FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology

ISSN: 2147-9526

Year: 2025, Volume: 13 Issue: 3

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji
Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology

ISSN: 2147-9526, Year: 2025, Volume: 13 Issue: 3

İmtiyaz Sahibi/ Owner	Prof. Dr. Uğur ÜNAL – Gazi Üniversitesi
Yayın Yönetmeni / Publishing Manager	Prof. Dr. Uğur GÖKMEN – Gazi Üniversitesi
Yazışma Adresi / Correspondence Address	fbedergic@gazi.edu.tr
İnternet Adresi / Web Address	https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc
Yayın Türü /Publication Type	Süreli / Periodical Yılda dört sayı yayımlanır: Mart, Haziran, Eylül, Aralık Published four issues per year: March, June, September, December
Baş Editör / Editor-in-Chief	Prof. Dr. Adem ACIR – Gazi Üniversitesi
Baş Editör Yardımcısı / Deputy Editor-in-Chief	Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Selçuk YAĞMUR– Gazi Üniversitesi
Alan Editörleri / Area Editors	Prof. Dr. Nihat ÖZTÜRK – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Sait Dündar SOFUOĞLU – Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ – Erciyes Üniversitesi Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ – Başkent Üniversitesi Prof. Dr. Mehmet DEMİRTAŞ – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Adem UZUN – Bursa Uludağ Üniversitesi Prof. Dr. Gültekin UZUN – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Cevdet SÖĞÜTLÜ – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Sinan AKSÖZ – Pamukkale Üniversitesi Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. İlyas KARASU – Samsun Üniversitesi Doç. Dr. Sinem UZUN – Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Doç. Dr. Semih ÖZDEN– Milli Savunma Üniversitesi Doç. Dr. Cemil OCAK – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Volkan KILIÇLI – Gazi Üniversitesi

©2025

	Doç. Dr. Fecir DURAN – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Şenol ŞİRİN – Düzce Üniversitesi Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR – Batman Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Güven MERAL – Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Seda ŞAHİN – Çankırı Karatekin Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Pınar Sezin ÖZTÜRK KARDOĞAN –Gazi Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Onur ALTUNTAŞ – Gazi Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Emre AYHAN – Gazi Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Ayşenur ASLAN – Ankara Üniversitesi
Sekretarya / Secretariat	Doç. Dr. Selçuk YAĞMUR– Gazi Üniversitesi
Mizanpaj Editörleri / Layout Editors	Oğuz Kaan ÇİNİCİ – Gazi Üniversitesi Yaren GÜVEN – Gazi Üniversitesi Can ALİCAN – Gazi Üniversitesi
Teknik Editör / Technical Editor	Medine ÖZKAYA – Gazi Üniversitesi

©2025

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji
Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology

HAKKINDA

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi ailesinde Part C olarak yer alan Tasarım ve Teknoloji Dergisi, temel mühendislik konularını kapsamakta ve yılda 4 sayı (Mart, Haziran, Eylül, Aralık) yayınlamaktadır. Mühendislik bilimlerindeki en güncel bilimsel ve teknolojik gelişmeleri araştırmacılara, mühendislere ve ilgili kitlelere ulaştırmayı hedefler. Dergi ulusal ve uluslararası düzeyde bilim, teknoloji ve mühendislik alanlarında orijinal araştırma makalelerini veya tarama makalelerini kabul etmektedir. Temel mühendislik alanlarındaki hem deneysel hem de kuramsal çalışmaların yer aldığı dergimiz, mühendisliğin hızla gelişen alanlarına ilişkin makalelerin yayınına öncelik tanır. Tasarım ve Teknoloji Dergisinde makaleler 2020 yılı sonuna kadar Türkçe yayınlamıştır. 2021 yılı başından itibaren ise dergimizin uluslararası tanınırlığını artırmak amacıyla Türkçe'nin yanı sıra İngilizce makale de kabul edilmeye başlanmıştır.

Dergimiz Tübitak-Ulakbim Dergi Dizin İndeksi (Tr Dizin)-Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı, Ebsco, Google Scholar, Doaj, Cıtefactor indekslerinde taranmaktadır.

ABOUT

Design and Technology Journal is published as a Part C of Gazi University Science Journal and covers basic engineering issues. It publishes 4 issues per year (March, June, September, December). The journal aims to inform researchers, engineers and interested people about the latest scientific and technological developments. It accepts findings and reflections of original research, scientific research articles or up to date review papers with summaries, evaluations, and comparisons. Our journal publishes both experimental and conceptual studies and gives priority to studies on rapidly developing areas of engineering. It aims at focusing on interdisciplinary methods and technologies. Design and Technology Journal accepts papers on engineering fields written in English or Turkish.

Indexing and abstracting: TR Index, Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar and CiteFactor

AMAÇ ve KAPSAM

Dergi ulusal ve uluslararası düzeyde;

1- Bilim, teknoloji ve mühendislik alanlarında orijinal bir araştırmayı bulgu ve sonuçlarıyla yansıtan ve bilime katkısı olan araştırma makalelerini

2- Yeterli sayıda bilimsel makaleyi tarayıp, konuyu bugünkü bilgi ve teknoloji düzeyinde özetleyen, değerlendirme yapan ve bulguları karşılaştırarak yorumlayan derleme makalelerini yayınlamaktadır.

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi: Tasarım ve Teknoloji" dergisi temel mühendislik konularını kapsayan bir dergidir. Mühendislik bilimlerindeki en güncel bilimsel ve teknolojik gelişmeleri araştırmacılara, mühendislere ve ilgili kitlelere ulaştırmayı hedefler. Dergi ulusal ve uluslararası düzeyde

©2025

bilim, teknoloji ve mühendislik alanlarında orijinal bir araştırmayı bulgu ve sonuçlarıyla yansıtan ve bilime katkısı olan araştırma makalelerini veya yeterli sayıda bilimsel makaleyi tarayıp, konuyu bugünkü bilgi ve teknoloji düzeyinde özetleyen, değerlendirme yapan ve bulguları karşılaştırarak yorumlayan tarama makalelerini kabul etmektedir.

Mimarlık, sanat, spor ve sağlık alanları dergimiz kapsamı alanında değildir.

AIMS and SCOPE

The journal accepts studies at national and international level as follows;

1- Research articles reflecting results and findings of original research papers in science, technology and engineering fields.

2- Review articles providing a refined summary of a remarkable number of articles in a contemporary technological and scientific manner, carrying out evaluations, making comparisons and comments.

Gazi University Science Journal: Design and Technology journal is about basic engineering issues. The target audience is researchers and engineers, and the journal aims at informing people with the latest scientific and technological developments. The journal accepts papers reflecting the results of original results in science, technology and engineering fields at the national and international level and research papers that contribute to scientific field or papers that summarize the latest developments on an issue are accepted.

The fields of architecture, art, sport and health are not in the scope of this journal.

©2025

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji
Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

62. **Investigation of Physical, Mechanical and Tribological Properties of Blast Furnace Dust Reinforced Bronze Matrix Composite Brake Pads** (Araştırma Makalesi), Hüsamettin Kuş, İlker Sugözü, Adem Avcu 827

63. **Using Of Deep Learning Models In Acoustic Scene Classification** (Araştırma Makalesi), Zehra Bozdağ, Harun Çiğ 849

64. **Adli Bilişim Araştırmalarına Küresel Bir Bakış: Bibliyometrik Analiz ile Yayın Trendleri ve Araştırma Yönelimleri** (Araştırma Makalesi), Onur Ceran 859

65. **Comparative Analysis with PVGIS and PVsyst for Solar Energy Production in Bahşılı Region of Kırıkkale** (Araştırma Makalesi), Beyza Yıldırım, Hıdır Düzkaya 877

66. **Strengthened Key Method in Transition to Quantum Cryptology** (Araştırma Makalesi), Fatih Selvi, Mustafa Alkan 892

67. **Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Çok Amaçlı Geometrik Optimizasyona Dayalı Performans İyileştirmesi** (Araştırma Makalesi), Melda Eyüboğlu, Burak Yenipınar, Cemil Ocak 906

68. **Capacity Balancing And Variation Minimization İn Unrelated Parallel Machine Scheduling With Sequence-Dependent Setup Times: A Mathematical Model And Matheuristic Approach** (Araştırma Makalesi), Merhad Ay 919

69. **A Novel Approach To Objective Criterion Weighting: Extended Statistical Variance Procedure (ESVP)** (Araştırma Makalesi), Furkan Fahri Altıntaş 932

70. **Derin Öğrenme Modelleri Kullanarak Endüstriyel Makinelerin Kalan Kullanım Ömrü Tahmini** (Araştırma Makalesi), Mustafa Ozan Özkök, Rüştü Akay 955

71. **Tarım Ve Hayvancılık Alanında Dijital Dönüşüm: Evrişimsel Sinir Ağları Ve Regresyon Modelleri Kullanılarak Sığırlarda Canlı Ağırlık Tahmini** (Araştırma Makalesi), Mustafa Zahid Gürbüz, Oğuzhan Kıvrak, Ayşe Berna Altınel Girgin, Ali Değirmencioğlu 968

72. **Implementation Of Battery-Integrated Transformerless High-Gain Smart Inverter** (Araştırma Makalesi), Oguz Alkul, Şevki Demirbaş 981

73. **Hafif Elektrikli Araçlar İçin OC-LMS Tabanlı MUS Kestiricisi Kullanan Hız-Algılayıcısız Doğrudan Moment Kontrollü Fırçasız Doğru Akım Motor Sürücüsü** (Araştırma Makalesi), Mehmet Ünal, Rıdvan Demir, Engin Cemal Mengüç, Remzi İnan 991

74. **Yapay Zeka ile Tarihi Çevrede Mekan Dizimi: Uşak Geleneksel Konutlarının Tipolojik Sınıflandırılması** (Araştırma Makalesi), Gizem Güvlü Erhan, Seda Şimşek Tolacı 1002

©2025

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji
Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

75. **Alüminyum Matrisli Silisyum Nitrür Takviyeli Metalik Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu** (Araştırma Makalesi), İbrahim Doğan, Elif Işık, Mehmet Türker 1019

76. **Yüzey Dalgası Kaynaklı Bozucu Etkiler Altında Otonom Sualtı Araçlarının (Auvs) Hız Kararlılığının Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) Tabanlı Model Öngörülü Kontrol (MPC) İle Sağlanması** (Araştırma Makalesi), Ahmetcan Önal, Andaç Töre Şamiloğlu 1031

77. **Geçmişten Günümüze Gaz Basınç Sensörleri "Piezorezistif Sensörler Üzerine Bir Derleme** (Derleme), Yasin Arslan, Gülşah Demirhan Aydın, Deniz Karaçor, Nuri Akgün 1046

78. **AM/FM Radyo Sistemleri için Otomotiv Aktif Çubuk Anten Tasarımı** (Araştırma Makalesi), Olcay Yigit 1062

79. **Investigation of the Effects of Two Different Biopolymers on the Strength Parameters of Silty Soil** (Araştırma Makalesi), Halil Oğuzhan Kara, Mehmet Uğur Yilmazoğlu 1083

80. **Taşıt Kaynaklı Hava Kalitesi Değişimi: PM10, NO_2, SO_2 ve CO Parametrelerine Dayalı Bir Değerlendirme** (Araştırma Makalesi), Aslıhan Kurnuç Seyhan, Neşe Ertugay 1100

81. **Yüzey Dalgası Analizi ile Elde Edilen Kayma Dalgası Hızlarına Dayalı Zemin Tepki Analizleri ile Hesaplanan Transfer Fonksiyonlarının HVSR Eğrileri ile Karşılaştırılması** (Araştırma Makalesi), Onur Eyisüren, Öznur Karaca, Sadık Öztoprak 1113

82. **High-Resolution Direction Finding on Uniform Linear Arrays: A Comparative Evaluation of MUSIC Algorithm Derivatives** (Araştırma Makalesi), Emrah Onat 1122

83. **Evaluating AI-Based Energy Management Strategies for Electric Vehicles using SWARA - weighted Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA** (Araştırma Makalesi), Gözde Bakioğlu 1137

84. **Akıllı Sayaç Verilerinde Derin Zaman Serisi Analizi ve Olasılık Tabanlı Kümeleme ile Enerji Tüketicisi Esneklik Tespiti** (Araştırma Makalesi), Zühre Aydın 1157

85. **Bataryalı Elektrikli Araçlar ile İçten Yanmalı Motorlu Araçların Devrilme Kararlılığı Yönünden Karşılaştırılması** (Araştırma Makalesi), Turgay Ergin 1173

86. **Effects of in-situ formed TiB2 Phase on Mechanical Properties of Spark Plasma Sintered Boron Carbide** (Araştırma Makalesi), Sinem Başkut, Name Yalama, Servet Turan 1184

87. **Laboratuvar Güvenilirlik Analizinde SPAR-H Yaklaşımı: Toprak Azot Analizi Örneği** (Araştırma Makalesi), Nurgül Zengin, Ertuğrul Ayyıldız 1195

88. **AISI 1040 Alaşımının Frezelenmesinde Teorik ve Uygulamalı Kesme Parametrelerine Dayalı iTool Adlı Yeni bir Paket Program ile Bilgisayar Destekli Süreç Planlama** (Araştırma Makalesi), Kadirhan Akdeniz, Ayşegül Çakır Şencan 1208

©2025

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji
Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

89. **Türkiye'de Emsal Kararların Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Sınıflandırılması** (Araştırma Makalesi), Süleyman Kürşat Demir, Emrah Aydemir, Yasin Sönmez 1227

90. **Determination of Radiation Shielding Properties of Magnesium Oxychloride Cement with Acidic and Basic Pumice Aggregate** (Araştırma Makalesi), Şemsettin Kılınçarslan, Yasemin Şimşek Türker, Nuri Işıldar 1240

91. **Time-Series Forecasting of the Pazarcık Earthquake Using LSTM, Transformer and RNN Models** (Araştırma Makalesi), Seda Şahin, Emine Çankaya 1253

92. **TiO2 Tozlarından TiC Tozlarının Karbon Kaplama Metodu ile Üretilebilirliğinin Araştırılması** (Araştırma Makalesi), Ali Rıza Ebeoğlu, Agah Aygahoğlu, Mustafa Aydın 1261

93. **Recent Reviews on Topology Optimization** (Derleme), Fatma Nur Şen, Mithat Kutay Can 1268

94. **Baskı Tekniklerinde Teknolojik Dönüşüm ve Dijital Sanata Yansımaları: Dijital Baskı ve Yapay Zekâ Destekli Üretim Süreçleri** (Araştırma Makalesi), Cengiz Şahin 1286

95. **Göknar, Doğu Kayını ve Afrika Maunu Türlerinin Makro ve Mikro Yapılarının Analizi** (Araştırma Makalesi), Çiğdem Çicek 1295

96. **Influence of Heating Media on Mechanical and Microstructural Properties of CP Titanium Alloy** (Araştırma Makalesi), Erdem Mermer, Nurdan Evcimen, Hanifi Çinici 1305

97. **Investigation of Thermal Comfort and Optimum Supply Water Temperature in the Double Layered Thermally Activated Building System** (Araştırma Makalesi), Oğuzhan Çalışır, Müjdat Öztürk, Gamze Genç 1315

98. **Estimating Object Location in RF Communication by Using RSSI Values Through k-NN and Deep Learning Techniques** (Araştırma Makalesi), Nihat Daldal, Muhammad Zaib 1331

99. **Performance of L-type Furniture Corner Joints Connected with Dowels Produced in Different Orientations with 3D Printing Technology** (Araştırma Makalesi), Tolga Kuşkun 1345

©2025

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 827-848 (2025)

Yüksek Fırın Baca Tozu ile Güçlendirilmiş Bronz Matrisli Fren Balata Malzemelerin Fiziksel, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Hüsamettin KUŞ[1*], İlker SUGÖZÜ[2], Adem AVCU[3]

[1]*Tarsus Üniversitesi, Mersin Tarsus Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine Programı, Mersin, Turkey*

[2]*Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Mersin, Türkiye*

[3]*Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Adana, Turkey*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/02/2025
Düzeltme: 26/03/2025
Kabul: 12/05/2025

Anahtar Kelimeler

Metal matrisli kompozit fren balatası
Endüstriyel atık
Yüksek fırın baca tozu
Fren performansı

Article Info

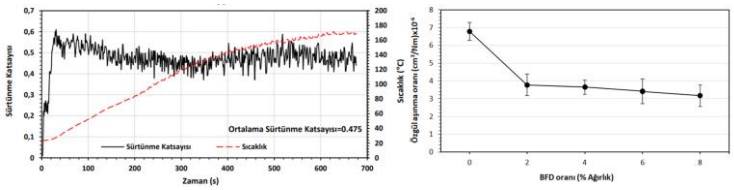
Research article
Received: 19/02/2025
Revision: 26/03/2025
Accepted: 12/05/2025

Keywords

Metal matrix composite brake pad
Industrial waste
Blast furnace dust
Braking performance

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada endüstriyel bir atık ürün olan yüksek fırın baca tozu (BFD) takviyeli bronz matrisli fren balata numuneleri üretilmiştir. Üretilen kompozit fren balata numunlerin tribolojik, mekanik ve fiziksel performansları incelenmiştir. / In this study, bronze matrix brake pad samples reinforced with BFD, an industrial waste product, were produced. The tribological, mechanical and physical performances of the produced composite brake pad samples were investigated.



Şekil A: *Fren balata numunelerinin sürtünme katsayısı (BFD-6) ve özgül aşınma oran değerleri /* ***Figure A:*** *Coefficient of friction (BFD-6) and specific wear rate values of brake pad samples*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Hem fren performans özelliklerini geliştirmek hem de üretim maliyetlerini azaltmak amacıyla fren balata üretiminde takviye elemanı olarak BFD kullanılmıştır. / BFD was used as a reinforcement element in brake pad production in order to both improve brake performance properties and reduce production costs.*
- *BFD'nin fren balatası malzemesinde takviye elemanı olarak kullanılması, çevre dostu, düşük maliyetli ve düşük karbon ayak izine sahip fren balata örneklerinin geliştirilmesine katkıda bulunmuştur. /Usage of BFD as a reinforcement element in brake pad material contributed to the development of environmentally friendly, low-cost, and low-carbon footprint brake pad samples.*
- *BFD'nin ilavesi herhangi bir maliyet artışına yol açmaksızın bronz matrisli fren balata numunesinin ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma direncinde gelişme sağlamıştır. / The reinforcement of BFD improved the average friction coefficient and wear resistance of the bronze matrix brake pad sample without increasing its cost.*

Amaç (Aim): *Bu çalışma, BFD'nin, bronz matrisli fren balata malzemesi üretiminde takviye elemanı olarak kullanılabilirliğini ve bu kullanımın fren performans özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır ./ This study aims to evaluate the usability of BFD as a reinforcing element in the production of bronze matrix brake pad material and the effects of this use on brake performance properties.*

Özgünlük (Originality): *Bronz matrisli fren balatası malzemesinin fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla takviye elemanı olarak BFD kullanımının araştırılması. / Investigation of the use of BFD as a reinforcement element to improve the physical, mechanical and tribological properties of bronze matrix brake pad material.*

Bulgular (Results): *BFD'nin fren balatalarında fren performans özelliklerinin gelişimine katkı sağladığı belirlenmiştir. / It was determined that BFD contributed to the improvement of brake performance characteristics in brake pads.*

Sonuç (Conclusion): *Bronz matrisli fren balata üretiminde takviye elemanı olarak BFD kullanılmasıyla, herhangi bir maliyet artışı olmaksızın temel fren performans özelliklerinin iyileştirilebileceği belirlenmiştir. / It was determined that by using BFD as a reinforcement element in the production of bronze matrix brake pads, basic brake performance properties can be improved without any cost increase.*

*Corresponding author, e-mail: husamettinkus@tarsus.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1643160

GU J Sci, Part C, 13(3): 827-848 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Yüksek Fırın Baca Tozu ile Güçlendirilmiş Bronz Matrisli Fren Balata Malzemelerin Fiziksel, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Hüsamettin KUŞ[1*], İlker SUGÖZÜ[2], Adem AVCU[3]

[1]*Tarsus Üniversitesi, Mersin Tarsus Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mersin, Turkey*

[2]*Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Mersin, Türkiye*

[3]*Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Adana, Turkey*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/02/2025
Düzeltme: 26/03/2025
Kabul: 12/05/2025

Anahtar Kelimeler

Metal matrisli kompozit
Fren balatası
Endüstriyel atık
Yüksek fırın baca tozu
Fren performansı

Öz

Bu çalışma, endüstriyel atık bir malzeme olan yüksek fırın baca tozunun (BFD) metal matrisli kompozit fren balatalarında takviye elemanı olarak kullanılabilirliğini ve BFD takviyesinin fren balatasının tribolojik, fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, ilk aşamada sıcak presleme yöntemi kullanılarak referans numune olarak adlandırılan bronz matrisli kompozit fren balata numunesi üretildi. İkinci aşamada, referans bronz matrisli fren balata numunesine ağırlıkça farklı oranlarda (%2, %4, %6 ve %8) BFD takviye edilerek yeni fren balata numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelerin yoğunluk, sertlik, çapraz kırılma dayanımı (TRS), ortalama sürtünme katsayısı, sürtünme katsayı kararlılığı ve özgül aşınma oranı değerleri belirlenmiştir. Üretilen numunelerin mikro yapısı ve aşınma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) kullanılarak karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, BFD takviye oranı artışına bağlı olarak üretilen numunelerin yoğunluğunun azaldığını, buna karşın sertliğinin ise arttığını göstermiştir. Üretilen numuneler arasında en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değeri 0.475 ile BFD-6 numunesinde belirlenmiştir. Ayrıca, artan BFD oranı ile birlikte numunelerin aşınma direncinde belirgin bir iyileşme tespit edilmiştir. Özellikle BFD-8 numunesinin, referans numuneye kıyasla yaklaşık %53.31 oranında daha düşük özgül aşınma değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, BFD'nin fren performans kalitesinden ödün vermeden düşük maliyetli bir fren balata malzemesi geliştirilmesinde alternatif bir kaynak olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir.

Investigation of Physical, Mechanical and Tribological Properties of Bronze Matrix Brake Pad Materials Reinforced with Blast Furnace Dust

Article Info

Research article
Received: 19/02/2025
Revision: 26/03/2025
Accepted: 12/05/2025

Keywords

Metal matrix composite
Brake pad
Industrial waste
Blast furnace dust
Braking performance

Abstract

This study aims to investigate the usability of Blast Furnace Dust (BFD), an industrial waste material, as a reinforcing element in metal matrix composite brake pads and the effects of BFD reinforcement on the brake pad's tribological, physical, and mechanical properties. For this purpose, the initial step produced a bronze matrix composite brake pad sample, called a reference sample, using the hot pressing method. In the second step, new brake pad samples were produced by reinforcing the reference bronze matrix brake pad sample with different BFD weight percentages (2%, 4%, 6%, and 8%). The density, hardness, transverse rupture strength (TRS), average friction coefficient, friction coefficient stability, and specific wear rate values of the produced samples were determined. Microstructure and wear surfaces of produced samples were characterized by using a scanning electron microscope (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). The results obtained showed that the density of the produced specimens decreased with the increase in BFD reinforcement ratio, while the hardness increased. The highest average coefficient of friction value among the produced samples was determined in BFD-6 sample with 0.475. In addition, a significant improvement in the wear resistance of the samples was determined with increasing BFD ratio. In particular, the BFD-8 sample was determined to have a specific wear value approximately 53.31% lower than the reference sample. The obtained findings showed that BFD can be considered as an alternative source for the development of a low-cost brake pad material without compromising the brake performance quality.

*Corresponding author, e-mail: husamettinkus@tarsus.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1643160

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fren balataları, hareket halindeki bir otomobilin güvenli bir şekilde durdurulması için kullanılan sürtünme elemanlarından biridir. Fren balataları, hareket halindeki bir taşıtı yavaşlatmak veya durdurmak için frenleme esnasında fren diski üzerinde sürtünme kuvveti oluşturarak, kinetik enerjiyi ısıya dönüştürürler. Genel olarak taşıtlarda seramik, metal ve polimer matrisli kompozit fren balataları kullanılmaktadır. Polimer matrisli fren balataları düşük frenleme enerjisine maruz kalan araçlarda tercih edilirken, orta ve yüksek düzey frenleme enerjisine maruz kalan araçlarda metal veya seramik matrisli fren balataları tercih edilmektedir. Seramik matrisli fren balataları yüksek üretim maliyetleri nedeniyle daha çok uçak, yüksek hızlı tren gibi yüksek düzey frenleme enerjisine maruz kalan taşıtlarda kullanılmaktadır. Metal matrisli fren balataları ise seramik matrisli fren balatalarına kıyasla daha düşük üretim maliyeti nedeniyle daha geniş bir kullanım alanına sahiptir [1]. Metal matrisli kompozit fren balataları yüksek sürtünme kararlılığı, yüksek aşınma direnci, yüksek ısı transferi, yüksek mukavemeti ve yüksek sertlik gibi özelliklerinden dolayı özellikle ağır vasıta ve yüksek performanslı taşıtların fren sistemlerinde tercih edilmektedir [2].

Metal matrisli kompozit fren balataları, metal bir matris, katı yağlayıcılar, takviyeler ve aşındırıcılar olmak üzere çeşitli bileşenlerin karışımından oluşan bir kompozit malzemedir [3]. Metal matrisli kompozit malzeme üretiminde matris malzemesi olarak yüksek ısı iletkenliği, üstün korozyon direnci, yüksek erime noktası, yüksek yorulma mukavemeti, iyi bir aşınma direnci ve basit üretim süreçleri gibi özellikleri nedeniyle çoğunlukla bakır ve alaşımları kullanılmaktadır [4], [5]. Sürtünme kararlılığını arttırmak, aşınma oranını düzenlemek ve gürültü oluşumunu azaltmak için fren balata malzemesi üretiminde matris malzemeye katı yağlayıcı olarak grafit, molibden disülfür gibi malzemeler ilave edilmektedir [6]. Metal matrisli fren balata malzemelerinde kritik bir bileşen olan abrasifler ise sürtünme katsayısı artışı sağlamak ve fren diski üzerinde oluşan sürtünme filmlerini temizlemek için kullanılmaktadır [7]. Literatürde metal matrisli fren balata malzemelerin sürtünme ve aşınma özelliklerini geliştirmek için alümina (Al_2O_3) [8], demir oksit (Fe_2O_3) [9], silisyum karbür (SiC) [10], silika (SiO_2) [11], titanyum karbür (TiC) [12], zirkonyum silikat ($ZrSiO_4$) [13], titanyum nitrür (TiN) [14] ve titanyum diborür (TiB_2) [15] gibi seramik malzemeler abrasif bir bileşen olarak kullanılmaktadır. Ancak, kullanılan bu geleneksel seramik takviye elemanlarının yüksek maliyetleri metal matrisli kompozit malzeme üretiminde yaygın kullanımının önünde bir engel teşkil etmektedir [16]. Ayrıca, dünyada hızla artan rekabet ortamı üretici firmaları kaliteden taviz vermeden daha uygun maliyetli ürünler üretme konusunda zorlamaktadır. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, tarımsal ve endüstriyel süreçlerin sonucunda bir yan ürün olarak oluşan atık malzemeler bir çözüm olarak düşünülmektedir. Endüstriyel ve tarımsal atık malzemelerin uygun fiyatı, düşük yoğunluğu, üretiminde yoğun enerji kullanımı gerektiren geleneksel sentetik takviye elemanlarına kıyasla daha düşük karbon ayak izine sahip olmaları son yıllarda bu atıkların metal matrisli kompozit malzeme üretiminde takviye elemanı olarak kullanımını hızla arttırmaktadır [17]. Ayrıca metal matrisli kompozit malzeme üretiminde endüstriyel ve tarımsal atık malzemelerin takviye elmanı olarak kullanımı, üretim maliyetlerini etkili bir şekilde düşürmenin yanı sıra üretimde doğal kaynaklara olan bağımlılığı azaltarak sürdürülebilir bir çevreye önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Metal matrisli fren balata malzemesi üretiminde takviye elemanı olarak endüstriyel ve tarımsal atık ürünlerin kullanımı rekabetin yoğun bir şekilde yaşandığı fren balata sektöründe oldukça yenilikçi bir çözüm olarak görülmektedir. Fakat endüstriyel ve tarımsal atık malzemeler doğası gereği birbirinden farklı kimyasal içeriklere ve fiziksel özelliklere sahiptir. Bu nedenle fren performansı açısından balata üretiminde en uygun atık ürününün ve takviye oranının belirlenmesi oldukça hayati bir konudur.

Demir çelik üretim sürecinde ortaya çıkan BFD, katı bir endüstriyel atık üründür. İstatistiklere göre, yüksek fırın çıkış gazından ayrılan ortalama baca tozu miktarı, üretilen sıcak metal tonu başına yaklaşık 28 kg olarak tahmin edilmektedir [18]. Türkiye'de demir çelik üretim sürecinde atık bir ürün olarak ortaya çıkan yıllık BFD miktarı 375.000-425.000 tondur [19]. BFD temel olarak demir oksitler (%20-40), yanmamış karbon (~%20) ve küçük oranlarda kalsiyum, alüminyum ve silisyum oksit gibi değerli bileşenler içerir. Ancak, bugüne kadar atık ürün olarak elde edilen BFD'nin çeşitli alanlarda kullanım oranının %20'den az olduğu bildirilmiştir [18]. BFD'nin büyük bir kısmı doğrudan demir çelik tesislerindeki depolama sahalarına katı atık olarak dökülmekte ve buralarda biriktirilmektedir. Bu durum ise çok fazla arazi kaybına, ciddi çevre kirliliğine ve kaynak israfına neden olmaktadır. Bu atık ürünler uygun bir şekilde bertaraf edilmezse su, atmosfer ve toprak kirliliğine neden olabilir, ekolojik döngüleri bozabilir ve çevresel tehlikeler oluşturabilir [20]. BFD karbon ve demir açısından zengin olmasına rağmen, küçük tane boyutu, çinko ve kurşun içeriği onun yüksek

fırın da doğrudan geri dönüştürülmesini imkânsız hale getirir. Yüksek fırın şarjında artan çinko miktarı yüksek fırında operasyonel sorunlara neden olabilir [21]. Bundan dolayı bu tozlara özel bir işlem yapılmaksızın geri dönüşümleri ve depolama sahalarından imhaları oldukça güç olmaktadır. Ayrıca BFD çimento, inşaat ve sanayi sektörlerinde yaygın olarak kullanılan diğer bir demir çelik atığı olan cüruf ile karşılaştırıldığında inşaat sektöründe de istenilen düzeyde kullanılamamaktadır [22]. BFD'nin geri dönüştürülmesin de karşılan problemler ve inşaat sektöründe istenilen düzeyde kullanılamaması BFD için alternatif bir değerlendirme alanın bulunmasını zorunlu kılmaktadır. Bu atık malzemelerin takviye elemanı olarak kompozit malzeme üretiminde kullanımı yenilikçi bir çözüm olarak değerlendirebilir. BFD'nin sahip olduğu grafit ve demir oksit gibi bileşenler dikkate alındığında günümüzde fren balata malzemesi üretiminde kullanılmakta olan bileşenlerin bir karışımı olduğu görülmektedir. BFD'nin metal matrisli kompozit fren balata üretiminde takviye elemanı olarak kullanılması durumunda içeriğinde bulunan demir oksitin abrasif bir bileşen, yanmamış karbonun ise bir katı yağlayıcı olarak görev yapabileceği düşünülmektedir. Hem abrasif bir bileşen hem de katı yağlayıcı içeren BFD, sahip olduğu bu özellikleri nedeniyle fren balata üretiminde maliyet artışına neden olmaksızın balata performansını arttıracak bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, BFD'nin metal matrisli kompozit fren balata malzemesi üretiminde bir takviye elemanı olarak değerlendirilmesi, çevresel sürdürülebilirlik yönünden de önemli bir katkı sağlayacaktır.

Literatürde kompozit malzeme üretiminde takviye elemanı olarak BFD'nin kullanımı üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, Bülbül [23] elastomer esaslı kauçuk malzemelere ağırlıkça farklı oranlarda (%10, %20, %30 ve %40) BFD, odun külü, rejenere kauçuk ve pirinç kabuğu gibi farklı dolgu malzemeleri ilave ederek kompozit malzemeler üretmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin aşınma, sertlik ve bazı mekanik özelliklerini araştırmıştır. Çalışmalar sonucunda, %10 BFD takviyeli elastomer kompozit malzemenin üretilen diğer kompozit malzemelere göre daha düşük aşınma miktarına ve daha yüksek bir kopma mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir. Kayılı ve arkadaşları [19] %100 LDPE (düşük yoğunluklu polietilen) ile %50 BFD takviyeli LDPE esaslı kompozit malzemelerin fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Elde etmiş oldukları bulgularda BFD ile güçlendirilmiş numunenin sürtünme katsayısı, aşınma kaybı ve çekme dayanımı değerleri %100 LDPE malzemesine göre azalmıştır. Kayılı ve arkadaşları [22] yapmış olduğu bir başka çalışmada ağırlıkça farklı oranlarda (% 0, % 10, % 15, % 22.5, % 33.75, % 50.625) BFD dolgulu LDPE esaslı 6 farklı kompozit malzeme üretmişlerdir. Gerçekleştirilen testler neticesinde, üretilen kompozit malzemelerde %10 BFD takviyeli numunenin en yüksek sürtünme katsayı değerine sahip olduğu, fakat bu takviye oranından sonra artan takviye oranına bağlı olarak sürtünme katsayı değerlerinin azalmaya başladığını belirlemişlerdir. Üretilen numunelerin aşınma kaybı incelendiğinde artan BFD takviye oranına bağlı olarak aşınma direncinin geliştiğini ifade etmişlerdir.

