin entegrasyon modern üretim ekosistemlerinde sürdürülebilir rekabet avantajı ve operasyonel mükemmelliğin temel belirleyicisi olarak öne çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tedarik Zinciri Yönetimi, Ürün Geliştirme Süreci, Üretim

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, Ege Üniversitesi, Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi, Orcıd: 0009-0004-7377-9999
[2] Prof. Dr., Ege Üniversitesi, Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi, Orcıd: 0000-0001-7204-0560
[3] Dr. Öğr. Üyesi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orcıd: 0000-0002-23179-7376

GİRİŞ

Küreselleşmenin hız kazanması, teknolojik gelişmelerin üretim süreçlerini dönüştürmesi ve müşteri beklentilerinin sürekli değişmesi, işletmelerin rekabet anlayışında köklü değişimlere neden olmuştur. Günümüzde işletmeler yalnızca maliyet, kalite ve teslimat performansı üzerinden değil; aynı zamanda inovasyon kapasitesi, dijitalleşme düzeyi, sürdürülebilirlik ve esneklik yetkinlikleri üzerinden de rekabet etmektedir. Artan ürün karmaşıklığı, teknolojik dönüşüm ve değişen müşteri beklentileri, firmaları geleneksel üretim anlayışından uzaklaştırarak daha entegre, iş birliğine dayalı ve teknoloji odaklı yapılara yöneltmiştir.

Ürün çeşitliliğinin artması ve müşteri taleplerinin daha kişiselleştirilmiş hale gelmesi, firmaları geleneksel üretim ve yönetim anlayışından uzaklaştırarak daha entegre, iş birliğine dayalı ve teknoloji odaklı yapılara yöneltmiştir. Bu dönüşüm süreci, işletmelerin yalnızca kendi iç kaynaklarıyla rekabet etmesini yetersiz hale getirmiş; tedarikçiler, stratejik partnerler, müşteriler ve diğer paydaşlarla kurulan güçlü iş birliklerini rekabet avantajının temel unsurlarından biri haline getirmiştir.

Ürün geliştirme süreçleri, işletmelerin rekabet avantajı elde etmesinde en kritik faaliyet alanlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Yeni Ürün Geliştirme (New Product Development-NPD) süreçlerinde alınan kararların, ürün maliyetinin büyük bir bölümünü doğrudan etkilediği bilinmektedir. Literatürde, ürün maliyetlerinin yaklaşık %70'inin tasarım ve geliştirme aşamalarında belirlendiği ifade edilmektedir. (Sendler, 2013*)* Bu nedenle stratejik partnerlerin ve tedarikçilerin ürün geliştirme sürecine erken aşamalarda dahil edilmesi, maliyet optimizasyonu, ürün kalitesinin artırılması, geliştirme sürelerinin kısaltılması ve inovasyon kapasitesinin güçlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Erken Tedarikçi Katılımı (Early Supplier Involvement-ESI) yaklaşımı, işletmelerin dış kaynaklardan elde edilen teknik uzmanlık, üretim deneyimi ve yenilikçi çözümleri ürün geliştirme süreçlerine entegre etmesini sağlayarak daha rekabetçi ürünlerin geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0 dönüşümleriyle birlikte dijitalleşmenin ürün geliştirme süreçleri üzerindeki etkisi daha da belirgin hale gelmiştir. Yapay zeka, büyük veri analitiği, nesnelerin interneti (IoT), dijital ikiz teknolojileri, bulut bilişim ve akıllı otomasyon sistemleri; ürün tasarımı, mühendislik analizleri, üretim planlama ve kalite yönetimi süreçlerinde önemli avantajlar sağlamaktadır.

Sonuç olarak, firmaların etkin entegrasyonu, modern üretim ekosistemlerinde sürdürülebilir rekabet avantajı, operasyonel mükemmellik ve dijital dönüşüm için kilit bir faktör olarak tanımlanmaktadır.

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE TEORİK ÇERÇEVE

2.1. YENİ ÜRÜN GELİŞTİRME SÜRECİ

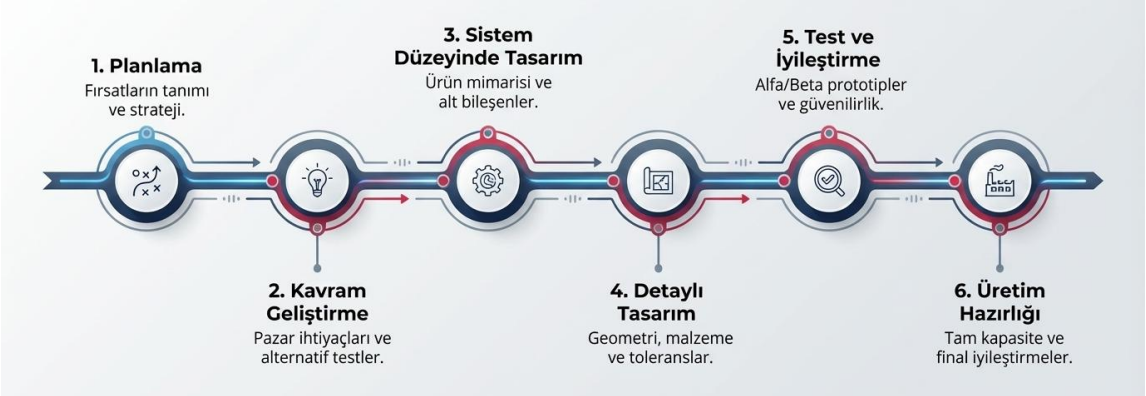
Ürün geliştirme, bir pazar fırsatının algılanmasıyla başlayan ve ürünün tasarımını, üretimini, pazarlama ve satışını, satış sonrası hizmetleri içeren bir dizisidir. Başarılı bir süreç; ürün kalitesi, ürün maliyeti, geliştirme süresi, geliştirme maliyeti ve geliştirme yeteneği olmak üzere beş boyutta değerlendirilir.

Ürün geliştirme, müşteri beklentilerini karşılayacak şekilde mevcut ürünleri iyileştirme ve yeni ürünler yaratma sürecidir. Süreç genellikle bir fırsat belirleme aşamasıyla başlar. Bir ürün geliştirme misyon beyanı oluşturulduktan sonra, amaç, fırsatı mümkün olan en iyi ürün haline getirmektir.

Ürün geliştirme süreci, bir işletmenin bir ürünü tasarlamak, geliştirmek ve ticarileştirmek için izlediği adımlar veya aktiviteler dizisidir. Bu süreçteki birçok adım ve aktivite, fiziksel olmaktan ziyade entelektüel ve organizasyoneldir. Bazı kuruluşlar, kesin ve ayrıntılı bir geliştirme süreci tanımlayıp buna uyarlar; bazıları ise süreçlerini net bir şekilde tanımlayamayabilir. Dahası, kuruluşun farklı farklı iş ve ürün geliştirme süreçleri vardır. Aynı işletme bile, farklı türde geliştirme projeleri için birbirinden farklı süreçler izleyebilir. Bu çeşitlilik, ürün geliştirme süreçlerinin işletmenin ihtiyaçlarına ve projenin özelliklerine göre uyarlanabilir olmasının önemini vurgular. (Ulrich, 1995)

2.1.1 Ürün Geliştirme Sürecinin Ana Aşamaları

Ürün geliştirme süreci, bir ürünün fikir aşamasından pazara sunulmasına kadar izlenen sistematik bir dizi adımdan oluşur. Bu süreç, başarılı ve yenilikçi bir ürün ortaya koymak için her biri belirli bir amaca hizmet eden temel aşamaları içerir: planlama, kavram geliştirme, sistem seviyesi tasarım, detaylı tasarım, test ve iyileştirme ile üretim hazırlığı. (Şekil 1) Her aşama, ürünün hedef pazar ihtiyaçlarını karşılamasını ve ticari başarı elde etmesini sağlamak için birbirini tamamlayan bir yapı sunar. (Ulrich, 1995)



Şekil 1. Ürün Geliştirme Süreci Aşamaları

Planlama (Faz 0): Kurumsal strateji rehberliğinde fırsatların tanımlandığı ve proje görev tanımının oluşturulduğu aşamadır.

Konsept Oluşturma: Hedef pazar ihtiyaçlarının belirlendiği, alternatif ürün konseptlerinin üretilip test edildiği ve en uygun çözümün seçildiği evredir.

Sistem Düzeyinde Tasarım: Ürün mimarisinin tanımlandığı, ürünün alt sistem ve bileşenlere ayrıldığı aşamadır.

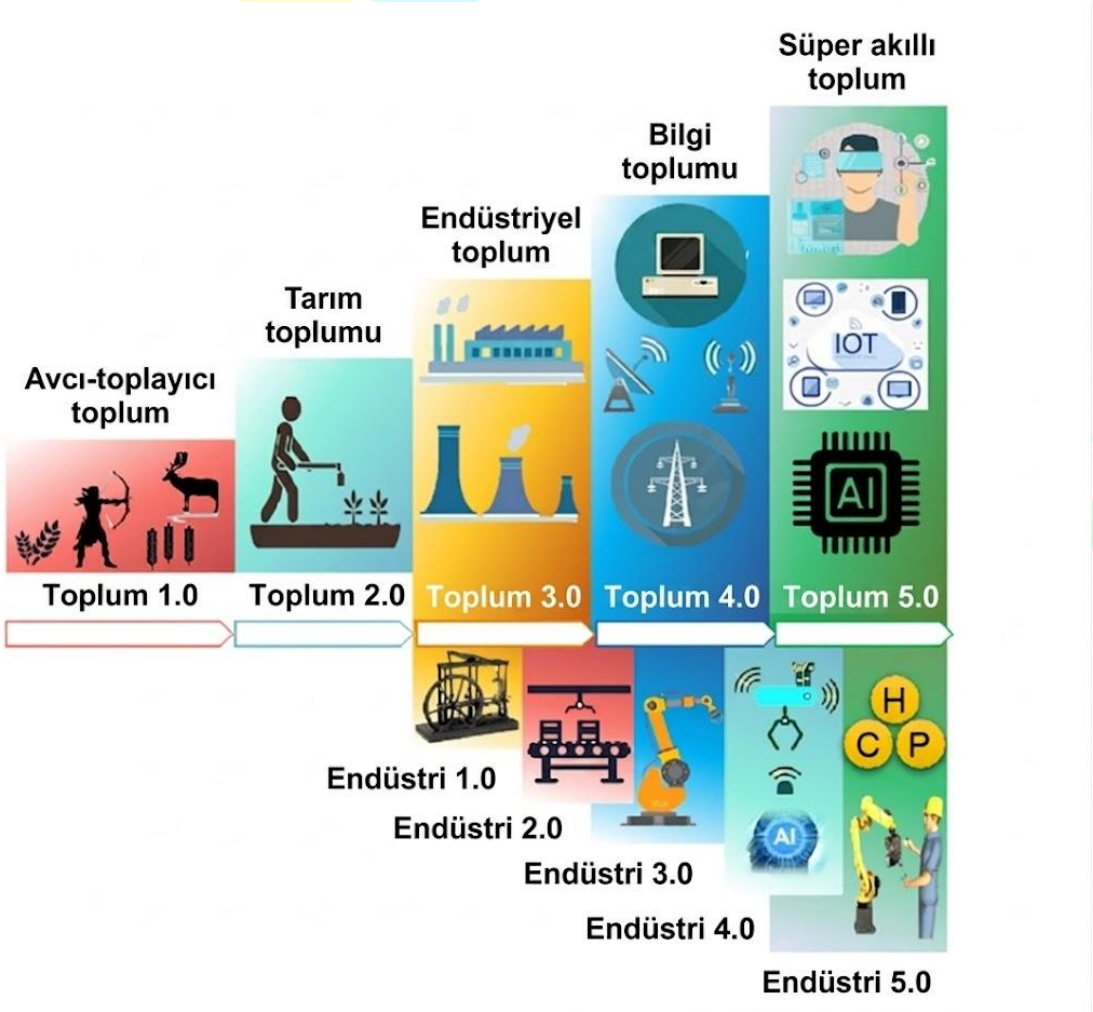
Detaylı Tasarım: Ürünü oluşturan tüm parçaların geometrisinin, malzemesinin ve toleranslarının eksiksiz belirlenerek üretim dokümantasyonunun hazırlandığı evredir.

Test ve İyileştirme: Üretim öncesi prototiplerin (alfa ve beta) oluşturularak ürünün müşteri ihtiyaçlarını karşılama düzeyinin ve güvenilirliğinin değerlendirildiği aşamadır.

Üretim Hazırlığı (Ramp-up): Üretim sisteminin tam kapasite çalışmaya başladığı, iş gücünün eğitildiği, üretim sonrası servis hizmetlerinin planlandığı ve kalan hataların giderildiği final evresidir. (Ulrich, 1995)

2.1.2 Ürün Geliştirme Süreçlerindeki Değişim

Dünyada üretim süreçleri, 18. yüzyılın sonunda buhar gücüyle başlayan Endüstri 1.0'dan, günümüzün siber-fiziksel sistemlerine ve siber-güvenliğe odaklanan Endüstri 4.0'a kadar büyük bir dönüşüm geçirmiştir. İlk üç sanayi devrimi sırasıyla mekanizasyon, elektrik enerjisi ve otomasyon tarafından yönlendirilmiş, tarım toplumundan üretim temelli bir ekonomiye geçişi sağlamıştır. Günümüzde ise Endüstri 4.0, nesnelerin interneti (IoT), yapay zeka (AI) ve büyük veri analitiği gibi teknolojilerle makinelerin birbiriyle gerçek zamanlı veri alışverişi yaptığı bir ekosistem yaratmaktadır. Bu teknoloji odaklı yaklaşım, son yıllarda yerini insan refahını ve sürdürülebilirliği merkeze alan Endüstri 5.0 vizyonuna bırakmaya başlamıştır.



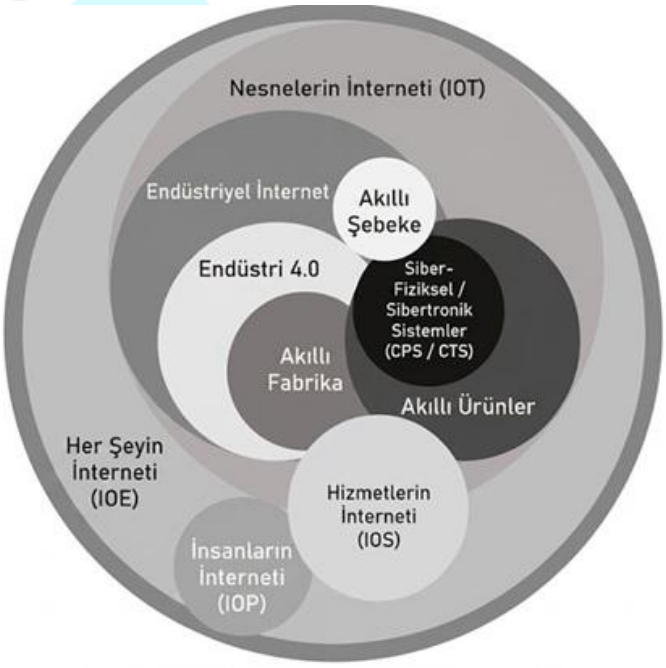
Şekil 2. *Toplumsal dönüşüm ve endüstriyel evrim (Sihan Huang, Wang Li, Zheng, 2022)*

Türkiye'de ürün geliştirme süreci kavramı, gelişmiş ülkelere kıyasla nispeten yenidir ve tarihsel olarak farklı evrelerden geçmiştir. 1980'li yılların başında Türkiye'deki yardımcı sanayi kuruluşları, tasarımları ana üreticiler tarafından yapılan parçaların tedariğinde sadece üretici olarak yer almış, tasarım katkıları oldukça sınırlı kalmıştır. 1990'lı yıllarda ise uzmanların fiziksel olarak aynı ortamda bulunduğu çalışma metotları ön plana çıkmıştır.

Günümüzde Türkiye'deki kuruluşlar, uluslararası standartlara (VDI-2221 gibi) uyum sağlamaya ve Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) platformlarını kullanarak tasarım, üretim ve tedarik süreçlerini yeniden yapılandırmaya başlamıştır. ***(Sayer & Ülker, 2014)***

Küresel ölçekte Yeni Ürün Geliştirme (NPD) disiplini, son 30 yılda mühendislik ve işletme alanlarının iç içe geçmesiyle çok disiplinli bir yapıya bürünmüştür. Geleneksel doğrusal modeller, yerini daha esnek, yinelemeli ve çevik yaklaşımlara bırakmıştır.

Geleneksel NPD süreçleri, yüksek belirsizlik ve düşük ticari başarı oranları (%30 civarı) ile karakterize edilmektedir. Ancak, Dördüncü Sanayi Devrimi ile birlikte Yapay Zeka (AI) ve dijitalleşme, bu süreci kökten değiştirerek daha hızlı, verimli ve veriye dayalı bir bilgi sürecine dönüştürmüştür.



Şekil 3. *Üretimde Dijitalleşme ve Yeni Teknolojiler Şeması*

2.1.3. Ürün Geliştirmenin Stratejik Elemanları

Ürün geliştirme projeleri, birbiriyle iç içe geçmiş beş ana sistem veya alan üzerinden yönetilir.

Ürün Sistemi: Geliştirilen ürünün tasarımı, mimarisi, bileşenleri ve bu bileşenler arasındaki ilişkileri kapsar.

Süreç Sistemi: Ürünü geliştirmek için yapılması gereken işler, faaliyetler ve bu faaliyetlerin zaman içindeki sıralamasını içerir.

Organizasyon Sistemi: Projede yer alan insanların, ekiplerin ve departmanların yapılandırılmasıdır.

Araç Sistemi: Çalışmaları yürütmek için kullanılan bilgi teknolojileri (IT), yazılımlar ve ekipmanlardır.

Hedef Sistemi: Projenin amaçları, gereksinimleri, kısıtlamaları ve stratejik hedefleridir. (Mike Danilovic & Tyson R. Browning, 2006)

2.2. TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİ

Tedarik zinciri yönetimi (SCM), bir ürün veya hizmetin hammaddeden nihai müşteriye kadar olan tüm akışını kapsayan geniş bir alanı içerir. SCM'nin strateji, planlama ve operasyonel yönleri etkilemektedir. Lojistik stratejileri SCM'nin önemli bir parçasıdır.

Modern endüstride rekabet, tekil işletmelerden ziyade tedarik zinciri ekosistemleri arasında gerçekleşmektedir. Orijinal Ekipman Üreticileri (OEM), yan sanayi kuruluşları ve stratejik ortaklar arasındaki ilişkilerin dinamik yapısı, bir ürünün fikir aşamasından geri dönüşümüne kadar uzanan yaşam döngüsü yönetimini doğrudan belirler. Tedarik zincirindeki aktörlerin rolleri, stratejik iş birliklerinin doğası, seçim süreçlerinde kullanılan modern sayısal yöntemler ve kurumsal kültürün iş birliği başarısı üzerindeki kritik etkisi büyük öneme sahiptir.

SCM'deki değer yaratımının, tedarik zinciri performansını iyileştirmeye yönelik hem dışsal hem de kurum içi çabaların bir sonucu olduğunu belirtmektedir. Bu, SCM'nin hem teorik hem de pratik açıdan işletmeler için kritik önem taşıdığını göstermektedir. (Budenford, 2024)

Endüstriyel şirketlerde satın alma faaliyetlerinin toplam ciro içindeki payı %50 ile %90 arasında değişmekte, bu da tedarikçi kararlarını karlılığın temel belirleyicisi haline getirmektedir. Organizasyonlar tedarikçilere daha bağımlı hale geldikçe, hatalı karar vermenin sonuçları daha ağırlaşmaktadır. Bu durum, tedarikçi seçim ve değerlendirme süreçlerinin daha sistematik, şeffaf ve analitik modellere dayalı olarak yürütülmesini zorunlu kılmaktadır. (Budenford, 2024)

2.2.1 Üretimde Yer Alan Yardımcı Sanayi Firmalarının Yapısal Değişimi

Üretim ekosistemindeki yardımcı sanayi firmaları, geleneksel "yan sanayi" tanımından "stratejik iş ortağı" ve "genişletilmiş işletme" kavramlarına doğru evrilmiştir. Geleneksel modelde tedarikçiler sadece fiziksel girdi sağlayan birimler olarak görülürken, modern yaklaşımlarda ürün geliştirme süreçlerine en erken aşamada dahil olan paydaşlar haline gelmiştir.

2.2.2 Orijinal Ekipman Üreticisi (OEM)

OEM'ler modern endüstriyel ekosistemlerde temel taşlardan biri olup tarihsel süreçte anlamı ve üstlendiği stratejik rol açısından büyük bir evrim geçirmiştir. Günümüzde OEM'ler yalnızca üretim yapan birimler değil, karmaşık tedarik ağlarını yöneten bir yapı haline gelmiştir.

1990'lı yıllarda OEM terimi, başka bir şirketin nihai ürününe giren parça ve bileşenleri üreten tedarikçileri ifade etmek için kullanılırken, günümüzde bu anlam yer değiştirmiştir. Modern literatürde OEM, tedarikçilerden gelen parça ve sistemleri birleştirerek nihai ürünü oluşturan, bu ürüne kendi markasını veren ve pazara sunan ana üreticiyi tanımlar. (Stark, 2011) Örneğin otomotiv sektöründe Ford veya Toyota, farklı tedarikçilerden gelen binlerce parçayı birleştirerek "Ford" veya "Toyota" markalı araçları ürettikleri için OEM olarak kabul edilirler. (Oliveira, Nunes & Afonso, 2019)

Özellikle yüksek teknoloji endüstrilerinde sadece fiziksel malların değil, "İnovasyon Tedarik Zinciri" kapsamında patent, lisans ve Ar-Ge hizmetleri gibi meta değişimlerinin yaşandığı yeni bir yapı ortaya çıkmıştır. Bu yapıda tedarikçiler, sadece parça üreten birimler değil, inovasyon akışını yöneten stratejik partnerlerdir. Ayrıca, modüler ürün tasarımları, birinci

seviye tedarikçilerin rolünü değiştirerek onları tüm modüllerden sorumlu olan ve kendi alt tedarikçi ağlarını yöneten sistem entegratörlerine dönüştürmüştür**.** (M. Pero, 2010)

2.2.3 OEM'in Rolü

Geleneksel üretim modellerinde OEM'ler, tedarik zincirleri üzerinde tam kontrole sahip oldukları dikey olarak entegre edilmiş yapılar kuruyordu. Ancak dijital dönüşüm, elektrifikasyon ve otonom sürüş gibi trendler bu yapıyı yatay olarak organize olmuş kompleks bir ekosisteme dönüştürmüştür.

Yönetim Görevi: Modern OEM'ler artık her şeyi kendi bünyelerinde üretmek yerine; yazılım geliştiricileri, enerji sağlayıcıları ve sensör üreticileri gibi çok çeşitli paydaşları ortak bir stratejik hedef doğrultusunda yönetmektedir.

Müşteri Deneyimi Yönetimi: Özellikle elektrikli araç (EV) çağında OEM'in rolü, araç satışının ötesine geçerek; şarj altyapısı, yazılım güncellemeleri ve sürekli servis hizmetlerini içeren tüm müşteri yolculuğunu yönetmeye odaklanmıştır.

2.1.4 Tedarikçi Türleri ve Seviyeleri

Tedarik zinciri, özellikle otomotiv ve havacılık gibi karmaşık üretim süreçlerine sahip sektörlerde, hiyerarşik bir yapıda organize edilen farklı seviyelerdeki tedarikçilerden oluşur. Kaynaklara göre bu seviyelerin özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

Birinci Seviye Tedarikçiler

Birinci seviye tedarikçiler, Orijinal Ekipman Üreticileri (OEM) ile doğrudan çalışan ve onlara ürün sağlayan firmalardır. Günümüzde bu tedarikçiler yalnızca parça üretimi yapmakla kalmayıp, aynı zamanda modül ve sistem bazında üretim sorumluluğu da üstlenmektedir. Özellikle otomotiv sektöründe alternatör statörü gibi kritik bileşenleri üreten firmalar bu gruba örnek olarak gösterilebilir. Tedarik zincirinde entegrasyonun güçlenmesiyle birlikte OEM'ler, batarya teknolojileri ve otonom sürüş sistemleri gibi stratejik alanlarda 1. Seviye tedarikçileriyle yakın iş birliği kurmakta ve bu firmaları ürün geliştirme süreçlerinin erken aşamalarından itibaren sürece dahil etmektedir.

1. Seviye tedarikçileri, kendilerine parça sağlayan alt kademedeki (2. seviye) tedarikçi ağlarını koordine etme görevini de üstlenirler

İkinci Seviye Tedarikçiler

İkinci seviye tedarikçiler, birinci seviye tedarikçilere parça, alt montaj ve çeşitli bileşenler sağlayan işletmelerdir. Bu firmalar ağırlıklı olarak Tier 1 tedarikçilerine hizmet vermekle birlikte, bazı durumlarda doğrudan Orijinal Ekipman Üreticileri (OEM) veya belirli alanlarda uzmanlaşmış kuruluşlarla da çalışabilmektedir. Genellikle belirli üretim teknolojileri ve teknik yetkinlikler üzerinde uzmanlaşan 2. Seviye tedarikçiler, karmaşık bileşenlerin üretimini gerçekleştirerek tedarik zincirinin verimliliğine, esnekliğine ve sürekliliğine önemli katkılar sağlamaktadır.

Üçüncü Seviye Tedarikçiler

Üçüncü seviye tedarikçiler , tedarik zincirinin üst kademelerinde yer alan ve ikinci seviye tedarikçilere hammadde veya temel bileşen sağlayan firmalardır. Bu işletmeler

genellikle maliyet odaklı faaliyet gösterdiklerinden "düşük maliyetli emtia tedarikçileri" olarak değerlendirilmektedir. Faaliyetleri büyük ölçüde sipariş yönetimi, ürün maliyetlendirme, ürün modifikasyonu ve tersine mühendislik gibi süreçlere odaklanmaktadır. Üretimde modülerleşmenin yaygınlaşmasıyla birlikte OEM'ler daha az sayıda ancak daha yüksek yetkinliğe sahip 1. Seviye tedarikçileriyle çalışmayı tercih etmeye başlamış, bunun sonucunda sistem tedarikçisi konumundaki 1. Seviye firmalar, kendi tedarik ağlarında yer alan 2. Seviye ve 3. Seviye tedarikçilerin koordinasyonu ve yönetiminden daha fazla sorumlu hale gelmiştir. (Stark, 2011)

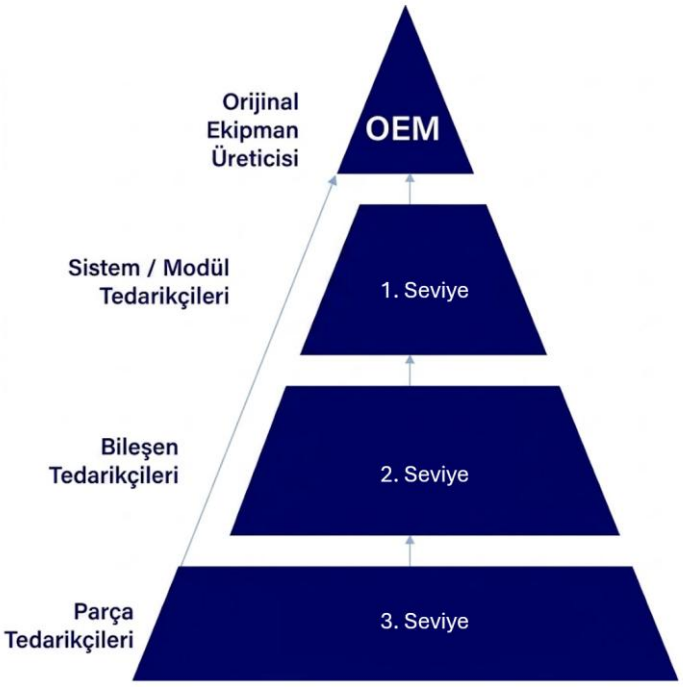
Tablo 1. Tedarikçi Ekosistem Matrisi

Kriter	**Seviye 1**	**Seviye 2**	**Seviye 3**
Tanım & Rol	Sistem entegratörleri (örn. batarya veya otonom sürüş). Kendi alt ağlarını (Seviye 2/3) koordine ederler.	Alt montaj ve karmaşık bileşen uzmanları.	Hammadde ve temel emtia tedarikçileri.
OEM ile İlişki	Doğrudan, stratejik iş birliği. Ar-Ge süreçlerine dahil olurlar.	Genellikle Seviye 1'e hizmet verir; nadiren OEM ile doğrudan çalışır.	Seviye 2'ye hizmet verir. Hiyerarşinin temelidir.
Stratejik Odak	Modüler üretim, inovasyon ve sistem sorumluluğu.	Belirli üretim teknolojileri, teknik yetkinlik ve esneklik.	Maliyet odaklılık, sipariş yönetimi, tersine mühendislik.

2.1.5 OEM, Tedarik Zinciri ve Ürün Geliştirme İlişkisi

Son dönemde OEM'ler, yalnızca üretim faaliyetlerini yürüten firmalar olmaktan çıkmış; ürünün fikir aşamasından kullanım ömrünün sonuna ve geri dönüşüm süreçlerine kadar tüm yaşam döngüsünü yöneten stratejik merkezler hâline gelmiştir. Bu kapsamda OEM'ler, ürün geliştirme süreçlerini daha verimli hâle getirebilmek amacıyla tedarikçilerini erken aşamalarda sürece dahil ederek maliyet avantajı sağlamayı, inovasyonu hızlandırmayı ve teknik bilgi paylaşımını artırmayı hedeflemektedir.

Özellikle, erken tedarikçi katılımı yaklaşımı, ürün geliştirme süreçlerinde iş birliğini güçlendiren önemli bir unsur olarak öne çıkmaktadır. (Strak, 2011) Bununla birlikte, modüler ürün mimarileri sayesinde ürün konfigürasyonlarının karmaşıklığı azaltılmakta, tasarım ve sistem yönetimi OEM tarafından sürdürülürken üretim faaliyetleri sözleşmeli üreticilere aktarılabilmektedir. ***(M. Pero, 2010)*** Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) platformlarının kullanımı ise tüm tedarik zinciri boyunca ortak ve güvenilir bir veri altyapısı oluşturarak "Tekil Doğruluk Kaynağı" anlayışını desteklemektedir. Böylece ürün verileri, mühendislik değişiklikleri ve süreç yönetimi dijital ortamda entegre biçimde yönetilebilmektedir.



Şekil 4. *Tedarikçi piramidinin görselleştirilmesi*

TEDARİKÇİ SEÇİMİ VE DEĞERLENDİRME KRİTERLERİ

Modern iş dünyasında satın alma fonksiyonunun idari bir görevden stratejik bir belirleyiciye dönüşmesi, tedarikçi seçimi ve değerlendirme süreçlerini işletme karlılığının ve rekabet gücünün temel direklerinden biri haline getirmiştir. Tedarikçi seçimi süreci, sadece en düşük maliyetli teklifi veren tarafı bulma çabasının ötesine geçerek, işletmenin uzun vadeli stratejik hedefleriyle uyumlu, tamamlayıcı yeteneklere sahip ve riskleri paylaşabilen paydaşların belirlenmesini hedefleyen sistematik bir yaklaşımdır. Bu süreç genel olarak problemin tanımlanması, kriterlerin formüle edilmesi, tedarikçilerin nitelendirilmesi (ön eleme) ve nihai seçimin yapılması olmak üzere dört ana aşamadan oluşur.

Değerlendirme kriterleri, projenin veya satın almanın karmaşıklığına bağlı olarak çeşitlilik gösterse de temel olarak teknik fizibilite, ticari uygulanabilirlik, finansal analiz ve yasal uyumluluk çerçevesinde şekillenir. Teknik açıdan tedarikçinin üretim kapasitesi, teknolojik yetkinliği, Ar-Ge birikimi ve fikri mülkiyet haklarını yönetme becerisi, özellikle yüksek teknoloji içeren ürün geliştirme projelerinde kritik bir seçim kriteridir. Finansal boyut ise adayın karlılık oranları, yatırım getirisi potansiyeli, finansal gücü ve uzun vadeli sürdürülebilirliği gibi metriklerle derinlemesine incelenir; zira yanlış iş ortağı seçimi işletme için ciddi sermaye kayıplarına ve itibar risklerine yol açabilir.

Stratejik ortaklıkların başarısı için kriterler sadece sayısal verilerle sınırlı kalmayıp; kurumların stratejik odak noktaları, operasyonel beklentileri ve kültürel dokuları arasındaki uyumu da kapsamalıdır. Ortak bir vizyonun paylaşılması, şeffaf iletişim kanallarının oluşturulması ve taraflar arasında karşılıklı güvene dayalı bir ilişkinin tesisi, operasyonel çatışmaların minimize edilmesi ve iş birliğinin ömrünün uzatılması açısından hayati öneme sahiptir. Ayrıca, küreselleşen pazarlarda tedarikçinin lojistik altyapısı, pazar bilgisi, regülasyonlara uyum kabiliyeti ve etik iş uygulamaları da vazgeçilmez değerlendirme unsurları arasında yer alır.

Başarılı bir tedarikçi seçimi; finansal, teknik ve kültürel kriterlerin işletmenin özgün ihtiyaçlarına göre odaklandırıldığında, veriye dayalı ve risk odaklı bir yönetim süreci gerektirmektedir. (Tjemkes, Pepijin Vos & Burgers, 2012)

Tedarik Zincirindeki Firmaların Üretim ve Ürün Geliştirme Süreçlerine Entegrasyonu

Tedarik zincirinde yer alan firmaların süreçlere entegrasyonu, günümüzün rekabetçi ve karmaşık iş ortamında işletmelere önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu entegrasyonun temel aşamaları şöyle açıklanabilir.

Erken Tedarikçi Katılımı (Early Supplier Involvement - ESI): Tedarikçiler ürün geliştirme sürecine sadece üretim aşamasında değil, tasarımın en başında, ana modüller belirlenirken dahil edilir. Bu sayede tasarım hataları erkenden tespit edilir ve üretim maliyetleri %70 oranında tasarım aşamasında belirlendiği için büyük tasarruf sağlanır. (Farhad Ameri & Deba Dutta, 2013)

Eşzamanlı Mühendislik ve İşbirliği: Tasarım, mühendislik ve üretim planlama süreçleri tedarikçilerle eşzamanlı olarak yürütülür. Bu işbirliği, ürünün pazara sunum süresini (TTM) %50'ye kadar kısaltırken, geliştirme deneyiminin daha hızlı artmasını sağlar. (John Stark, 2011)

Ortak Tasarım ve Yenilik (Co-creation): Tedarikçiler ve perakende ortakları, pazar verilerini ve teknik uzmanlıklarını paylaşarak ürünü birlikte geliştirirler. Bu durum, "çekme" (pull) modeliyle pazar ihtiyaçlarına tam uyum sağlayan ve operasyonel mükemmelliği artıran ürünlerin ortaya çıkmasını sağlar. (Santiago, 2020)

Dijital Entegrasyon ve Veri Şeffaflığı: Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) ve Endüstri 4.0 teknolojileri (IoT, Bulut vb.) kullanılarak tedarik zinciri boyunca gerçek zamanlı bilgi akışı sağlanır. Tedarikçilerin bu sistemlere entegre olması, tasarım değişikliklerinin ve konfigürasyon yönetiminin tüm paydaşlarca anlık takibini ve izlenebilirliği mümkün kılar. (Martin Eigner, 2020)

Stratejik İttifaklar ve Risk Paylaşımı: Firmalar arası kurulan stratejik ortaklıklar sayesinde büyük projelerin finansal yükü ve operasyonel riskleri paydaşlar arasında dağıtılır. Bu ortaklıklar, ölçek ekonomisinden yararlanarak inovasyon hızını artırır ve yeni pazarlara girişi kolaylaştırır (DAVID T. CARLSON, 2019)

SONUÇ

Günümüz üretim koşullarında, rekabetin artık tekil firmalar arasında değil, bütünleşik tedarik zinciri ağları ve ekosistemlerin kolektif verimliliği üzerinden şekillendiği görülmektedir. Bu yeni yapıda OEM'ler, sadece nihai ürünü birleştiren birimler olmaktan çıkıp, karmaşık tedarik ağlarını yöneten ve stratejik hedefler doğrultusunda paydaşları koordine eden yönetim kanallarına dönüşmüştür. Özellikle Erken Tedarikçi Katılımı yaklaşımının benimsenmesi, ürün maliyetlerinin yaklaşık %70'inin belirlendiği tasarım ve geliştirme aşamalarında dış teknik uzmanlığın sürece dahil edilmesini sağlayarak maliyet optimizasyonu, hata oranlarının azaltılması ve pazara sunum süresinin %50'ye kadar kısaltılması açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Yardımcı sanayi kuruluşları ve stratejik partnerlerin operasyonel süreklilik, teknolojik yetkinlik ve risk paylaşımı konularındaki katkıları, üretim ekosisteminin inovasyon kapasitesini

doğrudan güçlendirmektedir. Endüstri 4.0 ile gelen dijitalleşme süreci, PLM gibi platformlar üzerinden "tekil doğruluk kaynağı" anlayışını yerleştirerek, tedarik zinciri boyunca gerçek zamanlı veri şeffaflığı ve eşzamanlı mühendislik uygulamalarını mümkün kılmaktadır.

Sonuç olarak, firmalar arasındaki bu derin ve stratejik entegrasyon, modern üretim dünyasında operasyonel mükemmelliği sağlamak, dijital dönüşümü başarıyla gerçekleştirmek ve sürdürülebilir bir rekabet avantajı elde etmek için kilit faktör olarak tanımlanmaktadır.

KAYNAKLAR

Ameri, F., & Dutta, D. (2013). Product lifecycle management: Closing the knowledge loops. Springer.

Browning, T. R., & Danilovic, M. (2006). Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices. International Journal of Project Management.

Bodendorf, F., Feilner, S., & Franke, J. (2024). How do joint ventures and non-equity strategic alliances impact the complexity of the supply chain and thus supply chain performance? Institute for Factory Automation and Production Systems, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Carlson, D. T. (2019). Emerging risks spur strategic alliances in manufacturing and automotive industries.

Eigner, M. (2020). System lifecycle management. Springer.

Gallino, S. (2020). New product development in an omnichannel world.

Huang, S., Wang, B., Li, X., Zheng, P., Mourtzis, D., & Wang, L. (2022). Industry 5.0 and Society 5.0—Comparison, complementation and co-evolution

Oliveira, J., Nunes, M., & Afonso, P. (2019). New product development in the context of Industry 4.0: Insights from the automotive components industry. In J. Reis, S. Pinelas, & N. Melão (Eds.), Industrial Engineering and Operations Management II (pp. 83–94). Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14973-4_8

Pero, M. (2010). A framework for the alignment of new product development and supply chains.

Sendler, U. (2013). Industrie 4.0 – Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM. Springer-Verlag.

Sayer, S., & Ülker, A. (2015). Ürün yaşam döngüsü yönetimi. Mühendis ve Makine, Cilt: 55 Sayı: 657

Stark, J. (2011). Product lifecycle management. Springer.

Tjemkes, B., Vos, P., & Burgers, K. (2012). Strategic alliances management. Routledge.

Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (1995). Product design and development. McGraw-Hill.

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

The Ecological Significance of Native Flood-Tolerant Riparian Species in Floodplain Ecosystems

Gülkız EKRİ[1]
Ayşe ÖZTÜRK PULATOĞLU[2]
Nagihan SEKİ[3]

Abstract

Climate change-induced increases in extreme precipitation events have significantly intensified the frequency and impacts of floods and inundation disasters. In particular, the narrowing of stream channels, degradation of natural floodplains, and reduction of vegetation cover disrupt the natural hydrological and ecological balance, thereby decreasing ecosystem resilience against flooding. Although conventional engineering practices play an important role in mitigating flood risks, the need for sustainable and ecologically based approaches has been steadily increasing. In this context, riparian ecosystems are regarded as critical natural buffer zones due to their essential functions in regulating hydrological regimes, controlling erosion, and maintaining habitat continuity.