Literatürde, endüstriyel bir atık malzeme olan BFD'nin kompozit fren balata malzeme üretiminde takviye elemanı olarak kullanımı ile ilgili yapılmış az sayıda çalışma olduğu görülmüştür. Ayrıca, yapılmış çalışmaların çoğunlukla polimer matrisli fren balata malzemelerine odaklandığı, metal matrisli fren balata malzemelerinde takviye elemanı olarak BFD'nin kullanımını ve üretilen fren balata malzemelerin mekanik, fiziksel ve tribolojik özellikleri üzerine BFD'nin etkilerini araştıran yeterli sayıda çalışma olmadığı dikkati çekmektedir. Bu çalışma literatürdeki bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, günümüzde artan çevresel kaygılar, artan hammadde ve üretim maliyetleri, göz önünde bulundurulduğunda BFD'nin kompozit malzeme üretiminde değerlendirilmesi hususunda yapılacak çalışmalar oldukça önemli bir hale gelmektedir. Bu çalışmada takviye elemanı olarak bronz matrisli kompozit fren balata malzemesi üretiminde BFD'nin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda farklı oranlarda (%2, %4, %6 ve %8) BFD takviyeli bronz matrisli kompozit fren balata numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelerin sertlik, yoğunluk, TRS, sürtünme katsayısı, özgül aşınma oranı ve sürtünme katsayı kararlılık değerleri belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, bronz matrisli fren balata malzemesine ilave edilen BFD'nin sürtünme katsayısı artışına ve aşınma direncinin gelişmesine pozitif katkı sağladığını göstermiştir. Ayrıca, BFD takviyeli fren balata numunelerin ortalama sürtünme katsayı değerlerinin otomobil fren balatalarından arzu edilen (0.3-0.6)[24] değerleri arasında olması BFD'nin otomotiv ve farklı sektörlerin ihtiyaç duyduğu yüksek katma değere sahip kompozit malzeme geliştirilmesinde alternatif bir kaynak olarak değerlendirilebileceğinin göstergesidir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1 Fren Balata Numunelerinin Hazırlanması (Preparation of Brake Pad Samples)

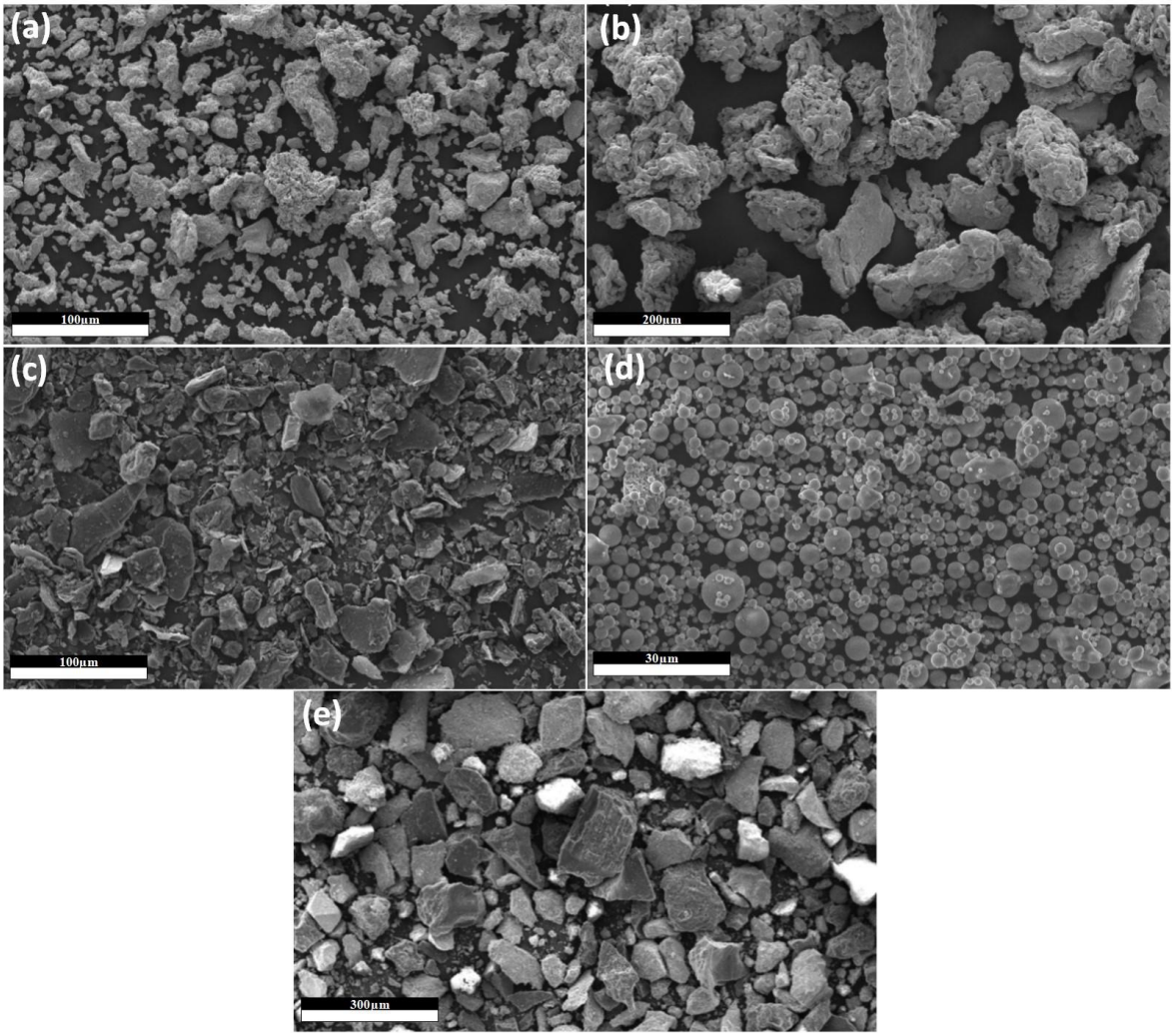
Bu çalışmada kompozit fren balata malzemelerin üretilmesinde matris malzemesi olarak bronz ($CuSn_6Zn_6Pb_3$), matrisi güçlendirmek için demir tozu, katı yağlayıcı olarak grafit tozu, birincil takviye elemanı olarak uçucu kül ve ikincil takviye elemanı olarak da BFD tozları kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak kullanılan uçucu kül İskenderun Sugözü Termik Santralinden, BFD tozu ise Karabük Demir Çelik Fabrikasından atık olarak temin edilmiştir. Şekil 1'de çalışmada kullanılan tozların SEM görüntüleri, Tablo 1'de de parçacık boyut analiz sonuçları verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, bronzun karmaşık bir şekle (Şekil 1(a)), demir tozunun gözenekli bir yapıya (Şekil 1(b), grafitin pul formuna (Şekil 1(c)), uçucu kül parçacıklarının dairesel bir şekle (Şekil 1(d)), yüksek fırın baca tozunun ise keskin köşe ve kenarlara sahip olduğu (Şekil 1(e)) belirlenmiştir. Ayrıca, yüksek fırın baca tozunun temel olarak demir oksit ve karbon olmak üzere iki farklı bileşenden oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 1(e)'de verilen SEM resminde bu bileşenlerden karbonun daha koyu bir renge, demir oksitin ise daha açık bir renge sahip olduğu görülmektedir. BFD'nin kimyasal içeriği ile ilgili yapılan çalışmalarda, BFD bileşiminde bulunan karbonun hem amorf hem de grafit formunda bulunabileceği bildirilmiştir [18]. Bir başka çalışmada, Zhong ve arkadaşları [25] XRD, XPS FTIR ve Raman spektroskopisi gibi teknikler kullanarak BFD'de bulunan karbonun karakterizasyon işlemini gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışma sonucunda BFD'de bulunan karbonun yaklaşık % 49,56 oranında grafit yapısında bir karbondan oluştuğunu ifade etmişlerdir. Şekil 2'de bu çalışmada kullanılan BFD parçacığının SEM resmi ve EDS analiz sonuçları sunulmuştur. SEM resmi incelendiğinde BFD bileşiminde bulunan karbon ve demir oksit parçacıklarının varlığı net bir şekilde görülmektedir. EDS analiz sonucu, 1 ile işaretlenen parçacığının karbon (grafit) 2 ile işaretlenen parçacığının ise demir oksit bileşiği olduğunu doğrulamaktadır. Yüksek fırın baca tozu X-ışını floresans spektrometrisi (Axios Advanced Panalytical, İngiltere) kullanılarak belirlenen kimyasal bileşimi Tablo 2'de sunulmuştur. Bu analiz sonuçlarına göre BFD'nin temel olarak demir oksit (% 61.380), silisyum dioksit (% 8.025) ve kalsiyum oksitten (% 5.151) oluştuğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar Şekil 2'de verilen EDS analiz sonuçları ile örtüşmektedir. Balata üretiminde kullanılan diğer bir takviye elemanı olan uçucu külün de temel olarak silisyum dioksit (% 59.787), alüminyum oksit (% 21.034) ve demir oksit (% 7.824) bileşiklerinden oluştuğu Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 1. Fren balata numune üretiminde kullanılan tozların boyut dağılımları (Size distributions of powders used in brake pad sample production)

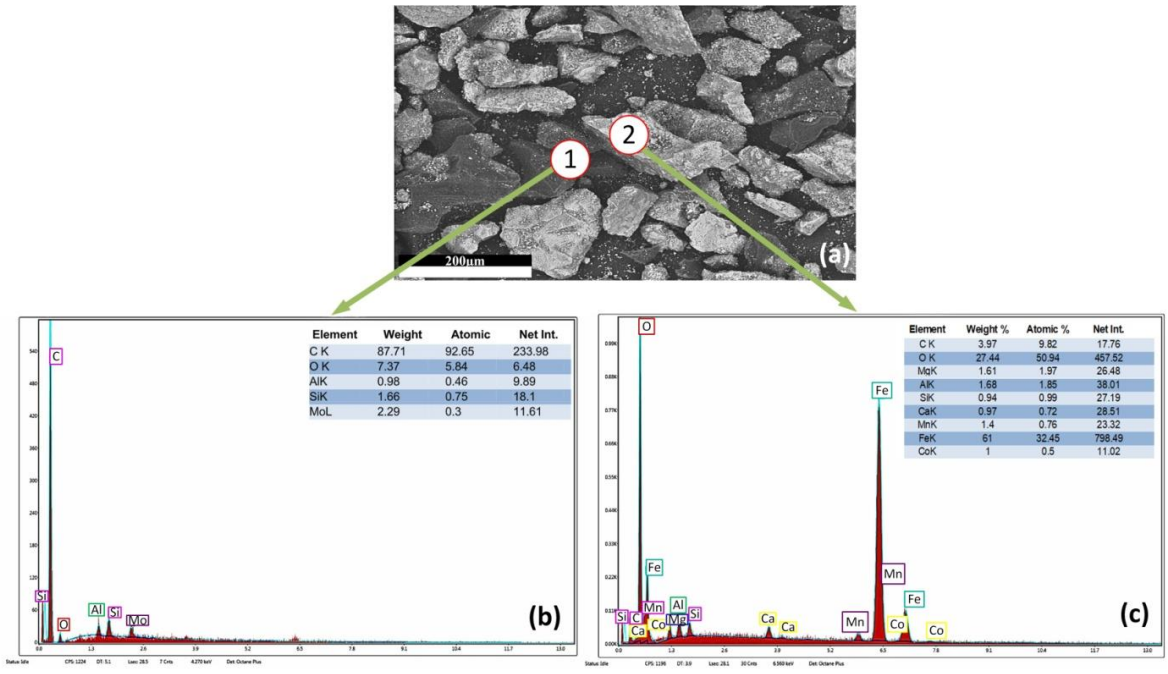
Parçacıklar	D10 (µm)	D50 (µm)	D90(µm)
Bronz	15.1	63.9	255
Demir	30.9	86.5	155
Grafit	9.25	35.3	105
Uçucu kül	2.69	17.4	71.6
BFD	36.3	114	213

Tablo 2. BFD ve uçucu külün kimyasal analiz sonucu (Chemical analysis result of BFD and fly ash)

Bileşenler	Fe_2O_3	CaO	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Na_2O	MgO	SO_3	K_2O	LOI
Uçucu kül	7.824	2.229	59.787	21.034	0.839	1.080	2.189	0.369	2.364	1.680
BFD	61.380	5.151	8.025	3.311	0.095	0.000	1.282	0.084	0.310	18.08



Şekil 1. Fren balata üretiminde kullanılan tozların SEM resimleri (a) Bronz, (b) Demir (c) Grafit, (d) Uçucu Kül, (e) BFD tozu (SEM images of powders used in brake pad production (a) Bronze, (b) Iron (c) Graphite, (d) Fly Ash, (e) BFD powder)



Şekil 2. Yüksek fırın baca tozunun a) SEM resmi b) 1 numaralı noktanın EDS analiz sonucu c) 2 numaralı noktanın EDS analiz sonucu (a) SEM picture of blast furnace flue dust b) EDS analysis result of point number 1 c) EDS analysis result of point number 2)

2.2. Fren Balata Numunelerinin Üretilmesi
(Production of Brake Pad Samples)

Fren balata numunelerinin üretim, test ve analiz aşamaları Şekil 3'de gösterilmiştir. Bronz matrisli fren balata malzemesi olarak ağırlıkça %68 bronz ($CuSn_6Zn_6Pb_3$), %15 demir, %12 uçucu kül ve %5 grafitten oluşan formülasyon referans malzeme olarak belirlenmiştir. Bu malzeme BFD-0 olarak kodlanmıştır. BFD-0 malzemesinin sertlik, yoğunluk, TRS, ortalama sürtünme katsayı değeri, zamana bağlı sürtünme katsayı ve disk yüzey sıcaklık değişimleri, sürtünme kararlılığı ve özgül aşınma oranı gibi özellikleri yazarlar tarafından yapılan daha önceki bir çalışmadan alınmıştır [26]. Daha sonra bu temel formülasyona takviye elemanı olarak ağırlıkça %2, %4, %6 ve %8 oranında BFD ilave edilerek 4 farklı yeni fren balata formülasyonu geliştirilmiştir. Çalışma içerisinde bu formülasyonlar ilave edilen BFD takviye oranına göre sırasıyla BFD-2, BFD-4, BFD-6 ve BFD-8 olarak kodlanmıştır. Fren balata numunesi üretiminde takviye elemanı olarak kullanılmak üzere temin edilen BFD tozu ilk olarak seramik havanda öğütülmüştür. Öğütme işleminin ardından BFD Şekil 3'de görülen titreşimli elek sallama (JeoTest, JG-036/1) cihazı yardımı ile elenerek, balata üretiminde kullanılmak üzere 150 µm altı boyutuna sahip tozlar seçilmiştir. Bu işlemin ardından tozlar her bir formülasyonu oluşturan oranlara göre hassas bir terazi kullanılarak tartılmış ve ardından homojen bir karışım elde etmek amacıyla mekanik bir karıştırıcı yardımı ile 40 d/dk dönme hızında, 90 dk. boyunca karıştırılmıştır. Bu işlem sonrasında hazırlanan her bir formülasyona ait toz karışımları 800 C^o sıcaklık ve 40 MPa basınç altında grafit kalıplar içinde 5 dakika boyunca sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi sonunda 25×25×8 mm^3 boyutlarında aşınma test numuneleri ve 40x10x10 mm^3 boyutlarında üç nokta eğme test numuneleri üretilmiştir (Şekil 4).

2.2 Fren Balata Numunelerinin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi (Determination of Physical Properties of Brake Pad Samples)

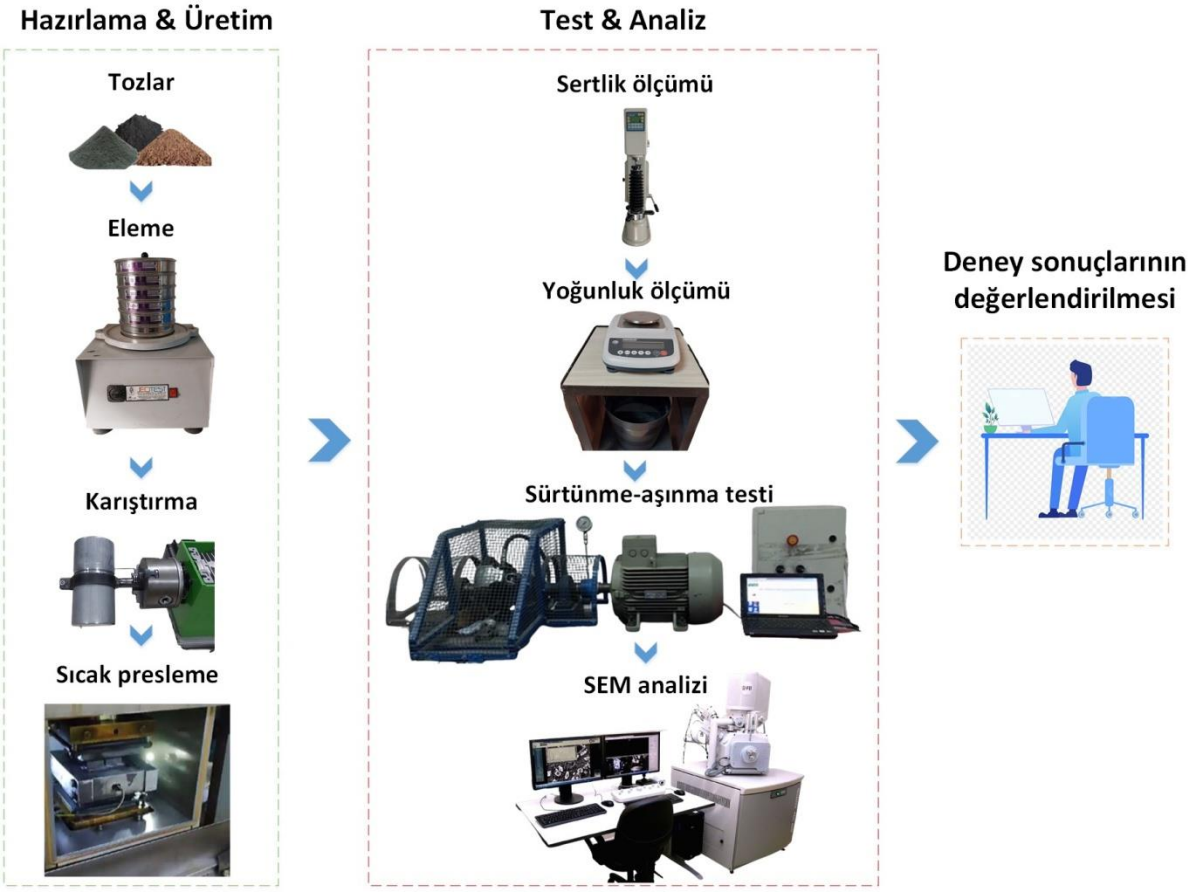
Üretilen fren balata numunelerin sertlik değerleri Bulut Makine sertlik ölçme cihazı (Digirock-RB model) kullanılarak Rockwell HRM cinsinden belirlenmiştir. Sertlik değerlerinin belirlenmesinde 100 kgf uygulama yükü ve ¼ inç çapında bilye kullanılmıştır. Her bir numuneden en az 5 ölçüm değeri alınmış olup, bu değerlerinin ortalaması numunenin sertlik değeri olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, fren balata numunelerinin yoğunluk değerleri Denklem (1) kullanılarak Arşimet prensibine göre belirlenmiştir [27]. Yoğunluk ölçüm sonuçları 3 defa tekrarlanmış ve bu tekrarların ortalaması hesaplanmıştır.

$$\rho_d = \frac{m_k}{m_k - m_y} \quad (1)$$

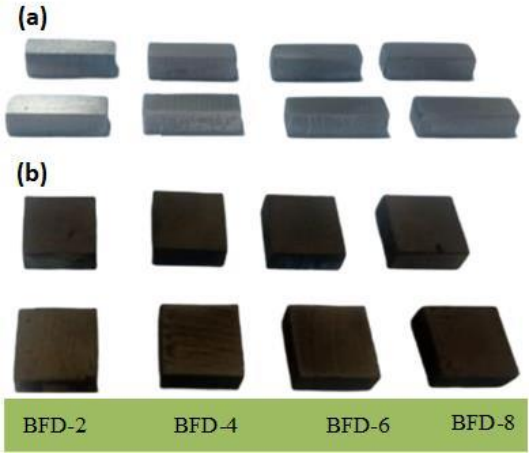
Burada, ρ_d numunenin deneysel yoğunluğunu, m_k kuru ağırlığını ve m_y ise yaş ağırlığını ifade etmektedir.

2.3 Fren Balata Numunelerinin TRS Özelliğinin Belirlenmesi (Determination of TRS Properties of Brake Pad Samples)

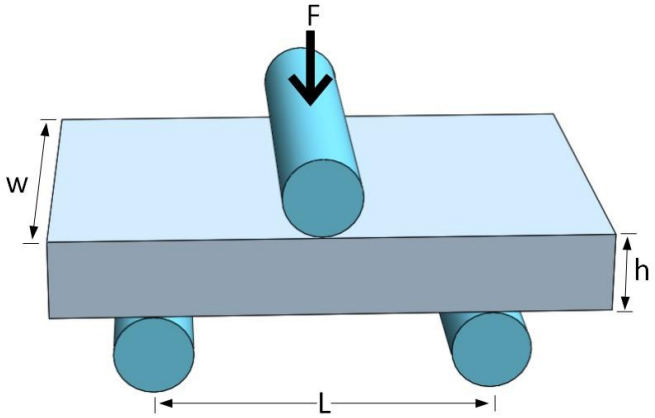
Üretilen fren balata numunelerinin üç nokta eğme testi, 50 kN yük kapasiteli JK-001 model Jeotest marka basma test cihazı ile dakikada 1 mm çene hızında gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme deneyleri Şekil 5'te şematik resmi verilen test düzeneği kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3. Deneysel çalışma akış diyagramı (Experimental study flow diagram)



Şekil 4. Üretilen fren balata test numuneleri (a) Üç nokta eğme test numuneleri (b) Aşınma test numuneleri (Produced brake pad test samples (a) Three-point bending test specimens, (b) friction wear test specimens)



Şekil 5. Üç nokta eğme test düzeneği (Three point bending test rig)

Fren balata numunelerinin TRS mukavemet değerleri Denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır [28]. Burada σ_TTRS mukavemetini (MPa), F uygulanan yükü (N), l iki destek arası mesafeyi (mm), b numunenin genişliğini (mm) ve h numunenin yüksekliğini (mm) belirtmektedir.

$$\sigma_T = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (2)$$

2.4 Fren Balata Numunelerinin Tribolojik Özelliklerinin Belirlenmesi (Determination of Tribological Properties of Brake Pad Samples)

Fren balata numunelerinin sürtünme-aşınma deneyleri özel olarak tasarlanmış bilgisayar kontrollü tam ölçekli fren test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test cihazı ile ilgili detaylı bilgiler Sugözü [29], [30] tarafından yapılan farklı çalışmalarda rapor edilmiştir. Sürtünme-aşınma testlerinde karşı malzeme olarak 250 Hv sertliğe sahip standart hava soğutmalı gri dökme demirden yapılmış fren diski kullanılmıştır. Üretilen fren balata numunelerin fren testi 1.05 MPa frenleme yükü, 616 dev/dak disk dönme hızı ve 660 saniye boyunca kuru kayma koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Fren testi esnasında, disk yüzey sıcaklık değişimi temassız kızılötesi termometre ile sürtünme katsayısı değişimi ise fren test cihazında bulunan ve 981 N ölçüm kapasitesine sahip bir yük sensörü aracılığıyla ölçülmüştür. Numunelerin aşınma miktarını belirlemek amacıyla fren balata numunelerinin ağırlıkları fren testi öncesi ve sonrası hassas bir terazi yardımıyla ölçülmüş ve aradaki ağırlık farkı aşınma miktarı olarak belirlenmiştir. Numunelerin özgül aşınma oranı TSE 555 (1992) standartlarına göre (V_s) Denklem (3) kullanılarak hesaplanmıştır [29].

$$V_s = \frac{1}{2\pi R}\,\frac{m_1 - m_2}{n\rho f_s} \quad (3)$$

Burada m_1 (gram) numunenin aşınma testi öncesi ağırlığını, m_2 (gram) numunenin aşınma testi sonrası ağırlığını, R (mm) fren balatasının merkezi ile diskin merkezi arasındaki mesafesini, ρ (g/cm^3) yoğunluğu, f_s (N) ortalama sürtünme kuvvetini ve n ise diskin toplam tur sayısını ifade etmektedir.

Fren balata numunelerinin sürtünme katsayı kararlılığı da Denklem (4) kullanılarak belirlenmiştir [31]. Her bir numune için sürtünme katsayı kararlılık değeri sürtünme-aşınma test süresince elde edilen sürtünme katsayı verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Sürtünme katsayısı kararlılık değerinin 100'e olabildiğince yakın olması fren balatalarından arzu edilen bir özelliktir [32], [33].

$$FS = \left(\frac{\mu_{ave}}{\mu_{max}}\right) x100 \quad (4)$$

Burada, FS sürtünme katsayı kararlılığı (%), μ_{ave} ortalama sürtünme katsayısı ve μ_{max} maximum sürtünme katsayısıdır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Yüksek Fırın Baca Tozu Takviyeli Fren Balata Numunelerinin Mikroyapı Analizi (Microstructure Analysis of Blast Furnace Flue Dust Reinforced Brake Pad Samples)

Şekil 6, farklı oranlarda BFD içeren numunelerin mikroyapı resimlerini ve EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. Fren balata numunesinin bileşenlerinden olan demir, grafit ve uçucu kül parçacıkları matris içerisinde uniform olarak dağılmıştır (Şekil 6(a)-(d)). Buna karşın balata numunesinin diğer bir bileşeni olan BFD, % 4 takviye oranının üzerinde ve özellikle % 8 takviye oranında matris içerisinde belirli bölgelerde kümelenmiştir (Şekil 6(c),(d)). EDS analiz sonucu mikroyapıda 1 ile gösterilen noktanın bronz, 2 ile gösterilen noktanın BFD'nin demir oksit bileşiği, 3

numaralı noktanın uçucu kül, 4 numaralı noktanın grafit, 5 numaralı noktanın BFD'nin diğer bileşeni olan grafit ve 6 numaralı noktanın demir olduğunu kanıtlamaktadır (Şekil 6(a)-(d)). Fren balata üretiminde matrise katı yağlayıcı olarak ilave edilen pul şeklinde grafit parçacıkları genel olarak levha şeklinde tane sınırlarına yerleşmişlerdir. EDS analiz sonucu pul şeklindeki grafit parçacıkların çoğunun karbondan oluştuğunu göstermiştir. Buna karşın BFD kaynaklı grafit parçacıkların keskin köşeli bir forma sahip olduğu (Şekil 6(c)) ve temel olarak yüksek oranda karbon ile düşük oranda oksijen içerdiği belirlenmiştir. BFD'nin diğer bileşeni bir demir oksit bileşimi olup bu hematit olarak ifade edilir [22]. BFD'nin demir oksit bileşeninin EDS analizinde tespit edilen demir ve oksijen içeriği bu durumu kanıtlamaktadır. Buna karşın balata üretiminde matrise güçlendirici bir bileşen olarak ilave edilen demir parçacıklarında herhangi bir oksijen içeriğine rastlanılmamıştır. Yüksek sıcaklıkta oluşan BFD, maruz kaldığı sıcaklık nedeniyle okside olmaktadır. Bu durum BFD'nin hem demir oksit hem de grafit bileşeninde belirlenen oksijen içeriği ile doğrulanmaktadır. Mikro yapı incelemesi kümelenmemiş BFD parçacıkların (hem grafit hem de demir oksit) matris ile iyi bir ara yüzey bağı oluşturduğunu göstermiştir (Şekil 6(a)-(c)). Bu durum üretilen numunelerin gelişmiş bir mekanik ve aşınma özelliklerine sahip olması için oldukça önemlidir. Parçacık takviyeli kompozit malzemelerin mekanik ve aşınma özelliklerini araştıran çalışmalar takviye elemanın matris içerisinde uniform olarak dağılması ve matris ile güçlü bir arayüzey bağı oluşturmasının mekanik ve aşınma özellikleri geliştirebileceğini göstermektedir [34].

3.2. Fren Balata Numunelerinin Yoğunluk Değerleri (Density Values of Brake Pad Samples)

Tablo 3'te üretilen fren balata malzemelerin deneysel, teorik ve bağıl yoğunluk değerlerini göstermektedir. Yüksek fırın baca tozu takviyeli fren balata malzemelerin deneysel yoğunlukları Arşimet yöntemi kullanılarak belirlenmiş, teorik ve bağıl yoğunluk değerleri ise hesaplanmıştır. BFD-0, BFD-2, BFD-4, BFD-6 ve BFD-8 numunelerin yoğunluk değerleri sırasıyla 5.91, 5.68, 5.61, 5.59 ve 5.49 g/cm^3 olarak belirlenmiş olup BFD oranına bağlı olarak yoğunluk değerlerinin değişimi Şekil 7'de görülmektedir. İlave edilen BFD oranına bağlı olarak fren balata numunelerin yoğunluk değeri azalmıştır. Bu durumun BFD içerisinde bulunan grafitten kaynaklandığı düşünülmektedir. BFD temel olarak demir oksit ve grafit karışımıdır. Grafitin bronza göre sahip olduğu daha düşük yoğunluk değeri artan BFD oranına bağlı olarak yoğunluk değerinin azalmasına neden olmuştur. Matrise göre daha düşük yoğunluk değerine sahip bir takviye elemanın matrise ilavesi ile gerçekleşen yoğunluk değeri düşüşü birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalarda rapor edilmiştir [35]. BFD-0 numunesinin bağıl yoğunluk değeri % 78.27 iken BFD-8 numunesinin bağıl yoğunluk değeri % 75.82 olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu iki değer birbirine oldukça yakındır. Bu durum, numunelerinin üretiminde belirlenen sinterleme parametrelerinin uygun olduğunun bir göstergesidir. Benzer sonuçlar Okay ve Islak [36] tarafından yapılan çalışmada da rapor edilmiştir.

3.3. Fren Balata Numunelerinin Sertlik Değerleri (Hardness Values of Brake Pad Samples)

Üretilen fren balata malzemelerin sertlik değerleri Şekil 8'de görülmektedir. Üretilen BFD-0, BFD-2, BFD-4, BFD-6 ve BFD-8 numunelerin sertlik değerlerinin sırası ile 102.5, 102.6, 103.3, 104.8 ve 108.4 HRM olduğu belirlenmiştir. Artan BFD oranına bağlı olarak numunelerin sertlik değeri artmıştır. Bu durum BFD'nin matrise göre daha yüksek sertliğe sahip demir oksit bileşeninin dislokasyon hareketine bir engel oluşturmasına atfedilmektedir [35], [37]. Bilindiği gibi zorlaştırılan veya engellenen dislokasyon hareketi malzemenin sertlik değerini arttırır. Çalışma kapsamında üretilen numunelerde artan BFD takviye oranına bağlı olarak matris içerisindeki demir oksit parçacıkları da artar. Matris içerisinde artan bu demir oksit parçaçıkları da Orawan mekanizması etkisi ile dislokasyon hareketlerini engelleyerek sertlik değerinin artmasına neden olmuştur. Yumuşak bir matrise, sert bir takviye elemanı ilavesinin üretilen numunenin sertlik değerini arttırdığı literatürdeki diğer çalışmalarda da rapor edilmiştir [38], [39].