A review of the ecological literature indicates that areas where natural riparian vegetation is preserved experience lower flood impacts, reduced erosion, and improved water quality. Furthermore, native flood-tolerant species contribute substantially to ecosystem resilience and biodiversity conservation owing to their high adaptive capacities. In this study, the ecological functions of native plant species naturally occurring in riparian ecosystems and capable of tolerating flood conditions were investigated. Species naturally distributed in riparian zones in Türkiye, including *Salix alba*, *Populus nigra*, *Alnus glutinosa*, *Tamarix smyrnensis*, *Phragmites australis*, *Fraxinus angustifolia*, and *Platanus orientalis*, were evaluated in terms of their root structures, sediment retention capacity, effects on reducing surface runoff velocity, and contributions to water infiltration. In addition, the role of riparian vegetation in minimizing soil loss during flood events and its potential to strengthen ecological connectivity between aquatic and terrestrial habitats were examined.

As a result, rather than focusing solely on structural engineering solutions in flood management, utilizing the ecological functions of riparian plant species should be considered an important strategy for sustainable disaster management. The conservation and widespread use of native flood-resistant plant species in flood-prone areas provide an effective ecosystem-based solution for reducing hydrological risks associated with climate change.

Keywords: Climate change, flash floods, riparian vegetation, native plant species, Türkiye.

[1] Unvan, Üniversite, Bölüm, Orcıd: Kastamonu University, Department of Landscape Architecture, 234412035@ogr.kastamonu.edu.tr https://orcid.org/0009-0005-6697-8612
[2] Unvan, Üniversite, Bölüm, Orcıd: Associate Professor, Kastamonu University, Department of Forest Engineering, ayseozturk@kastamonu.edu.tr https://orcid.org/0000-0002-7673-8170
[3] Unvan, Üniversite, Bölüm, Orcıd: Assistant Professor Dr., Karabük University, Department of Forest Engineering, nagihanseki@karabuk.edu.tr https://orcid.org/0000-0002-4367-6153

Introduction

Riparian zones are dynamic ecotonal transition areas characterized by high levels of biodiversity, functioning as critical interfaces that regulate the flow of matter, energy, and nutrients between aquatic and terrestrial ecosystems (Naiman & Décamps, 1997: 621; Keleş Özgenç, 2024: 233). These areas play a key role in maintaining the sustainability of hydrological cycles and watershed integrity by providing essential ecosystem services, including slowing surface runoff, retaining sediments, controlling streambank erosion, and improving water quality (Keleş Özgenç, 2024: 235; Akturk et al., 2024: 13). However, recent land-cover analyses conducted across Türkiye indicate that 44.8% of these sensitive buffer zones are occupied by grasslands and 32.2% by agricultural lands, while riparian areas dominated by trees and shrubs, which are responsible for performing primary ecological functions, account for only 16.1% of the total riparian landscape (Akturk et al., 2024: 8; Atesoglu et al., 2025: 11855). This severe fragmentation and insufficiency of forest cover within riparian corridors compromises the hydrological buffering capacity of watersheds and reduces ecosystem resilience to extreme flood events intensified by climate change. The ongoing process of global climate change, through the Clausius–Clapeyron relationship, increases the atmosphere's moisture-holding capacity by approximately 7% for every 1°C rise in temperature, thereby increasing both the frequency and magnitude of sudden, intense, and unpredictable flood events across the Mediterranean Basin and Türkiye (Alay, 2026: 8; IPCC, 2021). Future climate projections (RCP8.5 / SSP5-8.5) suggest that by 2100, the frequency of extreme precipitation events in Türkiye may increase by up to 30%, while annual maximum precipitation levels could rise by as much as 15% (Alay, 2026: 4; IPCC, 2021). Conventional flood-control approaches largely rely on grey infrastructure, such as concrete channels, levees, and dams. However, these structural engineering solutions often disrupt river connectivity and, in the long term, exacerbate channel erosion and habitat degradation (Opperman et al., 2017: 164). Under such ecological pressures, Nature-Based Solutions (NBS) have emerged as a prominent approach for river ecosystem restoration and flood-risk management. In this context, the sustainability of flood management is directly dependent on a comprehensive understanding of the botanical, morphological, and physiological adaptation capacities of native flood-tolerant woody and herbaceous species (Garssen et al., 2017: 3052; Keleş Özgenç, 2024: 242). Flood stress causes soil pores to become saturated with water, drastically reducing gas diffusion rates and leading to oxygen deficiency (hypoxia or anoxia) in the root zone (Striker, 2012: 3). Under oxygen-deprived conditions, aerobic respiration in roots is disrupted, ATP production declines, and toxic fermentation by-products accumulate, ultimately suppressing photosynthetic capacity, stomatal conductance, and overall plant growth (Parent et al., 2008: 1). Native riparian species exhibiting high flood tolerance can develop specific anatomical and morphological responses that enable survival and the continued provision of ecosystem services under these extreme stress conditions. Among the most important adaptations are the development of aerenchyma tissues that facilitate internal gas transport within roots and stems, the formation of hypertrophied lenticels that support root respiration, and the rapid development of adventitious roots that replace submerged root systems (Vreugdenhil et al., 2006: 48; Glenz et al., 2006: 2). From a forest botanical perspective, these mechanisms not only ensure plant survival but also enhance sediment retention along riverbanks through modified root

architecture and increase hydraulic roughness by dissipating the kinetic energy of surface runoff. Among Türkiye's rich floristic biodiversity, species such as *Salix alba, Populus nigra, Alnus glutinosa, Tamarix smyrnensis, Phragmites australis*, *Fraxinus angustifolia,* and *Platanus orientalis* are characteristic components of riparian ecosystems and represent valuable genetic resources with high adaptive capacity to flood regimes. Although numerous studies have investigated the individual ecology of these species, there remains a need for comprehensive analyses that simultaneously evaluate their root morphology, macro-sediment retention capacity, runoff attenuation potential, and contributions to soil infiltration under Türkiye's unique hydroclimatic conditions.

This study aims to scientifically elucidate the morphophysiological responses and biomechanical functions developed by native woody and herbaceous species with high ecosystem engineering and restoration potential in Türkiye's riparian ecosystems under flood stress. Accordingly, the study provides a scientific basis for integrating green infrastructure strategies and nature-based solutions into national environmental policies by promoting the ecological functions of native plant taxa, rather than relying exclusively on conventional grey engineering approaches for flood-risk reduction.

Materials and Methods

In this study, the hydroecological functions and flood-adaptation mechanisms of flood-tolerant woody and herbaceous plant species naturally occurring in Türkiye's riparian ecosystems were evaluated through a comprehensive review of the scientific literature. Seven native taxa commonly distributed across floodplains and riverbanks in Türkiye were selected for analysis:

- *Salix alba* (white willow)
- *Populus nigra* (black poplar)
- *Alnus glutinosa* (black alder)
- *Tamarix smyrnensis* (tamarisk)
- *Phragmites australis* (common reed)
- *Fraxinus angustifolia* (narrow-leaved ash)
- *Platanus orientalis* (oriental plane)

Experimental data obtained from the literature were evaluated according to four principal characteristics for each species: (i) root system traits, including root type, depth, and spatial distribution; (ii) sediment retention and erosion-control capacity; (iii) potential to reduce surface runoff and contribute to hydraulic roughness; and (iv) effects on soil permeability and groundwater recharge.

In addition, the morphological and physiological adaptation mechanisms developed by these species in response to flood stress—including aerenchyma formation, lenticel development, and chlorophyll retention—were examined and comparatively assessed. Based on the synthesized findings, an ecological evaluation matrix was developed to determine the suitability of the investigated species for use in Nature-Based Solutions (NBS) applications

across different flood-management zones, including riverbanks, riparian buffer strips, and floodplains.

Results and Discussion

Ecological Adaptation and Species-Specific Morphological and Physiological Responses

Evidence from the literature indicates that characteristic woody and herbaceous species of riparian zones develop multidimensional morpho-anatomical adaptation mechanisms in response to hypoxic and anoxic conditions in the root zone, including adventitious root formation, hypertrophied lenticel development, and enhanced meristematic activity (Alay, 2026: 3; Pezeshki, 2001: 299). Among the native taxa examined in this study, *Platanus orientalis* and *Salix alba* emerged as the species exhibiting the highest levels of adaptive capacity and anatomical plasticity under prolonged flooding conditions. In particular, *Platanus orientalis* has been reported to maintain vertical growth performance, cambial activity, and structural stability even under submergence periods extending up to 15 days (Alay, 2026: 102; Alay, 2026: 178).

Similarly, *Salix alba* and *Populus nigra* ensure root respiration during flood events by rapidly producing adventitious roots and developing aerenchyma tissues that facilitate oxygen diffusion within submerged stem tissues (Glenz et al., 2006: 4). In contrast, species such as *Fraxinus angustifolia* and *Alnus glutinosa* exhibit high tolerance to periodic flooding, particularly during seedling and juvenile growth stages; however, when flood duration and water depth reach extreme levels, these species tend to experience chlorophyll degradation and reduced metabolic activity (Alay, 2026: 65; Alay, 2026: 122).

At the physiological level, the accumulation of osmolytes such as proline in root and leaf tissues, together with increased antioxidant enzyme activity, constitutes a selective defense strategy that enables these native species to maintain osmotic balance and minimize cellular damage and lipid peroxidation under anoxic root conditions (Alay, 2026: 140; Sachdev et al., 2021: 277).

Anatomical Plasticity, Root Architecture, and Hydraulic Conductivity

Hydromorphic stresses, including flooding and sediment loading, exert significant influences on secondary xylem anatomy and hydraulic transport safety in woody plant species (Alay, 2026: 165; Gauthier & Jacobs, 2011: 1277). Species directly associated with river channels, such as *Fraxinus angustifolia* and *Platanus orientalis*, exhibit xylem modifications under flood conditions while maintaining dimensional stability in ray width and height parameters (Nardini et al., 2011: 608). This anatomical plasticity prevents the collapse of water-conducting tissues (embolism formation) under mechanical stress and ensures maximum hydraulic safety during periods of inundation (Alay, 2026: 65; Alay, 2026: 167). Conversely, species with more limited adaptation to prolonged flooding or those occupying the outer zones of riparian vegetation gradients frequently exhibit reductions in ray dimensions and vessel diameters as submergence duration increases. These responses indicate the suppression of cambial cell division due to root hypoxia-induced hormonal imbalances, particularly involving auxin and ethylene regulation (Alay, 2026: 166; Alay, 2026: 184). These botanical and biomechanical responses directly influence species distribution patterns and vegetation zonation along both vertical and horizontal gradients extending from riverbanks toward

adjacent terrestrial habitats (Tabacchi et al., 2000: 2959). For example, owing to their high hydraulic roughness and flexibility, *Phragmites australis* and *Tamarix smyrnensis* function as primary sediment filters within the active river channel zone. In contrast, species possessing deep and extensive root systems, such as *Salix alba*, *Alnus glutinosa*, and *Platanus orientalis*, contribute substantially to riverbank stabilization within the first and second riparian buffer zones.

Riparian Restoration Potential and Ecosystem Services in Türkiye

The fact that riparian forest cover in Türkiye currently accounts for only 16.1% of riparian landscapes due to anthropogenic pressures, agricultural conversion, and grazing activities significantly weakens the capacity of watersheds to attenuate and buffer extreme flood peaks (Akturk et al., 2024: 8). Watershed ecology studies demonstrate that balanced catchments with approximately 70% riparian forest cover exhibit soil water retention and infiltration rates that are approximately 50% higher than those observed in degraded riparian systems with sparse vegetation cover (approximately 10%) (Alay, 2026: 37).

The strategic incorporation of native flood-tolerant species such as *Salix alba*, *Populus nigra*, and *Alnus glutinosa* into river restoration projects as planned "green reservoirs" and bioengineering buffer strips can substantially transform river hydraulic dynamics. Through their dense root networks and flexible stem structures, these riparian vegetation components have the potential to reduce flood-wave velocity by approximately 80–85% while dissipating the kinetic energy of flowing water (Alay, 2026: 39).

The following table summarizes the functional roles, root architectures, and sediment-retention capacities of the seven native taxa included in this review within the context of flood-management mechanisms.

Table 1. *Functional Attributes of Selected Plant Taxa Relevant to Flood Management.*

Species (Taxon)	**Root System Architecture**	**Sediment Retention and Bank Stabilization Capacity**	**Runoff and Flow Velocity Attenuation Capacity**	**Preferred Riparian Vegetation Zone**
Salix alba	Dense lateral and shallow adventitious root networks	Very High (bank stabilization)	High (flexible stem mechanics)	Active riverbank zone (first riparian belt)
Populus nigra	Wide lateral and deep taproot combination	High (macro-sediment stabilization)	Moderate to high	Buffer zone (second riparian belt)
Alnus glutinosa	Dense fibrous root and pseudo-taproot system	Very high (prevention of bank erosion/scouring)	High	Wetlands / riverbanks

Species (Taxon)	Root System Architecture	Sediment Retention and Bank Stabilization Capacity	Runoff and Flow Velocity Attenuation Capacity	Preferred Riparian Vegetation Zone
Tamarix smyrnensis	Deep and extensive lateral root system	High (fine sand and silt retention)	Very high (shrub-form surface roughness)	Active channel / saline or arid riparian margins
Phragmites australis	Dense rhizome system and fibrous root network	Very high (fine sediment and particle filtration)	Very high (dense hydraulic roughness)	Water–land interface (shallow flow zones)
Fraxinus angustifolia	Deep and strong lateral root system	Moderate to high	Moderate (rigid stem structure)	Outer floodplain zone (third riparian belt)
Platanus orientalis	Highly robust and extensive mass root architecture	Very high (large sediment and coarse material trapping)	High (high hydraulic resistance)	Buffer zone and abandoned/old river channels

In this context, rather than relying solely on conventional grey engineering structures such as concrete channels, artificial levees, and dams in river basins, the utilization of the superior biomechanical and hydrological functions of native riparian vegetation offers a more economically viable, sustainable, and self-repairing nature-based model for addressing hydroclimatic risks associated with climate change.

Conclusions and Recommendations

In this study, the importance of Nature-Based Solutions (NBS) and native riparian vegetation functions as an alternative and complementary approach to conventional grey engineering structures has been examined within a forest botany framework in response to extreme flood risks triggered by global climate change, adopting a holistic perspective. Based on the resulting ecological synthesis and morpho-physiological analyses, the following key conclusions were reached:

- The taxa naturally distributed along riverine ecosystems in Türkiye—namely *Salix alba*, *Populus nigra*, *Alnus glutinosa*, *Tamarix smyrnensis*, *Phragmites australis*, *Fraxinus angustifolia*, and *Platanus orientalis*—exhibit high tolerance to flood-induced root hypoxia due to their root architecture, rapid adventitious root formation, aerenchyma development, and high anatomical plasticity.
- From a biomechanical perspective, these species increase hydraulic roughness in river channels, thereby attenuating peak flood discharges, reducing surface flow velocity, and stabilizing riverbanks through dense root systems that minimize sediment transport and erosion.

- At the national scale, the fact that approximately 77% of riparian areas in Türkiye are under agricultural and grazing pressure, while forested areas responsible for primary protective functions remain at a critical level of only 16.1%, significantly weakens the natural buffering capacity of watersheds against flooding. This condition transforms restoration using native species-based green infrastructure from a preference into a hydrological necessity.

Based on the analyzed parameters, the following strategic recommendations are proposed for the sustainable management and ecological restoration of floodplains in Türkiye:

- **Zonation-Based Species Selection:** In watershed restoration projects, dynamic planting schemes should be designed according to distance from the river channel and flood recurrence intervals. In active riverbank zones, priority should be given to flexible and high sediment-trapping species such as *Salix alba*, *Alnus glutinosa*, *Tamarix smyrnensis*, and *Phragmites australis*. Species with relatively more rigid stem structures, such as *Platanus orientalis*, *Populus nigra*, and *Fraxinus angustifolia*, should be positioned in stabilization strips within the outer floodplain zones (second and third belts).
- **Integrated Bioengineering Approaches:** Flood risk management should move beyond reliance on purely concrete-based grey infrastructure and promote hybrid bioengineering techniques that integrate grey and green infrastructure by utilizing the root and stem mechanics of native woody vegetation.
- **Policy and Legislative Revision:** Existing water and forestry policies should be updated to ensure legal protection of vulnerable riparian buffer zones (RBZs) under pressure from agricultural conversion and overgrazing. The rehabilitation of these areas using native tree and shrub taxa should be integrated into national environmental and disaster management strategies.
- **Conservation of Genetic Resources:** The genetic diversity of flood-tolerant native riparian populations should be preserved, and seed and cutting materials derived from these local ecotypes should be used in watershed-based nursery and reforestation programs.

References

Akturk, E., Guney, K., Aydin, M., Yildiz, F., & Kaya, O. (2024). Land cover dynamics and environmental implications in Türkiye's riparian zones: A comprehensive seven-year study. *Forests, 15*(7), 1177.

Alay, M. (2026). Sel taşkın yataklarında yetişen türlerin gelişimleri ile fizyolojik, morfolojik ve anatomik özelliklerinin taşkın zamanı ve süresine bağlı olarak değişimleri (Doktora Tezi). Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu.

Atesoglu, A., Bulut, F. S., Ozel, H. B., & Zeren Cetin, I. (2025). Large-scale earth observation and monitoring of riparian zone land-cover changes in Türkiye. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *22* (12), 11843-11858.

Garssen, R., Verhoeven, J. T., & Soons, M. B. (2017). Effects of climate-change-induced floods on a riparian plant community: a simulation experiment on the importance of soft-wood tree species. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 2035. *DOI:* 10.3389/fpls.2017.02035

Gauthier, M. M., & Jacobs, D. F. (2011). Walnut (*Juglans* spp.) ecophysiology in response to environmental stresses and potential acclimation to climate change. *Annals of Forest Science*, *68*, 1277-1290.

Glenz, C., Schlaepfer, R., Iorgulescu, I., & Kienast, F. (2006). Flooding tolerance of Central European tree and shrub species. *Forest Ecology and Management*, *235*(1-3), 1-13. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.05.065

IPCC (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate. IPCC AR6 Report.

Keleş Özgenç, E. (2024). Exploring the wide-ranging ecosystem services of riparian vegetation on a global scale. *Turkish Journal of Forestry, 25*(2), 233-243.

Nardini, A., Gullo, M. A. L., & Salleo, S. (2011). Refilling embolized xylem conduits: is it a matter of phloem unloading?. *Plant Science*, *180*(4), 604-611. DOI: 10.1016/j.plantsci.2010.12.011

Naiman, R. J., & Decamps, H. (1997). The ecology of interfaces: Riparian zones. *Annual Review of Ecology and Systematics, 28,* 621-658.

Opperman, J. J., Moyle, P. B., Larsen, E. W., Florsheim, J. L., & Manfree, A. D. (2017). *Floodplains: Processes and management for ecosystem services*. Univ of California Press.

Parent, C., Capelli, N., Berger, A., Crèvecoeur, M., & Dat, J. F. (2008). An overview of plant responses to soil waterlogging. *Plant Stress*, *2*(1), 20-27.

Pezeshki, S. R., & DeLaune, R. D. (2012). Soil oxidation-reduction in wetlands and its impact on plant functioning. *Biology*, *1*(2), 196-221. *DOI:* 10.3390/biology1020196

Sachdev, S., Ansari, S. A., Ansari, M. I., Fujita, M., & Hasanuzzaman, M. (2021). Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. *Antioxidants*, *10*(2), 277. *DOI:* 10.3390/antiox10020277

Striker, G. G. (2012). Flooding stress on plants: anatomical, morphological and physiological responses. *Botany*, *1*(1), 3-28.

Tabacchi, E., Lambs, L., Guilloy, H., Planty-Tabacchi, A. M., Muller, E., & Decamps, H. (2000). Impacts of riparian vegetation on hydrological processes. *Hydrological Processes*, *14*(16-17), 2959-2976.

Vreugdenhil, S. J., Kramer, K., & Pelsma, T. (2006). Effects of flooding duration,-frequency and-depth on the presence of saplings of six woody species in north-west Europe. *Forest Ecology and Management*, *236*(1), 47-55. 06 Elsevier B.V. All rights reserved. DOI:10.1016/j.foreco.2006.08.329

6th International Congress of Engineering and Natural Sciences

Veri Güvenliği Kısıtları Altında Üretim Hattı Kalite Ekipleri İçin Şirket İçi RAG Tabanlı Bilgi Asistanı Tasarımı ve Uygulaması

Beyza BOZ[1]

Özet

Akıllı telefon üretim ortamlarında kalite güvencesi sorumluluğu taşıyan mühendisler, hatalı cihazların incelenmesi sırasında ciddi bilgi erişim güçlükleriyle karşılaşmaktadır. İlgili günlük kayıtlarına ulaşmak, önceki vakalara ait çözüm notlarını bulmak ve hatanın kökenini doğru bir şekilde tespit etmek hem fazladan zaman gerektiren hem de bireysel deneyime aşırı bağımlı süreçlerdir. Bu çalışmada, söz konusu sorunları gidermek amacıyla yalnızca şirket altyapısı üzerinde işlev gören bir Retrieval-Augmented Generation (RAG) mimarisi tasarılanmış, ardından prototip düzeyinde hayata geçirilmiştir.

Geliştirilen sistem; açık kaynaklı büyük dil modelleri, anlamsal vektör veritabanı ve doğal dil işleme bileşenlerini bir arada kullanarak mühendislerin sıradan konuşma diliyle soru sormasına ve anlık yanıt almasına imkân tanımaktadır. Projenin en belirleyici tasarım kısıtı, kurumsal gizlilik politikalarının üretim verilerinin dış sistemlere aktarılmasına izin vermemesidir; bu gerçeklik, tüm bileşenlerin şirket içi sunucuda barındırılmasını zorunlu kılmaktadır. Herhangi bir gerçek üretim kaydına başvurulmaksızın oluşturulan sentetik veri kümesi üzerinde yürütülen prototip testleri, yüzde seksen yedi geri getirme başarımı ve ortalama dört virgül iki saniyelik yanıt gecikmesiyle sistemin fiili kullanıma uygunluğunu kanıtlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Retrieval-Augmented Generation, Büyük Dil Modeli, Üretim Kalite Kontrolü, Şirket İçi Yapay Zeka, Veri Güvenliği

[1] MSc. Öğrencisi, İstanbul Bilgi Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Samsung Elektronik Türkiye ARGE Merkezi, beyza.boz@samsung.com

1. GİRİŞ

Günümüz akıllı telefon üretim hatları, birbirine sıkı sıkıya bağlı çok sayıda test ve doğrulama aşamasını bünyesinde barındırmaktadır. Her istasyon, işleme aldığı cihazlara ilişkin kapsamlı günlük kayıtları oluşturmakta; bu kayıtlar arasında kablosuz frekans kalibrasyon verileri, modem bağlantı test sonuçları, sensör kalibrasyon çıktıları ve yazılım doğrulama logları yer almaktadır.

Üretim hattından ayrılan kusurlu cihazların incelenmesinden sorumlu mühendisler, genellikle üç ardışık adımı takip etmektedir: önce ilgili istasyona ait günlük kayıtlarını incelemek, ardından arızanın donanım, yazılım ya da kalibrasyon kaynaklı olup olmadığını belirlemek ve son olarak geçmişte yaşanmış benzer vakalara dayanarak uygun bir çözüme ulaşmak. Ne var ki bu süreç, çeşitli yapısal sorunlar nedeniyle verimli bir biçimde işlememektedir.

Söz konusu sorunların başında bilginin dağınık ve erişilmez niteliği gelmektedir. Geçmiş hata raporları ile çözüm notları, farklı formatlarda ve birbirinden kopuk ortamlarda tutulmaktadır. Buna ek olarak, deneyim eksikliği ciddi bir engel oluşturmaktadır: tecrübesiz bir mühendis, hangi günlük satırına odaklanması gerektiğini tek başına kestiremediğinden deneyimli bir meslektaşından destek almak zorunda kalmaktadır. Son olarak, üretim hattının bekletilmesi doğrudan maliyet artışına yol açtığından bu gecikmelerin birikmesi üretim ekonomisi üzerinde önemli bir baskı yaratmaktadır.

Büyük dil modelleri ve bu modelleri anlık bilgi kaynaklarıyla harmanlayan RAG yaklaşımı, bilgi yönetimi sorunlarına yenilikçi çözümler sunmaktadır. Bununla birlikte, endüstriyel ortamlarda bu teknolojilerin doğrudan uygulanmasının önünde ciddi bir engel durmaktadır: kurumsal veri gizliliği. Üretim kaynaklı hata raporları, kalibrasyon değerleri ve test çıktıları şirketin fikrî mülkiyeti kapsamında değerlendirildiğinden herhangi bir bulut tabanlı yapay zeka servisine iletilmesi mümkün değildir.

Bu çalışma, veri gizliliği kısıtını birincil bir tasarım gereksinimi olarak benimseyerek yalnızca şirket içi kaynaklara dayanan bir RAG sistemi geliştirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın özgün katkısı; endüstriyel bir bağlamda açık kaynaklı dil modeli, yerel vektör veritabanı ve doğal dil arayüzünü bir arada kullanan, güvenlikten ödün vermeksizin çalışabilen bir mimari tasarımının ortaya konmasıdır.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1 Retrieval-Augmented Generation Yaklaşımı

Lewis ve diğerleri, 2020 yılında yayımladıkları çalışmada (Lewis vd., 2020: 9459) bir dil modelinin öğrenilmiş ağırlıklarıyla sınırlı kalmak yerine harici bir bilgi tabanına dinamik olarak başvurabildiği RAG mimarisini kamuoyuyla paylaşmıştır. Böyle bir yapı, özellikle güncel ya da alana özel bilgi gerektiren durumlarda, yalnızca dil modelinin kullanıldığı geleneksel yaklaşımlardan çok daha tutarlı sonuçlar üretmektedir.

Gao ve diğerleri (2023, paragraf 3), RAG sistemlerini üç farklı kategoride ele almıştır: yalnızca getirme ve üretim adımlarını içeren temel düzey; yeniden sıralama ve bağlam sıkıştırma gibi ek optimizasyonları barındıran gelişmiş düzey; ve bileşenlerin birbirinden bağımsız olarak değiştirilebildiği modüler düzey. Bu çalışmada benimsenen tasarım, şirket içi

çalışma kısıtları nedeniyle gelişmiş düzeye yakın bir mimari sergilemektedir. Ram ve diğerleri (2023: 1317), LM mimarisinde hiçbir değişiklik yapmaksızın ilgili belgeleri doğrudan girdi bağlamına ekleyen "in-context RALM" yaklaşımının, mimari değişiklik gerektiren yöntemlere kıyasla dağıtım kolaylığı açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermiştir. Bu çalışmada benimsenen prompt tabanlı yaklaşım da bu anlayışla örtüşmektedir.

2.2 Anlamsal Gömme ve Vektör Veritabanları

Metinlerin anlamsal içeriğini yoğun sayısal vektörler aracılığıyla kodlayan gömme modelleri, çağdaş bilgi getirme sistemlerinin vazgeçilmez bir bileşenini oluşturmaktadır. Reimers ve Gurevych (2019: 3982), çift kodlayıcı mimariye sahip Sentence-BERT modelini sunarak cümleler arasındaki anlamsal benzerliğin verimli biçimde hesaplanmasını mümkün kılmıştır. Bu çalışmada tercih edilen all-MiniLM-L6-v2 modeli yalnızca yirmi iki milyon parametreye sahip olmakla birlikte, teknik nitelikteki üretim kayıtlarında yeterli gömme kalitesi sağlamaktadır.

Vektör veritabanları ise bu gömmeler üzerinde yaklaşık en yakın komşu araması gerçekleştiren özelleşmiş depolama sistemleridir. ChromaDB, Pinecone, Weaviate ve FAISS bu kategorideki öne çıkan çözümler arasında sayılabilir. Açık kaynaklı yapısı, yapılandırma gerektirmeyen yerel kurulum seçeneği ve Python ekosistemiyle doğal uyumu göz önünde bulundurulduğunda ChromaDB, şirket içi kullanım için en uygun tercih olarak belirlemiştir.

2.3 Endüstriyel Yapay Zeka Uygulamaları

Üretim süreçlerinde makine öğrenmesi yöntemlerine olan ilgi son yıllarda kaydadeğer bir artış göstermiştir. May ve diğerleri (2022: 186), üretim ortamlarında yapılandırılmamış metin verilerini işlemek için bir NLP boru hattı geliştirmiş; bu yaklaşımın makine sağlayıcılarından elde edilen metinsel bilgiyi biçimleştirerek üretim süreçlerinin optimize edilmesine katkı sağladığını ortaya koymuştur. Öte yandan Wang ve diğerleri (2023, paragraf 1), yarı iletken endüstrisindeki hata analizi raporlarından uzman bilgisinin otomatik çıkarılmasını hedefleyen bir NLP ve birliktelik kuralları tabanlı sistem geliştirmiş; bu yaklaşımın hata kök nedeni tahminini önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

Ne var ki endüstriyel yapay zeka literatüründe yer alan çalışmaların büyük bölümü bulut altyapısının kullanılabilir olduğunu örtük biçimde varsaymakta ya da veri mahremiyeti sorununu ikincil bir kısıt olarak değerlendirmektedir. Şirket içi model dağıtımını ön plana çıkaran ve veri güvenliğini temel tasarım ilkesi olarak kabul eden araştırmaların sayısının oldukça az olduğu görülmektedir. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

2.4 Açık Kaynaklı Dil Modelleri ve Yerel Dağıtım

Meta'nın geliştirdiği Llama 2 ve Llama 3 model serileri, ticari kullanıma elverişli lisans koşullarıyla şirket içi dağıtım için cazip bir seçenek hâline gelmiştir (Touvron vd., 2023). Mistral AI'ın sunduğu Mistral 7B modeli de özellikle teknik İngilizce metinlerde rekabet edebilir bir performans ortaya koymaktadır (Jiang vd., 2023, paragraf 4). Bu gelişmelerin yanı sıra Ollama gibi araçlar, büyük dil modellerinin yerel ortamlara kurulumunu ve API üzerinden kullanımını ciddi ölçüde kolaylaştırmış; böylece kurumsal ortamlarda dış servislere bağımlı kalmadan yapay zeka entegrasyonunun önü açılmıştır.

3. YÖNTEM

3.1 Tasarım Gereksinimleri

Geliştirme sürecine başlanmadan önce sistemin karşılaması beklenen işlevsel ve işlevsel olmayan gereksinimler açıkça tanımlanmıştır. İşlevsel gereksinimler; mühendislerin doğal Türkçe ile soru sorabilmesi, mevcut hata raporları ile standart işletim prosedürü belgelerine dayalı yanıtlar üretilmesi, yeni belge eklenediğinde sistemin model yeniden eğitimine gerek kalmaksızın güncellenebilmesi ve kabul edilebilir yanıt gecikmesi sunulması olmak üzere dört başlık altında ele alınmıştır. İşlevsel olmayan gereksinimler açısından ise tüm veri işleme ve çıkarım adımlarının şirket içi sunucuda yürütülmesi, herhangi bir dış uygulama programlama arayüzüne çağrı yapılmaması ve sistemin yalnızca merkezi işlem birimi barındıran mevcut şirket altyapısında çalışabilmesi zorunlu koşullar olarak belirlenmiştir.

3.2 Genel Mimari

Önerilen sistem dört işlevsel katmandan oluşmaktadır: belgeleri anlamsal vektörlere dönüştüren belge işleme ve gömme katmanı; bu vektörleri kalıcı olarak saklayan ve sorgu anında benzerlik araması gerçekleştiren vektör veritabanı katmanı; bağlamla zenginleştirilmiş girdileri işleyerek doğal dil yanıtları üreten dil modeli katmanı ve son olarak kullanıcılara sezgisel bir sohbet deneyimi sunan arayüz katmanı.

Bileşen	Teknoloji	Görev	Şirket İçi mi?
Gömme Modeli	all-MiniLM-L6-v2	Metni vektöre dönüştürme	Evet
Vektör Veritabanı	ChromaDB	Anlamsal arama ve saklama	Evet
Dil Modeli	Llama 3.2 / Ollama	Doğal dil yanıtı üretme	Evet
Kullanıcı Arayüzü	Streamlit	Web tabanlı sohbet ekranı	Evet
Belge İşleme	Python / pandas	PDF ve Excel okuma	Evet

Tablo 1 – Sistem Bileşenleri ve Şirket İçi Çalışma Durumu

3.3 Belge İşleme Süreci

Sistem, PDF, Excel ve düz metin gibi farklı formatlardaki kaynak belgeleri kabul edecek biçimde tasarlanmıştır. İşlem dört adımda gerçekleşmektedir: önce belgeden ham metin çıkarılmakta, ardından uzun belgeler anlam bütünlüğü korunarak daha küçük parçalara bölünmekte, her parça gömme modeline girilerek üç yüz seksen dört boyutlu bir vektöre dönüştürülmekte ve son olarak bu vektörler belge adı, tarih ve kategori gibi üst verilerle birlikte ChromaDB'ye kaydedilmektedir.

```
from sentence_transformers import SentenceTransformer
import chromadb

model = SentenceTransformer('all-MiniLM-L6-v2')
client = chromadb.PersistentClient(path='./uretim_db')
collection = client.get_or_create_collection('hata_raporlari')

def belge_ekle(metin, belge_id, meta_veri):
    vektor = model.encode([metin]).tolist()
    collection.add(documents=[metin], embeddings=vektor,
```

```
        ids=[belge_id], metadatas=[meta_veri])
```

3.4 Sorgu ve Yanıt Üretim Süreci

Bir mühendis sisteme soru ilettiğinde dört ardışık adım devreye girmektedir. İlk adımda sorunun metni vektöre dönüştürülmekte, ikinci adımda ChromaDB bu vektörü koleksiyondaki tüm belge vektörleriyle kosinüs benzerliği açısından karşılaştırarak en yakın üç belgeyi seçmektedir. Üçüncü adımda bulunan belgeler bir bağlam metni olarak düzenlenmekte, dördüncü adımda ise bu bağlam ve orijinal soru birlikte yerel dil modeline iletilerek Türkçe bir yanıt elde edilmektedir. Prompt şablonu tasarlanırken modelin yalnızca sağlanan bağlam içindeki bilgilere dayanması ve bağlamda bulunmayan hiçbir bilgiyi üretmemesi özenle vurgulanmıştır.

3.5 Veri Güvenliği Mimarisi

Sistemin en belirleyici tasarım kararı, veri akışının hiçbir aşamasında şirket ağı dışına çıkmamasıdır. Tüm model ağırlıkları, kurulum sırasında tek seferlik bir indirme işlemiyle şirket sunucusuna aktarılmakta; bu işlemin ardından internet bağlantısına ihtiyaç duyulmamaktadır. Vektör veritabanı sunucunun yerel diskinde tutulmakta, model çıkarımı da aynı sunucuda gerçekleşmektedir. Kullanıcı arayüzü yalnızca şirket içi ağ üzerinden erişilebilir durumdadır.

4. BULGULAR

4.1 Veri Kümesi

Üretim kayıtlarının gizlilik statüsü nedeniyle gerçek hata raporları çalışmaya dahil edilememiştir. Bu kısıt, gerçek üretim bağlamından ilham alınarak oluşturulan sentetik bir veri kümesiyle aşılmıştır. Toplam kırk yedi kayıttan oluşan veri kümesi, üç farklı model için iki istasyonu kapsamakta olup donanım, yazılım ve deneysel olmak üzere üç hata kategorisine göre dağılmaktadır.

İstasyon	Hata Kategorisi	Rapor Sayısı
İstasyon A	Donanım (HW)	12
İstasyon A	Yazılım Spec (SW)	6
İstasyon A	Deneysel	5
İstasyon B	Donanım (HW)	10
İstasyon B	Yazılım (SW)	9
İstasyon B	Deneysel	5

Tablo 2 – Sentetik Veri Kümesi Dağılımı

4.2 Performans Sonuçları

Prototip, test veri kümesi üzerinde genel olarak tatmin edici sonuçlar vermiştir. Otuz sorudan yirmi altısında sistem ilk üç sonuç içinde doğru belgeyi döndürmeyi başarmış; bu oran yüzde seksen yedi geri getirme doğruluğuna karşılık gelmektedir. Başarısızlıkla sonuçlanan dört vakada ise soru dilindeki terminoloji ile belge içeriğindeki terminoloji arasındaki uyumsuzluk belirleyici etken olarak tespit edilmiştir.

Metrik	Sonuç	Açıklama
Geri Getirme Doğruluğu (@3)	%87	30 sorunun 26'sında doğru belge
Ortalama Yanıt Gecikmesi	4,2 sn	CPU sunucu, Llama 3.2 3B
Bağlam Uygunluğu	%91	Uzman değerlendirmesi
Veri Güvenliği	Tam	Dış ağ bağlantısı yok
Bellek Kullanımı	~6 GB RAM	Model + veritabanı toplam

Tablo 3 – Sistem Performans Değerlendirmesi

4.3 Test Senaryoları

Sistemin farklı soru tiplerine verdiği yanıtları karşılaştırmak amacıyla üç senaryo grubu tasarlanmıştır.

4.3.1 Doğrudan Hata Kodu Sorgulama.

Bu grupta mühendisler ellerindeki hata kodunu olduğu gibi sisteme iletmektedir. Sistem, söz konusu kodu içeren geçmiş raporu bularak alınan aksiyonu özetlemekte ve mühendisi doğru yöne yönlendirmektedir. Bu senaryo türünde geri getirme doğruluğu yüzde doksan beşe ulaşmıştır.

4.3.2 Semptom Tabanlı Sorgulama.

Bu grupta mühendis hata kodu yerine gözlemlediği belirtiyi tarif etmektedir. '5G bağlantısı kurulamıyor, ne kontrol etmeliyim?' biçimindeki sorular bu kategoriye girmektedir. Sistem, anlamsal benzerlik aracılığıyla ilgili geçmiş vakaları bularak öncelikli inceleme noktalarını sunmaktadır. Doğruluk bu senaryo türünde yüzde seksen iki olarak ölçülmüş olup başarısızlıkların tümünde terminoloji uyumsuzluğu etken olmuştur.

4.3.3 Karşılaştırmalı Sorgulama.

Bu grupta mühendis iki farklı istasyon arasındaki ilişkiyi sorgulamaktadır. Sistem her iki istasyona ait belgeleri bir arada getirerek bütüncil bir yorum sunmaktadır. Bununla birlikte, çok kaynaklı bu tür sorgu-larda yanıt tutarlılığının diğer senaryo gruplarına kıyasla daha düşük kaldığı görülmüştür.

5. TARTIŞMA

Elde edilen bulgular, veri gizliliği kısıtları altında şirket içi RAG sistemlerinin üretim ortamlarında uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Sistemin öne çıkan güçlü yönleri şöyle sıralanabilir: kurumsal veriler hiçbir koşulda dış ortama taşınmamakta; yeni belgeler eklenediğinde model yeniden eğitilmeksizin sistem güncellenebilmekte; açık kaynaklı bileşenler kullanıldığından ek lisans maliyeti doğmamakta ve sistem, mevcut CPU tabanlı altyapıda çalışabilmektedir.

Öte yandan bazı kısıtlamalar da gözetilmelidir. Merkezi işlem birimi ortamında ölçülen yanıt gecikmesi, grafik işleme birimi desteğiyle önemli ölçüde azaltılabilir. Genel amaçlı İngilizce metinler üzerinde eğitilmiş gömme modelinin Türkçe teknik terminolojiyi ne ölçüde yansıttığı ise ayrı bir araştırma sorusu olarak güncellik kazanmaktadır.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, akıllı telefon üretim hattı kalite ekiplerine yönelik, yalnızca şirket içi kaynaklara dayanan bir RAG tabanlı bilgi asistanı tasarlanmış ve işler hâle getirilmiştir. Sistem; yerel dil modeli, vektör veritabanı ve doğal dil arayüzünü bir arada getirerek mühendislerin geçmiş hata raporlarına ve çözüm belgelerine aninda erişmesini kolaylaştırmaktadır. Sentetik veri kümesi üzerinde gerçekleştirilen değerlendirmeler, yüzde seksen yedi geri getirme doğruluğu ve dört virgül iki saniyelik ortalama yanıt gecikmesiyle sistemin gerçek üretim ortamlarında kullanıma hazır olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışmanın literatüre en belirgin katkısı, veri güvenliği kısıtını bir sonradan eklenti olarak değil, tasarımın kurucu ilkesi olarak konumlandırmasıdır. Bu bakış açısı, benzer gizlilik kısıtlarıyla çalışan farklı endüstriyel alanlara da aktarabilir niteliktedir.