3.4. Fren Balata Numunelerinin TRS Sonuçları (TRS Results of Brake Pad Samples)

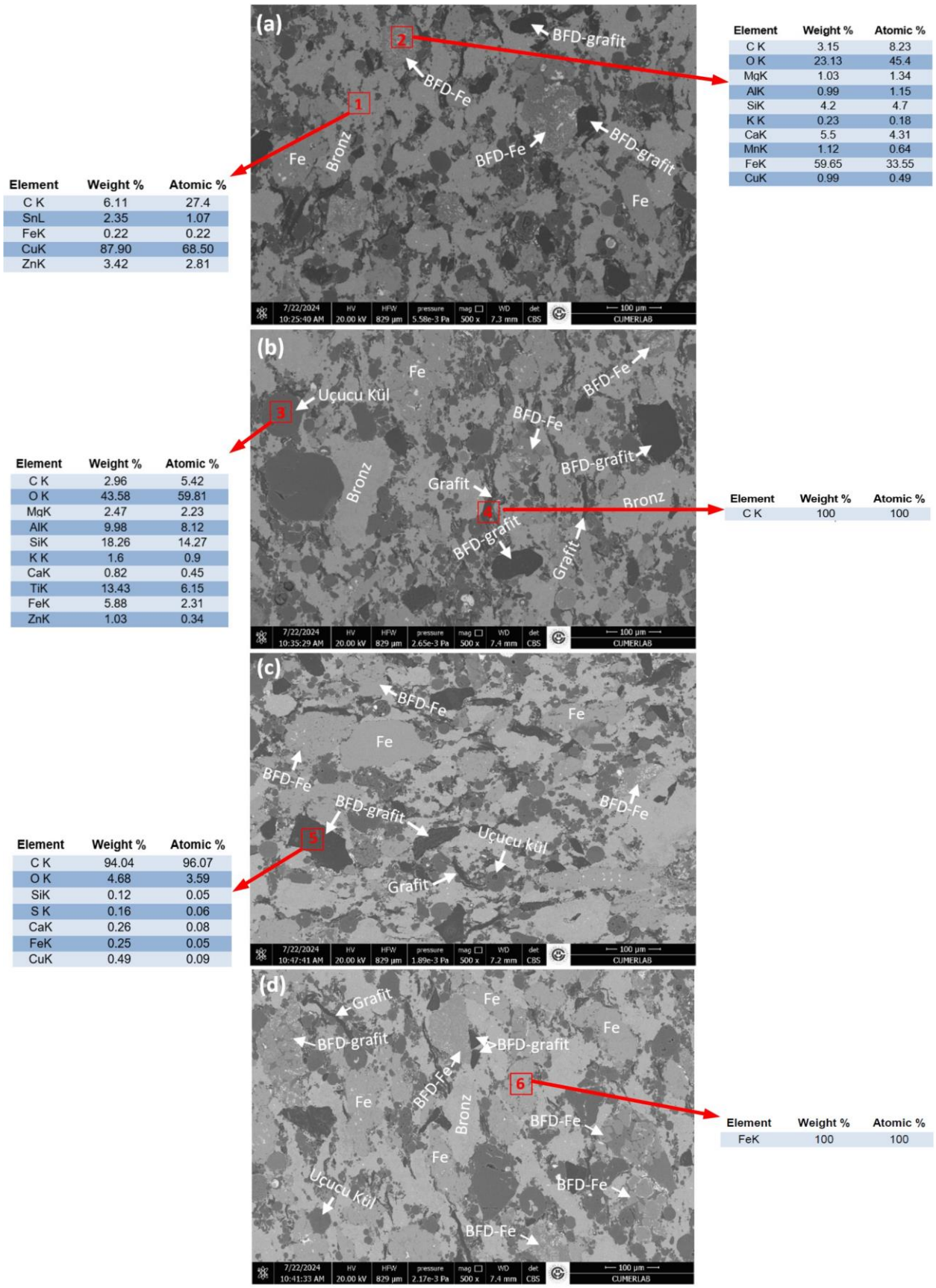
Şekil 9'da matrise ilave edilen BFD oranına bağlı olarak üretilen fren balata numunelerin TRS değerlerindeki değişim görülmektedir. BFD-0 numunesinin TRS değeri 102.138 MPa iken BFD-2 ve BFD-4 numunesinin TRS değerleri sırasıyla 139.97 ve 143.09 MPa olarak belirlenmiştir. Ancak %4 BFD ilavesinden sonra, BFD-6 ve BFD-8 numunelerin TRS değerleri sırasıyla 129.75 ve 122.64 MPa değerine düşmüştür. % 4 BFD oranından sonra TRS değerlerinin azalma eğilimi göstermesi BFD'nin matris içerisinde bölgesel kümelenmesinden kaynaklanan kusurlara atfedilmiştir. BFD takviyeli tüm numunelerin TRS değerleri BFD-0 numunesine göre daha yüksektir. BFD takviyeli numunelerin TRS değeri BFD-0

numunesin TRS değerine göre en az % 20 en çok da % 40 oranında artmıştır. Bu durum ilave edilen BFD'nin üretilen kompozit malzemelerin eğme dayanımını geliştirmede etkili olduğunu göstermiştir.

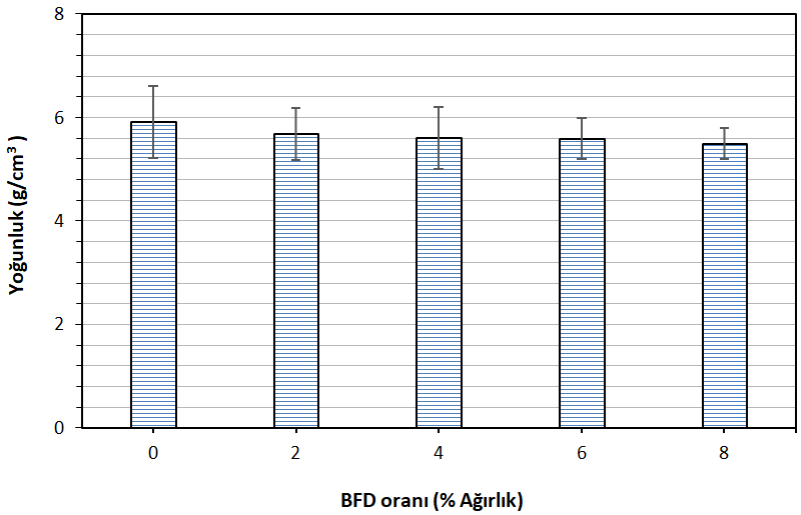
Şekil 10 üretilen fren balata malzemelerin kırık yüzey SEM resimlerini göstermektedir. Bilindiği gibi BFD temel olarak grafit ve demir oksit gibi iki farklı bileşenin karışımıdır. BFD-2 ve BFD-4 numunelerinde matrise uygulanan yük, bronz ile BFD ara yüzeyinde oluşan güçlü bağ yapısı aracılığı ile BFD parçacıklarına aktarılır ve numunelerin yük taşıma özellikleri gelişir. BFD'nin hem grafit hem de demir oksit bileşeninin matris ile oluşturduğu boşluksuz yapı iyi bir arayüzey bağının kanıtı olarak değerlendirilmiştir (Şekil 10(a)-(d)). Benzer tespitler birçok araştırmacı tarafından yürütülen çalışmalarda da rapor edilmiştir [39]. Buna bağlı olarak da BFD-2 ve BFD-4 numunelerin TRS değerleri BFD-0 numunesinin TRS değerine göre artış göstermiştir. BFD-2 ve BFD-4 numunelerindeki BFD bileşenleri Şekil 11'de verilen EDS analiz sonucu ile tanımlanmıştır. Bu sonuçlara göre 1 rakamı ile gösterilen noktadaki BFD bileşeninin grafit, 2 rakamı ile gösterilen noktadaki BFD bileşenin de demir oksit olduğu belirlenmiştir (Şekil 10(a),(b)). Parçacık-matris ara yüzünde meydana gelen ayrılma, homojen olmayan parçacık dağılımı, matris kusurları ve parçacık kırılması gibi birçok farklı mekanizmanın parçacık takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin çapraz kırılma davranışı üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Matrise ilave edilen takviye parçacıkların matriste homojen dağılarak kusursuz bir arayüzey bağı oluşturması, matrise uygulanan yükün takviye parçacıklara aktarılmasını sağlar. Bu durum, numunenin TRS değerlerinin gelişmesine olumlu katkı sağlar [40]. Fakat, ilave edilen BFD oranının % 6 ve % 8 olması ile BFD matris içerisinde kümelenme eğilimi göstermiştir (Şekil 10(e),(f)). BFD-6 ve BFD-8 numunelerinde artan takviye oranına bağlı olarak oluşan parçacık kümelenmesi de bu noktalarda bölgesel gerilme yoğunlaşmasına neden olur. Bunun sonucunda üç nokta eğme testinde yüksek gerilmeye maruz kalan bu parçacıklarda önce çatlak oluşumu başlar ve bunun ardından da kırılma gerçekleşir (Şekil 10(f)). Çatlayan ve ardından kırılan BFD'nin, BFD-6 ve BFD-8 numunelerinde yük taşıma kapasitesini olumsuz yönde etkileyerek TRS değerinin azalmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Tablo 3. Üretilen fren balata numunelerin teorik, deneysel ve bağıl yoğunluk değerleri (Theoretical, experimental and relative density values of the produced brake pad samples)

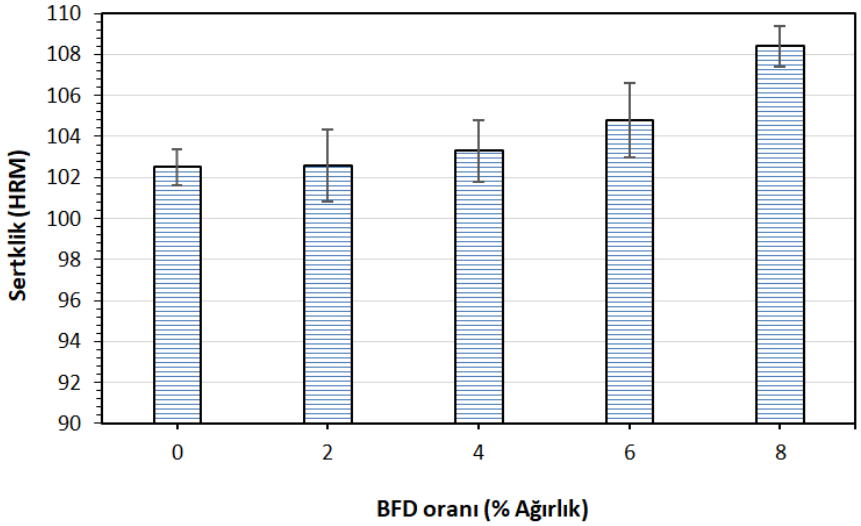
Yüksek fırın baca toz oranı (%)	Teorik yoğunluk (g/cm^3)	Deneysel yoğunluk (g/cm^3)	Bağıl yoğunluk (%)
BFD-0	7.55	5.91	78.27
BFD-2	7.46	5.68	76.13
BFD-4	7.39	5.61	76.04
BFD-6	7.31	5.59	75.92
BFD-8	7.24	5.49	75.82



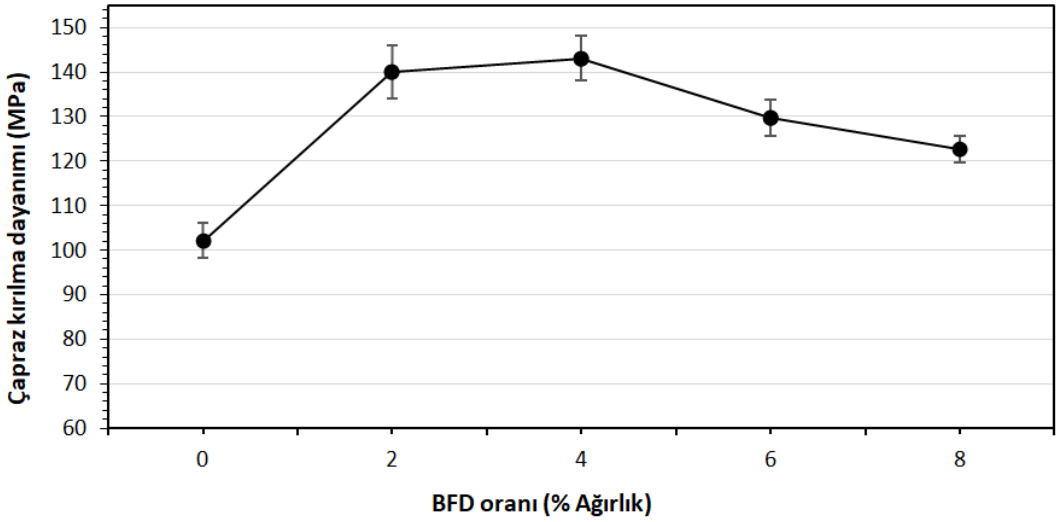
Şekil 6. Fren balata numunelerin BSE görüntüleri ve EDS analiz sonuçları: (a) BFD-2 (b) BFD-4, (c) BFD-6, (d) BFD-8 (BSE images and EDS analysis results of brake pad samples: (a) BFD-2 (b) BFD-4, (c) BFD-6, (d) BFD-8)



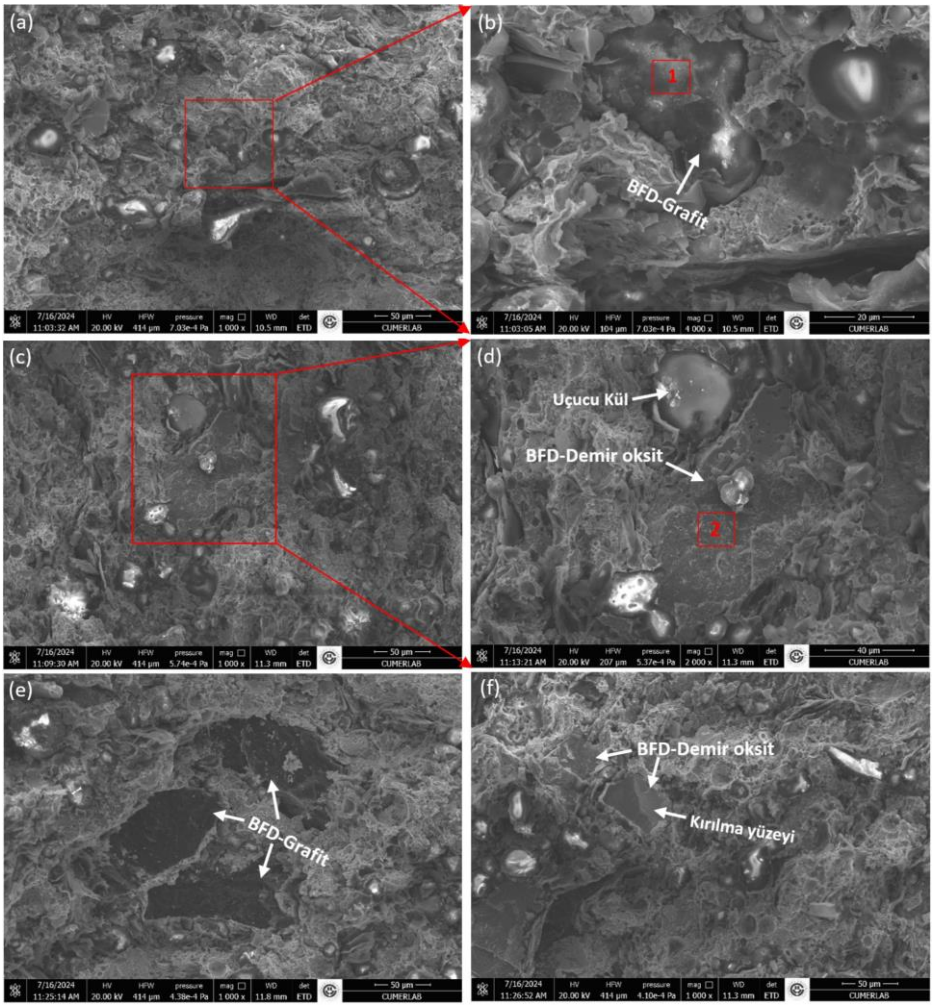
Şekil 7. Üretilen fren balata numunelerin yoğunluk değerleri (Density values of the produced brake pad samples)



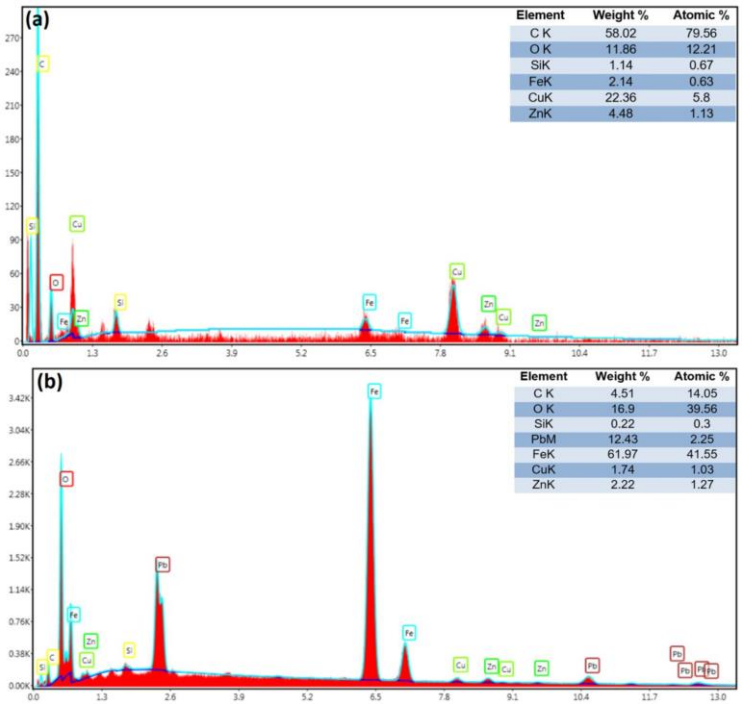
Şekil 8. Üretilen fren balata numunelerin sertlik değerleri (Hardness values of the produced brake pad samples)



Şekil 9. Üretilen fren balata numunelerin TRS değerleri (TRS values of the produced brake pad samples)



Şekil 10. Üretilen fren balata numunelerinin kırık yüzeylerine ait SEM resimleri (a)-(b) % 2, (c)-(d) %4, (e) % 6, (f) % 8 BFD (SEM images of the fracture surfaces of the brake pad samples produced (a)-(b) 2%, (c)-(d) 4%, (e) 6%, (f) 8% BFD)



Şekil 11. Şekil 10'da verilen SEM resmindeki (a) 1, (b) 2 noktasının EDS analiz sonucu (EDS analysis result of point (a) 1, (b) 2 in the SEM image given in Figure 10)

3.5. Fren Balatası Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Performansı (Friction-Wear Performance of Brake Pad Materials)

Şekil 12(a)-(e) farklı oranlarda BFD ile güçlendirilmiş fren balata numunelerin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sürtünme ara yüzey sıcaklık değişimlerini göstermektedir. Artan BFD oranına bağlı olarak, BFD-0, BFD-2, BFD-4, BFD-6, ve BFD-8 numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0.435, 0.461, 0,463, 0.475 ve 0.467 olmuştur (Şekil 12(a)-(e)). Elde edilen bu sonuçlar, tüm numuneler arasında en düşük ortalama sürtünme katsayı değerine 0.435 ile BFD-0 numunesinin, en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerine de 0.475 ile BFD-6 fren balata numunesinin sahip olduğunu göstermiştir. % 6 BFD oranına kadar fren balata numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değeri artmıştır. Bu durumun BFD'nin sahip olduğu Fe_2O_3 ve grafit gibi iki farklı bileşenin birlikte ancak farklı sürtünme mekanizmaları ile sürtünme katsayısı artışına yol açmasından kaynakladığı düşünülmektedir. Fe_2O_3 oldukça sert bir bileşen olup sürtünme esnasında karşı yüzey üzerinde abrasif bir etki oluşturarak sürtünme katsayısı artışına katkı sağlar. Bunun yansıra BFD'nin diğer bileşeni olan granül grafit çoklu köşe ve kenarlara sahiptir. Grafitin sahip olduğu bu özellikler frenleme esnasında karşı yüzey üzerinde bir tutunma kuvveti oluşturarak %6 BFD oranına kadar sürtünme katsayısı artışına pozitif yönde bir katkı sağlamıştır. Zhang ve arkadaşları [41] yaptıkları bir çalışmada farklı oranlarda granül grafit içeren bakır matrisli fren balata malzemeleri üretmişler ve bunların sürtünme özelliklerini araştırmışlardır. Frenleme esnasında çoklu kenar ve köşelere sahip granül grafitin düzensiz şekli, karşı yüzeyle temas ettiğinde daha güçlü bir kavrama kuvveti oluşturarak ilave edilen granül grafit oranının artmasıyla sürtünme katsayısının artmasına neden olduğunu ifade etmişlerdir. BFD-8 numunesinin ortalama sürtünme katsayısı değeri BFD-6 numunesinin ortalama sürtünme katsayısına göre bir miktar azalmıştır. BFD-8 numunesinin ortalama sürtünme katsayısının BFD-6 numunesine göre daha düşük olmasına yol açan temel etken 540. saniye ve 148 ^oC disk sıcaklığından sonra meydana gelen feyd olayıdır (Şekil 12(e)). Feyd olayı sürtünme katsayısının artan sıcaklığa bağlı olarak düşmesi olarak tanımlanan bir olgu olup sürtünme malzemelerinde gerçekleşmesi istenmeyen bir durumdur [42]. Feyd olayının meydana gelmesindeki temel faktörün, BFD-8 numunesinde BFD'nin belli bölgelerde oluşturduğu kümelenmeden kaynaklandığı düşünülmektedir. Parçacık kümelenmesi sonucu kümelenen parçacıklar matris tarafından yeterince çevrelenememekte ve bu durum da parçacık matris arayüzey bağını zayıflatmaktadır. BFD'nin grafit bileşenlerinin kümelenmesi zaten zayıf olan grafit matris arayüzey bağını daha da zayıflatır ve bu durum frenleme esnasında sürtünme arayüzünde artan sıcaklığın etkisiyle BFD'nin grafit bileşeninin matristen kopmasına neden olur. Kopan grafit parçacıkları da sürtünme ara yüzeyinde yağlayıcı bir film tabakası oluşturarak metal-metal teması azaltır. Bu durum, sürtünme testinin son aşamasında artan sürtünme sıcaklığına bağlı olarak sürtünme katsayısını da azaltır (Şekil 12(a)). Diğer BFD-0, BFD-2, BFD-4 ve BFD-6 numunelerin sürtünme katsayılarında artan sürtünme ara yüzey sıcaklığına bağlı olarak belirgin bir düşüş gözlenmemiştir. Üretilen bir balata numunesinin otomobillerde fren balata malzemesi olarak kullanılabilmesi için 0.3-0.6 aralığında bir sürtünme katsayısı değerine sahip olması gerektiği rapor edilmiştir [24]. Bu açıdan değerlendirildiğinde üretilen tüm numunelerin rahatlıkla fren balata malzemesi olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

BFD-0, BDF-2, BFD-4, BFD-6 ve BFD-8 numuneleri için sürtünme testinin sonunda ulaşılan maksimum disk yüzey sıcaklıkları sırası ile 184, 159, 163, 170 ve 164 °C olmuştur. Burada BFD takviyeli numunelerin BFD takviyesiz numuneye göre daha yüksek bir ortalama sürtünme katsayı değerine sahip olmasına rağmen testin sonunda ulaşılan maksimum disk yüzey sıcaklığının BFD takviyesiz numuneye göre daha düşük olması oldukça dikkat çekici bir durumdur. Genellikle yüksek sürtünme katsayısı yüksek sürtünme ara yüzey sıcaklığının bir nedeni olarak ifade edilmektedir. Ancak BFD takviyeli numunelerde tam olarak bu durum gerçekleşmemiştir. Bu durumun, BFD'nin bileşeni olan granül grafitin bir taraftan sürtünme katsayı artışına neden olurken diğer taraftan da yağlayıcı bir etki göstererek arayüzey sıcaklık artışını baskılamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

İdeal bir fren balata malzemesi için farklı koşullarda (hız, sıcaklık, basınç vd.,) gerçekleştirilen frenleme durumlarında sürtünme katsayı değişimin minimum düzeyde olması istenir. Sürtünme katsayı kararlılığı olarak da ifade edilen bu durum tüm fren balata malzemelerinden talep edilen önemli özelliklerden birisidir [43]. Artan BFD takviye oranına bağlı olarak değişen sürtünme katsayı kararlılık değerleri Şekil 13'te gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde BFD-0 numunesinin sürtünme katsayı kararlılık değeri % 76,47 iken bu numuneye %2, %4, %6 ve %8 BFD ilave edildiğinde fren balata numunelerin

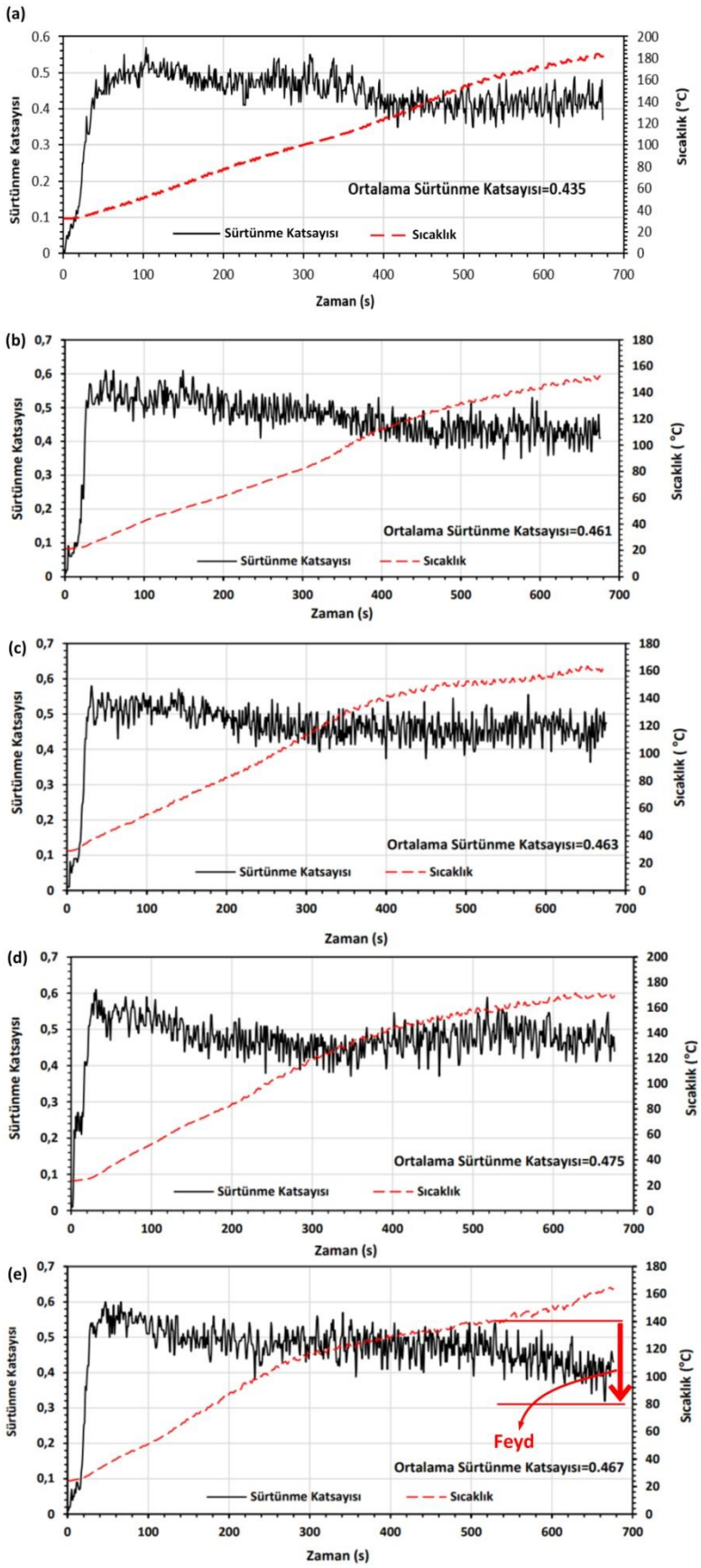
sürtünme katsayı kararlılık değerleri sırasıyla % 75.57, % 79.82, % 79.22 ve % 77.6 olmuştur. BFD-2 numunesi hariç diğer tüm BFD takviyeli numuneler BFD-0 numunesine göre daha yüksek bir sürtünme katsayı kararlılık değeri sergilemiştir. BFD takviyeli numunelerde BFD oranının % 2'den % 4'e artması ile sürtünme katsayı kararlılığı artmış ancak bu takviye oranından sonra artan BFD takviye oranı ile sürtünme katsayısı kararlılık değeri azalma eğilimi göstermiştir. Tüm numuneler arasında en yüksek sürtünme katsayı kararlılık değerini BFD-4 numunesi sergilemiştir. En yüksek sürtünme katsayı kararlılığının bu numunede görülmesi, numunenin aşınma yüzeyinde yoğun temas platoların oluşumu ile açıklanabilir. Benzer şekilde, Eriksson ve Jacobson [44] frenleme esnasında aşınma yüzeyinde oluşan temas platolarının sürtünme katsayı kararlılığını geliştirmede önemli katkı sağladığını ifade etmiştir.

Şekil 14, yüksek fırın baca tozu takviyeli fren balata numunelerin özgül aşınma oranlarını göstermektedir. Tüm numuneler arasında en düşük özgül aşınma oranını 3.17×10^{-6} cm^3/Nm ile BFD-8 numunesi, en yüksek özgül aşınma oranını ise 6.79×10^{-6} cm^3/Nm ile BFD-0 numunesi göstermiştir. Tüm numunelerin özgül aşınma değerleri incelendiğinde artan BFD takviye oranı ile numunelerin özgül aşınma değerlerinin kademeli olarak azaldığı belirlenmiştir. En yüksek ve en düşük özgül aşınma oranı değerleri kıyaslandığında, BFD-8 numunesinin özgül aşınma oranı BFD-0 numunesinin özgül aşınma oranına göre yaklaşık %53.31 oranında azalmıştır. Bu durum fren balata numunelerine BFD ilavesinin, numunelerin aşınma dirençlerini geliştirmede önemli bir katkı sağladığını göstermektedir. BFD takviye oranının artması ile numunelerin artan aşınma dirençlerinin sürtünme esnasında aşınma yüzeyine çıkan BFD bileşenlerin aşınma yüzeyinde ikincil temas platolarının oluşması ve genişlemesi için gerekli çekirdeklenme noktalarını oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sürtünme yüzeyinde oluşan ve genişleyen ikincil temas platoları da sürtünme çifti arasındaki metalik teması engelleyerek aşınma direncinin gelişmesine katkı sağlamaktadır [41].

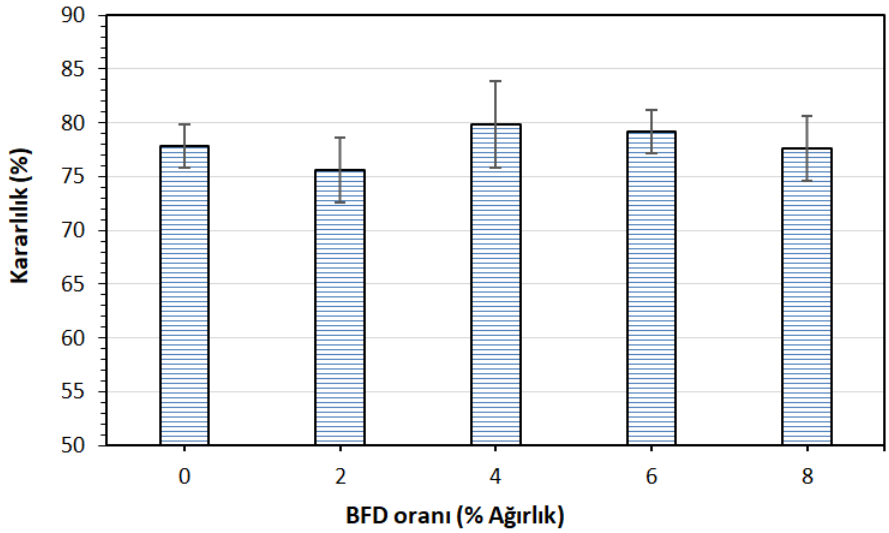
Şekil 15((a)-(d)) BFD-2, BFD-4, BDF-6 ve BFD-8 numunelerin aşınma yüzeylerine ait farklı büyütmelerdeki SEM resimlerini göstermektedir. BFD-2 numunesinin aşınma yüzeyinde deleminasyon aşınması sonucunda aşınma yüzeyinden pul şeklinde aşınma parçacıkların koptuğu görülmektedir. Sürtünme esnasında temas yüzeyinin altında başlayan mikro çatlaklar kayma doğrultusunda ilerler ve bu çatlaklar belirli bir büyüklüğe ulaştığında delaminasyon aşınması meydana gelir. Buna bağlı olarak da aşınma yüzeyinden pul şeklinde aşınma parçacıkları ayrılır. Aşınma yüzeyinden kopan bu pul şeklindeki aşınma parçacıkları da kesme gerilmesinin etkisi ile sürtünme arayüzeyinde parçalanarak küçük ve eş eksenli aşınma parçacıklarına dönüşmektedir. Bu aşınma parçacıkları da, ikincil temas platosu oluşum sürecine iki farklı şekilde dahil olmaktadır. Birinci durumda aşınma parçacıkları BFD'nin etrafında birikmekte ve ardından sürtünme arayüzeyinde oluşan sıcaklık ve temas basıncın etkisi ile sinterlenerek ikincil temas platolarına dönüşmektedir. İkinci durumda ise aşınma parçacıkları daha önce oluşmuş olan ikincil temas platolarının arkasında birikmekte ve bu platoların büyümesine katkı sağlamaktadır (Şekil 15(a)). BFD-4 numunesinin aşınma yüzeyi oldukça pürüzsüz bir karakter göstermiştir. Fakat fren balata numunesinin sürtünme-aşınma testleri sırasında aşınma yüzeyinde oluşan aşınma parçacıkları BFD'nin grafit bileşeni arkasında birikerek ikincil temas platoları üzerinde tekrar sıkıştırılmış tabaka olarak da ifade edilen yeni bir temas tabakası oluşturmuştur (Şekil 15(b)). BFD-6 numunesinin aşınma yüzeyinde, BFD arkasında geniş ikincil temas platoların oluştuğu Şekil 15(c)'de görülmektedir. Bu ikincil temas platolarının oluşumunda önemli bir görev üstlenen BFD parçacıkları, takviye oranının artmasına bağlı olarak kümelenme eğilimi göstermiştir. Kümelenme oluşumu nedeniyle parçacıklar matris tarafından yeterince çevrelenememekte ve bu da parçacık matris ara yüzeyinde kusurların oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca, sürtünme ara yüzeyinde artan sıcaklığın neden olduğu matris yumuşaması, parçacık kümelenmesinden dolayı zayıf bir ara yüzey bağ dayanımına sahip olan BFD parçacıklarının daha kolay bir şekilde matristen ayrılmasına neden olur. Birincil temas platosu görevi gören bu parçacıkların sürtünme arayüzeyinden ayrılması ile birincil temas platosu etrafında oluşan ikincil temas platoları da bozulmaktadır. Bozulan ikincil temas platoları da aşınma yüzeyinde çukurların oluşmasına neden olmaktadır. Ancak sürtünme yüzeyinden kopan ikincil temas platoları sürtünme ara yüzeyinde parçalanarak daha küçük aşınma parçacıklarına dönüşmektedir. Bu aşınma parçacıkları da oluşan çukurlarda birikerek ikincil temas platolarının tekrar oluşup büyümesi için katkı sağlamaktadır. Sürtünme ara yüzeyinde gerçekleşen bu sürecin BFD-6 numunesinin aşınma direncinin gelişmesine olumlu yönde katkı sağladığı düşünülmektedir (Şekil 15(c)). BFD-8 fren balata numunesi sürtünme yüzeyinde oluşan çukurlarda ise daha fazla miktarda küçük ve eş eksenli aşınma parçacıklarının

biriktiği Şekil 15(d)'de görülebilmektedir. Biriken bu küçük aşınma parçacıkları de ikincil temas platosunun büyümesine katkı sağlayarak BFD-8 numunesinin aşınma direncinin gelişmesine neden olmuştur. Zhang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sürtünme yüzeyinde oluşan çukurların nanometreden birkaç mikron boyutuna kadar olan aşınma parçacıklarını depoladığını rapor etmişlerdir [41].