Gelecek çalışmalar kapsamında öncelikle anonimleştirilmiş gerçek üretim verileriyle sistemin yeniden değerlendirilmesi planlanmaktadır. Türkçe teknik metinler üzerinde ince ayar yapılmış bir gömme modelinin sisteme entegre edilmesi, geri getirme doğruluğunu daha da artırabilir. Uzun vadede ise sistemin birden fazla üretim hattını ve çeşitli istasyon türlerini kapsayacak biçimde ölçeklendirilmesi hedeflenmektedir.

7. KAYNAKÇA

Gao, Y., Xiong, Y., Gao, X., Jia, K., Pan, J., Bi, Y., ... & Wang, H. (2023). Retrieval-augmented generation for large language models: A survey. *arXiv preprint arXiv:2312.10997*, *2*(1), 32.

Jiang, A. Q., Sablayrolles, A., Mensch, A., Bamford, C., Chaplot, D. S., Casas, D. D. L., Bressand, F., Lengyel, G., Lample, G., Saulnier, L., Lavaud, L. R., Lachaux, M. A., Stock, P., Le Scao, T., Lavril, T., Wang, T., Lacroix, T., ve El Sayed, W. (2023). Mistral 7B. arXiv preprint arXiv:2310.06825, *3*.

Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., ... & Kiela, D. (2020). Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive nlp tasks. *Advances in neural information processing systems*, *33*, 9459-9474.

Wang, Z., Ezukwoke, K., Hoayek, A., Chabridon, S., ve Beauseroy, P. (2023). Natural language processing (NLP) and association rules (AR)-based knowledge extraction for intelligent fault analysis: A case study in semiconductor industry. Journal of Intelligent Manufacturing. https://doi.org/10.1007/s10845-023-02310-1

Ram, O., Levine, Y., Dalmedigos, I., Muhlgay, D., Shashua, A., Leyton-Brown, K., & Shoham, Y. (2023). In-context retrieval-augmented language models. *Transactions of the Association for Computational Linguistics*, *11*, 1316-1331.

Reimers, N., & Gurevych, I. (2019, November). Sentence-bert: Sentence embeddings using siamese bert-networks. In *Proceedings of the 2019 conference on empirical methods in natural language processing and the 9th international joint conference on natural language processing (EMNLP-IJCNLP)* (pp. 3982-3992).

Touvron, H., Martin, L., Stone, K., Albert, P., Almahairi, A., Babaei, Y., ... & Scialom, T. (2023). Llama 2: Open foundation and fine-tuned chat models. *arXiv preprint arXiv:2307.09288*.

May, M. C., Neidhöfer, J., Körner, T., Schäfer, L., ve Lanza, G. (2022). Applying natural language processing in manufacturing. Procedia CIRP, 115, 184–189. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.071

6thInternational Congress of Engineering and Natural Sciences

Tekstil Yüzeylerinde Böcek Kovucu Fonksiyon Kazandırmaya Yönelik Güncel Yaklaşımlar

Emine BAKAN[1]

Abstract

Textile products have evolved far beyond their fundamental covering and protection functions, increasingly being engineered with multifunctional properties that prioritize user health, comfort, and safety. Particularly in healthcare settings, military operations, outdoor recreational activities, agricultural work, and protective apparel sectors, the escalating risks posed by ectoparasites—including mosquitoes, ticks, moths, lice, and fleas—have elevated the development of insect-repellent textile surfaces to a critical research priority. These arthropods not only cause significant physiological discomfort but also serve as vectors for life-threatening diseases such as malaria, Lyme disease, Zika virus, and dengue fever. Consequently, functional textiles equipped with insect-repellent capabilities offer a sustainable protection strategy that reduces dependency on topical chemical insecticides while simultaneously enhancing wearer comfort and biological safety.

This study comprehensively examines contemporary approaches for imparting insect-repellent functionality to textile surfaces. Conventional synthetic active agents, notably permethrin and DEET (N,N-diethyl-meta-toluamide), are discussed in terms of their established efficacy against hematophagous insects; however, their environmental persistence, toxicity concerns, and potential for inducing insecticide resistance have necessitated the exploration of alternative strategies. Accordingly, the insecticidal and repellent potentials of naturally derived botanical agents—including citronella, neem (azadirachtin), lavender, eucalyptus, peppermint, and lemongrass extracts—are systematically evaluated. Advanced finishing techniques employed for incorporating these active compounds onto textile substrates are thoroughly detailed, encompassing pad-dry-cure, dip-coating, spray application, microencapsulation, nanoencapsulation, and sol-gel coating methodologies. Among these, microencapsulation utilizing biodegradable wall materials such as chitosan, alginate, or gum arabic has garnered substantial research attention due to its ability to facilitate controlled release mechanisms, significantly enhance wash durability, and preserve long-term repellent effectiveness across multiple laundering cycles. Furthermore, nanotechnology-based approaches involving zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles are highlighted for their dual functionality, combining antibacterial properties with insect-repellent characteristics. In conclusion, research in insect-repellent textiles is demonstrably shifting toward environmentally benign, human-health-conscious, cost-effective, and durable solutions. This study provides a critical evaluation of current technologies and establishes a guiding framework suggesting that future investigations should prioritize the development of integrated multifunctional coating systems that simultaneously address insect resistance, antimicrobial activity, UV protection, and water repellency for comprehensive textile applications.

Keywords: Functional textiles, insect-repellent textiles, microencapsulation, natural extracts, textile finishing

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Uşak Üniversitesi Ulubey Meslek Yüksekokulu Tasarım Bölümü, emine.tomruk@usak.edu.tr, Orcıd: 0000-0002-3463-4314

1. GİRİŞ

Tekstil teknolojilerindeki son gelişmeler, tekstil ürünlerinin geleneksel koruyucu ve estetik işlevlerinin ötesine geçerek çok fonksiyonlu ve akıllı uygulamalara yönelmesine neden olmuştur. Antimikrobiyal aktivite, ultraviyole koruma, alev geciktiricilik, kendini temizleme özelliği ve böcek kovucu performans gibi ek özellikler kazandırılmış fonksiyonel tekstiller hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda giderek artan bir ilgi görmektedir (Çelen vd., 2023). Bu fonksiyonlar arasında böcek kovucu tekstiller, vektör kaynaklı hastalıklara ilişkin artan endişeler ve günlük yaşamda böceklere maruz kalma oranının yükselmesi nedeniyle önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir (Joshi vd., 2009; Tawiah vd., 2025).

Sivrisinek, kene, pire, akar ve güve gibi böcek türleri yalnızca rahatsızlık vermekle kalmayıp aynı zamanda birçok bulaşıcı hastalığın vektörü olarak da görev yapmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü verilerine göre 2020 yılında yaklaşık 241 milyon sıtma vakası görülmüş ve 627 bin kişi bu hastalıktan hayatını kaybetmiştir (World Health Organization [WHO], 2021). Sivrisinekler sıtma, dang humması, Zika virüsü enfeksiyonu ve chikungunya gibi hastalıkların taşınmasında rol oynarken; keneler Lyme hastalığı ve diğer ciddi enfeksiyonların yayılımında etkili olmaktadır. Bunun yanı sıra böcekler, tekstil materyallerinde biyolojik bozunmaya ve malzeme hasarına da neden olabilmektedir (Medha vd., 2021; Kantheti vd., 2023). Bu nedenle böcek temasını önleyebilen tekstil materyallerinin geliştirilmesi, sağlık tekstilleri, askeri kıyafetler, dış mekân giyim ürünleri, spor giyimi ve koruyucu tekstil uygulamaları açısından giderek daha önemli hâle gelmiştir.

İnsan sağlığı üzerindeki etkilerinin yanı sıra böcekler tekstil materyalleri üzerinde de zararlı etkiler oluşturabilmektedir. Özellikle güve ve bazı böcek türleri yün, ipek, kürk ve tüy içeren protein esaslı liflerle beslenerek tekstil ürünlerinde bozulma, lif hasarı ve yapısal deformasyonlara neden olmaktadır (Rocklöv ve Dubrow, 2020). Depolama ve kullanım süreçlerinde ortaya çıkan bu zararlar tekstil ürünlerinin kullanım ömrünü azaltmaktadır.

Küresel iklim değişikliği, artan şehirleşme, uluslararası seyahatler ve açık alan aktivitelerindeki artış, insanların böceklerle temas sıklığını artırmıştır (Rocklöv ve Dubrow, 2020). Bu nedenle geleneksel koruma yöntemlerinin ötesinde daha etkili ve uzun süreli çözümlere duyulan ihtiyaç artmış; tekstil yüzeylerine böcek kovucu özellik kazandırılması önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir.

Geleneksel böcek koruma yöntemleri arasında yer alan spreyler, losyonlar ve kimyasal uygulamalar çoğunlukla kısa süreli etki göstermekte ve düzenli tekrar uygulaması gerektirmektedir (Fradin ve Day, 2002). Ayrıca bu kimyasalların doğrudan deriyle temas etmesi bazı durumlarda tahriş, alerjik reaksiyonlar ve sağlık riskleri oluşturabilmektedir. Bu nedenle böcek kovucu özelliklerin doğrudan tekstil materyallerine kazandırılması daha sürdürülebilir ve kullanıcı dostu bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

Böcek kovucu tekstiller; sağlık tekstilleri, askeri kıyafetler, spor giyim ürünleri, kamp ekipmanları, çocuk tekstilleri ve koruyucu giysiler gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır (Şekil 1). Bu tekstiller kullanıcıya ek bir işlem gerektirmeden sürekli koruma sağlayabilmektedir. Özellikle böcek kaynaklı hastalıkların yoğun görüldüğü bölgelerde bu tür tekstiller önemli bir önleyici sağlık stratejisi olarak değerlendirilmektedir.

Geleneksel olarak böcek kovucu özellikler sentetik kimyasal maddelerin uygulanması ile elde edilmektedir. Bu bileşikler genellikle yüksek etkinlik göstermesine rağmen, toksisite, çevresel etki, dayanıklılık ve insan sağlığı açısından bazı endişeleri de beraberinde getirmektedir. Bu durum, araştırmacıları sürdürülebilir alternatiflerin geliştirilmesine yöneltmiştir. Bu kapsamda bitkisel ekstraktlar, uçucu yağlar ve biyobazlı bileşikler çevre dostu seçenekler olarak ön plana çıkmıştır (Maia ve Moore, 2011). Yeni aktif maddelerin geliştirilmesine paralel olarak mikroenkapsülasyon, nanoenkapsülasyon ve sol-jel gibi yenilikçi uygulama teknikleri de bu alandaki araştırma olanaklarını önemli ölçüde genişletmiştir (Ardanuy vd., 2014; Specos vd., 2010).

Şekil 1. Koruyucu tekstillere örnekler

Tekstil mühendisliği alanında, giysilere ve diğer tekstil ürünlerine böcek itici özellik kazandırmak, kullanıcıları böcek ısırıklarından ve vektör kaynaklı hastalıklardan korumak için yenilikçi bir yaklaşımdır (Tawiah vd., 2025). Böceklere karşı dayanıklı tekstiller, özel apre işlemleriyle liflere entegre edilen kimyasal veya doğal kovucular sayesinde, giyen kişiyi ya da bulundukları ortamı böceklerden uzak tutmayı hedefler. Bu tür koruyucu tekstiller; ev tekstilleri (örn. cibinlik, perde), dış mekan giyim ürünleri (kamp ve safari kıyafetleri), askeri üniformalar ve sağlık sektöründe kullanılan tekstiller (ör. böcek itici cerrahi önlükler, hasta çarşafları) gibi geniş bir yelpazede uygulama alanı bulmaktadır (Şekil 1). Özellikle enfeksiyon riski yüksek bölgelerde görev yapan sağlık personelinin, böcek itici kumaşlardan üretilmiş formalar giymesi konforu artırırken böcek ısırıklarıyla taşınan hastalık riskini de azaltabilir (Banks vd., 2014).

Böcek kovucu tekstillerin geliştirilmesinde hem sentetik insektisitler hem de doğal kovucular kullanılmaktadır. Sentetik kimyasallar arasında permetrin ve DEET (N,N-dietil-m-toluamid) en yaygın uygulananlardandır (Fei vd., 2007; Banks vd., 2014). Permetrin, papatya (Krizantem) çiçeklerinden türetilmiş sentetik bir piretroid olup geniş spektrumlu bir böcek öldürücü ve kovucudur; ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından giysilerde kullanımı onaylanmış başlıca böcek kovucu kimyasaldır. Nitekim binlerce Amerikan ve İngiliz askeri üniformasında permetrin emprenye işlemi uygulanarak askerlerin sivrisinek ve kene ısırıklarından korunması sağlanmıştır (Fradin ve Day, 2002). Bununla birlikte, DEET ve

permetrin gibi sentetik ajanların uzun süreli cilt temasında veya hassas kişilerde sağlık açısından bazı endişeler doğurabileceği bildirilmiştir (Koren vd., 2003). Örneğin, DEET içeren ürünler 6 aydan küçük bebekler ve hamileler için önerilmemektedir. Bu sebeple, doğal kökenli böcek kovucular son yıllarda önem kazanmıştır. Bitkisel uçucu yağlar (citronella, okaliptüs, nane, lavanta, neem vb.), hem daha güvenli kabul edilmeleri hem de çevre dostu olmaları nedeniyle tekstil uygulamalarında ilgi görmektedir (Maia ve Moore, 2011). Ancak doğal ajanların tek başına kullanımında istenen düzeyde kalıcılık ve etkinin sağlanması güç olabilmektedir (Banks vd., 2014).

Bu çalışmada, böcek itici özellikli tekstiller konusunda literatürdeki çalışmalar derlenerek; doğal ve sentetik kovucuların tekstillere uygulanma yöntemleri, etkinliklerinin değerlendirilmesi, yıkamaya karşı dayanıklılıkları ve sağlık sektörü de dahil çeşitli kullanım alanları ele alınacaktır.

YÖNTEM

Bu çalışma derleme niteliğinde olup, böceklere karşı dayanıklı tekstiller konusunda yayınlanmış bilimsel araştırmalar sistematik olarak incelenmiştir. Literatür taraması kapsamında Web of Science, Scopus ve Google Akademik gibi veri tabanlarında *"insect repellent textile", "mosquito repellency fabric", "böcek itici apre"* gibi anahtar kelimelerle 2010 sonrası çalışmalar öncelikli olmak üzere tarama yapılmıştır. Elde edilen kaynaklardan SCI ve Scopus indeksli dergilerde yayımlanmış 40'dan fazla makale detaylı değerlendirmeye alınmıştır. İncelenen çalışmalardan, farklı tekniklerin etkinlik performanslarını karşılaştırabilmek için sayısal veriler, istatistiksel sonuçlar ve tablo-halinde sunulmuş bulgular derlenmiştir.

LİTERATÜR TARAMASI

Doğal Elyaflar ve Bitkisel Kökenli Böcek Kovucular

Doğal elyaflı tekstiller (pamuk, yün, keten gibi) gözenekli ve nefes alabilir yapıları nedeniyle böcek kovucu apre uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Bu elyaflara, bitkisel kökenli uçucu yağlar veya bitki ekstraktları emdirilerek doğal böcek itici özellik kazandırılabilir (Maia ve Moore, 2011). Örneğin, pamuklu kumaşlara uygulanan neem (Azadirachta indica) yaprak ekstresi, sivrisinek kovucu olarak etkinliği araştırılan popüler doğal çözümlerden biridir. Mujallid (2019) yaptığı bir çalışmada yeşil neem yapraklarından hazırlanan ekstrakt ile finisaj yapılmış pamuklu kumaşın yaklaşık %80 sivrisinek kaçırma sağladığını, kuru neem yaprağı ekstraktı ile aprelenen kumaşın ise %60 seviyesinde kaldığını rapor etmiştir. Bu sonuç, bitkisel kovucuların kaynağına ve hazırlama şekline bağlı olarak etkinlik farkı gösterebildiğini ortaya koymaktadır (Mujallid, 2019). Benzer şekilde, farklı bitkisel kombinasyonlar da incelenmiştir. Parvez ve arkadaşları (2023), nane yaprağı ile sarımsak özlerinin alkol ekstraktını örme kumaşa uygulayarak sivrisineklere karşı koruma sağlamayı denemiştir. %25 konsantrasyonlu nane-sarımsak ekstraktı ile işlenmiş numunede %78.6 kovuculuk ve %50 öldürücülük, %35 ekstrakt oranında ise %85.6 kovuculuk ve %76.7 öldürücülük elde edilmiştir. Ancak yıkama döngüleri arttıkça etkinlikte azalma görülmüştür (örn. 5 yıkama sonrasında kovuculuk oranı belirgin biçimde düşmüştür). Bu durum, doğal ajanların tekstilde kalıcılığını artırmak için bağlayıcı polimerler veya kapsülleme tekniklerine ihtiyaç duyulabileceğini göstermektedir (Parvez vd., 2023).

Şekil 2. *Böcek kovucu özelliği olan bazı bitkiler; a)neem bitkisi b)nane/sarımsak c)limon otu d)okaliptüs e)lavanta f)karanfil g)tarçın*

Bitkisel yağların böcek kovucu etkisi uzun zamandır bilinmektedir. Citronella (limon otu) yağı, limonen (narenciye kabuğu yağı bileşeni), okaliptüs yağı, lavanta ve karanfil yağları gibi uçucu yağlar sivrisinekler ve diğer haşereler üzerinde itici etki yapar (Lee vd., 2002; Nerio vd., 2010; Vinayagamoorthy,vd., 2019) (Şekil 2). Ancak bu doğal bileşenler uçuculukları nedeniyle hızlı şekilde ortama yayılarak etkilerini yitirebilirler. Literatürde, uçucu yağların etki süresini uzatmak için mikrokapsülasyon veya siklodekstrin ile kompleksleme yöntemleri kullanılmaktadır (Specos vd., 2010). Bazı çalışmalarda, pamuklu kumaşlara β-siklodekstrin (β-CD) uygulayarak uçucu yağ moleküllerinin elyaf içerisinde hapsedilmesi sağlanmış; böylece hem ilk etki gücünün hem de yıkama-sonrası kalıcılığın arttığı gösterilmiştir. Örneğin, limonen maddesiyle yapılan bir deneyde, reaktif siklodekstrin ile ön işlem görmüş pamuklu kumaşın, işlem görmeyenlere kıyasla yıkama ve uzun depolama sonrasında dahi böcek itici özelliklerini koruduğu ve daha az kimyasal kullanımıyla aynı etkiyi sağlayabildiği bulunmuştur. Doğal kovucuların etkinliğini artırmak için bir diğer yaklaşım da kombinasyon ve katmanlama stratejileridir (Türkoğlu vd., 2020). Farklı bitkisel ekstraktların karışımları (örn. neem + nane, okaliptüs + tarçın yağı vb.) daha yüksek kovuculuk oranları sağlayabilmektedir (Pavela ve Benelli, 2016). Bununla birlikte, bitkisel ajanların antibakteriyel veya antifungal ek faydaları da vardır; örneğin narenciye kabuk ekstreleri uygulanmış cibinliklerin hem sivrisinek kovucu etki gösterdiği hem de *E. coli* ve *S. aureus* bakterilerine karşı antibakteriyel özellik kazandığı rapor edilmiştir (Feng vd., 2000; Goy vd., 2016; Medina-Jaramillo, 2017).

Literatürde doğal, bitkisel kaynaklı çözümlerin genellikle daha güvenli ve ekolojik olmaları öne çıkmaktadır. Bununla birlikte bu malzemeler etkinlik açısından formülasyona ve

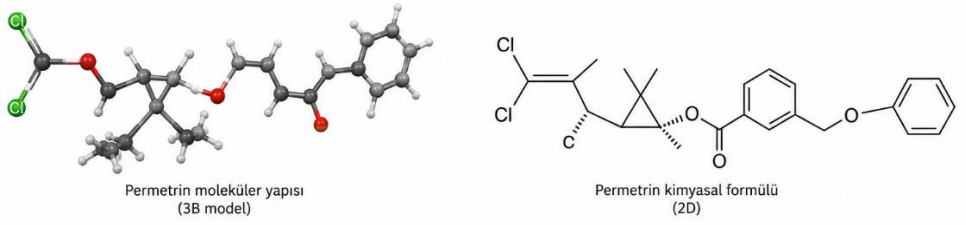
uygulamaya bağlı geniş bir aralık sergilemektedir. Tablo 1, bazı seçilmiş doğal kovucu uygulamalarının etkinlik ve dayanıklılık performanslarını özetlemektedir.

Tablo 1. *Seçilmiş doğal böcek kovucu tekstil uygulamalarının etkinlik ve dayanıklılık performansları.*

Doğal Kovucu Sistem	**Tekstil Yüzeyi**	**Elde Edilen Etki**	**Yıkama Dayanımı**	**Kaynak**
Neem (Azadirachta indica) yaprak ekstraktı	Pamuklu kumaş	Yaklaşık %80 sivrisinek kovuculuk	Düşük – yıkama sonrası etkinlik azalması	Mujallid (2019)
Nane + sarımsak ekstraktı (%35)	Örme kumaş	%85.6 kovuculuk, %76.7 öldürücülük	Orta – çoklu yıkamalarda düşüş	Parvez vd. (2023)
Limonen mikrokapsülü + β-siklodekstrin	Pamuklu kumaş	%41 sivrisinek ölüm oranı, belirgin kovuculuk	Yüksek – 20 yıkamaya kadar etkili	Türkoğlu vd. (2020)
Limonen mikrokapsülü + permetrin	Pamuk kumaş	%54 sivrisinek ölüm oranı	Yüksek – 20 yıkamaya kadar etkili	Türkoğlu vd. (2020)
Mikroenkapsüle citronella (lemongrass) yağı	Polyester kumaş	Yüksek sivrisinek kovuculuk	Orta – mikrokapsülleme ile geliştirilmiş dayanım	Mondal (2008)

Sentetik İnsektisit Kaplamalar ve Kimyasal Apreler

Sentetik böcek kovucular, tekstil ürünlerine güçlü ve genellikle uzun süreli koruma kazandırabilir. Bu grupta en yaygın kullanılanlar piretroid sınıfı insektisitlerdir. Özellikle permetrin maddesi, hem kovucu (repellent) hem öldürücü (insektisit) etkiye sahip olduğu için tekstil kaplamalarında sıkça tercih edilir (Banks vd., 2014). Permetrin, sivrisinekler ve böcekler de dahil olmak üzere çeşitli eklembacaklılara karşı etkili olması, insanlara karşı düşük toksisite göstermesi ve cilt tarafından minimum düzeyde emilmesi nedeniyle yaygın olarak kullanılan sentetik bir böcek ilacı ve akarisit olarak tanımlanır. Böcek ısırıklarına karşı koruma sağlamak için genellikle giysilere, ağlara ve kamp malzemelerine uygulanır (Şekil 3) (Chatra vd., 2019). Permetrin ile aprelenmiş kumaşlar, sivrisinek, kene, güve gibi haşerelerin kumaşa konmasını ve ısırmasını engeller; haşere kumaşa temas ederse sinir sistemini etkileyerek ölümüne de yol açabilir. Bu çift yönlü etki, permetrin apreli askeri üniformaların saha koşullarında %90'ı aşan oranlarda ısırık azalması sağlamasıyla belgelenmiştir (Faulde vd., 2003).



Şekil 3. *Permetrin böcek kovucu kimyasalı*

Sentetik kimyasallar arasında DEET (N, N-diethyl m-toluamide), de tekstillere uygulanabilmektedir, ancak DEET uçucu ve yağ çözücü bir madde olduğu için genellikle mikroenkapsüle edilerek veya özel polimer matrikslerle kumaşa bağlanarak kullanılır (Türkoğlu, 2013; Eyüpoğlu, 2018). N'Guessan ve arkadaşları (2008), DEET'i mikrokapsül formunda cibinliklere uygulayarak yavaş salımlı bir formülasyon geliştirmiş ve bu sayede kaplamanın sivrisinek öldürücü etkisinin en az 6 saat sürdüğünü gözlemlemişlerdir. Bu yöntem,

normalde hızla buharlaşan DEET'in tekstil üzerinde daha uzun süre kalmasını sağlamıştır. Ancak DEET'in bazı plastik malzemelere zarar verebilmesi ve cilt emilimiyle ilgili sınırlamalarından ötürü, tekstil uygulamalarında permetrin kadar yaygın değildir (N'Guessan vd., 2008).

Sentetik aprelerde öne çıkan bir diğer aktif madde grubu da karbamatlar ve organofosfatlar olabilmektedir; fakat bunlar toksisiteleri nedeniyle tekstil kullanımında tercih edilmezler. Günümüzde tekstil sektöründe yasal düzenlemeler, insan sağlığına minimum zarar veren ve çevreye kalıcı atık bırakmayan kimyasalların kullanımını teşvik etmektedir (European Chemicals Agency [ECHA], 2020). Avrupa Birliği REACH tüzüğü ve ABD EPA, permetrin gibi piretroidlerin kontrollü düzeylerde tekstilde kullanımına izin verirken, bazı eski tip insektisitlerin (örn. DDT, lindan gibi klorlu organiklerin) kullanılmasını yasaklamıştır (Rücker, 2024).

Sentetik kovucuların avantajı, yüksek ve hızlı etki sağlamalarıdır. Örneğin, Türkoğlu ve ark. (2020) tarafından rapor edilen bir çalışmada, pamuk kumaşa mikroenkapsüle permetrin uygulanması sonucunda test edilen *Culex* cinsi sivrisineklerin %54'ünün kısa sürede öldüğü, limonen gibi doğal bir ajanla karşılaştırıldığında daha yüksek öldürücülük sağlandığı belirtilmiştir.

Özetle, sentetik böcek itici kaplamalar yüksek performanslı koruma sunsa da, insan ve çevre sağlığı üzerindeki etkileri ile regülasyonlara uyum konularında dikkat gerektirir. Bu nedenle güncel eğilim, mümkün olduğunda doğal ve sentetik yöntemleri birleştiren hibrit çözümler geliştirmektir. Örneğin, bir tekstil yüzeyine hem permetrin (sentetik) hem de citronella yağı (doğal) birlikte mikroenkapsülle uygulanarak hem geniş spektrumlu hem de hoş kokulu bir koruma sağlama yönünde çalışmalar bulunmaktadır (Thorsell vd., 1998; Anitha vd., 2011). Böylece daha düşük miktarda kimyasal kullanarak yeterli koruma elde etmek ve olası yan etkileri azaltmak mümkün olabilir.

Biyopolimer Bazlı Yenilikçi Çözümler

Böcek itici tekstillerde biyopolimerlerin kullanımı, son yıllarda dikkat çeken bir diğer alandır. Chitosan (kitosan) gibi biyopolimerler, doğal kaynaklı (karides kabuğundan elde edilen kitin türevi) ve antimikrobiyal özellikli malzemelerdir (Rinaudo, 2006). Kitosan, tekstil terbiye işlemlerinde bağlayıcı ajan veya fonksiyonel kaplama olarak kullanılabilmektedir. Böcek itici uygulamalarda kitosanın iki rolü olabilir: (1) Doğrudan sivrisinek kovucu etkisi (bazı çalışmalarda zayıf da olsa kovucu etkisi rapor edilmiştir) ve (2) diğer aktif maddeler için film oluşturucu bir bağlayıcı görevi görmesi. Bano (2014), ticari bir sivrisinek kovucu apreyi pamuklu kumaşa uygularken sentetik akrilik bağlayıcı yerine kitosan kullanmanın etkilerini incelemiştir. Sonuçlar, kitosan bağlayıcı kullanıldığında kovuculuk etkisinin daha yüksek olduğunu ve kaplamanın yıkamaya karşı daha dayanıklı hale geldiğini, ayrıca kumaşın çekme mukavemetinde bir artış gözlendiğini göstermiştir. Bu bulgu, kitosan gibi biyopolimerlerin hem çevreci bir alternatif olduğunu hem de teknik performansı iyileştirebildiğini ortaya koymaktadır.

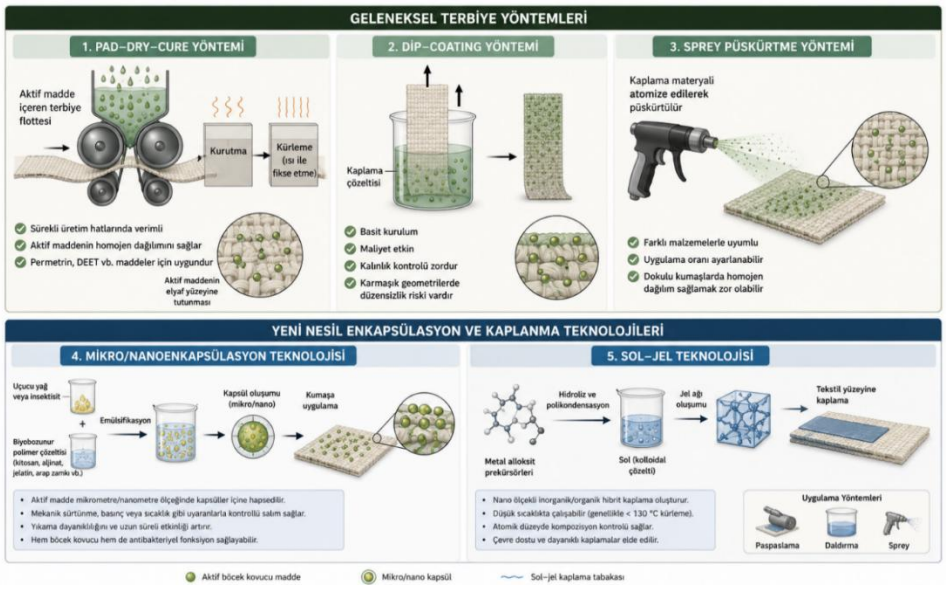
Bir diğer biyopolimer bazlı yaklaşım, yukarıda da bahsedilen siklodekstrin uygulamalarıdır. Siklodekstrinler (özelikle β-siklodekstrin), konik yapılı şeker türevleri olup hidrofobik molekülleri (örneğin uçucu yağ bileşenlerini veya permetrini) kaviteleri içinde

tutarak yavaş salınım sağlayabilir (Cipriani vd., 2008; Şengöz ve Öztanır, 2009). Reaktif gruplarla modifiye edilmiş siklodekstrinler (örn. MCT-β-CD: monoklorotriazinil-β-siklodekstrin) pamuklu kumaşlara kovalent bağ ile fikse edilebilir ve bu sayede kumaş, yıkamayla çıkmayan bir katman kazanır. Hebeish ve arkadaşları (2011) yaptıkları çalışmada, MCT-β-CD ile işlenmiş pamuk kumaşa limonen (narenciye yağı ana maddesi) aplike etmiş ve her 1 gram kumaş için 0.125 gram limonen yükleyerek dayanıklı bir böcek itici etki elde etmiştir. Sonuçta, β-CD ile işlenen kumaşın hem toksik etkili sivrisinek kovucu aktivite kazandığı, hem de 10'dan fazla yıkama ve uzun süreli depolama sonrasında bile bu etkinin korunduğu belirtilmiştir. Siklodekstrin uygulamaları, özellikle doğal uçucu yağların kısa ömürlü kokusunu ve etkisini uzatmak açısından büyük potansiyel taşır.

Ayrıca mikrokapsülasyon yöntemi de biyopolimer bazlı çözümlere dahil edilebilir. Mikrokapsül duvar malzemesi olarak genellikle arap zamkı gibi doğal polimerler veya aljinat, kitosan gibi biyopolimerler kullanılabilmektedir. Örneğin, Tayyar ve arkadaşları (2025) çalışmalarında Citrus aurantium L. (turunç) kabuğu yağını kompleks koaservasyon yöntemiyle mikrokapsülle kaplayıp pamuk, polyester ve akrilik kumaşlara uygulamışlardır. Optik mikroskop görüntülerinde düzgün küresel yapıda kapsüllerin kumaş yüzeyine başarıyla tutunduğu, ve geliştirilen özel excito-chamber düzeneği ile yapılan testlerde bu kapsüllü kumaşların *Culex* sivrisineklerine karşı belirgin kovucu etki gösterdiği saptanmıştır. Mikrokapsül tekniği, kontrollü salım sağlayarak uçucu kovucuların etkisini uzatmakla kalmaz, aynı zamanda çok katmanlı fonksiyonellik eklenmesine imkân verir. Örneğin aynı kapsüle hem böcek kovucu hem de hoş koku verici bir yağ konulabilir.

BÖCEK KOVUCU BİLEŞENLERİN TEKSTİL YÜZEYLERİNE ENTEGRASYONUNDA KULLANILAN YÖNTEMLER

Tekstil ürünlerine böcek kovucu fonksiyon kazandırılmasında kullanılan terbiye teknikleri, aktif maddenin kumaş yüzeyine tutunma gücü, yıkama dayanıklılığı ve kontrollü salım profili açısından belirleyici öneme sahiptir. Geleneksel yöntemler arasında yer alan pad-dry-cure**,** dip-coating **ve** sprey püskürtme teknikleri, endüstriyel ölçekte en yaygın başvurulan yöntemlerdir (Van Langenhove ve Paul, 2014; Sajib vd., 2020) (Şekil 4).



Şekil 4. *Böcek kovucu yöntemler*

Pad-dry-cure yönteminde kumaş, aktif madde içeren terbiye flottesine daldırılarak iki silindir arasından geçirilir, fazla flotte sıkılır ve ardından kurutma ile kürleme işlemlerine tabi tutulur. Bu yöntem özellikle sürekli üretim hatlarında verimli olup, sentetik insektisitlerin (permetrin, DEET vb.) pamuk ve polyester kumaşlara homojen dağılımını sağlamaktadır (Sheikh ve Teli, 2024).

Dip-coating tekniğinde ise tekstil materyali kaplama çözeltisine batırılarak çekilir; bu yöntem basit kurulumu ve maliyet etkinliği nedeniyle tercih edilmekle birlikte, kalınlık kontrolü ve karmaşık geometrilerde düzensizlik riski taşımaktadır (Ojstršek vd., 2022).

Sprey püskürtme yöntemi ise kaplama materyalinin atomize edilerek püskürtme tabancası ile tekstil yüzeyine uygulanmasını esas alır; farklı malzemelerle uyumlu olup uygulama oranı ayarlanabilir, ancak dokulu kumaşlarda homojen dağılım sağlamak zor olabilmektedir (Ortelli vd., 2020; Trabucco vd., 2021).

Son yıllarda, aktif maddelerin tekstil yüzeyine entegrasyonunda mikroenkapsülasyon ve nanoenkapsülasyon teknolojileri öne çıkmıştır (Ghazal vd., 2023). Mikroenkapsülasyon, uçucu yağların veya insektisitlerin biyobozunur polimer duvarlar (kitosan, aljinat, arap zamkı, jelatin vb.) ile çevrelenerek mikrometre ölçeğinde kapsüller halinde üretilmesini içerir. Örneğin, lime peel uçucu yağının kitosan/aljinat mikrokapsülleri ile pamuklu kumaşa immobilize edilmesi, hem antibakteriyel hem de böcek kovucu etkinlik sağlamıştır. Benzer şekilde, sitronella yağının jelatin-arap zamkı duvar malzemeleri ile mikroenkapsüle edilerek pamuk ve polyester kumaşlara uygulanması, kumaş türüne bağlı olarak farklı salım kinetikleri sergilemiş ve yıkama dayanıklılığını artırmıştır. Mikroenkapsülasyonun en önemli avantajı, mekanik sürtünme, basınç veya sıcaklık değişimleri gibi dış uyaranlarla kapsül duvarının kontrollü yıkılması veya difüzyonu sayesinde aktif maddenin uzun süreli ve kontrollü salımını sağlamasıdır.

Sol-jel teknolojisi ise metal alkoksit prekürsörlerin hidroliz ve polikondensasyon reaksiyonları ile kolloidal çözeltiler (sol) haline getirilip, jel ağı oluşturarak tekstil yüzeyine nano ölçekli inorganik/organik hibrit kaplama yapılmasını sağlar (Rivero vd., 2016; Camlibel ve Arık, 2017). Bu yöntem düşük sıcaklık koşullarında çalışabilme, atomik düzeyde kompozisyon kontrolü ve çevre dostu olma gibi avantajlar sunar. Tekstil uygulamalarında sol-jel çözeltileri paspaslama, daldırma veya sprey yöntemleri ile kumaşa uygulanabilir; ardından genellikle 130°C'nin altında termal kürleme gerçekleştirilir.

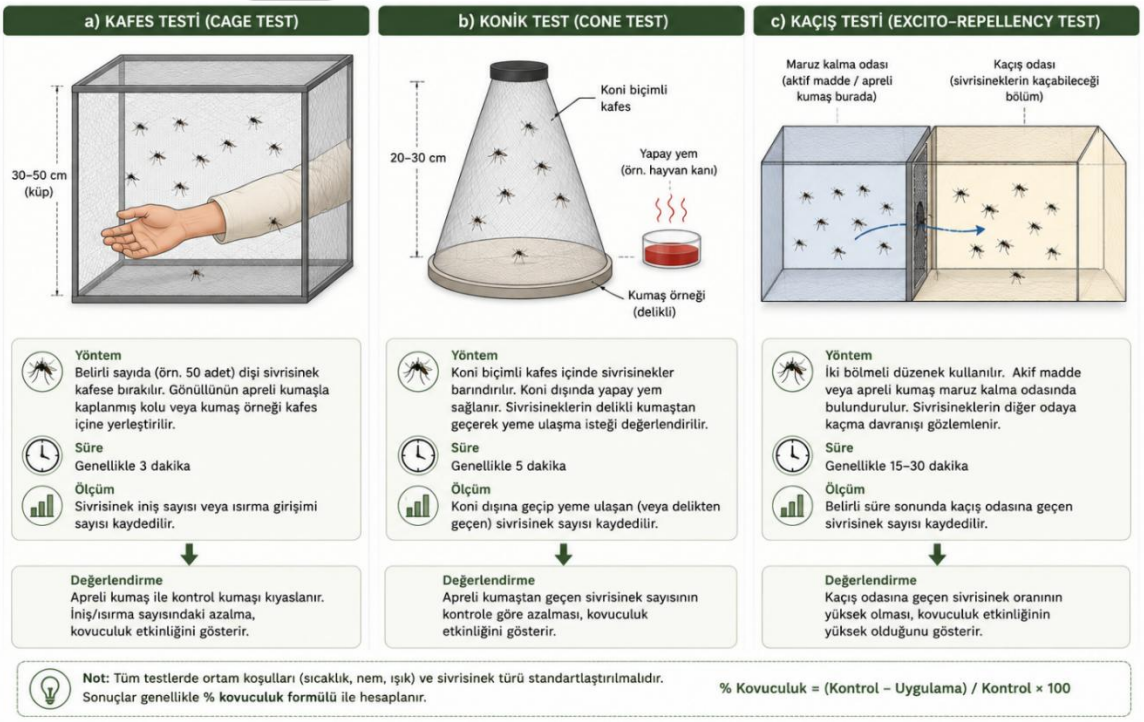
BÖCEK KOVUCULUK TEST METOTLARI

Tekstil üzerine uygulanmış kovucuların etkinliğini değerlendirmek için literatürde en çok kullanılan testler şunlardır: kafes testi (cage test), konik test (cone test) ve çift bölmeli kaçış testi (excito-repellency test) (Hougard, 2003; Logan vd., 2010; Saeidi vd., 2011; Anuar ve Yusof, 2016; Prakash vd., 2019; Turan ve Çokyiğit, 2023) (Şekil 5).

Kafes testinde, belirli ebatlarda (genellikle 30–50 cm küp) bir kafes içine belirli sayıda (örneğin 50 adet) dişi sivrisinek bırakılır; gönüllü deneğin kovucu apreli kumaşla kaplanmış kolu veya kumaş örneği kafes içine yerleştirilir ve sivrisineklerin konma/ısırma davranışı belirli bir süre (örn. 3 dakika) gözlemlenir. Bu testte sivrisinek iniş sayıları veya ısırma girişimleri sayılarak, apreli kumaş ile kontrol kumaşı kıyaslanır.

Konik test ise farklı olarak, insana ihtiyaç duymadan bir kumaş örneğinin üzerinde koni biçimli bir kafes içinde sivrisinekleri barındırır; sivrisinekleri cezbedecek yapay bir yem (örn. hayvan kanı) koni dışında sağlanır ve sivrisineklerin delikli kumaştan geçerek yeme ulaşma isteği değerlendirilir.