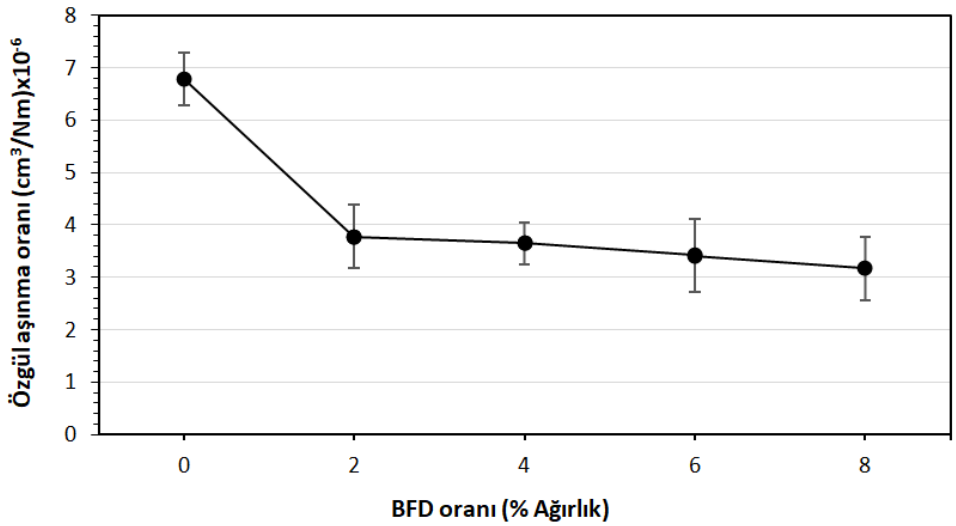
Şekil 16, BFD-6 ve BFD-8 fren balata malzemelerin aşınma yüzeylerinde kare ile gösterilen bölgelerin EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. EDS analiz sonuçları incelendiğinde, BFD-6 numunesinin aşınma yüzeyinde oluşan ikincil temas platosunda belirlenen demir oranı BFD-8 numunesininkinden daha yüksektir. Bu durumun, BFD-6 numunesinin karşı disk üzerinde daha yoğun bir abrasif etki göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu abrasif etki nedeniyle karşı disk malzemesinden BFD-6 numunesine doğru daha fazla oranda demir transferi gerçekleşmiştir. Tüm numuneler arasında BFD-6 numunesinin en yüksek sürtünme katsayı değerine sahip olması EDS analiz sonucunda belirlenen yüksek demir içeriği sonucu ile örtüşmektedir.



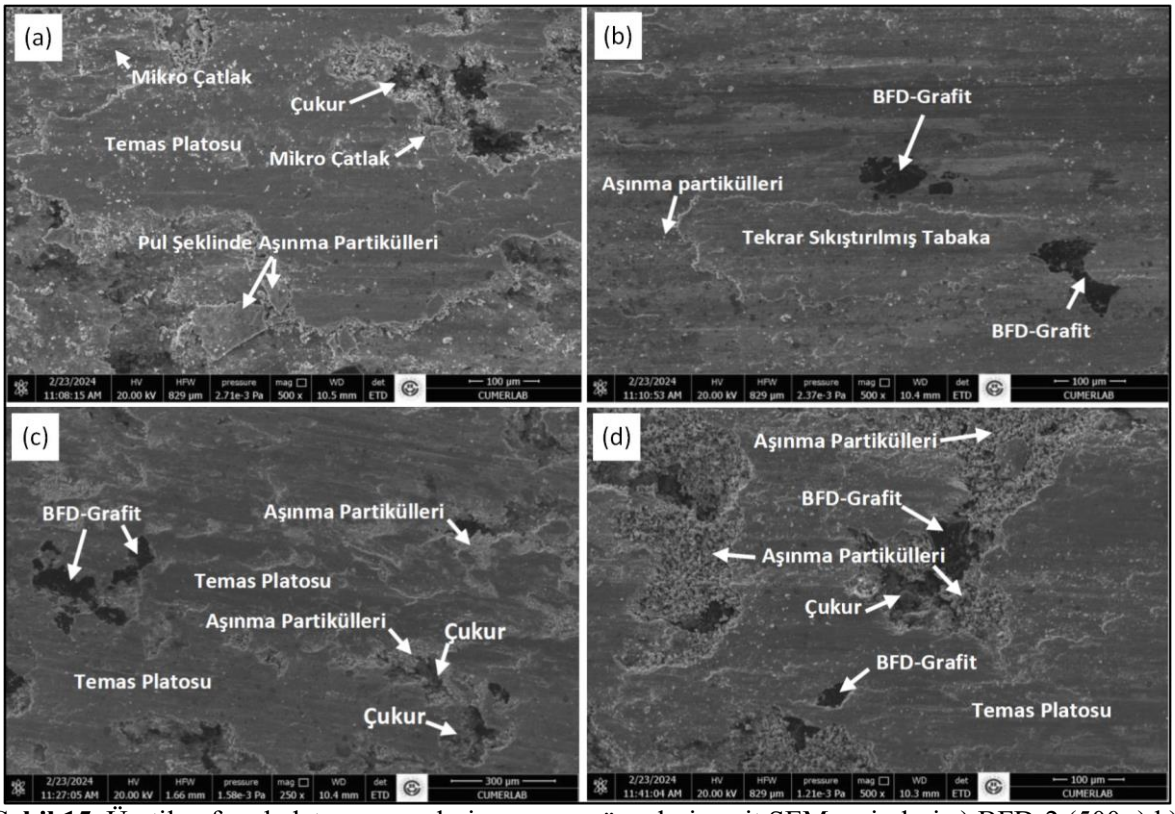
Şekil 12. Üretilen fren balata numunelerin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve disk yüzey sıcaklık değişimleri (a) BFD-0, (b) BFD-2, (c) BFD-4, (d) BFD-6, (e) BFD-8 (Time dependent friction coefficient and disc surface temperature changes of the produced brake pad samples (a) BFD-0, (b) BFD-2, (c) BFD-4, (d) BFD-6, (e) BFD-8)



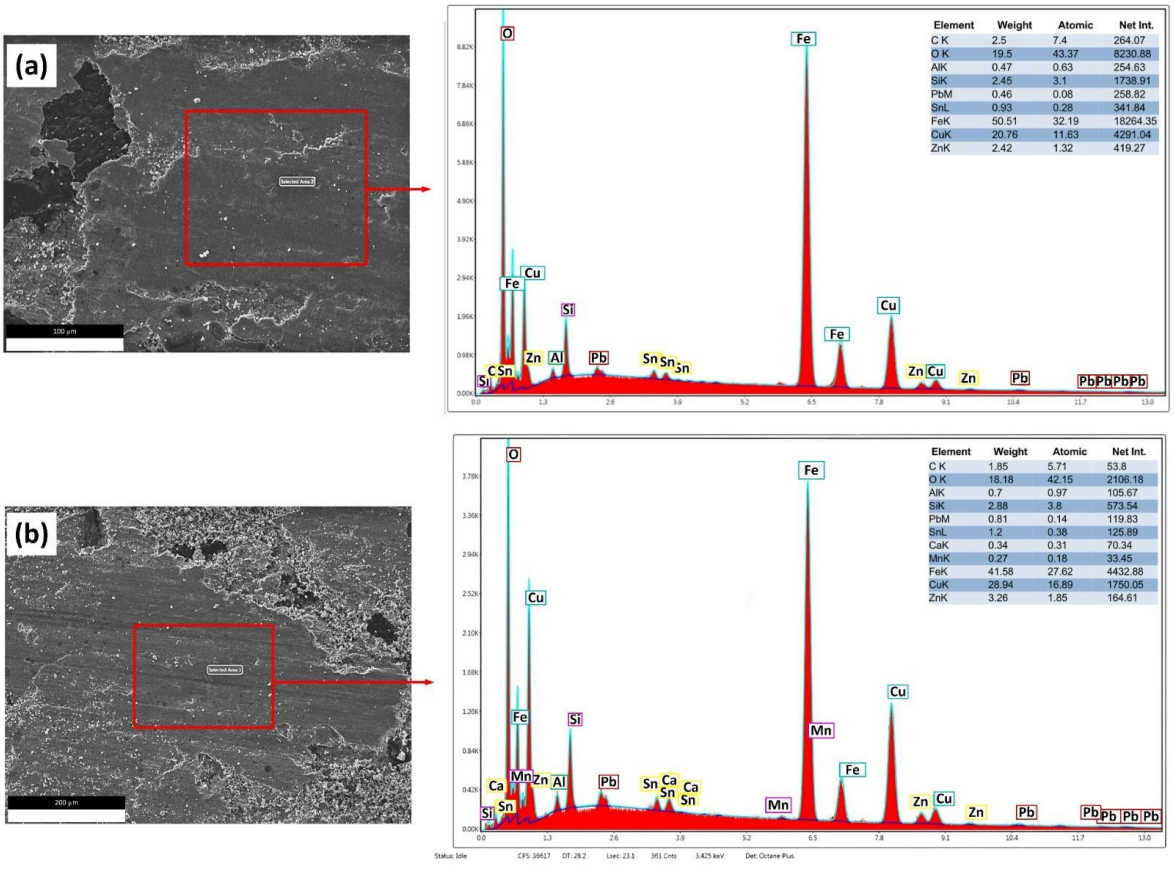
Şekil 13. Üretilen fren balata numunelerin sürtünme katsayı kararlılık değerleri (Friction coefficient stability values of produced brake pad samples)



Şekil 14. Üretilen fren balata numunelerin özgül aşınma oranları (Specific wear rates of produced brake pad samples)



Şekil 15. Üretilen fren balata numunelerin aşınma yüzeylerine ait SEM resimleri a) BFD-2 (500×) b) BFD-4 (500×) c) BFD-6 (250×) d) BFD-8 (500×) (SEM images of the wear surfaces of the produced brake pad samples a) BFD-2 (500×) b) BFD-4 (500×) c) BFD-6 (250×) d) BFD-8 (500×))



Şekil 16. Üretilen fren balata numunelerin aşınma yüzeylerinde kırmızı kare ile gösterilen alanların EDS analiz sonuçları (a) BFD-6, (b) BFD-8 (EDS analysis results of the areas indicated with red squares on the wear surfaces of the produced brake pad samples (a) BFD-6, (b) BFD-8)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu araştırmada endüstriyel bir atık malzeme olan BFD'nin bronz matrisli kompozit fren balata malzemesi üretiminde takviye elemanı olarak kullanılabilirliği ve üretilen fren balata numunelerinin fiziksel, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Bu doğrultuda, sıcak presleme yöntemi kullanarak ağırlıkça farklı oranlarda (%2, %4, %6 ve %8) BFD takviyeli fren balata numuneleri üretilmiştir. Üretilen fren balata numunelerinin yoğunluk, sertlik, sürtünme katsayı kararlılığı, TRS, ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerleri belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1) BFD takviyeli fren balata numunelerin yoğunluk değerleri, ağırlıkça artan BFD takviye oranına bağlı olarak azalmış, sertlik değerleri ise artmıştır. Artan BFD oranına bağlı olarak yoğunluk değerlerinin azalması, BFD'nin yoğunluk değerinin matrisi oluşturan bronzun yoğunluk değerinden daha düşük olmasından kaynaklanmıştır. Artan BFD takviye oranına bağlı olarak üretilen numunelerin sertlik değerlerinin artışı ise BFD'nin içeriğinde bulunan demir oksit bileşenin dislokasyon hareketini engellemesi nedeniyle gerçekleşmiştir.

2) %4 BFD takviye oranına kadar üretilen numunelerin TRS değerleri artış eğilimi gösterirken, bu takviye oranından sonra artan BFD takviye oranına bağlı olarak TRS değerleri azalmıştır. Bu durum %4 BFD takviye oranından sonra BFD parçacıklarının matris içerisinde kümelenme eğilimi göstermesinden kaynaklanmıştır.

3) Üretilen numunelerden elde edilen ortalama sürtünme katsayı değerlerinin, otomobillerde fren balata malzemesi olarak kullanım için gerekli olan 0.3-0.6 aralığında olduğu belirlenmiştir.

4) Artan BFD ilavesine bağlı olarak fren balata numunelerin aşınma yüzeyinde genişleyen ikincil temas platoları, sürtünme çifti arasındaki metal/metal teması engelleyerek numunelerin özgül aşınma oranlarının azalmasına katkı sağlamıştır.

Bu araştırma sonucunda elde edilen bulgular, bronz matrisli kompozit fren balata malzemesi üretiminde endüstriyel bir atık ürün olarak temin edilen BFD'nin test edilen ağırlık oranlarında herhangi bir fren performans kaybına neden olmaksızın kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca, bu çalışma fren balata üretiminde takviye elemanı olarak BFD kullanımıyla hem BFD'nin çevreye verdiği zararın ve hem de balata üretim maliyetinin azaltılabileceğini ortaya koymuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, TÜBİTAK BİDEB 2218 Ulusal Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı (Proje Numarası 122C219) kapsamında desteklenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

***Hüsamettin KUŞ*:** Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

***İlker SUGÖZÜ*:** Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

***Adem AVCU*:** Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] H. Zhou, P. Yao, T. Gong, Y. Xiao, Effects of ZrO2 crystal structure on the tribological properties of copper metal matrix composites, Tribology International, 138 (2019) 380-391.

[2] C. Kar, B. Surekha, Effect of red mud and TiC on friction and wear characteristics of Al 7075 metal matrix composites, Australian Journal of Mechanical Engineering, 20:1 (2019) 14-23.

[3] K. I. Kim, H. Lee, J. Kim, K. H. Oh, K. T. Kim, Wear Behavior of Commercial Copper-Based

Aircraft Brake Pads Fabricated under Different SPS Conditions, Crystals, 11:11 (2021).

[4] F. S. Hamid, O. A. Elkady, A. R. S. Essa, A. El-Nikhaily, A. Elsayed, A. K. Eessaa, Analysis of Microstructure and Mechanical Properties of Bi-Modal Nanoparticle-Reinforced Cu-Matrix, Crystals, 11:9 (2021).

[5] R. Nithesh, N. Radhika, S. Shiam Sunder, Mechanical Properties and Adhesive Scuffing Wear Behavior of Stir Cast Cu–Sn–Ni/Si3N4 Composites, Journal of Tribology, 139:6 (2017).

[6] N. Yavuz, R. Ertan, Polimer Matrisli Fren Balata Malzemelerinin Kompozisyon ve Üretim Paremetreleri Acısından Değerlendirilmesi, Mühendis ve Makine, 47:553 (2005) 24-30.

[7] S. H. Gawande, V. N. Raibhole, A. S. Banait, Study on Tribological Investigations of Alternative Automotive Brake Pad Materials, J Bio Tribo Corros, 6:3 (2020).

[8] M. Boz, A. Kurt, The effect of Al2O3 on the friction performance of automotive brake friction materials, Tribology International, 40:7 (2007) 1161-1169.

[9] M. Khafidh, F. P. Putera, R. Yotenka, D. F. Fitriyana, R. D. Widodo, R. Ismail, A. P. Irawan, T. Cionita, J. P. Siregar, N. H. Ismail, A Study on Characteristics of Brake Pad Composite Materials by Varying the Composition of Epoxy, Rice Husk, Al2O3, and Fe2O3, AE, 6:2 (2023) 303-319.

[10] G. Cui, J. Ren, Z. Lu, The Microstructure and Wear Characteristics of Cu–Fe Matrix Friction Material with Addition of SiC, Tribol Lett, 65:3 (2017).

[11] X. Xiong, J. Chen, P. Yao, S. Li, B. Huang, Friction and wear behaviors and mechanisms of Fe and SiO2 in Cu-based P/M friction materials, Wear, 262:9-10 (2007) 1182-1186.

[12] T. Peng, Q. Yan, X. Zhang, Y. Zhuang, Role of titanium carbide and alumina on the friction increment for Cu-based metallic brake pads under different initial braking speeds, Friction, 9:6 (2020) 1543-1557.

[13] M. Boz, A. Kurt, Effect of ZrSiO4 on the friction performance of automotive brake friction materials, Journal of materials science & technology, 23:6 (2007) 843-850.

[14] Yu-nan Tian, Z. Dou, L. Niu, T. Zhang, Effects of Titanium Nitride Particles on Copper Matrix-Graphite Composite Properties, Russ. J. Non-ferrous Metals, 61:3 (2020) 387-395.

[15] S. C. Tjong, K. C. Lau, Abrasive wear behavior of TiB2 particle-reinforced copper matrix composites, Materials Science and Engineering: A, 282:1-2 (2000) 183-186.

[16] A. M. Desai, T. R. Paul, M. Mallik, Mechanical properties and wear behavior of fly ash particle reinforced Al matrix composites, Mater. Res. Express, 7:1 (2020).

[17] A. Bahrami, N. Soltani, M. I. Pech-Canul, C. A. Gutiérrez, Development of metal-matrix composites from industrial/agricultural waste materials and their derivatives, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 46:2 (2015) 143-208.

[18] J. Xu, N. Wang, M. Chen, Z. Zhou, H. Yu, Comparative investigation on the reduction behavior of blast furnace dust particles during in-flight process in hydrogen-rich and carbon monoxide atmospheres, Powder Technology, 366 (2020) 709-721.

[19] M. T. Kayili, G. Çelebi, A. Güldaş, Sürdürülebilir Yapı Malzemesi Hedefiyle Demir Çelik ve Plastik Endüstrisi Atıklarının Geri Kazanımı, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33:2 (2018) 33-44.

[20] D. Zhao, J. Zhang, G. Wang, A. N. Conejo, R. Xu, H. Wang, J. Zhong, Structure Characteristics and Combustibility of Carbonaceous Materials from Blast Furnace Flue Dust, Applied Thermal Engineering, 108:5 (2016) 1168-1177.

[21] C. Lanzerstorfer, M. Kröppl, Air classification of blast furnace dust collected in a fabric filter for recycling to the sinter process, Resources, Conservation and Recycling, 86 (2014) 132-137.

[22] M. Tuna Kayili, G. Çelebi, A. Guldas, Morphological, mechanical, thermal and tribological properties of environmentally friendly construction materials: recycled LDPE composites fılled by blast furnace dust, Journal of Green Building, 15:3 (2020) 159-175.

[23] Ş. Bülbül, Farklı inorganik ve organik dolguların nr/sbr tipi elastomer malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük, 2014.

[24] P. J. Blau, Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives, Oak Ridge National Laboratory, 2001.

[25] Y. Zhong, X. Qiu, J. Gao, Z. Guo, Structural Characterization of Carbon in Blast Furnace Flue Dust and Its Reactivity in Combustion, Energy Fuels, 31:8 (2017) 8415-8422.

[26] H. Kuş, A. Avcu, İ. Sugözü, Red Mud Ratio Effects on the Tribological Performance of Fly-Ash-Reinforced Bronze Matrix Brake Pad Material, J. of Materi Eng and Perform, (2024).

[27] H. Çinici, H. Karakoç, Ö. Şahin, İ. Ovalı, Investigation of microstructure, mechanical, and tribological properties of SiC/h-BN/Gr hybrid reinforced Al6061 matrix composites produced by hot extrusion method, Diamond and Related Materials, 136 (2023).

[28] J. Fischer, B. Stawarczyk, C. H. F. Hämmerle, Flexural strength of veneering ceramics for zirconia, Journal of Dentistry, 36:5 (2008) 316-321.

[29] İ. Sugözü, B. Sugözü, Investigation of The Effect of Solid Lubricant Particle Sizes on Friction and Wear Properties in Friction Composites: An Experimental Case Study with Graphite, International Journal of Automotive Science and Technology, 5:3 (2021) 179-183.

[30] İ. Sugözü, K. Kahya, Investigation of the Effect on Tribological Properties of the use of Pinus Brutia Cone as a Binder in Brake Pads, European Mechanical Science, 2:4 (2018) 115-118.

[31] A. Avcu, H. Kuş, İ. Sugözü, Application of the MULTIMOORA Method to Evaluate Performance Results of Red Mud Reinforced Bronze Matrix Brake Pads, 8:4 (2024) 419-430. .

[32] İ. Sugözü, B. Sugözü, Friction and Wear Properties of Automobile Brake Linings Containing Borax Powder with Different Grain Sizes, International Journal of Automotive Science And Technology, 5:3 (2021) 224-227.

[33] J. Bijwe, N. Aranganathan, S. Sharma, N. Dureja, ve R. Kumar, Nano-abrasives in friction materials-influence on tribological properties, Wear, 296:1-2 (2012) 693-701.

[34] S. Şap, Ü. A. Usca, M. Uzun, K. Giasin, D. Y. Pimenov, Development of the hardness, three-point bending, and wear behavior of self-lubricating Cu-5Gr/Al2O3-Cr3C2 hybrid composites, Journal of Composite Materials, 57:8 (2023) 1395-1409.

[35] S. Islak, C. Özorak, N. M. E. Abouacha, U. Çalıgülü, V. Koç, Ö. Küçük, The effects of the CNF ratio on the microstructure, corrosion, and mechanical properties of CNF-reinforced diamond cutting tool, Diamond and Related Materials, 119 (2021).

[36] F. Okay, S. Islak, Microstructure and mechanical properties of aluminium matrix boron carbide and carbon nanofiber reinforced hybrid composites, Sci Sintering, 54:2 (2022)125-138, 2022.

[37] H. Kus ve D. Altiparmak, Effect of glass powder on the friction performance of automotive brake lining materials, Sci Sintering, 55:2 (2023) 159-170.

[38] K. E. Oksuz, Tribological behaviour of Al2014–Al2O3 particle- reinforced composites produced by powder metallurgy method, Journal of the Balkan Tribological Association, 19:2 (2013) 190-201.

[39] H. Karakoç, Effect of SiC Particle Size on the Mechanical and Wear Behavior of Al356 Metal Matrix Composites, Silicon, 15:15 (2023) 6729-6744.

[40] K. P. Boyle, The role of particle cracking in dilatation during tensile straining of a cast and thermomechanically processed 6061 Al - 20 volume percent Al_2O_3 metal matrix composite, Naval postgraduate school, Mechanical engineering, 1996.

[41] P. Zhang, L. Zhang, D. Wei, P. Wu, J. Cao, C. Shijia,X. Qu, K. Fu, Effect of graphite type on the contact plateaus and friction properties of copper-based friction material for high-speed railway train, Wear, (2019) 432-433.

[42] J. Bijwe, M. Kumar, Optimization of steel wool contents in non-asbestos organic (NAO) friction composites for best combination of thermal conductivity and tribo-performance, Wear, 263: 7-12 (2007) 1243-1248.

[43] M. H. Cho, J. Ju, S. J. Kim, H. Jang, Tribological properties of solid lubricants (graphite, Sb2S3, MoS2) for automotive brake friction materials, Wear, 260:7-8 (2006) 855-860.

[44] M. Eriksson, S. Jacobson, Tribological surfaces of organic brake pads, Tribology International, 33:12 (2000) 817-827.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 849-858 (2025)

Using of Deep Learning Models In Acoustic Scene Classification

Zehra BOZDAĞ KARAKEÇİ[1*] Harun ÇİĞ[2]

[1]*Harran University, Faculty of Engineering, Department of Software Engineering, Şanlıurfa, Turkey*

[2]*Harran University, Faculty of Engineering, Department of Software Engineering, Şanlıurfa, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 15/11/2024
Revision: 14/03/2025
Accepted: 04/06/2025

Keywords

Signal processing
Deep learning
Acoustic scene classification
Audio processing
Model performance

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/11/2024
Düzeltme: 14/03/2025
Kabul: 04/06/2025

Anahtar Kelimeler

Sinyal işleme
Derin öğrenme
Akustik sahne sınıflandırması
Ses işleme
Model performansı

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study shows that a simple CNN outperforms more complex models in classifying stage sounds using mel-spectrograms, achieving 59% accuracy on the TAU Acoustic Scene 2023 dataset, emphasizing the efficiency and effectiveness of lightweight models in ambient sound analysis. / Bu çalışma, mel-spektrogramlar kullanarak sahne seslerini sınıflandırmada basit bir CNN'in daha karmaşık modellerden üstün olduğunu göstermektedir. TAU Acoustic Scene 2023 veri setinde %59 doğruluk elde etmiş olup, hafif modellerin çevresel ses analizinde hem verimli hem de etkili olduğunu vurgulamaktadır.

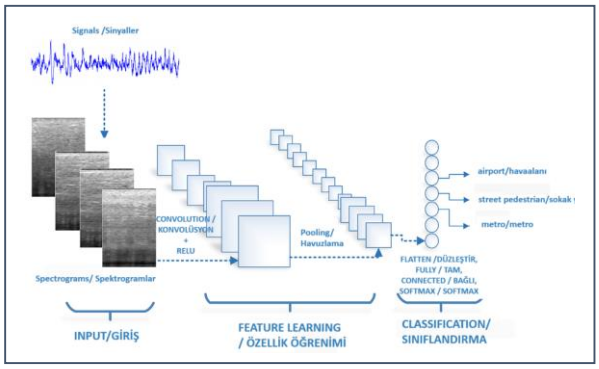


***Figure A**: Template of the Study /**Şekil A:** Çalışmanın Şablonu*

Highlights (Önemli noktalar)

- *Ambient sound analysis provides environmental context through surrounding audio. / Ortam sesi analizi, çevreleyen ses aracılığıyla çevresel bağlam sağlar.*
- *Deep learning methods are increasingly applied to this field, surpassing traditional techniques. / Derin öğrenme yöntemleri bu alanda giderek daha fazla uygulanmakta ve geleneksel tekniklerin önüne geçmektedir.*
- *Mel-spectrograms from the TAU Acoustic Scene 2023 dataset were used for classification. / Sınıflandırma için TAU Akustik Sahne 2023 veri setinden elde edilen Mel-spektrogramları kullanıldı.*

***Aim (Amaç):** To evaluate and compare the performance of various deep learning models for acoustic scene classification. / Akustik sahne sınıflandırması için çeşitli derin öğrenme modellerinin performansını değerlendirmek ve karşılaştırmak.*

***Originality (Özgünlük):** The study focuses on using mel-spectrogram representations of stage sounds. A comparison of simple and complex deep learning models is presented in terms of classification performance and efficiency. / Çalışma, sahne seslerinin mel-spektrogram gösterimlerinin kullanılmasına odaklanmaktadır. Basit ve karmaşık derin öğrenme modellerinin sınıflandırma performansı ve verimliliği açısından bir karşılaştırması sunulmaktadır.*

***Results (Bulgular):** A simple CNN model outperformed more complex models with a 59% accuracy rate. The CNN achieved the highest performance despite having the fewest parameters. / Basit bir CNN modeli, %59'luk bir doğruluk oranıyla daha karmaşık modellerden daha iyi performans gösterdi. CNN, en az parametreye sahip olmasına rağmen en yüksek performansı elde etti.*

***Conclusion (Sonuç):** Simpler deep learning models, like CNNs can be both effective and computationally efficient for acoustic scene classification tasks. / CNN'ler gibi daha basit derin öğrenme modelleri, akustik sahne sınıflandırma görevleri için hem etkili hem de hesaplama açısından verimli olabilir.*

*Corresponding author, e-mail: zbozdag@harran.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1585401

GU J Sci, Part C, 13(3): 849-858 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Using of Deep Learning Models In Acoustic Scene Classification

Zehra BOZDAĞ KARAKEÇİ[2*] Harun ÇİĞ[2]

[1]*Harran University, Faculty of Engineering, Department of Software Engineering, Şanlıurfa, Turkey*

[2]*Harran University, Faculty of Engineering, Department of Software Engineering, Şanlıurfa, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 15/11/2024
Revision: 14/03/2025
Accepted: 04/06/2025

Keywords

Signal processing
Deep learning
Acoustic scene classification
Audio processing
Model performance

Abstract

Ambient sound analysis has become more prominent with the rise of portable and wearable devices. It provides valuable insights into a person's environment by analyzing surrounding sounds. Recently, deep learning methods, frequently used in image and text processing, have been applied to this field and are proving more effective than traditional machine learning techniques.

In this study, we evaluated the performance of different deep learning models using mel-spectrograms of 3 classes of stage sounds based on TAU Acoustic Scene 2023 dataset. Our results indicate that a simple Convolutional Neural Network (CNN) model gives better classification results compared to other more complex models in classification tasks. Despite having the fewest parameters, the CNN model achieved the highest success with 59% accuracy. This suggests that simpler models can be highly effective for acoustic scene classification, highlighting the value of more efficient and computationally feasible approaches in this domain.

Akustik Sahne Sınıflandırmasında Derin Öğrenme Modellerinin Kullanımı

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/11/2024
Düzeltme: 14/03/2025
Kabul: 04/06/2025

Anahtar Kelimeler

Sinyal işleme
Derin öğrenme
Akustik sahne sınıflandırması
Ses işleme
Model performansı

Öz

Taşınabilir ve giyilebilir cihazların yükselişiyle ortam sesi analizi daha da belirgin hale geldi. Çevresel sesleri analiz ederek bir kişinin ortamına dair değerli içgörüler sağlar. Son zamanlarda, görüntü ve metin işlemede sıklıkla kullanılan derin öğrenme yöntemleri bu alana uygulandı ve geleneksel makine öğrenme tekniklerinden daha etkili olduğu kanıtlandı.

Bu çalışmada, TAU Akustik Sahne 2023 veri setine dayalı 3 sınıf sahne sesinin mel-spektrogramlarını kullanarak farklı derin öğrenme modellerinin performansını değerlendirdik. Sonuçlarımız, basit bir Evrişimli Sinir Ağı (ESA) modelinin sınıflandırma görevlerinde diğer daha karmaşık modellere kıyasla daha iyi sınıflandırma sonuçları verdiğini göstermektedir. En az parametreye sahip olmasına rağmen, ESA modeli %59 doğrulukla en yüksek başarıyı elde etti. Bu, daha basit modellerin akustik sahne sınıflandırması için oldukça etkili olabileceğini ve bu alanda daha verimli ve hesaplama açısından uygulanabilir yaklaşımların değerini vurgulamaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Voice analysis covers a variety of voice-related problems such as automatic speech recognition [1], speech-to-text translation [2], automatic audio captioning [3], speech emotion recognition [4] [5], voice-based question-and-answer generation [6], vocal sound classification, and music score analysis [7,8].

With the advancing technology and the increase in the amount of data accessed, the interest in voice analysis has increased day by day. Table 1 presents the total number of publications in voice analysis by years [9], illustrating the distribution across different periods. The data suggests a projected increase in research activity in this field in the coming years.

Acoustic scene classification (ASC) is one of the problems in the field of audio analysis. ASC aims to

*Corresponding author, e-mail: zbozdag@harran.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1585401

classify digital audio signals into mutually exclusive scene categories, which can be, for example, an indoor environment (such as a house) or an outdoor environment (such as a park) [10]. In everyday life, people often use the ability to perceive and react to the scene they are in by listening to the sounds around them. Technological devices utilize ASC processing in various fields and applications. For instance, wearable smartwatches can classify the user's environment and adjust notifications accordingly. Similarly, smartphones and other devices equipped with digital sensors detect and classify environmental sounds. By definition, ASC seeks to identify the type of scene in which a given audio signal is recorded.

To utilize an acoustic audio signal for deep learning, the signal typically needs to be transformed into an appropriate format. Common methods for transforming audio signals include spectrograms, mel-frequency cepstral coefficients, linear prediction coding, and wavelet decomposition [11–14]. The resulting feature matrices or images are then used as input data for deep learning algorithms. In audio signal processing studies, the choice of transformation methods and the applied deep learning models significantly impact processing performance [14–16].

Table 1. Total number of audio analyzed publications by year (Yıllara göre ses analizli yayınların toplam sayısı)

	2015	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**
Publications (total)	23,287	26,105	30,883	37,592	37,155	48,972	55,151	58,498	65,618

In previous ASC studies, traditional machine learning techniques such as Support Vector Machines (SVM), K-Nearest Neighbors (KNN), Artificial Neural Networks (ANN), Random Forest (RF), Decision Tree (DT) and Hidden Markov Models (HMM) have been widely used. In these traditional approaches, classification usually consists of two stages: first, the features of the audio signal are extracted and then these features are classified by traditional machine learning methods [17–19]. Recently, deep learning methods have been successfully applied to ASC, yielding excellent results with models such as Time Delay Neural Networks, Bidirectional Long Short-Term Memory, Feed Forward Neural Networks, EfficientNet-based architectures (e.g., VGG, ResNet, Inception, Xception, and MobileNetV2), Fully Convolutional Neural Networks (FCNN), and Convolutional Recurrent Neural Networks (CRNN) [20–23].