Kaçış testinde ise iki bölmeli bir düzenek kurulur; biri sivrisineklerin başlangıçta bulunduğu "maruz kalma odası", diğeri kaçabilecekleri "kaçış odası"dır. Kovucu apreli kumaş veya aktif madde maruz kalma odasında bulundurulur ve belirli süre sonunda sivrisineklerin ne kadarının diğer odaya geçtiği ölçülür; kovucu etkinin yüksek olması, sivrisineklerin rahatsız olup kaçış odasına yönelmesiyle anlaşılır.



Şekil 5. *Böcek kovuculuk testleri a)Kafes testi, b)Konik test, c)Kaçış testi*

BULGULAR VE TARTIŞMA

Literatür incelemesi sonucunda, böcek itici tekstiller konusunda geliştirilen yöntemlerin farklı avantaj ve sınırlılıklara sahip olduğu görülmüştür. Sentetik kökenli permetrin ve DEET gibi ajanların yüksek kovuculuk ve öldürücülük sağladığı, özellikle askeri tekstiller ve dış mekân uygulamalarında etkili sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte toksisite, çevresel etkiler ve direnç gelişimi gibi nedenlerle doğal kökenli alternatiflere yönelim artmıştır. Neem, citronella, limon otu, okaliptüs, lavanta ve nane gibi bitkisel ajanların çevre dostu çözümler sunduğu, ancak etkinlik ve kalıcılık açısından sentetik ajanlara kıyasla daha sınırlı performans gösterebildiği anlaşılmıştır.

Çalışmalarda, doğal ajanların yıkama sonrası etkinlik kaybı yaşadığı; buna karşılık mikroenkapsülasyon, siklodekstrin kompleksleme ve biyopolimer bazlı kaplama tekniklerinin yıkama dayanıklılığını önemli ölçüde artırdığı rapor edilmiştir. Özellikle mikrokapsül uygulamalarının kontrollü salım sağlayarak uzun süreli koruma oluşturduğu görülmüştür. Ayrıca sol-jel ve nanoenkapsülasyon gibi yeni nesil yöntemlerin aktif maddelerin kumaş

yüzeyine daha homojen dağılımını sağladığı ve çok fonksiyonlu tekstil uygulamalarına olanak verdiği belirlenmiştir.

İnsan sağlığı ve kullanıcı konforu açısından değerlendirildiğinde, tekstile entegre edilen kovucuların doğrudan cilt temasını azaltması önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte güçlü bitkisel kokular, kumaş sertliği veya hava geçirgenliğinde azalma gibi bazı kullanıcı konforu problemlerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Uygulama alanına göre farklı çözümlerin öne çıktığı; sağlık tekstillerinde daha güvenli ve biyobazlı sistemlerin, askeri ve dış mekân tekstillerinde ise yüksek dayanımlı sentetik sistemlerin tercih edildiği görülmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, gelecekte böcek kovucu tekstil çalışmalarının sürdürülebilir, biyobozunur, düşük toksisiteli ve uzun ömürlü hibrit sistemlere yönelmesinin önemli olduğu düşünülmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Böceklere karşı dayanıklı tekstiller, halk sağlığı, kullanıcı konforu ve koruyucu tekstil uygulamaları açısından önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu derleme kapsamında doğal bitkisel ekstraktlar, sentetik insektisitler ve biyopolimer bazlı sistemler değerlendirilmiş; farklı uygulama tekniklerinin böcek kovuculuk performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Literatür bulguları, sentetik ajanların yüksek etkinlik sağladığını; buna karşın doğal kovucuların çevre dostu ve insan sağlığı açısından daha güvenli alternatifler sunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte doğal ajanların kalıcılık problemlerinin mikroenkapsülasyon, siklodekstrin kompleksleme ve nanoenkapsülasyon gibi tekniklerle önemli ölçüde azaltılabildiği belirlenmiştir. Özellikle kontrollü salım sağlayan biyopolimer bazlı sistemlerin gelecekte daha yaygın kullanım potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir.

Böcek kovucu tekstillerin sağlık sektörü, askeri giysiler, kamp ekipmanları ve ev tekstilleri gibi farklı alanlarda önemli kullanım potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Ancak bu ürünlerde yıkama dayanımı, kullanıcı güvenliği, standart test yöntemleri ve çevresel etkiler gibi konuların daha ayrıntılı araştırılması gerekmektedir.

Sonuç olarak, gelecekte yapılacak çalışmaların; çevre dostu, biyobozunur, düşük toksisiteli ve uzun ömürlü hibrit kaplama sistemlerine odaklanması önerilmektedir. Ayrıca akıllı tekstiller, kontrollü salım sistemleri ve çok fonksiyonlu yüzey uygulamalarının geliştirilmesi, böcek kovucu tekstil teknolojilerinin ilerlemesine önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Anitha, R., Ramachandran, T., Rajendran, R., Mahalakshmi, M. (2011). Microencapsulation of lemon grass oil for mosquito repellent finishes in polyester textiles. *Elixir Bio Phys*, *40*, 5196-5200.

Anuar, A. A., Yusof, N. (2016). Methods of imparting mosquito repellent agents and the assessing mosquito repellency on textile. *Fashion and Textiles*, *3*(1), 12.

Ardanuy, M., Faccini, M., Amantia, D., Aubouy, L., Borja, G. (2014). Preparation of durable insecticide cotton fabrics through sol-gel treatment with permethrin. *Surface and Coatings Technology*, *239*, 132-137.

Banks, S. D., Murray, N., Wilder-Smith, A., Logan, J. G. (2014). Insecticide-treated clothes for the control of vector-borne diseases: A review on effectiveness and safety. *Medical and Veterinary Entomology, 28*(Suppl. 1), 14–25. https://doi.org/10.1111/mve.12068

Bano, R. (2014). Use of Chitosan in Mosquito Repellent Finishing for Cotton Textiles. *Journal of Textile Science & Engineering*, 4(1), 162.

Camlibel, N. O., Arik, B. (2017). Sol-gel applications in textile finishing processes. *Recent applications in sol-gel synthesis. IntechOpen Limited, UK*, 253-281.

Chatha, S. A. S., Asgher, M., Asgher, R., Hussain, A. I., Iqbal, Y., Hussain, S. M., Iqbal, H. M. (2019). Environmentally responsive and anti-bugs textile finishes–Recent trends, challenges, and future perspectives. *Science of the Total Environment*, *690*, 667-682.

Cipriani, T. R., Mellinger, C. G., de Souza, L. M., Baggio, C. H., Freitas, C. S., Marques, M. C., Iacomini, M. (2008). Acidic heteroxylans from medicinal plants and their anti-ulcer activity. *Carbohydrate Polymers*, *74*(2), 274-278.

Çelen, R., Kanmaz, D., Aras, C., Yıldız, S., Tiritoğlu, M., Gebizli, S. D., Karaca, E. (2023). Sivrisinek Kovucu Tekstil Malzemeleri Üzerine Bir Derleme. *Tekstil ve Mühendis*, *30*(132), 351-367.

European Chemicals Agency [ECHA], 2020.

Eyüpoğlu, Ş. (2018). *Bazı doğal ve sentetik ürünlerin mikrokapsülasyon tekniği ile hazırlanarak, arılara karşı kovucu özelliğe sahip kumaş eldesinin araştırılması*. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa.

Faulde, M.K., Uedelhoven, W.M., Robbins, R.G. (2003). Contact toxicity and residual activity of different permethrin-based fabric impregnation methods for Aedes aegypti (Diptera: Culicidae), Ixodes ricinus (Acari: Ixodidae), and Lepisma saccharina (Thysanura: Lepismatidae). J Med Entomol. 40(6):935-941.

Fei, B., Xin, J. H. (2007). N,N-diethyl-m-toluamide-containing microcapsules for bio-cloth finishing. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, *77(1)*, 52-57.

Feng, Q. L., Wu, J., Chen, G. Q., Cui, F. Z., Kim, T. N., Kim, J. O. (2000). A mechanistic study of the antibacterial effect of silver ions on Escherichia coli and Staphylococcus aureus. *Journal of biomedical materials research*, *52*(4), 662-668.

Fradin, M. S., Day, J. F. (2002). Comparative efficacy of insect repellents against mosquito bites. *New England Journal of Medicine, 347*(1), 13–18. https://doi.org/10.1056/NEJMoa011699

Ghazal, H., Khaleed, N., El-Aziz, E. A. (2023). Significance, advantages, and disadvantages of nanotechnology in textile finishing. *Egyptian Journal of Chemistry*, *66*(12), 467–482.

Goy, R. C., Morais, S. T., Assis, O. B. (2016). Evaluation of the antimicrobial activity of chitosan and its quaternized derivative on E. coli and S. aureus growth. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, *26*(1), 122-127.

Hebeish, A., El-Naggar, M. E., Fouda, M. M., Ramadan, M. A., Al-Deyab, S. S., El-Rafie, M. H. (2011). Highly effective antibacterial textiles containing green synthesized silver nanoparticles. *Carbohydrate polymers*, *86*(2), 936-940.

Hougard, J. M., Corbel, V., N'guessan, R., Darriet, F., Chandre, F., Akogbeto, M., Traore-Lamizana, M. (2003). Efficacy of mosquito nets treated with insecticide mixtures or mosaics against insecticide resistant Anopheles gambiae and Culex quinquefasciatus (Diptera: Culicidae) in Cote d'Ivoire. *Bulletin of entomological research*, *93*(6), 491-498.

Joshi, M., Ali, S. W., Purwar, R., Rajendran, S. (2009). Ecofriendly antimicrobial finishing of textiles using bioactive agents based on natural products. *Indian journal of fibre and textile research*, *34*(3), 295-304.

Kantheti, P., Gupta, A. K., Rajitha, I. (2023). Sustainable mosquito repellent finish on cotton using Eucalyptus globulus leaf dye extracts. *Indian Journal of Fibre & Textile Research (IJFTR)*, *48*(3), 346-352.

Koren, G., Matsui, D., Bailey, B. (2003). DEET-based insect repellents: Safety implications for children and pregnant and lactating women. *Canadian Medical Association Journal, 169*(3), 209–212.

Lee, S. J., Umano, K., Shibamoto, T., & Lee, K. G. (2002). Identification of volatile components in basil (Ocimum basilicum L.) and thyme leaves and their antioxidant properties. *Food Chemistry, 91*(1), 131–137. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.05.056

Logan, J. G., Stanczyk, N. M., Hassanali, A., Kemei, J., Santana, A. E., Ribeiro, K. A., Mordue, A. J. (2010). Arm-in-cage testing of natural human-derived mosquito repellents. *Malaria journal*, *9*(1), 239.

Maia, M. F., Moore, S. J. (2011). Plant-based insect repellents: A review of their efficacy, development and testing. *Malaria Journal, 10*(Suppl 1), S11. https://doi.org/10.1186/1475-2875-10-S1-S11

Medina-Jaramillo,C. Ochoa-Yepes, O., Bernal,C., Famá, L. (2017). Active and smart biodegradable packaging based on starch and natural extracts, *Carbohydrate Polymers,* Volume 176, 187-194, https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.079.

Medha, K., Rajna, S., Devi, L. J., Samant, L., Jose, S. (2021). A comprehensive review on moth repellent finishing of woolen textiles. *Journal of Cultural Heritage, 49*, 260–271. https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.02.006

Mondal, S. (2008). Phase change materials for smart textiles – An overview. *Applied Thermal Engineering, 28*(11–12), 1536–1550. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.08.009

Mujallid, R. S. M. (2019). Efficiency of fabric repellency to mosquitoes. *Art and Design Review*, 7(4), 175–186. doi: 10.4236/adr.2019.74015.

N'Guessan, R., Knols, B. G. J., Pennetier, C., Rowland, M. (2008). DEET microencapsulation: a slow-release formulation enhancing the residual efficacy of bed nets against malaria vectors. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 102(3), 259–262.

Nerio, L. S., Olivero-Verbel, J., Stashenko, E. (2010). Repellent activity of essential oils: A review. *Bioresource Technology, 101*(1), 372–378. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.048

Ojstršek, A., Jug, L., Plohl, O. (2022). A review of electro conductive textiles utilizing the dip-coating technique: their functionality, durability and sustainability. *Polymers*, *14*(21), 4713.

Ortelli, S., Belosi, F., Bengalli, R., Ravegnani, F., Baldisserri, C., Perucca, M., Costa, A. L. (2020). Influence of spray-coating process parameters on the release of TiO2 particles for the production of antibacterial textile. *NanoImpact*, *19*, 100245.

Parvez, A. A., Hossain, M. J., Hossain, M. Z., Sohan, M. S. H., Hoque, F., Ahsan, M. H., Hoque, M. S. (2023). Mosquito repellent fabric: Development and characterization of peppermint and garlic mixture finish on knitted fabric to examine mosquito repellency. *Heliyon*, 9(5), e15944. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e15944

Pavela, R., & Benelli, G. (2016). Essential oils as ecofriendly biopesticides? Challenges and constraints. *Trends in Plant Science, 21*(12), 1000–1007. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.10.005

Prakash, C., Kumarand, S. K. S., & Sree, P. S. (2019). Effect of repellency on mosquito nets using citrus peel extract. *Int J Innovative Tech Exp Eng*, *8*(11), 1531-1535.

Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in polymer science*, *31*(7), 603-632.

Rivero, P. J., Goicoechea, J. (2016). Sol-gel technology for antimicrobial textiles. In *Antimicrobial Textiles* (pp. 47-72). Woodhead Publishing.

Rocklöv, J., Dubrow, R. (2020). Climate change: An enduring challenge for vector-borne disease prevention and control. *Nature Immunology, 21(5)*, 479–483. https://doi.org/10.1038/s41590-020-0648-y

Rücker, T. (2024). Safe Chemicals/REACH. In *Drug Discovery and Evaluation: Safety and Pharmacokinetic Assays* (pp. 2689-2694). Cham: Springer International Publishing.

Saeidi, M., Moharramipour, S., Sefidkon, F., & Aghajanzadeh, S. (2011). Insecticidal and repellent activities of Citrus reticulata, Citrus limon and Citrus aurantium essential oils on Callosobruchus maculatus. *Integrated Protection of Stored Products IOBC/WPRS Bulletine*, *69*, 289-293.

Sajib, M., Banna, B., Mia, R., Ahmed, B., Chaki, R., Alam, S. S., Islam, M. T. (2020). Mosquito repellent finishes on textile fabrics (woven & knit) by using different medicinal natural plants. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, *6*, 164-167.

Sheikh, J. N., Teli, M. D. (2024). *Sustainable textile chemical processing*. CRC Press.

Specos, M. M. M., García, J. J., Tornesello, J., Marino, P., Vecchia, M. D., Defain Tesoriero, M. V., Hermida, L. G. (2010). Microencapsulated citronella oil for mosquito repellent finishing of cotton textiles. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene, 104*(10), 653–658. https://doi.org/10.1016/j.trstmh.2010.06.004

Şengöz, N. G., Öztanır, İ. (2009). Siklodekstrinler Ve Tekstil Uygulamaları. *Tekstil ve Mühendis*, *16*(74), 21-35.

Tayyar, A. E., Kesici, Ş., Tetik, G. D., Aydeniz Güneşer, B. (2025). Development of insect repellent textiles via treating with microcapsules containing *Citrus aurantium* L. peel essential oil. *Industria Textila*, 76(1), 62-72.

Tawiah, B., He, W., Seidu, R. K., Zhou, Y., Sarkodie, B., Fei, B. (2025). Mosquito-repellent textiles: a systematic review of material innovations, application principles and research trends. *Textile Research Journal*, *95*(17-18), 2218-2247.

Thorsell, W., Mikiver, A., Malander, I., & Tunon, H. (1998). Efficacy of plant extracts and oils as mosquito repellents. *Phytomedicine*, *5*(4), 311-323.

Trabucco, S., Ortelli, S., Del Secco, B., Zanoni, I., Belosi, F., Ravegnani, F., Costa, A. L. (2021). Monitoring and optimisation of Ag nanoparticle spray-coating on textiles. *Nanomaterials*, *11*(12), 3165.

Turan, N. Y., Çokyiğit, M. A. (2023). A review of plant-based insect repellents, their applications on textiles and repellency test methods. *Usak University Journal of Engineering Sciences*, *6*(1), 33-51.

Türkoğlu, G. C. (2013). *Tekstil materyallerine fonksiyonel özellik kazandıran çeşitli kapsüllerin elde edilmesi ve karakterizasyonu*. Master's thesis, Dokuz Eylul Universitesi, Türkiye.

Türkoğlu, G. C., Sarıışık, A. M., Erkan, G., Yıkılmaz, M. S., Kontart, O. (2020). Micro- and nano-encapsulation of limonene and permethrin for mosquito repellent finishing of cotton textiles. *Iranian Polymer Journal*, *29*(4), 321-329. 10.1007/s13726-020-00799-4

Van Langenhove, L., Paul, R. (2014). Insect repellent finishes for textiles. *Functional Finishes for Textiles: Improving Comfort, Performance and Protection*, 333-60.

Vinayagamoorthy, P., Senthilkumar, B., Patchiyappan, K. M., Kavitha, R. (2017). Microencapsulated lemongrass oil for mosquito repellent finishing of knitted cotton wear. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, *10*(6), 303-307.

World Health Organization. (2021). *World malaria report 2021*. World Health Organization. https://www.who.int/teams/global-malaria-programme/reports/world-malaria-report-2021

6th International
Congress of Engineering and
Natural Sciences

SOLAR SIMULATION TESTING AND EVALUATION OF RESULTS FOR AUTOMOTIVE EXTERIOR TRIM COMPONENTS

Berna ÖZTÜRK[1]
Onur GÜDEK[2]
Gizem KILCI[3]
İhsan Can PEHLİVAN[4]

Abstract

Throughout the service life of a vehicle, exterior trim components play a critical role in fulfilling customer expectations regarding durability, comfort, safety, and aesthetics. These parts are subjected to various external factors such as climatic conditions, vibrations, and loads that may occur during the vehicle's operational lifetime. To evaluate their ability to meet performance and quality standards over a defined target lifespan under these influences, a range of testing methods are applied.

One of the most important tests performed is the sun simulation (accelerated aging) test. The purpose of this test is to assess the performance of exterior trim components in terms of resistance to fading, color change, functional degradation, and surface deterioration. Both basic and advanced test systems can be used in sun simulation applications.

The aim of this study is to describe what solar simulation testing is, how it is performed, its effects on exterior trim components, and the test systems currently in use.

Keywords: Exterior trim components, solar simulation, aging, surface degradation, test Systems

[1] Test Engineering , TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa, Türkiye,, Orcıd: 0009-0004-1535-5290
[2] Test Engineering , TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa, Türkiye,, Orcıd: 0009-0001-1104-8400
[3] Test Engineering , TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa, Türkiye,, Orcıd: 0009-0004-1535-5290
[4] Test Engineering , TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa, Türkiye,, Orcıd: 0009-0006-6468-0924

1. Introduction

In ensuring the performance and quality expectations of customers for a vehicle's performance and quality, factors such as equipment level, handling, trim components, fuel consumption, and interior noise levels can all play a role. Among these, exterior trim components stand out, particularly in terms of perceived quality.

To ensure that the quality and performance criteria expected from exterior trim components are consistently maintained at a defined level, it is necessary to recreate a wide variety of usage and environmental conditions both at the vehicle and component levels in a controlled laboratory environment for testing purposes.

In this context, exterior automotive trim components are subjected to various tests in laboratory settings to evaluate their performance degradation under prolonged exposure to solar radiation. The ultimate goal of these tests is to verify that the components continue to meet customer expectations throughout their service life.

One such test performed under laboratory conditions is the sun simulation test. The purpose of this test is to induce accelerated aging by simulating environmental factors such as UV radiation, high temperatures, and thermal cycles that exterior trim parts may encounter over their intended lifespan.

Following sun simulation testing, various effects may be observed on the component and/or its material. The outcomes of these tests can generally be categorized into two types of evaluations: objective and subjective. Objective evaluation methods rely on quantitative data obtained from various sensors and dimensional measurements, while subjective evaluations are conducted by test experts using the SAE (Society of Automotive Engineers) visual rating scale.

The results obtained from these assessments contribute to the establishment of quality criteria during the product development phase and enable proactive actions to prevent potential customer complaints.

Solar aging tests are typically conducted using solar simulators that emit specific wavelengths to replicate the spectral distribution of sunlight. These tests are performed under temperature cycles that vary throughout the day to simulate real-world climatic conditions.