CNNs reveal complex spatial and temporal dependencies more successfully than traditional methods. Acoustic Scene Classification (ASC) is the problem of characterizing the complex patterns and contextual information of sound. One of the methods to address this problem is to obtain and process spectrograms of signals. The Mel-spectrogram feature visually represents how the frequency content of sounds changes over time. For example, when an audio signal contains audible sound events such as "dog barking," "speech," or "applause," these events can be identified in the corresponding Mel-spectrogram feature due to their unique visual patterns. From this perspective, the Mel-spectrogram feature can be considered as an image [24].

For the last 20 years, CNNs have been the most widely used and highest-performing method in image processing fields such as classification, object detection, and segmentation [25–27]. The highest success rates are achieved with CNNs in studies conducted on Mel-spectrogram images [28–30]. However, it is still not fully understood what features CNNs learn, whether they generalize well across different datasets or overfit to a specific dataset, and how they encode information [31] [32].

Deep learning methods automatically extract the features required for classification from the given input by convolution operations. To successfully utilize these models, large datasets and server computers equipped with powerful graphics processing units (GPUs) are typically required. Advancements in technological devices and increasingly powerful computing systems have enabled the wider application of deep learning models. Research findings indicate that deep learning methods are being used more frequently in voice anawlysis, yielding more successful results [33]. These models are capable of learning complex patterns and recognizing subtle differences in audio data. Additionally, they learn faster and more

accurately than traditional models, making them particularly suitable for real-time audio classification and analysis.

In our study, we utilized the dataset released for the 1st task of the DCASE Challenge 2023. Mel-spectrograms were generated from the audio signals to be used in image classification models, which were then analyzed using contemporary models and a simple Convolutional Neural Network (CNN) architecture.

The contributions of our work to literature are as follows:

- We analyzed the performance of contemporary deep learning models on the dataset, with MobileNetV3-Small outperforming the other models in the benchmark.

- The simple CNN model, despite having fewer parameters, achieved the highest accuracy in the benchmark.

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 provides details about the dataset used in the study, while Section 3 outlines the experiments conducted using the dataset. Section 4 describes the methods applied, Section 5 presents the evaluation results, and finally, Section 6 offers the conclusions and suggestions.

2. DATASET (VERİ SETİ)

The DCASE Challenge is an annual competition for researchers focused on the computational analysis of audio events and acoustic scene analysis, providing a platform for presenting and discussing their results [34]. Each year, different tasks are defined, and datasets are released for the analysis of audio in order to accomplish these tasks. In this study, we utilized the dataset published for the first task of the competition, which involves voice classification. The general schematic of the voice classification process is presented in Figure 1.

The dataset consists of recordings from 12 European cities, captured in 10 distinct acoustic scenes (Airport, Indoor shopping mall, Metro station, Pedestrian street, Public square, Street with medium level of traffic, Traveling by a tram, Traveling by a bus, Traveling by an underground metro and Urban park) using 4 different devices. Additionally, it includes synthetic data from 11 mobile devices derived from the original recordings. The dataset is identical to the TAU Urban Acoustic Scene 2022 Mobile development dataset, with each audio file having a duration of 1 second. In our study, we utilized sound recordings from three classes: airport (0), street pedestrian (1), and metro (2). Table 2 provides the distribution of audio recordings across these classes [35].

The sound characteristics of ASC can be significantly affected by local infrastructure, population density, recording interval, cultural factors and changes in the recording device resolution [36,37]. These effects can cause the performance of the sound classification system to degrade. Adapting a model trained on specific cities and devices to other cities or devices creates a domain adaptation problem [38]. As a solution to this problem, collecting data from various data domains is an important method among the solutions to the domain adaptation problem. The dataset used in our study includes sound data from a total of 12 European cities: Amsterdam, Barcelona, Helsinki, Lisbon, London, Lyon, Madrid, Milan, Prague, Paris, Stockholm and Vienna. Also, different device types were used for sound recordings.

Mel-spectrograms of audio signals are frequently utilized for audio classification tasks [39–42]. In fact, the finalists of the DCASE Challenge employed mel-spectrogram features in their models [43]. To generate mel-spectrogram images from the audio files, a Hamming window with a sample length of 2048, an overlap of 1024, and 128 mel bins was used. Sample mel-spectrograms for the different classes are shown in Figure 2.

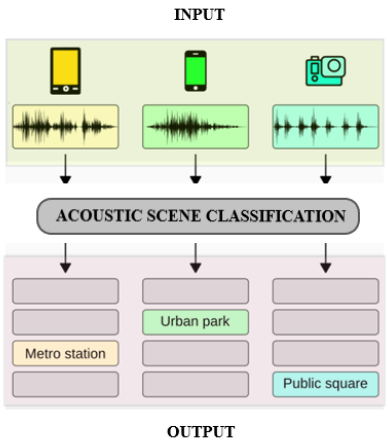


Figure 1. General schematic of the acoustic scene classification system (Akustik sahne sınıflandırma sisteminin genel şeması).

Table 2. Dataset information (Veri seti bilgisi)

Classes	Training Data	Test Data	Total
airport (0)	8000	2000	8000
pedestrian street (1)	8000	2000	8000
metro (2)	8000	2000	8000
Total	24000	6000	30000

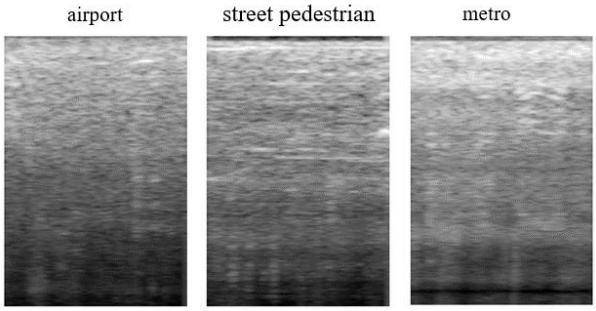


Figure 2. Examples of mel-spectrograms of sound classes (Ses sınıflarının mel-spektrogramlarına örnekler).

3. STUDIES ON THE DCASE DATASET
(DCASE VERİ SETİ ÜZERİNDEKİ ÇALIŞMALAR)

The high performance achieved through the use of deep learning in image classification problems has led to its widespread use in other problems as well [44]. In recent studies, it has been observed that deep learning techniques are predominantly applied to the ASC problem. When we examine the studies conducted over the years according to the first task description published by DCASE Challenge, deep learning models have been commonly used.

In 2017, Duppada and Hiray enhanced ASC performance by employing ensemble methods with various deep neural network models (LeNet, SqueezeNet, 1D CNN) using mel-spectrogram features [45]. In 2018, Eghbal-zadeh et al. incorporated an intraclass covariance analysis layer into the VGG model to improve performance [46]. A review of the DCASE competition by Gharib et al. in 2018 highlighted that data augmentation techniques, such as data replication, were widely used to enhance ASC performance [47]. In 2019, Wu and Lee's work on improving voice texture significantly boosted voice classification accuracy using CNN-based approaches [24]. In 2020, Zhang et al. explored the reuse of pre-trained models for different tasks [48]. Additionally, Tonami et al. demonstrated that multi-task learning, which combines the analysis of audio events and acoustic scenes, improves classification success[49]. In 2021, studies focusing on audio event detection with a curriculum learning approach achieved notable success by adopting training strategies based on the complexity of event learning [50]. Utilizing the DCASE 2017 dataset, in 2022, methods were developed that combined both scene and instantaneous sounds for event detection, while the Qwen-Audio application, introduced in 2023, provided more comprehensive solutions for universal audio understanding with its large-scale audio-language model [51,52].

The classification results for 15 classes, as announced on the official DCASE 2023 Challenge web page, ranked Schmid and his team in the top two positions, with accuracies of 62.7% and 61.4%, respectively [53]. The team developed a novel deep learning architecture featuring a regularized receptive field and residual inverted bottleneck blocks. Jiaxin et al. secured 3rd place with an accuracy of 60.8%, having designed a tutor model based on blueprint separable convolution (BSConv) [54].

These studies demonstrate that methodological diversity and innovation in the field of ASC contribute significantly to performance improvements, with variations in model designs and data processing methods playing a critical role in achieving success.

4. METHOD (METOT)

In our study, we utilized current image classification algorithms with varying parameter counts and technical architecture. ResNet, MobileNet, and EfficientNet architectures, which are frequently employed in the literature for image classification tasks, were included. Additionally, a CNN model with a simplified layer structure and a smaller number of parameters was developed. Comparisons of these models were conducted based on their parameter counts and classification accuracy.

ResNet is an architecture based on a residual network model, with variants such as ResNet101, ResNet50, and ResNet18, distinguished by the number of layers. In our study, we used the ResNet18 model, which has a depth of 18 layers and 11.7 million parameters. This variant has the fewest layers and parameters compared to the other ResNet models [55].

In 2017, Google introduced MobileNet, specifically designed for mobile and embedded applications to minimize resource requirements [56]. In this

network architecture, both the number of parameters (disk space) and computational complexity (power consumption and latency) are significantly reduced. MobileNet decreases the number of parameters by a factor of 7 compared to traditional full convolutional models, while sacrificing only 1% in accuracy. The MobileNet model achieves this efficiency by utilizing depth wise separable convolutions and pointwise convolution techniques.

In 2018, MobileNet-v2 was introduced as an evolution of its predecessor, maintaining accuracy levels while significantly reducing memory usage. This improvement is achieved through an inverted residual structure and shortcut connections between linear bottlenecks [57]. MobileNet-v2 processes 224x224x3 images, has a depth of 53 layers, and contains 3.5 million parameters. In 2019, the third generation of MobileNets, MobileNet-v3, was developed using a combination of Network Architecture Search (NAS) and the NetAdapt algorithm. This led to the creation of two models, MobileNet-v3 Large and MobileNet-v3 Small, designed to accommodate different resource constraints [58].

EfficientNets are a family of models developed by Google AI researchers, designed to scale network dimensions at a constant rate. EfficientNet employs a novel approach that scales the network's depth, width, and resolution uniformly with a fixed ratio. The EfficientNet-B0 model, for example, has a depth of 82 layers, processes input images at a resolution of 224x224x3, and contains 5.3 million parameters [59]. Compared to earlier models such as ResNet, DenseNet, and Inception, EfficientNet models are significantly more computationally efficient.

The simple CNN model consists of two blocks followed by a final output layer. Each block contains a Conv2d (3x3) layer, a ReLU activation function, and a Dropout layer. The Conv2d (3x3) layer is a 2D convolutional layer, ReLU introduces non-linearity, and Dropout is used to prevent overfitting by randomly omitting some neurons during training. Table 3 outlines the architecture of the developed simple CNN model. The MaxPool2d function reduces the size of the feature maps, while the Flatten and Linear layers prepare the feature maps for output. The implementation of the model was done using the PyTorch library in the Python programming language.

PyTorch and torchaudio libraries were used to process and classify audio signals. The audio signals were downsampled from 16 kHz to 8 kHz by applying a resampling process. After resampling, spectrogram and mel spectrogram transformations were performed. Data augmentation techniques were also applied to improve the model's overall accuracy. These techniques include TimeStretch, Frequency Mask, and Time Mask.

The mel spectrograms obtained from the processed audio data were resized to 224x224 pixels, and their values were normalized between 0 and 1 using min-max normalization. These processes enable the audio data to be converted into a format that can be effectively used in deep learning models.

All network models were trained for 10 epochs, with 80% of the dataset allocated for training and 20% for testing. Cross-Entropy was employed as the loss function, and the Adam optimizer was used as the optimization algorithm [60]. Adam is a variant of the stochastic gradient descent algorithm. A learning rate of 0.001 and a weight decay of 0.01 were applied during the training process.

Table 3. Architecture of the simple CNN model
(Basit CNN modelinin mimarisi)

Model Layers
Block
Block
MaxPool2d
Block
Block
MaxPool2d
Flatten
Linear

Evaluation metrics (Değerlendirme ölçütleri): The accuracy calculation formula used to compare the performance of the models is given in Equation (1). TP represents the number of True Positives, TN represents the number of True Negatives, FP represents the number of False Positives, and FN represents the number of False Negatives [61].

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

$$F1 - Score = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall} \quad (4)$$

The formula for calculating Precision is provided in Equation 2. Precision measures the proportion of correct predictions made by the model out of all positive predictions.

Recall, given in Equation 3, measures how many of the actual positive instances the model correctly identifies.

The F1-Score, calculated using Equation 4, represents the harmonic mean of Precision and Recall, providing a balanced measure of a model's accuracy.

5. METHOD RESULTS (YÖNTEM SONUÇLARI)

In this study, we utilized several state-of-the-art image classification network models with different parameter counts and architectures (ResNet18, MobileNetV3-Small, EfficientNet-B0, and MobileNetV2) to classify mel-spectrogram images of audio files. Additionally, the developed simple CNN model was employed for classification. Table 4 presents the Accuracy, Recall, Precision, and F1-Score of the models on the test dataset. As shown in the table, the simple CNN architecture achieves higher accuracy compared to the other models. Given that the audio files in the dataset are only 1 second in duration, they lack many of the distinguishing features necessary for effective class differentiation. As a result, the models generally show lower accuracy rates. However, as seen in Table 4, the simple CNN model demonstrates the highest accuracy.

Table 5 presents the number of parameters and accuracy values for the models. The simple CNN model, which has the lowest number of parameters, achieves the highest performance. Similarly, the MobileNetV3-Small model, which also has a relatively small number of parameters, ranks second in terms of accuracy.

Table 4. Evaluation results of the models (Modellerin değerlendirme sonuçları)

Model	Data Replication	Pre-trained	Number of Epochs	Accuracy	F1-Score	Recall	Precision
Simple CNN	√		10	0.5908	0.5490	0.6007	0.5587
MobileNetV3-Small	√	√	10	0.5633	0.5333	0.5633	0.5368
MobileNetV2	√	√	10	0.5068	0.4901	0.5021	0.5045
EfficientNet-B0	√	√	10	0.5407	0.5126	0.5431	0.5303
ResNet-18	√	√	10	0.4455	0.3813	0.4778	0.3805

Table 5. Parameter numbers of the models (Modellerin parametre sayıları)

Model	Parameter Number	Accuracy
Simple CNN	**157 939**	**0.5908**
MobileNetV3-Small	2 542 856	0.5633
MobileNetV2	3 504 872	0.5068
EfficientNet-B0	5 288 548	0.5413
ResNet-18	11 689 512	0.4455

Among the models selected for comparison, MobileNetV3-Small, which has the lowest number of parameters, is optimized for devices with lower computational requirements. It uses Squeeze-and-Excitation (SE) blocks and the hardswish activation function. Similarly, MobileNetV2 provides efficient computation with Depthwise Separable Convolution and offers low latency on mobile devices using Inverted Residual Blocks.

EfficientNet-B0 is a balanced model in terms of both the number of parameters and accuracy, optimized through Neural Architecture Search (NAS). ResNet18 improves the trainability of deeper networks by using residual connections (skip connections). It is a convolutional neural network model that is not very deep but still powerful.

The reason why the developed Simple CNN model achieves higher accuracy compared to advanced deep learning architectures can be attributed to several fundamental factors. These include dataset size and the compatibility of feature distribution. While highly optimized models (such as EfficientNet and ResNet) use techniques like parameter reduction, quantization, and narrow filters to minimize computational costs, these optimizations can sometimes lead to a loss of important visual information. Furthermore, pre-trained models, which are usually trained on large and diverse datasets (such as ImageNet), may have limited generalization ability when applied to specific datasets. In contrast, the Simple CNN model generalized better without overfitting because it was trained on a smaller dataset that was more aligned with the target task than those used for pre-trained models.

6. CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS
(SONUÇLAR VE ÖNERİLER)

In our study, acoustic scene sounds from the TAU Urban Acoustic Scene 2023 Mobile development dataset were classified using state-of-the-art deep learning models and simple CNN architecture. The analysis reveals that among the deep networks tested, the MobileNetV3-Small model, despite having fewer parameters, outperforms other models with an accuracy rate of 56.33%. In contrast, the ResNet18 model, which has the most parameters, exhibited the lowest performance. Interestingly, the simple CNN model, designed with only 157,939 parameters, achieved the highest accuracy of 59.08%, surpassing deeper and more complex networks.

These findings indicate that highly complex and deep architectures are not necessarily required for effective acoustic scene classification, and that compact models with fewer layers and parameters can perform competitively.

Furthermore, it was observed that mel-spectrogram images tend to lose discriminative features as they pass through deeper convolutional layers in complex networks. This may explain the superior performance of simpler models, which better preserve these features throughout the learning process.

Another factor influencing model performance is the nature of the dataset itself — since it contains 1-second audio clips, many distinctive scene-specific features may not be fully captured. This inherent limitation makes classification more challenging and is reflected in the observed accuracy rates.

The findings of this study have several real-world applications, especially in areas where efficient and accurate acoustic scene classification is important, such as wearable devices, smart home systems, and autonomous vehicles. Moreover, simpler models are well-suited for resource-constrained environments, such as low-power devices. These models can maintain competitive performance while reducing computational load and energy consumption, making them ideal for deployment in embedded systems and mobile platforms. For example, previous studies have shown that low-complexity models can effectively perform acoustic scene classification in resource-constrained environments [62].

In the future, additional features can be incorporated into the audio analysis process to enhance model performance. For instance, alongside mel-spectrograms, feature extraction methods commonly used in literature such as wavelet transforms and scalograms—could be explored. These methods can provide a more detailed analysis of the time-frequency characteristics of signals and help strengthen the discriminative features of the classes. By integrating such techniques, the accuracy of the models can be improved through the enhanced representation of the distinguishing characteristics of each class.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS
(ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Zehra BOZDAĞ KARAKEÇİ: She conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Harun ÇİĞ: He conducted the experiments and analyzed the results.

Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Kriman S, Beliaev S, Ginsburg B, Huang J, Kuchaiev O, Lavrukhin V, Leary R, Li J, Zhang Y, Quartznet: Deep Automatic Speech Recognition with 1D Time-Channel Separable Convolutions, in: ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2020; arXiv:1910.10261.

[2] Shivakumar KM, Aravind KG, Anoop TV, Gupta D. Kannada speech to text conversion using CMU Sphinx. Proceedings of the International Conference on Inventive Computation Technologies, ICICT 2016; 3-1:6.

[3] Mathur A, Saxena T, Krishnamurthi R. Generating subtitles automatically using audio extraction and speech recognition. Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Communication Technology (CICT). 2015; 621–626.

[4] Sakurai M, Kosaka T. Emotion recognition combining acoustic and linguistic features based on speech recognition results. Proceedings of the 2021 IEEE 10th Global Conference on Consumer Electronics. 2021; 824-827.

[5] Yağcı M, Aygül ME. Derin öğrenme tabanlı gerçek zamanlı vücut hareketlerinden duygu analizi modeli. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji. 2022; 12: 664–674.

[6] Fayek HM, Johnson J. Temporal reasoning via audio question answering. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. 2020; 1-1.

[7] Ewert S, Müller M. Estimating note intensities in music recordings. In: Proceedings of ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. 2011; 385-388.

[8] Türkmen MC, Ergin AA. Music note detection using matrix pencil method. In: Proceedings of the 31st IEEE Conference on Signal Processing Communications Applications, SIU 2023, 2023; 1-4.

[9] Audio Analyzing in Publications - Dimensions, (n.d.). https://app.dimensions.ai/discover/publication?search_mode=content&search_text=Audio Analyzing&search_type=kws&search_field=full_search (accessed September 3, 2024).

[10] Barchiesi D, Giannoulis DD, Stowell D, Plumbley MD. Acoustic scene classification: Classifying environments from the sounds they produce. IEEE Signal Processing Magazine. 2015; 32-16:34.

[11] Zaman K, Sah M, Direkoglu C, Unoki M. A survey of audio classification using deep learning. IEEE Access. 2023; 11-1:1.

[12] Kumari RSS, Sugumar D, Sadasivam V. Audio signal classification based on optimal wavelet and support vector machine. In: Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications (ICCIMA). 2007; 2-544:548.

[13] Mahanta SK, Basisth NJ, Halder E, Khilji AFUR, Pakray P. Exploiting cepstral coefficients and CNN for efficient musical instrument classification. Evolving Systems. 2024; 15(3): 1–13.

[14] Chu HC, Zhang YL, Chiang HC. A CNN sound classification mechanism using data augmentation. Sensors. 2023; 23(15): 6972.

[15] Dong S, Xia Z, Pan X, Yu T. Environmental sound classification based on improved compact bilinear attention network. Digital Signal Processing. 2023; 141.

[16] Mu W, Yin B, Huang X, Xu J, Du Z. Environmental sound classification using temporal-frequency attention based convolutional neural network. Scientific Reports. 2021; 11(1): 21552.

[17] Piczak KJ. ESC: Dataset for environmental sound classification. In: Proceedings of the 2015 ACM Multimedia Conference (MM). 2015; 1015–1018.

[18] Aytar Y, Vondrick C, Torralba A. SoundNet: Learning sound representations from unlabeled video. In: Advances in Neural Information Processing Systems. 2016; 29: 892–900.

[19] Baelde M, Biernacki C, Greff R. A mixture model-based real-time audio sources classification method. In: Proceedings of ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. 2017; 371–375.

[20] Guzhov A, Raue F, Hees J, Dengel A. Esresnet: Environmental sound classification based on visual domain models. In: Proceedings

of the International Conference on Pattern Recognition. 2020; 3504–3511.
[21] Jin G, Zhai J, Wei J. CAA-Net: End-to-End Two-Branch Feature Attention Network for Single Image Dehazing. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences. 2022; E106-A(1): 1–9.
[22] Spoorthy V, Mulimani M, Koolagudi SG. Acoustic scene classification using deep learning architectures. In: Proceedings of the 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT). 2021; 1–6.
[23] Yang L, Tao L, Chen X, Gu X. Multi-scale semantic feature fusion and data augmentation for acoustic scene classification. Applied Acoustics. 2020; 163: 107238.
[24] Wu Y, Lee T. Enhancing sound texture in CNN-based acoustic scene classification. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2019; 815–819.
[25] Bozdağ Karakeçi Z, Talu MF. Multi-scale residual segmentation network for histopathological image. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi. 2024; 15(3): 623–632.
[26] Spanhol FA, Oliveira LS, Petitjean C, Heutte L. Breast cancer histopathological image classification using Convolutional Neural Networks. In: Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). 2016; 2560–2567.
[27] Zhao Z-Q, Zheng P, Xu S-T, Wu X. Object detection with deep learning: A review. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2019; 30(11): 3212–3232.
[28] Tchinda BS, Tchiotsop D, Djoufack Nkengfack LC, Tchinda R. Diagnosis of epileptic seizures from electroencephalogram signals using log-Mel spectrogram and a deep learning CNN model. Heliyon. 2025;11(2): e42993
[29] Sharan RV, Mascolo C, Schuller BW. Emotion recognition from speech signals by Mel-spectrogram and a CNN-RNN. In: Proceedings of the 46th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). 2024; 1–4.
[30] Radhakrishnan BL, Kirubakaran E, Jebadurai IJ, Selvakumar IA, Andrew J. A CNN-based deep learning model for the in-home sleep stage detection system using Mel-spectrogram. In: Thomas KV, editor. Manipal Interdisciplinary Health Science and Technical Reports-2023. 2024; 98–103.
[31] Montavon G, Samek W, Müller KR. Methods for interpreting and understanding deep neural networks. Digital Signal Processing: A Review Journal. 2018; 73: 1–15.
[32] Dosilović FK, Brčić M, Hlupić N. Explainable artificial intelligence: A survey. In: Proceedings of the 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). 2018; 210–215.
[33] Ding B, Zhang T, Wang C, Liu G, Liang J, Hu R, Wu Y, Guo D. Acoustic scene classification: A comprehensive survey. Expert Systems with Applications. 2024; 238:121902.
[34] DCASE2023 Challenge - DCASE, (n.d.). https://dcase.community/challenge2023/index (accessed September 3, 2024).
[35] Heittola T, Mesaros A, Virtanen T. Acoustic scene classification in DCASE 2020 Challenge: generalization across devices and low complexity solutions. In: Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events (DCASE) Workshop. 2020; 1–5.
[36] Mesaros A, Heittola T, Virtanen T. A multi-device dataset for urban acoustic scene classification. arXiv preprint arXiv:1807.09840. 2018.
[37] Bear HL, Heittola T, Mesaros A, Benetos E, Virtanen T. City classification from multiple real-world sound scenes. In: Proceedings of the IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA). 2019; 1–5.
[38] Wang M, Deng W. Deep visual domain adaptation: A survey. Neurocomputing. 2018; 312: 135–153.
[39] Abdoli S, Cardinal P, Koerich AL. End-to-end environmental sound classification using a 1D convolutional neural network. In: Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2019; 255–259.
[40] Seo S, Kim C, Kim JH. Convolutional neural networks using log Mel-spectrogram separation for audio event classification with unknown devices. Journal of Web Engineering. 2022; 21(5): 1115–1133.
[41] Zhang T, Feng G, Liang J, An T. Acoustic scene classification based on Mel spectrogram decomposition and model merging. Applied Acoustics. 2021; 178: 107956.
[42] Nguyen MT, Lin WW, Huang JH. Heart sound classification using deep learning techniques based on log-mel spectrogram. Circuits, Systems, and Signal Processing. 2023; 42: 1039–1058.

[43] Abeßer J. A review of deep learning-based methods for acoustic scene classification. Applied Sciences (Switzerland). 2020; 10(15): 5251.

[44] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. Communications of the ACM. 2017; 60(6): 84–90.

[45] Duppada V, Hiray S. Ensemble of deep neural networks for acoustic scene classification. In: Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events (DCASE) Workshop. 2017; 1–5.

[46] Eghbal-Zadeh H, Dorfer M, Widmer G. Deep within-class covariance analysis for robust audio representation learning. In: Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events (DCASE) Workshop. 2017; 1–5.

[47] Gharib S, Derrar H, Niizumi D, Senttula T, Tommola J, Heittola T, Virtanen T, Huttunen H. Acoustic scene classification: A competition review. In: Proceedings of the IEEE International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP). 2018; 1–6.

[48] Zhang R, Zou W, Li X. Cross-task pre-training for on-device acoustic scene classification. In: Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events (DCASE) Workshop. 2019; 1–5.

[49] Tonami N, Imoto K, Yamanishi R, Yamashita Y. Joint analysis of sound events and acoustic scenes using multitask learning. IEICE Transactions on Information and Systems. 2021; E104-D (9): 1017–1025.

[50] Tonami N, Imoto K, Okamoto Y, Fukumori T, Yamashita Y. Sound event detection based on curriculum learning considering learning difficulty of events. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2021; 841–845.

[51] Tonami N, Imoto K, Nagase R, Okamoto Y, Fukumori T, Yamashita Y. Sound event detection guided by semantic contexts of scenes. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2022; 851–855.

[52] Chu Y, Xu J, Zhou X, Yang Q, Zhang S, Yan Z, Zhou C, Zhou J. Qwen-Audio: Advancing universal audio understanding via unified large-scale audio-language models. arXiv preprint arXiv:2307.04765. 2023.

[53] Schmid F, Morocutti T, Masoudian S, Koutini K, Widmer G. CP-JKU submission to DCASE23: Efficient acoustic scene classification with CP-Mobile. In: Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events (DCASE) Workshop. 2023; 1–5.

[54] Tan J, Li Y. Low-complexity acoustic scene classification using blueprint separable convolution and knowledge distillation. In: Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events (DCASE) Workshop. 2023; 1–5.

[55] He K, Zhang X, Ren S, Sun J. Deep residual learning for image recognition. In: Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016; 770–778.

[56] Howard AG, Zhu M, Chen B, Kalenichenko D, Wang W, Weyand T, Andreetto M, Adam H. MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. arXiv preprint arXiv:1704.04861. 2017.

[57] Sandler M, Howard A, Zhu M, Zhmoginov A, Chen L-C. MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2018; 4510–4520.

[58] Howard A, Sandler M, Chu G, Chen L-C, Chen B, Tan M, Wang W, Zhu Y, Pang R, Vasudevan V, Le QV, Adam H. Searching for MobileNetV3. In: Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). 2019; 1314–1324.

[59] Tan M, Le QV. EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In: Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning (ICML). 2019; 97: 6105–6114.

[60] Kingma DP, Ba JL. Adam: A method for stochastic optimization. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR). 2015.

[61] Baratloo A, Hosseini M, Negida A, El Ashal G. Part 1: Simple definition and calculation of accuracy, sensitivity and specificity. Emergency (Tehran, Iran). 2015; 3(2): 48–49.

[62] Koutini K, Henkel F, Eghbal-zadeh H, Widmer G. Low-complexity models for acoustic scene classification based on receptive field regularization and frequency damping. In: Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events (DCASE) Workshop. 2020; 1–5.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 859-876 (2025)

Adli Bilişim Araştırmalarına Küresel Bir Bakış: Bibliyometrik Analiz ile Yayın Trendleri ve Araştırma Yönelimleri

Onur CERAN[1*]

[1]*Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 21/05/2025
Revision: 12/06/2025
Accepted: 15/06/2025

Keywords

Digital Forensics
Bibliometric Analysis
Publication Trends
Scopus

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 21/05/2025
Düzeltme: 12/06/2025
Kabul: 15/06/2025

Anahtar Kelimeler

Adli Bilişim
Bibliyometrik Analiz
Yayın Eğilimleri
Scopus

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışma, Scopus veritabanından elde edilen 10.414 yayını bibliyometrik analizle inceleyerek adli bilişimdeki küresel eğilimleri belirlemiştir. ABD lider konumdayken, derin öğrenme, yapay zekâ, blokzincir ve IoT gibi konular son dönemde öne çıkan araştırma alanlarıdır./ This study analyzes 10,414 publications from Scopus to identify global trends in digital forensics. The United States leads the field, while deep learning, artificial intelligence, blockchain, and IoT have emerged as major research focuses in recent years.



Şekil A:*Çalışma Admları /* ***Figure A****: Study Steps*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Adli bilişim alanındaki 10.414 yayını kapsamlı bir bibliyometrik analizi yapılmıştır / Comprehensively 10,414 publications are analyzed in digital forensics.*
- *Adli bilişim alanında küresel eğilimler ortaya koyulmuştur / Global trends in the field of digital forensics have been revealed*
- *Derin öğrenme, yapay zekâ ve blok zinciri gibi teknolojilerin alanda öne çıkan temalar olduğu belirlenmiştir / echnologies such as deep learning, artificial intelligence, and blockchain have emerged as prominent themes in the field.*

Amaç (Aim): *Araştırmanın amacı, adli bilişim literatürünü nicel yöntemlerle sistematik olarak değerlendirmektir.Bu analiz, gelecekteki çalışmalar için stratejik bir rehber sağlamayı hedeflemektedir / The aim of this research is to systematically evaluate the digital forensics literature using quantitative methods. This analysis aims to provide a strategic roadmap for future studies in the field.*

Özgünlük (Originality): *Çalışma, Scopus veri tabanından elde edilen geniş veri seti ile alanda yapılmış en kapsamlı Türkçe bibliyometrik çalışmalardan biridi / The study is among the most comprehensive Turkish bibliometric analyses using an extensive dataset from Scopus.*

Bulgular (Results): *Amerika Birleşik Devletleri, hem yayın sayısında hem de atıf etkisinde açık ara lider konumdadır. Derin öğrenme ve nesnelerin interneti gibi konular son yıllarda hızlı bir artış göstermiştir. / The United States clearly leads in both publication volume and citation impact. Topics such as deep learning and the Internet of Things have shown rapid growth in recent years.*

Sonuç (Conclusion): *Adli bilişim araştırmaları, teknolojinin gelişmesiyle birlikte daha çok disiplinli bir yapı kazanmıştır. Çalışma, araştırmacılar ve politika yapıcılar için önemli yönelimler ve öneriler sunmaktadır./ Digital forensics research has become increasingly multidisciplinary as technology evolves. The study offers valuable directions and recommendations for researchers and policymakers.*

*Corresponding author, e-mail: onur.ceran@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1703234

GU J Sci, Part C, 13(3): 859-876 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Adli Bilişim Araştırmalarına Küresel Bir Bakış: Bibliyometrik Analiz ile Yayın Trendleri ve Araştırma Yönelimleri

Onur CERAN[1*]

[1]*Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 21/05/2025
Düzeltme: 12/06/2025
Kabul: 15/06/2025

Anahtar Kelimeler

Adli Bilişim
Bibliyometrik Analiz
Yayın Eğilimleri
Scopus

Öz

Bu çalışma, adli bilişim alanındaki küresel akademik üretkenliği ve araştırma eğilimlerini analiz etmek amacıyla kapsamlı bir bibliyometrik analiz sunmaktadır. Scopus veri tabanında "digital forensics" anahtar kelimesi ile gerçekleştirilen arama sonucunda 10.414 yayından oluşan bir veri seti elde edilmiş; bu set, yayın yılı, yayın türü, en üretken yazarlar, ülkeler, kurumlar, atıf sayıları ve anahtar kelimeler gibi çeşitli açılardan incelenmiştir. VOSviewer yazılımı kullanılarak oluşturulan ağ haritaları aracılığıyla, alandaki iş birliği dinamikleri, kavramsal yapı ve tematik gelişmeler görselleştirilmiştir. Bulgular, Amerika Birleşik Devletleri'nin hem yayın hem de atıf sayılarında açık farkla önde olduğunu; bilgisayar ve mühendislik bilimlerinin ise adli bilişim literatüründe baskın olduğunu ortaya koymaktadır. Derin öğrenme, yapay zekâ, blokzincir, mobil adli bilişim, IoT ve bulut bilişim gibi teknolojiler, son dönemde çalışmaların odak noktası haline gelmiştir. Ayrıca, anahtar kelime analizleri sosyal bilimler perspektifinden yapılabilecek çalışmalara da işaret etmektedir. Bu yönüyle çalışma, alandaki mevcut durumu tanımlamanın ötesine geçerek, gelecek araştırmalar için stratejik yönlendirmeler sunmaktadır. Yalnızca Scopus veri tabanıyla sınırlı olması çalışmanın temel sınırlılığıdır. Bununla birlikte, bu analiz, adli bilişim literatürünün dinamik yapısını ve çok disiplinli doğasını gözler önüne sererek hem araştırmacılara hem de politika yapıcılara değerli bir kaynak sunmaktadır.

A Global Perspective on Digital Forensics Research: Publication Trends and Research Directions through Bibliometric Analysis

Article Info

Research article
Received: 21/05/2025
Revision: 12/06/2025
Accepted: 15/06/2025

Keywords

Digital Forensics
Bibliometric Analysis
Publication Trends
Scopus

Abstract

This study presents a comprehensive bibliometric analysis aimed at evaluating global academic productivity and research trends in the field of digital forensics. A dataset of 10,414 publications was obtained through a Scopus search using the keyword "digital forensics" and analyzed across various dimensions including publication year, type, prolific authors, countries, institutions, citation counts, and keywords. Using VOSviewer, visual maps were created to uncover collaboration networks, conceptual structures, and thematic developments within the field. The findings indicate that the United States leads in both publication volume and citation impact, with computer and engineering sciences dominating the digital forensics literature. Technologies such as deep learning, artificial intelligence, blockchain, mobile forensics, IoT, and cloud computing have become focal points of recent research. Moreover, keyword analyses reveal opportunities for interdisciplinary studies, particularly from a social sciences perspective. Beyond describing the current state of the field, this study offers strategic insights for future research directions. The primary limitation of the research lies in its exclusive use of the Scopus database. Nevertheless, the analysis highlights the dynamic and interdisciplinary nature of digital forensics, offering valuable guidance for researchers, practitioners, and policymakers.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsanlık tarihi boyunca, suç olgusu toplumların en temel sorunlarından biri olmuştur. Suçun tanımı, biçimleri ve işleniş şekilleri dönemden döneme, kültürden kültüre değişiklik gösterse de toplumsal düzeni bozma ve bireysel güvenliği tehdit etme potansiyeli her zaman var olmuştur. Bu evrensel olgu karşısında, adaletin tesisi ve toplumsal huzurun sağlanması için, işlenen suçların aydınlatılması, faillerin tespiti ve adil bir yargılama süreci yürütülmesi hayati önem taşımaktadır. Bu sürecin belkemiğini ise, suç mahallinden veya olayla ilişkili diğer kaynaklardan elde edilen delillerin bilimsel yöntemlerle toplanması, analiz edilmesi ve yorumlanması oluşturmaktadır [1]. Uzun yıllar

*Corresponding author, e-mail: onur.ceran@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1703234

boyunca, adli tıp, adli kimya, adli balistik ve adli palinoloji gibi köklü adli bilim dalları, fiziksel, kimyasal ve biyolojik delillerin (kan, doku, parmak izi vb.) incelenmesi yoluyla suçların aydınlatılmasında ve karar vericilerin doğru kararlar almasında vazgeçilmez birer araç olmuştur [2]. Bu bilim dalları, maddesel dünyanın somut izlerini takip ederek adalete giden yolda önemli katkılar sunmuşlardır.

Ancak, 20. yüzyılın son çeyreğinden itibaren hız kazanan ve 21. yüzyılda hayatın her alanına nüfuz eden teknolojik devrim, suçun işleniş biçimlerini ve dolayısıyla adli soruşturma süreçlerini kökten değiştirmiştir [3]. Günümüzde artık, geleneksel fiziksel delillerin yanı sıra, bilgisayarlar, akıllı telefonlar, tabletler, sunucular, ağ cihazları, giyilebilir teknolojiler, bulut depolama servisleri ve hatta akıllı ev sistemleri gibi sayısız dijital ortamdan elde edilen veriler de adli soruşturmaların en kritik unsurlarından biri haline gelmiştir [4]. Bireylerin günlük yaşamlarının önemli bir kısmını dijital platformlarda geçirmesiyle birlikte, suçlular da eylemlerini giderek daha fazla dijital alana taşımaktadır. Bu durum, adli bilimler sahnesine "adli bilişim" olarak adlandırılan yeni bir disiplini sokmuştur [5].

Dijital deliller, geleneksel fiziksel delillerden farklı olarak, soyut ve kolayca kopyalanabilir, değiştirilebilir veya tamamen yok edilebilir bir yapıya sahiptirler [6]. Dahası, her yeni teknolojik gelişme, beraberinde yeni bir delil türünü ve bu delilin elde edilme, analiz edilme ve yorumlanma metodolojisini getirmektedir. Örneğin, eski bir dosya sistemi olan FAT (File Allocation Table) üzerinde silinen bir dosyanın kurtarılması ile yeni nesil bir dosya sistemi olan NTFS (New Technology File System) üzerinde silinen bir dosyanın kurtarılması arasında, dosya yapısı, metadata bilgileri (oluşturma, değiştirme, erişim tarihleri), dosya boşlukları (slack space) ve disk alanı yönetimi gibi teknik farklılıklar nedeniyle elde edilecek delilin niteliği ve elde etme zorluğu açısından önemli farklar bulunmaktadır. Bu durum, adli bilişim uzmanlarının ve araştırmacılarının sürekli olarak değişen teknolojiye ayak uydurmasını, yeni sistemlerin ve yazılımların nasıl çalıştığını anlamasını, potansiyel delil kaynaklarını keşfetmesini ve bu delillerin bütünlüğünü bozmadan nasıl toplanıp analiz edileceğini öğrenmesini zorunlu kılmaktadır.

Bu hızlı ve sürekli dönüşüm, adli bilişim alanındaki akademik araştırmaları ve uygulamalı çalışmaları son derece dinamik ve canlı tutmaktadır. Şifreleme teknikleri, veri gizleme yöntemleri, siber saldırılar ve bulut bilişim gibi karmaşık konular, adli bilişim uzmanlarını sürekli yeni yaklaşımlar ve araçlar geliştirmeye itmektedir [7]. Ancak, bu araştırmalar yalnızca teknik konularla sınırlı kalmamış; aynı zamanda dijital delillerin hukuki geçerliliği, mahkemelerde kabul edilebilirliği, elde ediliş usulleri ve kişisel mahremiyetin sağlanması gibi hukuksal boyutları da kapsamlı bir şekilde ele almayı gerektirmiştir [8]. Dijital delillerin kendine özgü doğası, ceza muhakemeleri kanunlarında da köklü değişikliklerin yaşanmasına neden olmuş ve olmaya devam edecektir [9]. Ceza muhakemesinde her şeyin delil olabileceğini belirten delil serbestliği ilkesinin dijital ortama yansımaları, delil zincirinin dijital veriler için nasıl sağlanacağı, ve uluslararası hukuki iş birliği gibi hususlar, yasal düzenlemelerde ve yargı pratiklerinde sürekli güncellenmekte ve tartışılmaktadır.

Adli bilişimin bu denli dinamik ve çok boyutlu yapısı, alandaki güncel eğilimleri, eksiklikleri ve gelecekteki araştırma alanlarını anlamayı zorunlu kılmaktadır. Geleneksel literatür taramaları, geniş bir veri yığını içerisinde belirli konulara odaklanmada yetersiz kalabilirken, bibliyometrik analizler, bu karmaşık bilgi ağını nicel ve sistematik bir şekilde inceleyerek çok daha kapsamlı bir bakış açısı sunar. Bu metodoloji, yayın sayıları, atıf analizleri, anahtar kelime birliktelikleri ve iş birliği ağları gibi metrikleri kullanarak, adli bilişim alanında hangi konuların öne çıktığını, hangi ülkelerin ve kurumların lider konumda olduğunu, farklı araştırma alanları arasındaki bağlantıları ve zaman içerisindeki değişimleri bilimsel verilerle ortaya koyma potansiyeli taşır.

Bu çalışmada, adli bilişim alanındaki küresel araştırma eğilimlerini ve tematik gelişimleri ortaya koymak amacıyla kapsamlı bir bibliyometrik analiz sunulacaktır. Böylece, bu hızla gelişen ve dönüşen alandaki mevcut durumu, gelecekteki potansiyelini ve adaletin tesisi için taşıdığı kritik önemi anlamak adına bilimsel bir bakış açısı sağlanması amaçlanmaktadır.

Çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde ele alınmıştır: Kavramsal çerçevenin ortaya koyulduğu ve literatür taramasının ele alındığı ikinci bölümün ardından, üçüncü bölümde metodoloji aktarılmıştır. Dördüncü bölümde bulgular ortaya koyulurken beşinci bölümde sonuçlar ve tartışma bölümü ele alınmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE (CONCEPTUAL FRAMEWORK)

2.1. Adli Bilişim (Digital Forensics)

Adli bilişim, dijital ortamlarda gerçekleşen suçların tespiti, delillendirilmesi ve hukuki süreçlerde kullanılmak üzere dijital delillerin toplanması, analiz edilmesi ve sunulmasını kapsayan disiplinler arası bir alandır. Bu alan, bilgisayar mühendisliği, hukuk, kriminoloji ve bilgi güvenliği gibi çeşitli disiplinlerin kesişim noktasında yer almaktadır.

Literatürdeki geniş tanımıyla, kanunen suç olarak belirlenmiş bir fiilin varlığında, failin ve fiilin belirlenebilmesi için kullanılan delilleri toplamaya ve değerlendirmeye yarayan, disketlerden, sabit disklerden ve çıkartılabilir disklerden delil elde etme amacıyla veri kurtarma işlemi olan ve elektronik delillerin muhteva ettiği bilgileri, delil inceleme süreçlerini, hukuki ve etik sorumlulukları göz önünde bulundurarak, delilin bütünlüğünü koruyarak ve maddi gerçeği açığa çıkarmak amacıyla; kopyalama, belirleme, çözümleme, yorumlama ve belgeleme süreçlerinin bütününe 'adli bilişim' adı verilmektedir [10, 11]. Adli bilişim kavramı, isminin çağrıştırdığı gibi sadece "adli" ve "bilişim" kelimelerinin mekanik birleşiminden türememiştir. Dilimize "computer forensics" tanımının bir çevirisi olarak kazandırılan bu terim, "bilişim" kelimesinin sahip olduğu geniş anlam yelpazesini esas alarak, "bilgisayar adli bilimi" gibi daha dar kapsamlı bir ifadenin yerine tercih edilmiştir. Ancak, bilişim teknolojilerindeki ilerlemelerle birlikte, elektronik delillerin yalnızca bilgisayarlarla sınırlı kalmadığının, akıllı telefonlar, ağ cihazları, bulut depolama alanları gibi çok sayıda dijital platformda da bulunabildiğinin aşılması "computer forensics" kavramının yerini, ondan daha genel bir niteliğe sahip olan "digital forensics" kavramının almasına yol açmıştır. Dolayısıyla, Türkçe 'deki "adli bilişim" terimi de aslında bu geniş kapsamlı "digital forensics" alanını tanımlamak üzere evrimleşmiş ve yaygın bir kullanım kazanmıştır [12].

Adli bilişim, bir olay yerinden dijital medyanın potansiyel delil olarak tanımlanmasıyla başlayıp, bir mahkemede bilirkişi tarafından delil olarak sunulması aşamasına kadar geçen çok aşamalı bir süreçtir [13]. Bu süreç salt olarak bir bilgisayarın içeriğinin kopyalanarak çıktılarının mahkemeye sunulmasına indirgenemez. Bu süreç genel olarak 4 aşamada incelenmektedir. Dijital delillerin tespiti, tespit edilen delillerin toplanması ve korunması, toplanan delillerin analiz edilmesi ve son olarak adli makamlara sunulması aşamalarından oluşmaktadır. Uluslararası alanda tasarlanan adli bilişim inceleme süreçlerini ayrıntılı olarak işleyen "Soyut Dijital Adli Bilişim Modeli (ADF)" ise bu süreci; olay türünün belirlendiği tespit adımından başlayarak; gerekli araç ve tekniklerin düzenlendiği hazırlık, delil toplama sürecinin optimize edildiği yaklaşım stratejisi, delillerin mevcut durumlarını muhafaza ettiği koruma, dijital delillerin kopyalarının oluşturulduğu toplama, olaya ilişkin geniş aramanın gerçekleştirildiği inceleme, delillere dayalı sonuçlar sunulduğu analiz, sonuçların açıklandığı sunum ve varlıkların sahiplerine geri verildiği delil iadesi ile son bulan işlemler dizisi olarak açıklamıştır [14]. Delillerin tespit edilip muhafaza altına alınırken tutulacak olan tutanaktan, delilin bulunduğu yerin resmedilmesine; el konulan hafıza biriminin imajının alınmasında, şifreli dosyaların çözülmesine, silinen dosyaların geri getirilmesinden, delil bütünlüğünü sağlayan hash fonksiyonlarının kullanımına kadar birçok ayrı işlemi içerisinde bulunduran bu süreç dolayısıyla farklı disiplinlerden birçok araştırmacının adli bilişim konusunda çalışmalar gerçekleştirmesini sağlamıştır.

2.2. Adli Bilişimin Önemi (The Significance of Digital Forensics)

Donn Parker'ın 1976 yılında yayımladığı "Crime by Computers" isimli kitabı ile bilgisayar yardımıyla işlenen suçların soruşturulması ve kovuşturulması amacıyla dijital bilginin kullanımına ilişkin ilk açıklama gerçekleştirilmiştir. O zamanlar sadece büyük şirketler, üniversiteler veya devlet kurumları tarafından kullanılan bilgisayarlar, 1980'lerde IBM'in tanıtmış olduğu bilgisayarı ile yayılım göstermiş, 1993'te Federal Soruşturma Bürosu'nın (FBI) ev sahipliği yaptığı Birinci Uluslararası Bilgisayar Delilleri Konferansı'nda, 26 ülkeden temsilciler bilgisayar delilleri alanında işbirliği ve deneyim paylaşımı ihtiyacı konusunda anlaşmıştır. Bu kararın ardından, 1995'teki ikinci konferansta Uluslararası Bilgisayar Delilleri Örgütü (IOCE) kurulmuştur [15].

21. yüzyılın 2.çeğreğine gelindiğinde, doğumla birlikte henüz ismi bile konulmayan bir bebeğin hastane veri tabanına kaydı ile başlayan, sayısallaşan (dijitalleşen) hayata ilişkin en önemli bilgiler de dijital olarak tutulmaya başlanmıştır. We Are Social Digital'in hazırlandığı 2024 yılına ait rapora göre 16-64 yaş aralığı nüfusun %97,6'sının herhangi bir tipte akıllı telefonunun, %57,7'sinin bilgisayarının, %30'unun akıllı saatinin ve tabletinin olduğu belirtilmiştir [16]. Bu durum adli bilişimin bazı zorluklarla karşılaşmasına da sebebiyet vermiştir. Bu zorluklar arasında veri miktarındaki yüksek artış, işlem gücü gereksinimleri, şifrelenmiş verinin karmaşıklığı, uçucu verilerin yoğunluğu, depolama ve geri getirmedeki farklı teknolojiler, bulut bilişim, IoT cihazlarının ve gömülü sistemlerin yaygınlaşması,

uzaktan çalışma ve veriye erişim, özel dosya sistemleri ve protokolleri sayılabilecektir [17]. 2024 yılında dijital adli bilişim pazarı 9,4 milyar dolar değerindeyken, 2031 yılına kadar bu değerin 17,4 milyar dolara ulaşması beklenmektedir. Bu büyüme, %9,2'lik bileşik yıllık büyüme oranını temsil etmektedir [18].

Teknolojide yaşanan gelişmelerle, siber saldırıların artan karmaşıklığı, genellikle birçok teknolojinin kullanılmasını gerektiren delil toplamanın zorluğuyla doğrudan ilişkilidir. Bu sebeple adli bilişim araştırmacılarına olan ihtiyaç artmış ve bu durum, adli bilişimle ilgili birçok akademik eğitim ve sertifika programının ortaya çıkmasına yol açmıştır. Ayrıca, yürütülecek görevlerin karmaşıklığı ve yasalara ve mahkeme düzenlemelerine uyma zorunluluğu, uyulması gereken katı protokollerin ve prosedürlerin oluşturulmasına neden olmuştur. Yeni siber suç biçimlerinin sürekli ortaya çıkması, bu tür olaylarla başa çıkmak için uyarlanabilir soruşturma süreç modellerini, yeni teknolojileri ve gelişmiş teknikleri de gerektirmektedir [19]. Ayrıca teknolojinin (yazılım ve donanım) hızla değişimi ile araçların yayınlandıkları zaman çoktan modası geçmiş olabilmektedir [20]. Bir ceza davası soruşturmasında adli bilişimin yadsınamaz bir önemi olmakla birlikte, bu disiplin teknolojideki değişikliklere ayak uydurmak zorunda olup, bunların kötüye kullanılabileceği yaratıcılığa her gün meydan okumak durumundadır [21].

2.3. Adli Bilişim ve Bibliyometrik Analiz (Digital Forensics and Bibliometric Analysis)

Adli bilişim ile ilgili farklı ülkelerden yazarlar tarafından alanın mevcut yapısının derinlemesine incelenmesini sağlayan bibliyometrik çalışmalar yapılmıştır. Son iki yılda yapılan çalışmalar incelendiğinde;

Chhtrapati vd. [22] adli bilişimde dijital delil konusunda yapmış oldukları bibliyometrik analizi çalışmalarında Scopus veri tabanında yer alan 1889-2020 yılları arasında yayımlanmış toplam 4458 çalışmayı incelemiş, bu alanda Amerika Birleşik Devletleri ve Birleşik Krallığın en etkili iki ülke olduğunu, Pretorya Üniversitesinin ise en üretken kurum olduğunu belirlemişlerdir. Goyal [23] adli bilişimde blok zinciri alanında yaptığı bibliyometrik analiz çalışmasında Scopus veri tabanında bulunan 175 makale üzerinde inceleme yapmış, yayın ve atıf sayısı bakımından en üretken ve etkili ülkenin Amerika Birleşik Devletleri olduğu ortaya koyulmuştur. Ramadhani ve Hariyadi [24] 2012-2022 yılları arasında Endonezya'nın Scopus veri tabanında bulunan adli bilişim alanındaki çalışmaları hakkında bibliyometrik analizi gerçekleşirmiş olup, bu on yılda toplam 117 makalenin yayımlandığını belirtmiştir. Ramadhani vd. [25], Scopus veri tabanında "multimedia forensics" and ("deep learning" or CNN) anahtar terimleri ile ilgili yapmış oldukları bibliyometrik analizde 2017-2022 yılları arasında 68 adet yayın yapıldığını tespit etmiş, multimedya adli bilişimi alanındaki araştırmaların yıllara göre önemli ölçüde artık göstermediği belirtilmiştir. Syahputri vd. [26] Scopus veri tabanında 2014-2023 yılları arasında yayımlanan adli bilişim araçları ile ilgili yapmış oldukları bibliyometrik analizi çalışmalarında 698 adet makaleyi incelemiş mobil, bulut adli bilişimi, zararlı yazılım analizi ve anti-adli bilişim çalışmaları arasında bir boşluk bulunduğu tespitini yapmışlardır. Al-Raggad ve Al-Raggad [27] adli bilişim ve idari hukuk bağlamında gerçekleştirdikleri bibliyometrik çalışma kapsamında Web of Science veri tabanında 2010-2024 yılları arasında yayımlanmış 543 yayını incelemiş, teknolojik gelişmelerden, düzenleyici değişikliklerden ve mali suistimallerden kaynaklanan karmaşıklıkları yansıtan idari hukuk ve adli bilişime olan ilgi ve alakanın arttığını ortaya koymuşlardır. Lu vd. [28] görsel-anti-adli bilişim alanında yapmış oldukları bibliyometrik analizi çalışmalarında Web of Science veri tabanında yer alan 2000 yılından itibaren yayımlanmış 1760 makale üzerinde inceleme gerçekleştirmişlerdir. 2017 yılında Deepfake gibi karmaşık görüntü sahteciliği teknolojilerinin yaygınlaşmasının alanda yapılan çalışmaları artırdığını belirtmişlerdir.

Literatür, adli bilişimin teknikler, uygulamalar ve zorluklar gibi çeşitli yönlerini araştırırken, alanın gelişimine dair daha derin içgörüler sağlamak için yayın eğilimleri, atıf kalıpları, iş birliği dinamikleri ve tematik kümelerin nicel bir incelemesine ihtiyaç vardır.

3. ARAŞTIRMANIN AMACI (AIM)

Bu çalışmanın amacı, Scopus veri tabanından derlenen nicel verilerle "Adli Bilişim" kavramına yönelik bibliyometrik bir analiz yapmaktır. Bu sayede, alandaki çalışmaların bütüncül bir değerlendirmesini sunarak, araştırmacılara gelecekteki çalışmalarında yol gösterecek bir başlangıç rehberi sağlamak hedeflenmektedir. Çalışma, Dergipark veri tabanında "Adli Bilişim" konusunda bibliyometrik analiz odaklı herhangi bir akademik çalışmanın bulunmadığı tespiti üzerine bu eksikliği gidermeyi amaçlamaktadır. Bu araştırma, belirtilen amaca ulaşmak için aşağıdaki sorulara yanıt aramıştır:

1. Adli bilişim alanı ile ilgili yayınların performans göstergeleri nelerdir?

2. Adli bilişim alanı ile ilgili yayınların kavramsal yapısı nasıldır ve ön plana çıkan unsurlar nelerdir?

Araştırma sonuçlarının adli bilişim alanına ve ilgili alanda çalışan araştırmacılara günümüz ve geleceğe dair ipuçları sunarak katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

4. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Yapılan bu araştırmada bibliyometrik analiz yöntemi benimsenmiştir. Bibliyometri, yayınlanmış araştırmaları sayısal olarak analiz etmek amacıyla matematik ve istatistiksel yöntemleri kullanan, disiplinler arası bir araştırma alanıdır. Bu analiz yöntemiyle bir sahanın nasıl bir gelişim gösterdiği ve hangi eğilimlere sahip olduğu incelenir. Görselleştirme araçları ve veri madenciliği teknikleri kullanılarak elde edilen değerli veriler, farklı bakış açılarıyla görüntülenebilmektedir. Bu analizlerden çıkan sonuçlar ışığında, ilgili alandaki bilimsel üretkenliği ölçmek, baskın konuları belirlemek ve olası gelecek trendlerini öngörmek mümkündür [29]. Bibliyometrinin kullanımı, günümüzde tüm bilim dallarına yayılmış ve giderek daha stratejik bir öneme sahip olmuştur. Özellikle ampirik nitelikteki çalışmaların büyük hacimlerde üretildiği, ancak aynı zamanda dağınık ve farklı görüşlerin olduğu bir dönemde, bilim alanlarını sistematik olarak haritalandırmak için bu yöntem oldukça elverişlidir [30].

Çalışma kapsamında, Scopus veri tabanından elde edilen veri seti, yıllara göre yayın sayısı, hangi ülkelerden çalışmalar yapıldığı, yayın türleri, en üretken yazarlar, en çok atıf alan çalışmalar, kurumların katkısı ve kullanılan anahtar kelimelerin analizi gibi farklı perspektiflerden incelenmiştir. Günümüzde farklı disiplinlerde kullanılan çeşitli bibliyometrik analiz yazılımları olmakla birlikte, VOSviewer tercih edilmiştir. VOSviewer, araştırmacılara literatürdeki eserlerin zaman içindeki ilerlemesini, çalışma odaklarının nasıl değiştiğini, eserler arasındaki ilişkileri ve yeni moda olan kavramları kolayca keşfetme imkânı sunmaktadır [31]. Bu yazılımın sağladığı ağ analizleri, haritalama, görsel sunumlar ve çok boyutlu analiz yetenekleri nedeniyle araştırmada kullanımı uygun bulunmuştur.

4.1. Veri Seti (Dataset)

Bu araştırmada, veri kaynağı olarak Scopus veri tabanı kullanılmıştır. Scopus; kapsamlı içeriği, çok disiplinli yapısı ve güvenilir atıf ile özet bilgileri sayesinde, akademik literatürde sıkça başvurulan saygın bir veri tabanıdır. Araştırmacılara, yetkin ve konuya ilişkin çalışmalara hızlı biçimde ulaşabilmeleri için güvenilir veri, ölçüm ve analiz araçları sunmaktadır [32]. Etik ilkelere uygunluğu ve belirli bir akademik kalite standardını sürdürmesi, Scopus'u güvenilir bir kaynak haline getirmektedir. Geniş bir dergi ağına ev sahipliği yapması, Scopus'un bilgilendirici ve erişimi kolay bir kaynak olarak öne çıkmasında etkili olmaktadır [33]. Ayrıca, çok çeşitli disiplinleri kapsayan kapsamlı bir bibliyometrik veri seti sunarak araştırmacılara önemli bir kaynak sağlamakta olup [34] hem yayımlanmış dokümanların bir koleksiyonunu tanımlama hem de bu dokümanlarla bağlantılı bibliyografik bilgileri dışarı aktarma yeteneğine sahiptir [35].

İlk olarak Scopus veri tabanında "TITLE-ABS-KEY ("digital forensics") AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "ch") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "bk")) " sorgusu ile "makale", "bildiri", "kitap" ve "kitap bölümü" alanları seçilerek arama yapılmıştır. 15 Mayıs 2025 tarihinde gerçekleştirilen bu aramada 10.414 sonuçtan oluşan bir veri setine erişilmiştir. Bu yayınlara ilişkin bilgiler Scopus arama paneli üzerinden indirilmiştir.

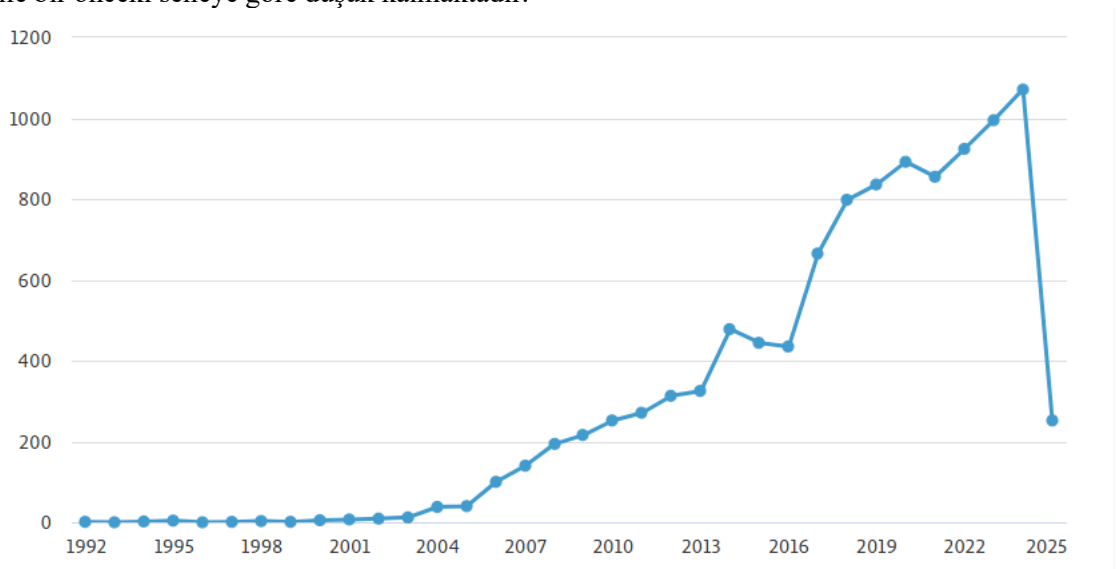
5. BULGULAR (RESULTS)

Bu başlık altında çalışma kapsamında yapılan analizler sonucunda ulaşılan bulgular sunulmuştur.

5.1. Yayınların Yıllara göre Dağılımı (Annual Distribution of the Publications)

Yıllık çalışma sayıları incelendiğinde en eski çalışmanın 1992 yılına ait bir konferans bildirisi olduğu görülmektedir. Takip eden 1993 yılına ait herhangi yayın bulunmazken 1994 yılında bu sayı 2'ye 1995 yılında 4'e çıkmıştır. 1996 yılında yine herhangi yayına rastlanmazken 1997 yılında 1, 1998 yılında 3, 1999 yılında 1 ve 2000 yılında 5 çalışma bulunmaktadır. 2000 yılına kadar ivmesiz bir hareket gözlenen yayın sayısında, 2000 yılına gelindiğinde ivmeli bir artışın başladığı gözlenmektedir. 2004 yılına gelindiğinde 36 çalışma ile bir önceki yıla göre yaklaşık 4 katlık bir artış oluştuğu görülmüştür. 2024 yılındaki toplam 1076 eser 20 yıl önceki üretilen sayıya göre 28,21 kat artış anlamına gelmektedir. 2015, 2016 ve 2021 yılları özelinde ivme açısını bozacak ve bir önceki

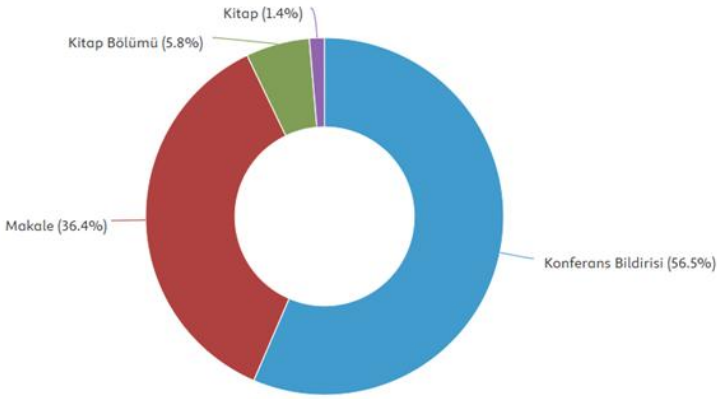
yıla göre az da olsa eser sayısında bir azalış gözlenmektedir. 2025 yılının ilk yarısında gerçekleştirilen bu çalışma, tarih itibariye 248 eser sayısı ile bir önceki seneye göre düşük kalmaktadır. Ancak yıl sonunda aynı ivmenin yakalanabileceği değerlendirilmektedir. Şekil 1'de yıllara göre yayın dağılımları grafiği sunulmuştur.



Şekil 1. Yayınların yıllara göre dağılım grafiği (Distribution chart of publications by year)

5.2. Yayınların Kategori Türlerine göre Dağılımı (Distribution of Publications by Type)

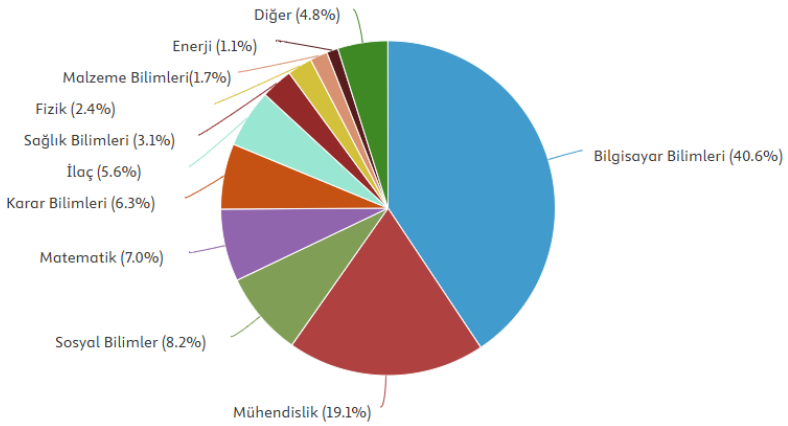
Yayınların kategori türlerine göre dağılımları incelendiğinde bu çalışmalar arasında 3790 dergi makalesi, 5882 konferans bildirisi, 141 kitap ve 601 kitap bölümü olduğu görülmüştür. Yayın türlerinden konferans bildirileri %56,5'lik payı ile en çok tercih edilen çalışma olurken Şekil 2 üzerinde yayınların türlerine göre dağılım grafiği gösterilmiştir



Şekil 2. Yayınların türlerine göre dağılım grafiği (Distribution of publications by type)

5.3. Yayınların Araştırma Disiplinine göre Dağılımı (Distribution of Publications by Research Discipline)

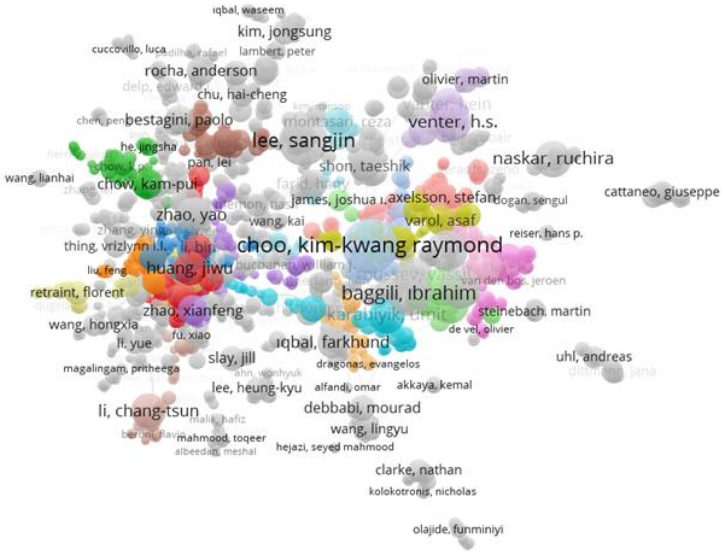
Disiplinler açısından inceleme yapıldığında çalışmaların büyük çoğunluğunun (8900) bilgisayar bilimleri alanına ait olduğu görülmektedir. Bilgisayar bilimlerini sırasıyla mühendislik (4186), sosyal bilimler (1788), matematik (1531), karar bilimleri (1388), ilaç (1229), sağlık bilimleri (679), fizik (524), malzeme bilimi (369), enerji (246) alanlarına ait yayınlar takip etmektedir. İş, yönetim, kimya, çevre bilimleri gibi diğer disiplinlerde yer alan yayınlar %4,8'lik bir bölümü oluşturmakta olup, yayınların araştırma disiplinine göre dağlımı Şekil 3 üzerinde sunulmuştur.