There is a wide range of commercially available test systems and equipment for conducting sun simulation tests, varying significantly depending on how the solar simulators are applied. These systems may range from simple, fixed configurations to complex and dynamic setups.

In the following sections of this study, the sun simulation testing of automotive exterior trim components will be discussed in detail, including the test procedures, evaluation methods, and the test systems currently in use.

2. Methodology

2.1 Solar Simulation Test :

Sunlight is crucial for the sustainability of life on Earth. However, the high-energy ultraviolet (UV) radiation it contains can cause irreversible chemical degradation in material structures over time. These rays can break the chemical bonds in materials, leading to both

visual and structural deformations, which not only result in aesthetic losses but also adversely affect the functionality and lifespan of the product. (https://lasp.colorado.edu/home/sorce)

The solar radiation that reaches the Earth's surface is divided into three categories: ultraviolet (UV), visible (VIS), and infrared (IR) radiation.

A. Ultraviolet (UV) Radiation:

Ultraviolet radiation has a wavelength range of 100–400 nanometers (nm) and is invisible to the human eye. It is classified into three subgroups: UV-C (100–280 nm), UV-B (280–315 nm), and UV-A(315–400nm). While UV-C does not reach the Earth's surface, UV-B can cause sunburn and degradation in materials. UV-A, on the other hand, is responsible for long-term photochemical degradation, contributing to material aging, color fading, and various biological effects such as skin cancer and eye damage.

B. Visible Light (VIS):

Visible light has a wavelength range of 400–700 nanometers (nm) and is detectable by the human eye. Although it does not directly cause chemical degradation in materials, it can lead to fading over time.

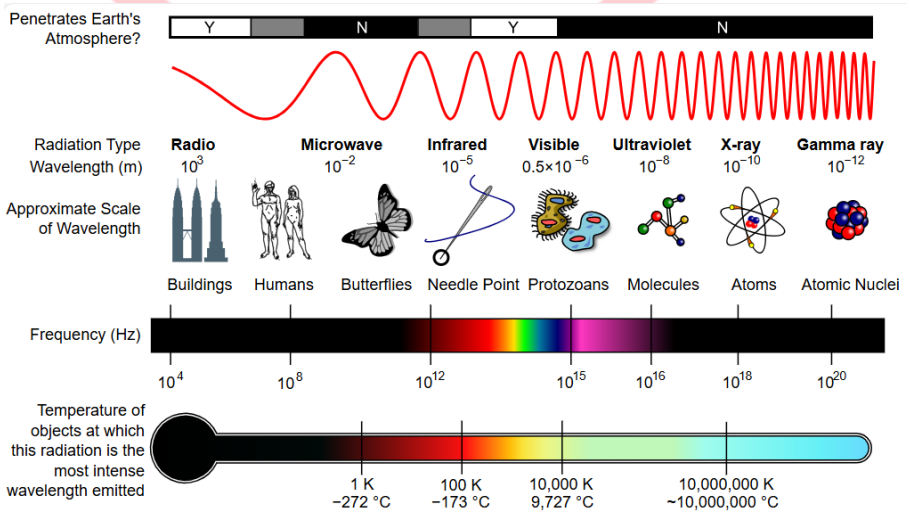
C. Infrared (IR) Radiation:

Infrared radiation has a wavelength range of 700 nanometers to 1 millimeter and is not visible to the human eye. It constitutes a significant portion of the solar radiation reaching the Earth. By increasing the temperature of materials, it can cause effects such as expansion, softening, thermal stress, and structural deformation.

Although the visible region occupies only a small portion of the electromagnetic spectrum, it contains approximately 45% of the radiated energy, making it one of the most energy-dense regions. Ultraviolet rays account for about 5% of the energy, while infrared rays contribute around 50%. (Givoni, 1969)

Figure 1 *- Electromagnetic Spectrum*

(https://tua.gov.tr/tr/blog/havacilik-ve-teknoloji/dalgalar-ve-elektromanyetik-tayf-spektrum)



To evaluate the long-term resistance of automotive components to sunlight exposure, solar simulation tests are conducted under laboratory conditions using ultraviolet (UV) lamps with specific spectral distributions, in accordance with international standards. Some of these international standards are described below:

- SAE J2020: This standard defines test procedures for accelerated UV aging of exterior automotive trim materials using fluorescent ultraviolet (UV) lamps and condensation systems. The purpose of this test method is to evaluate the durability of materials against UV radiation and environmental conditions.
- ASTM G154: This standard covers accelerated aging tests conducted using fluorescent UV lamps, and it addresses the effects of UV radiation on various materials.
- ISO 4892-3: This standard specifies the test methods used to evaluate the resistance of plastics to UV radiation.

The tests are conducted under conditions defined by international standards, using mobile or stationary chambers or devices that can accurately replicate the spectral distribution of natural sunlight, as well as apply specific light intensity and temperature cycles with precise control.

Figure-2 *Solar Simulation System*

(EYE IWASAKI ELECTRIC https://www.eye.co.jp/corporate/business/environmental/)

Exterior trim components are typically exposed to intense UV radiation for several months in test cycles designed to simulate the types of degradation that may occur over years of natural environmental exposure. At the end of the test:

- Color changes (fading or yellowing),
- Degradation of surface texture,
- Deformation,
- Reduction in mechanical properties (such as hardness and flexibility)

Plastic components, such as headlight and taillight housings, are trim parts that are susceptible to UV radiation. Sunlight can cause the plastic material to become brittle and lead to color fading in coated parts.Over time, a reduction in headlight oxidation may result in fogging, yellowing, and similar effects on the surfaces of headlight and taillight glass.

Oxidation of plastic coatings can also damage other plastic and rubber components, such as window seals, wipers, and tires, in a similar manner over time. Prolonged exposure to sunlight may cause cracking, breaking, and other deformations in these materials.

Such effects are evaluated both objectively and subjectively by testing the resistance of plastic coatings and trim materials against sunlight using solar simulators, ensuring the preservation of aesthetic and functional quality.

According to the IEC 60904-9 standard, solar simulators are defined as equipment that uses a light source with a spectral distribution similar to natural sunlight. In this context, a solar simulator is an artificial light source capable of producing or simulating sunlight with comparable spectral distribution and light intensity. Various types of solar simulators operate as either single-lamp or multi-lamp systems to determine the current-voltage (IV) characteristics of photovoltaic (PV) devices. (https://enlitechnology.com/blog/solar-simulator-01)

These testing systems employ two types of test methods: stationary and mobile.

Stationary (Laboratory-Type) UV test chambers are static devices typically used in laboratories and testing environments to simulate specific characteristics of sunlight. These simulators are fixed in one location and are generally used for long-term tests or measurements requiring high accuracy. Stationary simulators produce a light source with a spectral distribution similar to natural sunlight and are commonly preferred for testing the efficiency and performance of photovoltaic (PV) devices. These chambers use xenon arc lamps and fluorescent UV lamps.

Stationary UV lamp systems may also be mounted on mobile platforms, rail systems, or movable carriers to perform tests.

Figure 3- *Stationary UV lamp systems*

(EYE IWASAKI ELECTRIC https://www.eye.co.jp/corporate/business/environmental/)

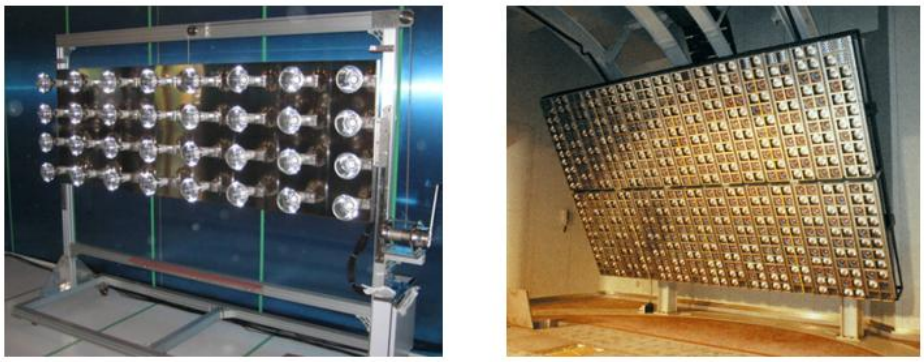
Mobile solar simulation test systems are designed to accommodate vehicle-mounted or outdoor applications, allowing for the testing of large exterior automotive trim parts (such as bumpers, roofs, side door panels) or the entire outer surface of a vehicle. Compared to stationary simulators, mobile simulators are more compact and portable, making them suitable for rapid simulation of sunlight effects in outdoor or field environments.Tripathi, S., & Gupta, R. (2017).

Solar Simulator: The Science and Technology of Photovoltaic Testing. Springer International Publishing.

(Kittler & Rupp, 2018). Solar Energy: Technology and Market Trends. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Figure 4 *- Solar Simulation Systems*

(https://www.mhi.com/business/products-services/industrial-machinery/solar-simulation-system)



Existing systems can be classified as manual, semi-automatic, or fully automatic, depending on their hardware and software capabilities. This classification yields significant differences in terms of user expertise requirements, big data collection capabilities, and investment costs, as shown in Table 1.

In manual systems, the user is directly responsible for tasks such as initiating the test, placing the samples, tracking the test duration, and recording data. These systems are preferred for low-cost and basic testing requirements.

Semi-automatic systems enhance test standardization by automating certain processes, yet still require user intervention at specific stages. This configuration offers a balanced solution, particularly for small- and medium-scale testing scenarios.

Fully automatic systems, on the other hand, allow test parameters to be pre-programmed, and all processes — including sample positioning, light control, and temperature regulation — are controlled automatically. These systems are high-cost and demand a higher level of user competence.

Table 1 *- System Comparison Table*

COMPARISON OF SYSTEM TYPES

SYSTEM TYPE	EASE OF USE	COMPATIBILITY WITH TESTED PART	INVESTMENT COST	BIG DATA INFRASTRUCTURE	REQUIRED SPACE	USER SKILL LEVEL
MANUAL	High	Moderate	Low	Low	Moderate	Moderate
SEMI-AUTOMATIC	Moderate	Moderate	Moderate	Low	Considerable	Considerable
FULLY AUTOMATIC	Moderate	High	High	Moderate	High	High

High / Good — Moderate / Medium — Low / Poor — High / Large / Considerable

3- Results and Discussion

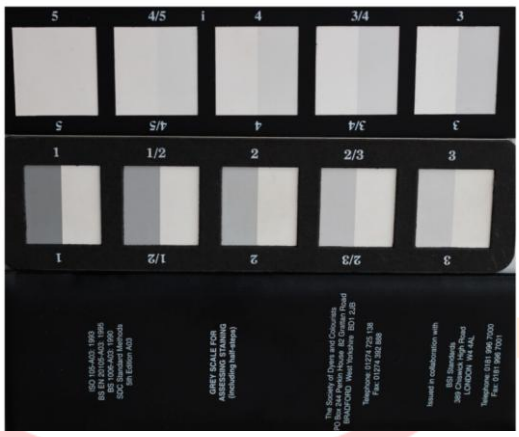
After the solar simulation test is completed for automotive exterior trim parts, a visual structural assessment is conducted to identify physical degradations such as color change, cracking, surface dulling, blistering, and peeling on the parts. The differences between the parts before and after the test are compared through visual inspection. During the evaluation, the resistance or color stability of materials like plastics to color changes is assessed using standardized measurement scales (e.g., Grayscale for Color Change). This can be seen in Figure 5.

The Gray Scale used to evaluate color changes in plastic materials is a measurement tool developed to visually compare the color differences of samples before and after testing. This scale is generally prepared in accordance with the ISO 105-A02 standard and classifies the degrees of color change from 1 to 5.

- ⇨ **5:** No color difference (excellent color fastness)
- ⇨ **4:** Very slight difference
- ⇨ **3:** Noticeable but acceptable difference
- ⇨ **2:** Significant color difference
- ⇨ **1:** Very severe color difference (poor color fastness)

Figure 5 - *Grayscale for Color Change*

(ISO 105 A03 BS 1006 A03:1978)



Evaluation from the customer perspective, which is the common goal of all assessment activities carried out during testing, is also a critical step in the process. Therefore,, evaluations in this area require experience and expertise.

The “SAE J1060 Subjective Rating Scale which is used by test experts as a global rating system, is shown in Table 1.

The aim here is to conduct an evaluation from the customer's point of view.

Table 2 *- SAE Evaluation Criteria*

(SAE J1060)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
UNACCEPTABLE				BORDER LINE	ACCEPTABLE				
CONDITION NOTED BY									
ALL OBSERVERS		MOST OBSERVERS		SOME OBSERVERS	CRITICAL OBSERVERS		TRAINED OBSERVERS		NOBODY
Intolerable	Severe	Very Poor	Poor	Marginal	Barely Acceptable	Fair	Good	Very Good	Optimal
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

4- Conclusion

Tests conducted through solar simulation in a controlled laboratory environment provide a rapid and effective method for evaluating the long-term environmental durability of automotive components by simulating external environmental conditions such as ultraviolet (UV) radiation and high temperatures to which products are exposed throughout their service life. In this way, the behavior of newly developed or existing products under various environmental scenarios can be predicted, and necessary improvements can be made promptly to ensure product safety and quality assurance. Moreover, these tests make significant contributions to accelerating product validation processes, increasing customer satisfaction, and ensuring compliance with regulations.

In addition, in order to enhance the evaluation process of solar simulation, UV, thermal, and vibration tests, artificial intelligence-based data analysis systems can be utilized. These systems enable predictive analysis, anomaly detection, and performance evaluation of automotive exterior trim components under accelerated environmental conditions (Artificial Intelligence; Machine Learning, n.d.).

Furthermore, as summarized in Table 1, different system types present distinct advantages and limitations in terms of ease of use, investment cost, data infrastructure requirements, and user skill level. While manual and semi-automatic systems offer lower investment costs and simpler implementation, they remain limited in data processing capability and consistency. In contrast, fully automatic systems, despite requiring higher investment, infrastructure, and technical expertise, provide superior data handling, improved repeatability, and higher evaluation accuracy. Therefore, the integration of artificial intelligence-based systems within fully automated testing environments represents a significant advancement in achieving more reliable, efficient, and objective assessment processes.

References

SAE International (2022) , SAE J2020 , Accelerated Exposure of Automotive Exterior Materials Using a Fluorescent UV and Condensation Apparatus

ASTM International. (2023). Standard practice for operating fluorescent ultraviolet (UV) lamp apparatus for exposure of nonmetallic materials (ASTM G154-23).

International Organization for Standardization. (2016). Plastics—Methods of exposure to laboratory light sources—Part 3: Fluorescent UV lamps (ISO 4892-3:2016).

Givoni, B. (1969). Man, climate and architecture. Elsevier.

(https://enlitechnology.com/blog/solar-simulator-01)

Tripathi, S., & Gupta, R. (2017). Thermal comfort in naturally ventilated spaces: Adaptive thermal comfort. Springer.

Kittler, R., & Rupp, M. (2018). Solar energy: Technology and market trends. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Laboratory for Atmospheric and Space Physics, "SORCE Mission." [Online]. Available: https://lasp.colorado.edu/home/sorce

International Organization for Standardization, ISO 4892-2:2013: Plastics — Methods of exposure to laboratory light sources — Part 2: Xenon-arc lamps, Geneva, Switzerland, 2013.

USB Laboratuvar, "UV Hızlandırılmış Yaşlandırma Testleri." [Online]. Available: https://usb-lab.com/hizmetler/laboratuvar-hizmetleri/uv-hizlandirilmis-yaslandirma-testleri

Westchester Detailing, "The Effects of Sun Exposure on Automotive Surfaces," Jul. 6, 2024. [Online]. Available: https://www.westchesterdetailing.com/the-effects-of-sun-exposure-on-automotive-surfaces

SAE International, "SAE International." [Online]. Available: https://www.sae.org

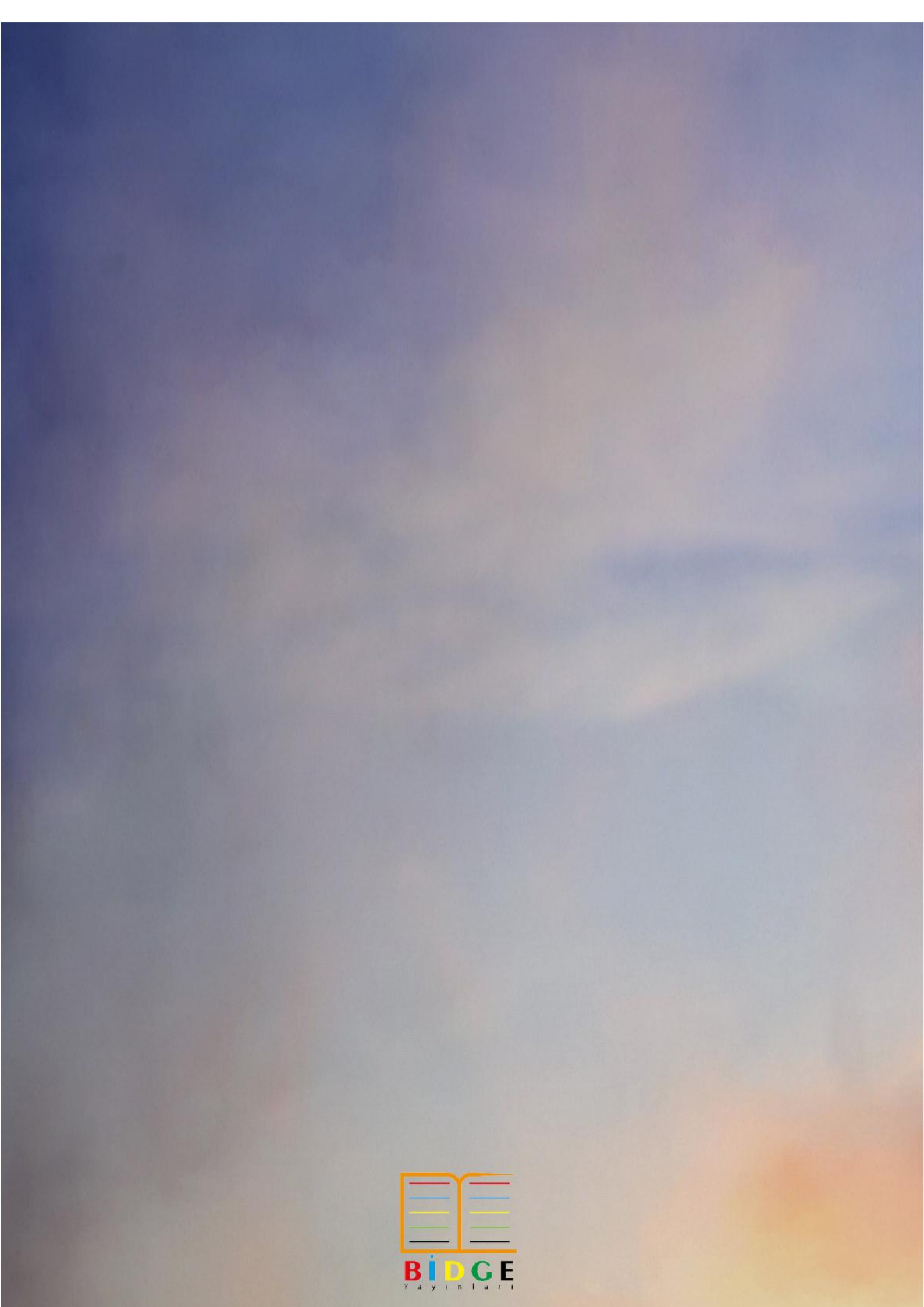
Enli Technology, "Solar Simulator Technology." [Online]. Available: https://enlitechnology.com/blog/solar-simulator-01

S. Tripathi and R. Gupta, Solar Simulator: The Science and Technology of Photovoltaic Testing. Springer International Publishing, 2017.

International Organization for Standardization. (1993). Textiles—Tests for colour fastness—Part A02: Grey scale for assessing change in colour (ISO 105-A02:1993).

SAE International. (2001). Instrument panel assembly static load deflection (SAE J1060).

Türkiye Uzay Ajansı, "Dalgalar ve Elektromanyetik Tayf Spektrumu." [Online]. Available: https://tua.gov.tr/tr/blog/havacilik-ve-teknoloji/dalgalar-ve-elektromanyetik-tayf-spektrum


BİDGE
Yayınları