Şekil 3. Yayınların araştırma disiplinlerine göre dağılım grafiği (Distribution of publications according to research disciplines)

5.4. Ortak Yazarlık Analizi (Co-authorship Analysis)

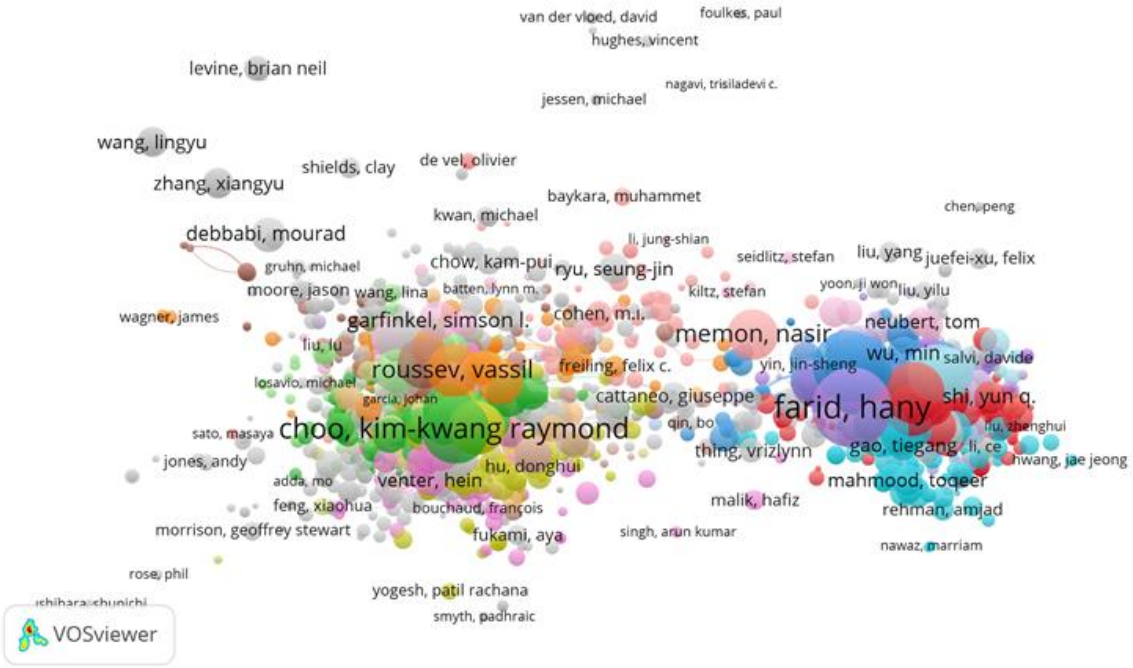
Ortak yazarlık analizi ile, yazarlar arasında olan bağlantı ve iş birliği açısından en çok ortak çalışma yapmış olan yazar/yazarları tespit etmek için, en az 1 atıf ve en az 3 yayın şartı arama kriteri oluşturularak yazar ortaklık ağı haritası çıkarılmış ve Şekil 4 üzerinde sunulmuştur. Ortak yazarlık analizinde, en güçlü bağlantılara sahip isimler arasında yapılan değerlendirmeye göre 1436 yazar adı, 65 farklı kümede birleşerek toplamda 3854 bağlantı oluşturmuştur. En güçlü bağlantılı ilk üç yazarın bağlantı gücüne göre sırası ile Kim-Kwang Raymond Choo (160), Sangjin Lee (12) ve Ibahim Baggili (97) olduğu tespit edilmiştir. En çok atıf almış olan yazarların ilk ikisinin (4838 atıf ile Hany Farid, 3514 atıf ile Jessica Fridrich) en güçlü bağlantılı yazarlar arasında olmadığı görülmektedir. 3058 atıf sayısı ile üçüncü sırada yer alan Kim-Kwang Raymond Choo aynı zamanda en güçlü bağlantısı olan yazar konumundadır. Kim-Kwang Raymond Choo eser sayısı bakımından da 111 yayın ile en fazla yayın üreten yazar konumunda bulunmaktadır. 87 eser sayısı ile Ibahim Baggili ve 69 eser sayısı ile Ibahim Baggili, Kim-Kwang Raymond Choo'yu takip ederken eser sayılarının yazar bağlantı güçleri ile doğru orantılı olduğu görülmüştür.



Şekil 4. Yazarlar arası ortak yazarlık haritası (Co-Authorship of the authors)

5.5. Yazarların Atıf Analizi (Citation Analysis of the Authors)

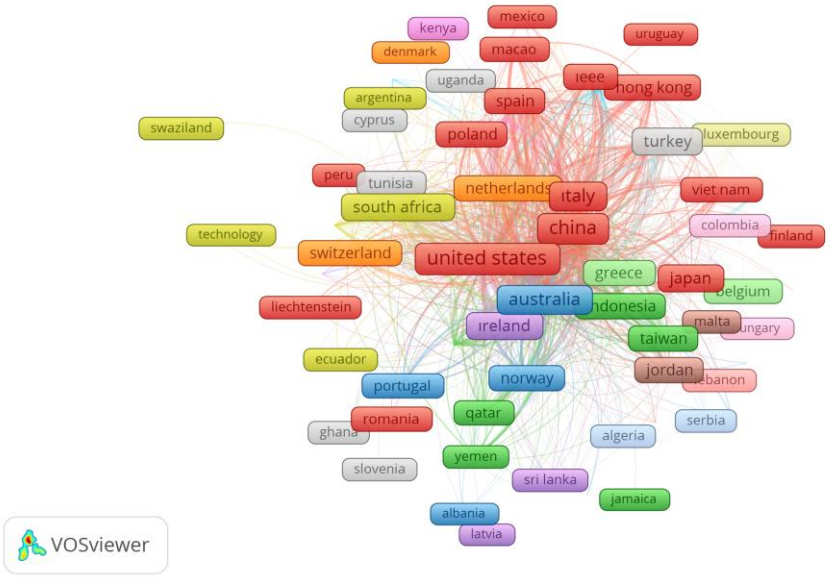
Atıf ağını yorumlayabilmek için en az 3 yayına sahip ve en az 5 atıf almış olma kriteri bulunan yazarlar için atıf analizine dair atıf ağı bağlantı haritası oluşturulmuştur. Aralarında bağlantıya sahip 1900 yazar 39 ayrı küme oluşturmaktadır. En fazla atıf alan ilk 3 yazar 4838 atıf ile Hany Farid, 3514 atıf ile Jessica Fridrich, 3058 atıf ile Kim-Kwang Raymond Choo olmuştur. Bu üç yazardan atıf sayısına göre birinci ve ikinci sırada yer alan yazarlar toplam bağlantı gücüne sahip ilk üç yazar arasında yer almazken, üçüncü sırada yer alan yazarın bağlantı gücü en yüksek yazar olduğu gözlenmiştir. Şekil 5'te yazarların atıf bağlantı haritası sunulmuştur.



Şekil 5. Yazarlar atıf bağlantı haritası (Co-citation network map)

5.6. Ülkeler Atıf Analizi (Citation Analysis of the Countries)

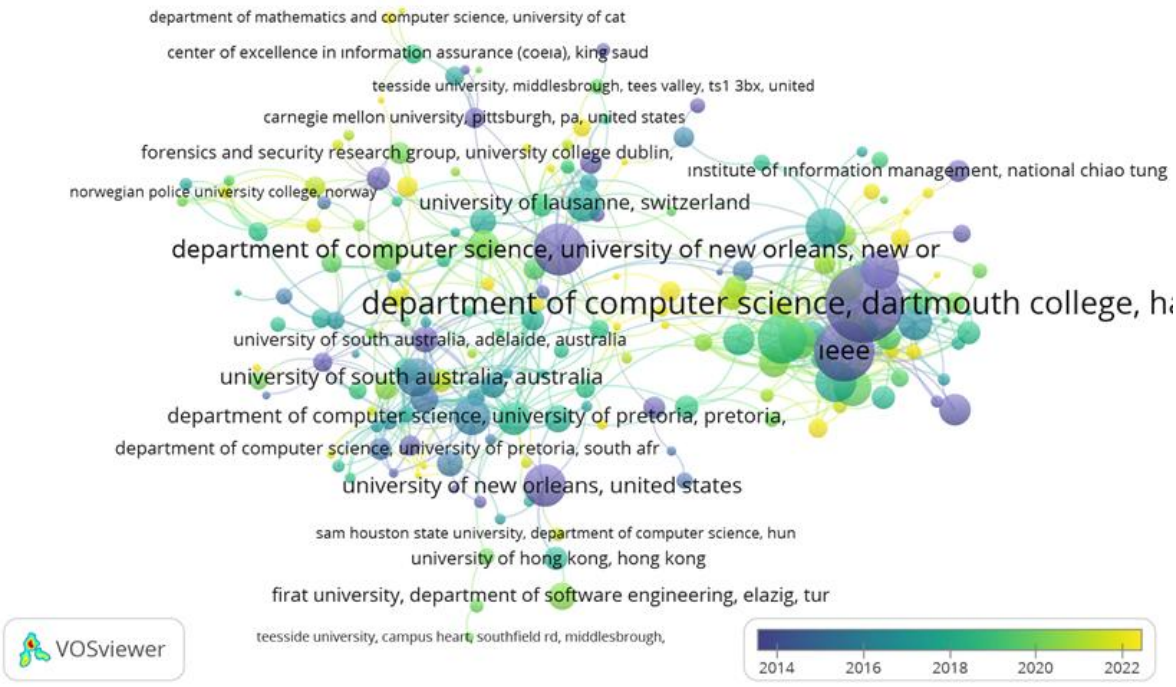
Çalışmaların gerçekleştirildiği ülkeleri baz alarak, atıflara ilişkin ait ağ haritası oluşturabilmek için, ilgili ülke tarafından en az 5 eseri yayımlanmış ve en az 5 atıf alması şartıyla aralarında ilişki gözlemlenen toplam 99 ülke üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. En fazla atıf sahibi ülkeler listelendiğinde Amerika Birleşik Devletleri'nin 40.180 atfı ile kendinden bir sonraki gelen ülke olan Çin'den (20.231 atıf) 2 kat fazla atıf sayısına sahip olduğu görülmüştür. Birleşik Krallık ise aldığı 12.119 atıf ile üçüncü ülke konumundadır. Ülkelerin alan yazına kazandırdığı eser sayıları ile atıflar beraber incelendiğinde ise Amerika Birleşik Devletleri 1985 eserle yine birinci sırada yer almaktadır. Eser sayısı ile aldığı atıf sayısı bu tabloya göre orantılı olmayan ülke ise Hindistan olmuştur. 1540 eserle ikinci sırada bulunan Hindistan aldığı atıflar sıralamasında dördüncü sırada bulunmaktadır. Ülkelerin atıf bağlantı haritası Şekil 6 üzerinde sunulmuştur.



Şekil 6. Ülkeler arası atıf bağlantı haritası (Bibliographic couplings of countries)

5.7. Kurumlar Atıf Analizi (Citation Analysis of the Organisations)

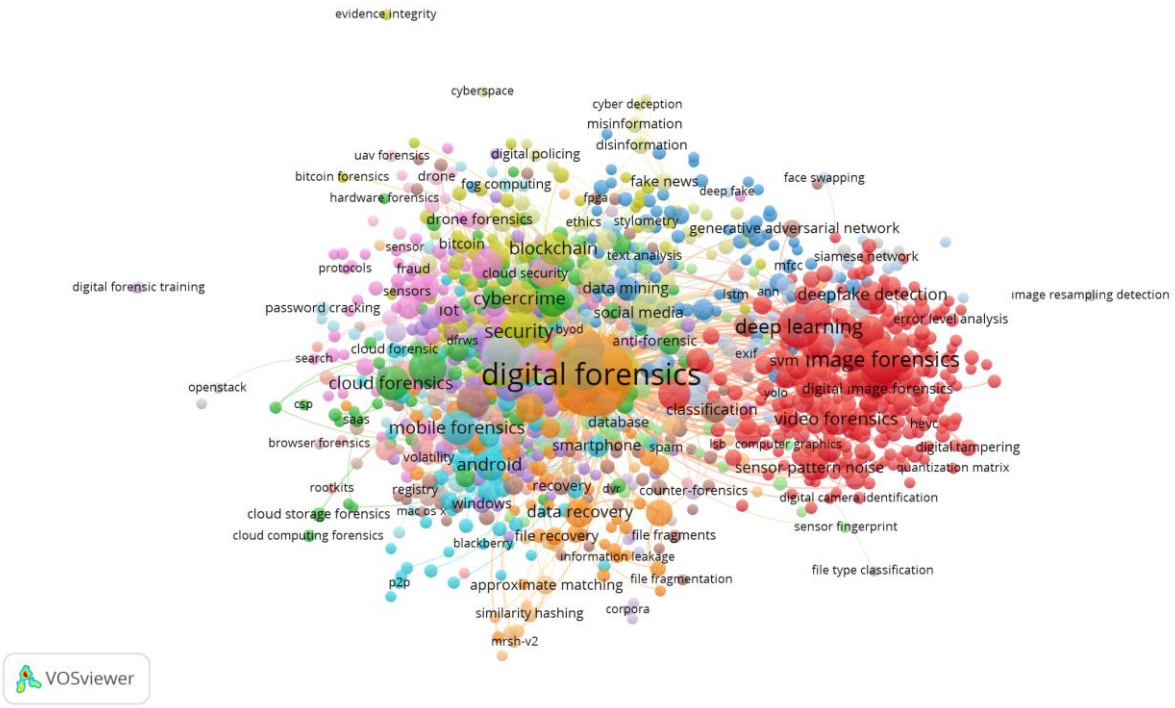
Kurumlar arasında gerçekleşen atıfların içerdiği ağ haritası oluşturmak için ilgili kurum tarafından en az 3 eser yayımlanmış olması ve en az 3 atıf alınması kriterleri koyularak analiz gerçekleştirilmiştir. Dartmouth Üniversitesi, Bilgisayar Bilimleri bölümünün (ABD) toplam 11 eserle 1999 atıf sayısına ulaştığı ve en çok atıf alan kurum konumunda olduğu görülmüştür. Tokyo Ulusal Enformatik Enstitüsü'nün (Japonya) toplam 6 eserle 1589 atıf sayısına ulaşarak ikinci sırada, Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü'nün ise (ABD) 6 yayın ve 1161 atıf ile üçüncü sırada bulunduğu görülmüştür. Şekil 7'de Kurumlar Arası Atıf Bağları Haritası sunulmuştur.



Şekil 7. Kurumlar arası atıf bağlantı haritası (Bibliographic couplings of institutions)

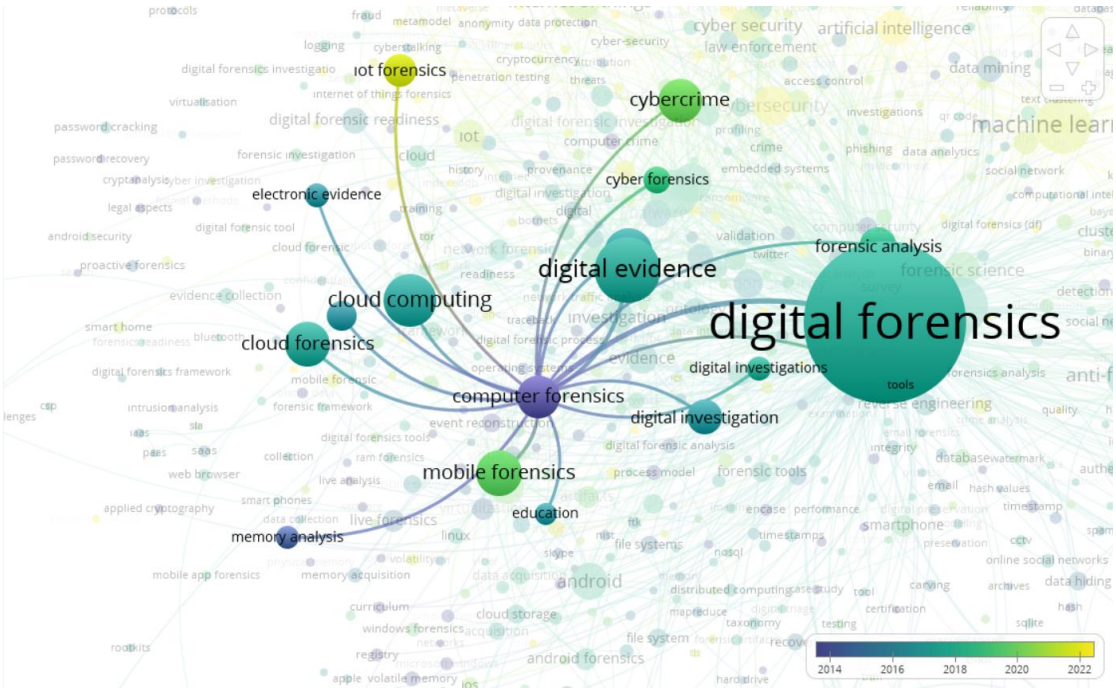
5.8. Yayınlarda Kullanılan Anahtar Sözcük Analizi (Co-occurence of All Keywords)

"Adli Bilişim" ile ilişkili yayın metinlerinde en sık kullanılan anahtar kelimeler incelendiğinde 3.107 tekrarla "digital forensics (adli bilişim)", 418 tekrarla "digital evidence (dijital delil)", 401 tekrarla "image forensics (görüntü adli bilişim)", 388 tekrarla "deep learning (derin öğrenme)", 343 tekrarla "forensics (adli inceleme)" ve 328 tekrarla "machine learning (makine öğrenmesi)" ifadelerinin üst sırada yer aldığı görülmüştür. Toplam bağlantı gücü açısından en güçlü anahtar kelimelerin ise sırayla "digital forensics", "deep learning", "digital evidence" ve "machine leraning" olduğu görülmüştür. En az 5 kez görülen ve birbiriyle ilişkili olduğu belirlenen 1.171 gözlem birimi üzerinde yapılan analizler sonucunda toplamda 22 küme, 16.323 bağlantı ve 30.996 toplam bağlantı gücü tespit edilmiştir. Yayınlarda en sık kullanılan anahtar kelime bağları haritası Şekil 8'de sunulmuştur.



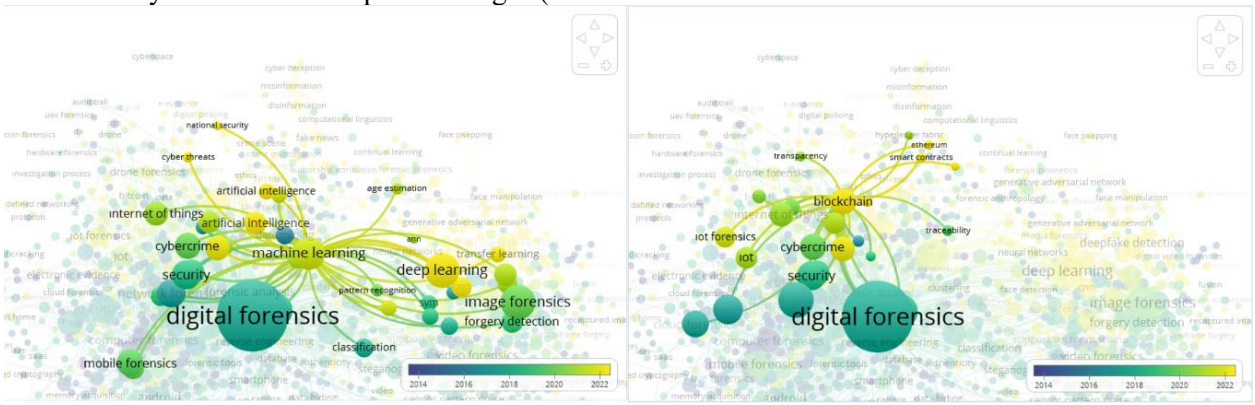
Şekil 8. Yayınlarda en sık kullanılan anahtar kelime bağları haritası (Keyword network map)

Şekil 9 üzerinde belirtildiği üzere anahtar kelime bulutunda "computer forensics (Bilgisayar adli bilişimi)" özelinde çalışmaların yer aldığı görülmektedir. Bu anahtar kelimenin bulunduğu kümede ise "digital media (dijital medya)", "digital video (Dijital video) ", "disk forensic (disk adli bilişimi)", "carving (veri hasatı)", "face recognition (yüz tanıma)", "file system (dosya sistemi)", "file types (dosya tipleri)", "hardware security (donanım güvenliği)", "recovery (veri kurtarma) ", "registry forensics (kayıt defteri analizi)" gibi bilgisayarın çalışması için gerekli olan temel birimler ve işletim sistemi üzerinde yapılan işlemler olduğu gözlenmektedir. 2016 yılından sonra ise "digital evidence (dijital delil)", electronic evidence (elektronik delil)", "Cloud computing/forensics (bulut bilişim/adli bilişimi)" anahtar kelimelerinin; 2018 yılından sonra "cyber crime/forensics (siber suç/adli bilişimi)", "mobile forensics (mobil adli bilişimi)" ve 2022'den sonra "IoT forenscis (Nesnelerin interneti adli bilişimi)" anahtar kelimelerinin "computer forensic" anahtar kelimesi ile ön plana çıktığı görülmektedir.



Şekil 9. En sık kullanılan anahtar kelimelerin 2014-2022 arası zaman haritası (a) (Time map of most frequently used keywords from 2014 to 2022)

Şekil 10 üzerindeki zaman haritasında görüldüğü gibi 2022 yılından sonra "machine learning (makine öğrenmesi)" ve "blockchain (blok zinciri)" anahtar kelimelerinin ön plana çıktığı görülmektedir. Machine learning anahtar kelimesi ile bu alanın alt alanları sayılabilecek "deep learning (derin öğrenme)", artificial intelligence (yapay zekâ)" anahtar kelimeleri ile çalışma alanı olan "deepfake detection (deepfake algılama)" gibi anahtar kelimelerin birliktelikleri ön plana çıkmaktadır. Blockchain anahtar kelimesi ile de "etherium" ve "smart contract (akıllı sözleşme)" anahtar kelimelerinin birlikteliği görülmektedir.

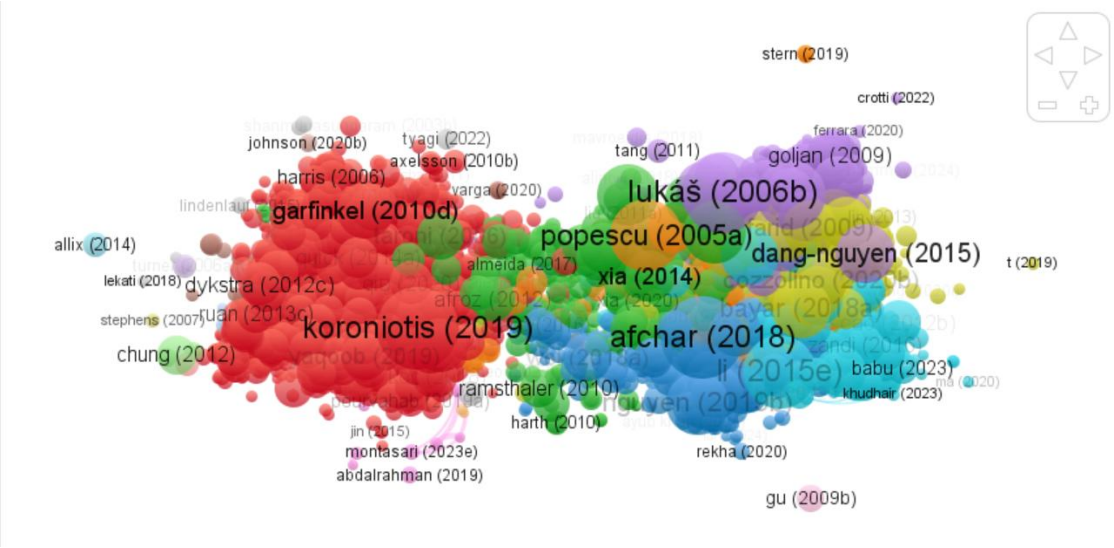


Şekil 10. En sık kullanılan anahtar kelimelerin 2014-2022 arası zaman haritası (b) (Time map of most frequently used keywords from 2014 to 2022)

5.9. Yayınların Bibliyografik Eşleşme Analizi
(Bibliographic Coupling of Documents)

Yayınlar arası bibliyografik eşleşme, farklı kaynaklardan yapılan iki ayrı atıfın aynı yayına yapıldığı durumu belirtmektedir [36]. En az beş atıf alma kriterine göre belirlenen 4315 makale üzerinden yapıla eşleşme analizine göre 26 küme, 278.757 bağlantı ve 439.122 toplam bağlantı gücü elde edilmiştir. Şekil 11 üzerinde yayınların eşleşme analizine ilişkin ağ haritası görülmektedir. En fazla eşleşme sayısına sahip olan yayınlar sırasıyla 1127 atıf ile Afchar vd. [37], 1203 atıf ile Koroniotis vd. [38], 1131 atıf ile Luka vd. [39], 877 atıf ile Jian Liv d. [40] ve 755 atıf ile Popescu ve Farid [41] olmuştur. En yüksek bağlantı gücüne sahip makaleler ise sırasıyla 3494 ile Zheng vd. [42], 2851 ile Qureshi ve Deriche [43], 2338 ile Bourouis vd. [44], 2269 ile Capasso vd. [45] ve 1853 ile Kaur vd. [46] olmuştur.

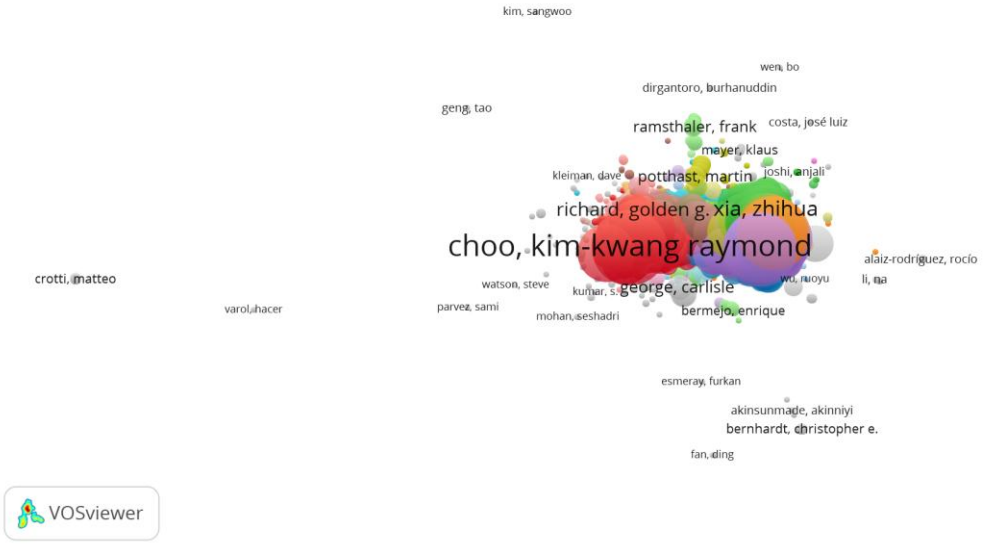
Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde eşleşme sayısı ile bağlantı gücü arasında bir ilişki olmadığı açıktır. Söz konusu veriler ışığında, alandaki öncü nitelikli geçmiş çalışmaların yüksek bir eşleşme/bağlantı değerine sahip olduğu; yeni çalışmaların ise alandaki önceki literatürden faydalanarak analiz edilen diğer yayınlarla güçlü bağlar kurduğu çıkarımı yapılabilir.



Şekil 11. Yayınların bibliyografik eşleşme analizine ilişkin ağ haritası (Network map for bibliographic matching analysis of publications)

5.10. Yazarların Bibliyografik Eşleşme Analizi (Bibliographic Coupling of the Authors)

Yapılan analizde, en az 5 yayına ve 1 atıfa sahip, birbiriyle bağlantılı toplam 9324 öğe incelenmiş. Bu inceleme sonucunda 87 küme, 2.432.269 bağlantı ve 10.242.269 toplam bağlantı gücü tespit edilmiştir. Yazarlar arasında en fazla bibliyografik eşleşmeye sahip olanlar ise sırasıyla Hany Farid (4.838 atıf ve 25940 bağlantı gücü), Jessica Fridrich (3.514 atıf ve 18641 bağlantı gücü) ve Kim-Kwang Raymond Choo (3.058 atıf ve 104.672 bağlantı gücü) olarak belirlenmiştir. Yazarlar arası bibliyografik eşleşme haritası Şekil 12'de sunulmuştur.



Şekil 12. Yazarların bibliyografik eşleşme analizine ilişkin ağ haritası (Network map of authors' bibliographic matching analysis)

6. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Bilimin küresel bir olgu haline gelmesiyle birlikte, bilim insanları, araştırma kurumları ve üniversiteler arasındaki iletişimin, iş birliğinin ve bilgi paylaşımının coğrafi sınırların ötesine taşındığı bir süreç başlamıştır. Bu durum, farklı ülkelerdeki bilimsel paydaşlar arasındaki iş birliğini teşvik etmiş ve bilimsel yayınlar ile araştırma çıktılarının daha geniş kitlelere erişimini kolaylaştırmıştır. Bilimsel literatürdeki bu artış ve yaygınlaşma, bibliyometrik çalışmaları önemli bir araştırma alanı olarak konumlandırmıştır [36].

Bu çalışma, uluslararası alan yazında 'adli bilişim' (digital forensics) kavramının mevcut durumunu ve gelişim aşamasını belirlemek amacıyla Scopus veri tabanında yer alan yayınları incelemeyi hedeflemiştir. Araştırma kapsamında, adli bilişim alanındaki literatürün sistematik, nesnel ve kapsamlı bir değerlendirmesini sunmak amacıyla ortak atıf analizi, anahtar kelime analizi, ortak yazar analizi ve bibliyografik eşleşme analizi gibi çeşitli bibliyometrik yöntemler ve görselleştirme teknikleri kullanılmıştır.

Çalışmanın veri toplama aşamasında, nitelikli ve güvenilir geniş kapsamlı bir yayın havuzuna sahip olan Scopus veri tabanında arama seçeneği olarak "başlık", "özet" ve "anahtar kelime" alanları seçilmiş ve 'digital forensics' anahtar kelimesi ile bir sorgulama gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar makale, bildiri, kitap ve kitap bölümü türleriyle sınırlandırılarak toplam 10.414 yayına erişilmiştir. Bu yayın kümesi üzerinde anahtar kelime, yazar, ülke ve kurum bazında yapılan analizlere ait ağ haritalarını görselleştirmek amacıyla VOSviewer yazılımı kullanılmıştır.

Araştırmanın temel amaçları doğrultusunda aşağıdaki araştırma sorularına yanıt aranmıştır:

- Araştırma Sorusu 1: Adli bilişim alanı ile ilgili yayınların performans göstergeleri nelerdir?

Adli bilişim ile ilgili alan yazın yazarlığı ve küresel dağılım incelendiğinde Amerika Birleşik Devletleri'nin atıf açısından en fazla yayına ve etkiye sahip olduğu görülürken en yakın takipçisi olan Çin'i ikiye katlamış durumdadır. Birleşik Krallık ise aldığı atıf sayıları ile üçüncü konumda yer almaktadır. Alan yazına kazandırılan eser sayısı ile aldığı atıf sayısı orantılı olmayan ülke Hindistan yayın sayısında ikinci sırada iken atıf sayısı bakımından dördüncü sıradadır. Grand View Research [47] adli bilişim market paylaşımı konusunda yayınlamış olduğu rapora göre, Amerika Birleşik Devletleri dünyada en büyük pazar payına sahip ülke konumundadır. Birleşik Krallık ise Avrupa bölgesinde lider konumda yer almaktadır. Asya pasifik pazarında ise Hindistan, Çin ve Japonya'nın marketi yönettiği göze çarpmaktadır. Aynı raporda LogRhythm gibi öncü firmaların Hindistan'daki araştırma geliştirme faaliyetlerini genişlettiği belirtilmiştir. Yayın sayılarının market paylaşımı ile doğru orantılı olduğu görülmekle birlikte, Hindistan özelinde yayın sayısı ile atıf sayısının doğru orantılı olmamasının yayın kalitesinden çok pazara sonradan dahil olması sebebiyle daha yeni tarihli yayınlarının eski tarihli yayınlara göre daha az atıf almasındaki doğallıktan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Al-Raggad ve Al Raggad'ın [27] Web of Science veri tabanında bulunan yayınlarla gerçekleştirdikleri bibliyometrik analizinin sonuçları ile de doğru orantılı olarak her geçen yıl adli bilişime olan katkının arttığı görülmektedir.

Atıflar ve yayınlar bazında kuruluşlar incelendiğinde yine Amerika Birleşik Devletleri'nin alandaki öncülüğü ortaya çıkmaktadır. En çok atıf alan ilk 3 kurumun ikisini, ilk beş kurumun dördünü ABD oluşturmaktadır. İlk 5'e girebilen tek ülke ise Japonya'dır. Alana katkı sağlayan yazarlar incelendiğinde de bu ilk 5 kurumda görev yapan araştırmacıların en yüksek atıf sayısına eriştiği de görülmektedir.

En çok atıf alan araştırmacılar incelendiğinde Hany Farid'in (ABD) alanda ilklerden sayılabilecek ve yüksek atıf sayısı ile öne çıkan eserin [41] de yazarlarından biri olduğu, yazarın 139 eserle hala adli bilişim alanına katkı sunuyor olduğu görülmüştür. Jessica Fridrich'in (ABD) de benzer şekilde alanda ilklerden sayılabilecek ve yüksek atıf sayısı ile öne çıkan eserin [39] de yazarlarından biri olduğu, yazarın 233 eserle hala adli bilişim alanına katkı sunuyor olduğu görülmüştür. Bu durum Chhatrapati vd. [22] ve Goyal [23] çalışmaları ile paralellik göstermektedir. Kim-Kwang Raymond Choo'nun (ABD) ise yayınlarının ilk iki yazar kadar atıf almadığı ancak sadece adli bilişim alanına sunduğu 122 yayın ile aldığı atıflar ile 3. sırada yer aldığı görülmektedir.

Çalışmalar yayın bazında incelendiğinde "MesoNet: A compact facial video forgery detection network" [37] isimli eser 1277 atıf ile en yüksek atıf sayısına sahiptir. Bu yayın deepfake (bir yapay zeka teknolojisi) teknolojisi ile multimedya dosyaları üzerinde yapılan tahrifatları belirlemeye çalışan ilk eser olma özelliğini taşımaktadır [48]. Eseri ortaya koyan araştırmacılar incelendiğinde ise Darius Afchar'ın alanda yeni bir araştırmacı olduğu

ancak diğer yazarların (Isao Echizen, Junichi Yamagishi) alana hala görüntü ve ses inceleme konularında katkı sunduğu görülmüştür. Diğer bir çalışma "Towards the development of realistic botnet dataset in the Internet of Things for network forensic analytics: Bot-IoT dataset" [38] ise atıf sayısı bakımında ikinci konuma sahiptir. Çalışma incelendiğinde ağ adli bilişimi için kullanılabilecek bir veri seti sağladığı, bu veri setinin de alanda çalışan diğer araştırmacılar tarafından kullanıldığından yüksek atıf sayılarına ulaştığı görülmektedir. Çalışmayı gerçekleştiren yazarlar incelendiğinde adli bilişim alanından çok nesnelerin interneti alanında çalışma gerçekleştirdikleri, adı geçen çalışmada da nesnelerin interneti üzerinde adli bilişim çalışmaları yapılabilecek bir veri seti oluşturdukları görülmüştür. Yayınlar arası bibliyografik eşleşme analizinde de bu yazarların önde çıkmalarının sebebi bu yayındır. Aynı analizde adı geçen Alin C. Popescu ise toplamda 5 adet yayını bulunmakta olup hepsi de görece yüksek atıf sayısına sahiptir. Belirtilen bu beş yayının da en çok atıf alan araştırmacı olan Hany Farid ile birlikte gerçekleştirildiği görülmektedir. Adli bilişim alanında çalışma gerçekleştirecek olan araştırmacıların yazar ve ülke ve kurum olarak yukarıda belirtilen analizler ışığında araştırmalarını gerçekleştirmeleri uygun olacaktır.

- Araştırma Sorusu 2: Adli bilişim alanı ile ilgili yayınların kavramsal yapısı nasıldır ve ön plana çıkan unsurlar nelerdir?

Alanın katkı sunduğu araştırma disiplinleri incelendiğinde %60'lık bir çalışmanın bilgisayar ve mühendislik bilimleri ile ilgili olduğu görülmektedir. Sadece %8.2'lik bir kısmının sosyal bilimler alanı ile ilgili olduğu görülmektedir. Bilgisayarların iş ve işlemler için kullanılmaya başlamasından, bu işlemlerin suça konu olabileceğinin de öngörülmesine kadar geçen süre kısa olarak nitelendirilemez. Bu sebeple, Birinci Uluslararası Bilgisayar Delilleri konferansının 1993 yılında yapılmasından [15], yaklaşık 10 yıl geçtikten sonra 36 akademik çalışmaya erişebilen alanda sosyal bilimler disiplininde görece az çalışmanın olmasının doğal olduğu değerlendirilmektedir. Ülkemizde de "Bilgisayarlarda, bilgisayar programlarında ve kütüklerinde arama, kopyalama ve elkoyma" başlığıyla Ceza Muhakemesi Kanunu'nun (CMK) 134. Maddesi, 1 Haziran 2005 tarihinde yürürlüğe girmiştir [49].

Eserlerde kullanılan anahtar kelimeler incelendiğinde son yıllarda hemen her alanda çalışması bulunan deep learning (derin öğrenme), machine learning (makine öğrenmesi) ve artificial intelligence (yapay zeka) anahtar kelimelerinin üst sıralarda yer aldığı görülmektedir. Bu üç anahtar kelime büyük veri analizi çalışmalarında birliktelik gösteren anahtar kelimelerdir [50]. Derin öğrenme, klasik makine öğrenimi yöntemlerinin aksine, resim, video ve ses verilerinin işaretlerinden, yerine getirmesi gereken işlevleri otomatik olarak öğrenebilmektedir [51]. Derin öğrenme uygulamaları, Google'ın AlphaGo ve Deep Dream, Facebook'un Deep Text, Baidu'nun insansız kara aracı ve IFLYTEK'in konuşma tanıma sistemi gibi birçok uluslararası şirket tarafından başarıyla hayata geçirilmiştir. Ayrıca, görüntü tanıma, el yazısı karakter tanıma, semantik segmentasyon, insan seviyesinde kontrol, yüz tanıma, yüz tespiti, yüz sahteciliği, insan eylemi tanıma ve tıbbi görüntü analizi gibi alanlarda da yaygın olarak kullanılmıştır [52]. Kasım 2022'de lansmanı yapılan, OpenAI tarafından geliştirilen ChatGPT olarak adlandırılan, insan benzeri metin yanıtları oluşturmasıyla bilinen yapay zeka uygulaması, çok yönlü sohbet robotu ile ilgili Ocak 2023 ile 24 Haziran 2024 tarihleri arasında, 1404 dergide 3231 orijinal makale yayımlanmış olup, makale başına ortalama 5,6 atıf oranı bulunmaktadır [53]. Dolayısıyla adli bilişim alanında da benzer yoğunlukta bir çalışmanın yapılmış ve yapılacak olduğu söylenebilir.

Analizlerde ortaya çıkan anahtar kelimelerden Cloud computing (bulut bilişim), Internet of Things (IoT- nesnelerin interneti) ve mobile forensics (mobil adli bilişim) de teknolojinin yönü ile doğru orantılıdır. We Are Social Digital'in hazırlandığı 2024 yılına ait rapora [16] göre nüfusun yaklaşık %98'inin herhangi bir tipte mobil telefonu varken yaklaşık %60'ının bilgisayarı bulunmaktadır. Kablosuz teknoloji bağlamında, beşinci nesil (5G) teknolojisi kablosuz araştırmalarında en zorlu ve ilgi çekici konu haline gelmekle birlikte, 5G sistemindeki IoT'in gelecek nesilde oyunun kurallarını değiştireceği öngörülmektedir [54]. Son yıllarda küresel çapta hızla yayılan bulut bilişim ve Nesnelerin İnterneti (IoT), bir araya geldiğinde dikkate değer özellikler sergileyerek, bulut depolama ve hesaplama kapasitesinden faydalanarak veri geliştirme ve biriktirmeye yönelik çeşitli uygulamaların geliştirilmesine olanak tanıyacağı da öngörülmektedir [55]. Dolayısıyla bu alanların da araştırmacılar tarafından incelenmesinin faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar kelimelerden digital evidence (dijital delil), security (güvenlik), cybercrime (siber suç) ve incident response (olay müdahalesi) daha çok sosyal alanda çalışılan anahtar kelimeler olarak

değerlendirilmektedirler. Dijital delil en çok kullanılan 2. Anahtar kelime olmasına karşın diğerleri görece daha az kullanılmışlardır. Sosyal bilimler alanında çalışma yapacak olan araştırmacıların bu anahtar kelimeleri kullanarak çalışmalarının görünürlüklerini artırabilecekleri değerlendirilmiştir.

Bu çalışma, adli bilişim alanına hem teorik hem de pratik düzeyde önemli katkılar sunmaktadır. Teorik açıdan, mevcut literatürden farklı olarak kendine özgü arama stratejisi, yıl kapsamı ve makale sayısıyla özellikle Türkçe literatüre değerli bir katkı sağlamaktadır. Pratik düzeyde ise, araştırmacıların ve bilim uzmanlarının adli bilişim konusundaki farkındalıklarını artırmayı ve bu alandaki gelecekteki çalışmalara yol gösterici bir nitelik taşımayı hedeflemektedir. Siber uzayın ve siber saldırıların sürekli değişen boyutu ve yöntemleri göz önüne alındığında, yeni teknolojiler bağlamında adli bilişim araştırmalarına duyulan ihtiyacın artması bu çalışmanın önemini vurgulamaktadır. Kısıtlar bölümünde belirtildiği üzere, bu araştırma yalnızca Scopus veri tabanındaki kayıtlarla sınırlıdır. Anahtar kelimelerin kullanım yoğunluğu göz önüne alındığında, bu konuların özellikle bilgisayar bilimleri ve mühendislik disiplinlerindeki çalışmalarda daha fazla yer alabileceği öngörülmektedir. Bu nedenle, benzer bir konudaki ileriki çalışmaların mühendislik ve bilgisayar bilimleri temelli eserlerin daha sık bulunduğu Web of Science gibi başkaca veri tabanlarını da içermesi önerilmektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Onur CERAN: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] E. H. Yükseloğlu, Ş. Ş. Özcan, and B. Ceylan, 'Olay yeri incelemesi ve Türkiye'deki uygulamalar', *Polis Bilimleri Dergisi*, vol. 10, no. 1, pp. 61–80, 2008.

[2] N. Menek and U. Taşdöven, 'Adli Bilimlerde Kriminalistik ve Luminol', *Adli Bilimler ve Suç Araştırmaları*, vol. 3, no. 1–2, pp. 3–17, 2021.

[3] R. Şamlı, 'Türk ve Dünya hukukunda bilişim suçları', *Akademik Bilişim*, vol. 10, pp. 10–12, 2010.

[4] N. A. Almubairik and F. Alam Khan, 'Systematic Literature Review on Wearable Digital Forensics: Acquisition Methods, Analysis Techniques, Tools, and Future Directions', *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 2, pp. 1320–1342, Jan. 2025, doi: 10.1109/JIOT.2024.3485027.

[5] T. Henkoğlu, *Adli bilişim: Dijital delillerin elde edilmesi ve analizi*. Pusula, 2020.

[6] D. Gedik, 'BİLİŞİM SUÇLARINDA IP TESPİTİ İLE EKRAN GÖRÜNTÜLERİ ÇIKTILARININ İSPAT DEĞERİ', *Bilişim Hukuku Dergisi*, vol. 1, no. 1, pp. 51–84, 2019.

[7] N. M. Karie and H. S. Venter, 'Taxonomy of Challenges for Digital Forensics', *Journal of Forensic Sciences*, vol. 60, no. 4, pp. 885–893, Jul. 2015, doi: 10.1111/1556-4029.12809.

[8] H. Arshad, A. B. Jantan, and O. I. Abiodun, 'Digital Forensics: Review of Issues in Scientific Validation of Digital Evidence.', *Journal of Information Processing Systems*, vol. 14, no. 2, 2018.

[9] S. Keskin, 'Bilişim Suçlarında Ceza Muhakemesi Kanunun 134. Maddesindeki Hükümlerin Uygulanmasında Yaşanan Aksaklıklar', *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, vol. 11, no. 2, pp. 649–667, 2021.

[10] M. Erdem and G. Özocak, 'Siber Güvenliğin Sağlanmasında Uluslararası Hukukun ve Türk Hukukunun Rolü', *Ankara Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, vol. 68, no. 1, pp. 127–212, Apr. 2019, doi: 10.33629/auhfd.553979.

[11] L. K. Berber, *Adli bilişim (computer forensic)*. Ankara: Yetkin Yayınları, 2004.

[12] Y. Başlar, 'Adli Bilişim Sürecinde Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Önerileri', *Türkiye Barolar Birliği Dergisi*, no. 148, p. 47, May 2020.

[13] S. Raghavan, 'Digital forensic research: current state of the art', *CSIT*, vol. 1, no. 1, pp. 91–114, Mar. 2013, doi: 10.1007/s40012-012-0008-7.

[14] J. Slay, Y.-C. Lin, B. Turnbull, J. Beckett, and P. Lin, 'Towards a formalization of digital forensics', in *Advances in Digital Forensics V: Fifth IFIP WG 11.9 International Conference on Digital Forensics, Orlando, Florida, USA, January 26-28, 2009, Revised Selected Papers 5*, Springer, 2009, pp. 37–47.

[15] M. Pollitt, 'A History of Digital Forensics', in *Advances in Digital Forensics VI*, vol. 337, K.-P. Chow and S. Shenoi, Eds., in IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 337. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 3–15. doi: 10.1007/978-3-642-15506-2_1.

[16] S. Kemp, 'We are Social', 2024. [Online]. Available: https://wearesocial.com/us/blog/2024/01/digital-2024

[17] H. N. Fakhouri, M. A. AlSharaiah, A. K. Al Hwaitat, M. Alkalaileh, and F. F. Dweikat, 'Overview of Challenges Faced by Digital Forensic', in *2024 2nd International Conference on Cyber Resilience (ICCR)*, Dubai, United Arab Emirates: IEEE, Feb. 2024, pp. 1–8. doi: 10.1109/ICCR61006.2024.10532850.

[18] P. Sravani, 'Digital Forensics Market Size, Share, Report, Growth Analysis'. Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: https://www.precisionbusinessinsights.com/market-reports/digital-forensics-market

[19] F. Casino *et al.*, 'Research Trends, Challenges, and Emerging Topics in Digital Forensics: A Review of Reviews', *IEEE Access*, vol. 10, pp. 25464–25493, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3154059.

[20] T. Wu, F. Breitinger, and S. O'Shaughnessy, 'Digital forensic tools: Recent advances and enhancing the status quo', *Forensic Science International: Digital Investigation*, vol. 34, p. 300999, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.fsidi.2020.300999.

[21] G. Horsman and N. Sunde, 'Unboxing the digital forensic investigation process', *Science & Justice*, vol. 62, no. 2, pp. 171–180, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.scijus.2022.01.002.

[22] D. Chhtrapati, S. P. Chaudhari, D. Mevada, A. Bhatt, and D. Trivedi, 'Research Productivity and Network Visualization on Digital Evidence: A Bibliometric Study', *Science & Technology Libraries*, vol. 40, no. 4, pp. 358–372, Oct. 2021, doi: 10.1080/0194262X.2021.1948486.

[23] R. Goyal, 'Blockchain Technology in Forensic Science. A Bibliometric Review', in *2021 3rd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N)*, Greater Noida, India: IEEE, Dec. 2021, pp. 1570–1573. doi: 10.1109/ICAC3N53548.2021.9725660.

[24] E. Ramadhani, D. Hariyadi, and F. E. Nastiti, 'A Bibliometrics Analysis of Digital Forensics Research in Indonesia Based on Scopus Index: 2012-2021', in *2022 IEEE 7th International Conference on Information Technology and Digital Applications (ICITDA)*, Yogyakarta, Indonesia: IEEE, Nov. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICITDA55840.2022.9971449.

[25] E. Ramadhani and D. Hariyadi, 'A Bibliometrics Analysis of Multimedia Forensics and Deep Learning Research Based on Scopus Index', *JITSI: Jurnal Ilmiah Teknologi Sistem Informasi*, vol. 4, no. 3, pp. 129–133, 2023.

[26] R. D. Syahputri, A. Anggono, P. Prasetyono, and M. Djasuli, 'Evolution and Research Opportunities of Digital Forensic Tools: A Bibliometric Analysis', *CogITo Smart Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 474–485, 2024.

[27] A. K. AL-Raggad and M. Al-Raggad, 'Analyzing trends: A bibliometric study of administrative law and forensic accounting in the digital age', *Heliyon*, vol. 10, no. 18, p. e37462, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e37462.

[28] Y. Lu, J. Liu, and R. Zhang, 'Current Status and Trends in Image Anti-Forensics Research: A Bibliometric Analysis', *arXiv preprint arXiv:2408.11365*, 2024.

[29] H. Ying *et al.*, 'A bibliometric analysis of research on heart failure comorbid with depression from 2002 to 2021', *Heliyon*, vol. 9, no. 2, p. e13054, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13054.

[30] M. Aria and C. Cuccurullo, 'bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis', *Journal of Informetrics*, vol. 11, no. 4, pp. 959–975, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.joi.2017.08.007.

[31] N. Van Eck and L. Waltman, 'Software survey: VOSviewer, a computer program for

bibliometric mapping', *scientometrics*, vol. 84, no. 2, pp. 523–538, 2009.

[32] 'Scopus | Abstract and citation database | Elsevier', www.elsevier.com. Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: https://www.elsevier.com/products/scopus

[33] A. N. Guz and J. J. Rushchitsky, 'Scopus: A system for the evaluation of scientific journals', *Int Appl Mech*, vol. 45, no. 4, pp. 351–362, Apr. 2009, doi: 10.1007/s10778-009-0189-4.

[34] Z. Ayaz, 'Sosyal Medya Analitiği Konulu Akademik Çalışmaların Bibliyometrik Analizi', *Yeni Medya Dergisi*, Oct. 2024, doi: 10.55609/yenimedya.1527131.

[35] A. Stasi, T. U. G. Mir, A. Pellegrino, A. K. Wani, and S. Shukla, 'Forty years of research and development on forensic genetics: A bibliometric analysis', *Forensic Science International: Genetics*, vol. 63, p. 102826, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.fsigen.2023.102826.

[36] M. Tanriverdi, 'Yalın Yönetim Kavramı Üzerine Yapılan Çalışmaların Bibliyometrik Analizi', *TurkishStudies*, vol. Volume 19 Issue 2, no. Volume 19 Issue 2, pp. 567–585, 2024, doi: 10.7827/TurkishStudies.73226.

[37] D. Afchar, V. Nozick, J. Yamagishi, and I. Echizen, 'MesoNet: a Compact Facial Video Forgery Detection Network', in *2018 IEEE International Workshop on Information Forensics and Security (WIFS)*, Hong Kong, Hong Kong: IEEE, Dec. 2018, pp. 1–7. doi: 10.1109/WIFS.2018.8630761.

[38] N. Koroniotis, N. Moustafa, E. Sitnikova, and B. Turnbull, 'Towards the development of realistic botnet dataset in the Internet of Things for network forensic analytics: Bot-IoT dataset', *Future Generation Computer Systems*, vol. 100, pp. 779–796, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.future.2019.05.041.

[39] J. Luka, J. Fridrich, and M. Goljan, 'Digital Camera Identification From Sensor Pattern Noise', *IEEE Trans.Inform.Forensic Secur.*, vol. 1, no. 2, pp. 205–214, Jun. 2006, doi: 10.1109/TIFS.2006.873602.

[40] Jian Li, Xiaolong Li, Bin Yang, and Xingming Sun, 'Segmentation-Based Image Copy-Move Forgery Detection Scheme', *IEEE Trans.Inform.Forensic Secur.*, vol. 10, no. 3, pp. 507–518, Mar. 2015, doi: 10.1109/TIFS.2014.2381872.

[41] A. C. Popescu and H. Farid, 'Exposing digital forgeries by detecting traces of resampling', *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 53, no. 2, pp. 758–767, Feb. 2005, doi: 10.1109/TSP.2004.839932.

[42] L. Zheng, Y. Zhang, and V. L. L. Thing, 'A survey on image tampering and its detection in real-world photos', *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 58, pp. 380–399, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jvcir.2018.12.022.

[43] M. A. Qureshi and M. Deriche, 'A bibliography of pixel-based blind image forgery detection techniques', *Signal Processing: Image Communication*, vol. 39, pp. 46–74, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.image.2015.08.008.

[44] S. Bourouis, R. Alroobaea, A. M. Alharbi, M. Andejany, and S. Rubaiee, 'Recent Advances in Digital Multimedia Tampering Detection for Forensics Analysis', *Symmetry*, vol. 12, no. 11, p. 1811, Nov. 2020, doi: 10.3390/sym12111811.

[45] P. Capasso, G. Cattaneo, and M. De Marsico, 'A Comprehensive Survey on Methods for Image Integrity', *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.*, vol. 20, no. 11, pp. 1–34, Nov. 2024, doi: 10.1145/3633203.

[46] N. Kaur, N. Jindal, and K. Singh, 'Passive Image Forgery Detection Techniques: A Review, Challenges, and Future Directions', *Wireless Pers Commun*, vol. 134, no. 3, pp. 1491–1529, Feb. 2024, doi: 10.1007/s11277-024-10959-x.

[47] Grand View Research, 'Digital Forensics Market Size, Share & Trends Analysis Report By Component (Hardware, Software, Service), By Type (Computer Forensics, Cloud Forensics), By Tool, By End-use, By Region, And Segment Forecasts, 2024 - 2030', Grand View Reseach, San Francisco, Market Analysis GVR-4-68038-135-1. Accessed: May 16, 2025. [Online]. Available: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/digital-forensics-market

[48] M. S. Rana, M. N. Nobi, B. Murali, and A. H. Sung, 'Deepfake Detection: A Systematic Literature Review', *IEEE Access*, vol. 10, pp. 25494–25513, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3154404.

[49] Resmi Gazete, 'Mevzuat Bilgi Sistemi'. Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=5271&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5

[50] J. Z. Zhang, P. R. Srivastava, D. Sharma, and P. Eachempati, 'Big data analytics and machine learning: A retrospective overview and bibliometric analysis', *Expert Systems*

with Applications, vol. 184, p. 115561, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.115561.

[51] E. DiKbiyik, Ö. DemiR, and B. Doğan, 'Derin Öğrenme Yöntemleri İle Konuşmadan Duygu Tanıma Üzerine Bir Literatür Araştırması', *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 10, no. 4, pp. 765–791, Dec. 2022, doi: 10.29109/gujsc.1111884.

[52] Y. Li, Z. Xu, X. Wang, and X. Wang, 'A bibliometric analysis on deep learning during 2007–2019', *Int. J. Mach. Learn. & Cyber.*, vol. 11, no. 12, pp. 2807–2826, Dec. 2020, doi: 10.1007/s13042-020-01152-0.

[53] M. Koo, 'ChatGPT Research: A Bibliometric Analysis Based on the Web of Science from 2023 to June 2024', *Knowledge*, vol. 5, no. 1, p. 4, Feb. 2025, doi: 10.3390/knowledge5010004.

[54] L. Chettri and R. Bera, 'A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems', *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 1, pp. 16–32, Jan. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2019.2948888.

[55] M. Mohammed Sadeeq, N. M. Abdulkareem, S. R. M. Zeebaree, D. Mikaeel Ahmed, A. Saifullah Sami, and R. R. Zebari, 'IoT and Cloud Computing Issues, Challenges and Opportunities: A Review', *QAJ*, vol. 1, no. 2, pp. 1–7, Mar. 2021, doi: 10.48161/qaj.v1n2a36.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 877-891 (2025)

Comparative Analysis with PVGIS and PVsyst for Solar Energy Production in Bahşılı Region of Kırıkkale

Beyza YILDIRIM*[1] Hidir DUZKAYA[2]

[1]*Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, Turkey*

[2]*Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-Electronics Engineering, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 19/03/2025
Revision:26/05/2025
Accepted: 26/07/2025

Keywords

Photovoltaic Systems
Solar Energy Plants
PVSyst
PVGIS

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/03/2025
Düzeltme: 26/05/2025
Kabul: 26/07/2025

Anahtar Kelimeler

Fotovoltaik Sistemler
Güneş Enerji Santrali
PVSyst
PVGIS

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study compares PVGIS and PVsyst simulations to evaluate the solar energy potential of a 15 MW fixed-axis PV system in Bahşılı, Kırıkkale. / Bu çalışma, Bahşılı/Kırıkkale'de 15 MW sabit eksenli bir PV sistemin güneş enerjisi potansiyelini değerlendirmek amacıyla PVGIS ve PVsyst simülasyonlarını karşılaştırmaktadır.

***Table A.** Comparison of PVGIS and PVsyst simulation results with the 30° tilt angle / **Tablo A.**(30 derece açı ile PVGIS ve PVsyst simülasyon karşılaştırılması*

Months	***PVGIS Data (KWh)***	***PVsyst Data (KWh)***
Jan.	*1.075*	*1.710*
Feb.	*1.398*	*2.158*
Mar.	*2.051*	*2.782*
Apr.	*2.340*	*2.996*
May.	*2.473*	*3.348*
Jun.	*2.657*	*3.426*
Jul.	*2.951*	*3.541*
Aug.	*2.917*	*3.601*
Sep.	*2.543*	*3.273*
Oct.	*2.109*	*2.686*
Nov.	*1.697*	*2.009*
Dec.	*1.181*	*1.649*
TOTAL	*25.392*	*33.179*

Highlights (Önemli noktalar)

- *PVSyst enables detailed modeling of system components and loss mechanisms. / PVsyst, sistem bileşenleri ve kayıp mekanizmalarının ayrıntılı modellenmesini sağlar.*
- *PVGIS offers rapid estimations using satellite-based datasets. / PVGIS, uydu tabanlı veri setleriyle hızlı tahminler sunar.*
- *Tracking systems increase annual energy yield by approximately 24%. / Takip sistemleri yıllık enerji üretimini yaklaşık %24 oranında artırmaktadır.*

***Aim (Amaç):** To evaluate the solar energy production potential of a fixed-axis photovoltaic system in Bahşılı, Kırıkkale, through a comparative analysis of PVGIS and PVsyst simulation tools. / Bahşılı/Kırıkkale bölgesinde sabit eksenli bir fotovoltaik sistemin güneş enerjisi üretim potansiyelini, PVGIS ve PVsyst simülasyon araçlarının karşılaştırmalı analizi yoluyla değerlendirmek*

***Originality (Özgünlük):** This study provides a methodological comparison of PVGIS and PVsyst outputs for the same geographical location, emphasizing the impact of simulation parameters and modeling depth on energy yield predictions. / Bu çalışma, aynı coğrafi konum için PVGIS ve PVsyst çıktılarının yöntemsel karşılaştırmasını sunmakta; simülasyon parametreleri ile modelleme derinliğinin enerji üretim tahminlerine etkisini vurgulamaktadır.*

***Results (Bulgular):** PVSyst estimated 33.179 GWh/year, while PVGIS predicted 25.392 GWh, revealing a 30% gap. Tracking systems raised this figure to 41.09 GWh./ PVsyst yıllık 33,179 GWh, PVGIS ise 25,392 GWh öngörerek %30'luk bir fark ortaya koymuştur. Takip sistemleri üretimi 41,09 GWh'ye çıkarmıştır.*

***Conclusion (Sonuç):** The study shows that simulation tool choice and modeling approach notably influence energy forecasts. Tracking systems, though costlier, enhance performance and investment feasibility. / Çalışma, simülasyon aracı ve modelleme yaklaşımının enerji tahminlerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Takip sistemleri, yüksek maliyetlerine rağmen performansı ve yatırım fizibilitesini artırmaktadır.*

*Corresponding author, e-mail: beyzayildirim9940@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc. 1661431

GU J Sci, Part C, 13(3): 877-891 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Comparative Analysis with PVGIS and PVSyst for Solar Energy Production in Bahşılı Region of Kırıkkale

Beyza YILDIRIM[*1] *Hıdır DÜZKAYA*[2]

[1]*Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, Turkey*

[2]*Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-Electronics Engineering, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 19/03/2025
Revision:26/05/2025
Accepted: 26/07/2025

Keywords

Photovoltaic Systems
Solar Energy Plants
PVSyst
PVGIS

Abstract

This study examines the energy production potential of a fixed-axis photovoltaic (PV) system in the Bahşılı region of Kırıkkale, using PVGIS and PVsyst simulation software. The research highlights the increasing significance of renewable energy in Turkey, particularly in light of the country's commitment to achieving net-zero emissions by 2053. Solar tracking systems have been identified as a promising technology for enhancing solar energy efficiency, yet their high initial costs and maintenance requirements present challenges. Through comparative simulations, the study finds that PVSyst estimates annual energy production at 33.179 GWh, approximately 30% higher than the 25.392 GWh predicted by PVGIS. This discrepancy is attributed to methodological differences, with PVsyst offering more detailed component analysis and loss evaluations. The research underscores the importance of simulation accuracy in project planning and emphasizes the potential benefits of solar tracking systems despite their limitations. Future work will focus on incorporating solar tracking systems into the analysis and validating simulation results with real-world field data. The findings contribute to more effective solar energy project planning and development of sustainable energy solutions in Turkey.

Kırıkkale Bahşılı Bölgesinde Güneş Enerjisi Üretiminin PVGIS ve PVSyst ile Karşılaştırmalı Analiz

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/03/2025
Düzeltme: 26/05/2025
Kabul: 26/07/2025

Anahtar Kelimeler

Fotovoltaik Sistemler
Güneş Enerji Santrali
PVSyst
PVGIS

Öz

Bu çalışma, Kırıkkale'nin Bahşılı bölgesinde sabit eksenli bir fotovoltaik (PV) sistemin enerji üretim potansiyelini PVGIS ve PVsyst simülasyon yazılımları kullanarak incelemektedir. Araştırma, Türkiye'nin 2053 yılına kadar net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda yenilenebilir enerji kaynaklarının artan önemine dikkat çekmektedir. Güneş takip sistemleri, güneş enerjisi verimliliğini artırmada umut vadeden bir teknoloji olarak öne çıkmakla birlikte, yüksek ilk yatırım maliyetleri ve bakım gereksinimleri nedeniyle bazı zorluklar barındırmaktadır. Karşılaştırmalı simülasyonlar sonucunda, PVsyst yazılımının yıllık enerji üretimini 33,179 GWh olarak tahmin ettiği, bunun da PVGIS tarafından öngörülen 25,392 GWh'ye kıyasla yaklaşık %30 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu fark, PVsyst'in daha ayrıntılı bileşen analizi ve kayıp değerlendirmeleri sunması gibi yöntemsel farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Araştırma, proje planlamasında simülasyon doğruluğunun önemini vurgulamakta ve sınırlamalarına rağmen güneş takip sistemlerinin potansiyel faydalarını ön plana çıkarmaktadır. Gelecek çalışmalarda, güneş takip sistemlerinin analize dahil edilmesi ve simülasyon sonuçlarının saha verileriyle doğrulanması hedeflenmektedir. Elde edilen bulgular, Türkiye'de daha etkili güneş enerjisi projelerinin planlanmasına ve sürdürülebilir enerji çözümlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Energy has been a determining factor in the development of civilizations throughout history. The adoption of fossil fuels as the primary energy source during the Industrial Revolution led to a significant increase in global energy demand. However, the finite nature of fossil fuel reserves and their environmental impacts have heightened interest in renewable energy sources. In this context, solar energy, a sustainable and abundantly available energy source, is pivotal in transforming the global

*Corresponding author, e-mail: beyzayildirim9940@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc. 1661431

energy supply [1]. In recent years, the share of solar energy in the global energy portfolio has been steadily increasing, emerging as one of the fastest-growing sectors among renewable energy sources. Studies indicate that solar energy significantly contributes to the global energy transition and accelerates the shift from fossil fuels to renewable energy. Additionally, it is emphasized that solar energy has the potential to enhance energy security and contribute to sustainable development, particularly in developing regions [2].

Solar energy is identified as a critical technology for global energy transition. For developing countries, solar energy offers economic and environmental advantages, positioning it as a key player in the renewable energy transition [3].

Türkiye's solar energy potential is high; however, numerous studies suggest that this potential has not been fully harnessed. Utilizing Turkey's solar energy potential effectively ensures a sustainable long-term energy supply. Turkey can significantly enhance its energy security and achieve its environmental targets by increasing investments in solar energy infrastructure [4].

Due to geographical advantages, Türkiye's substantial solar energy potential, if effectively utilized, is projected to contribute significantly to the country's renewable energy goals. These developments indicate that Türkiye is taking decisive steps to enhance its solar energy capacity, aligning with global trends [5]. As of 2024, Türkiye's installed solar energy capacity reached 20,016 MW (Ministry of Energy and Natural Resources [6]. This growth aligns with global renewable energy trends and supports Türkiye's goal of achieving net-zero emissions by 2053, according to the Paris Agreement [5].

Simulation software is critical in solar power plants' design, installation, and performance analysis. PVsyst and PVGIS are two prominent tools widely used for the performance analysis of photovoltaic (PV) systems. Both offer distinct advantages and may be preferred for different purposes. These tools model various processes—from initial plant design to optimization of energy production, assisting in evaluating the economic feasibility of projects [7].

PVsyst is considered a comprehensive tool for simulating PV systems. It utilizes various meteorological data to model and predict the energy production of plants [8]. Studies highlight the importance of considering local climatic conditions when using PVsyst, as it operates in harmony with regional data to predict the efficiency of solar energy systems more accurately. Similarly, PVGIS, developed by the European Commission, is a geographic information system-based tool used to assess the energy production potential of PV systems [7]. It offers a quick and user-friendly analysis of solar energy potential for specific locations. Huld et. Al. (2020) note that PVGIS provides reliable results in analyzing solar energy potential across vast regions such as Europe and Africa.

Some studies in Türkiye have compared the performance analyses of PVGIS and PVsyst across different regions to evaluate the accuracy of these tools. For instance, a study conducted in Uşak and Kayseri found that PVsyst values were 4.3% higher than actual production data, while PVGIS estimates were 2.3% lower [9].

PVsyst can perform detailed analyses concerning system design and energy production estimates. Offering detailed modeling and performance analysis of system components can more accurately simulate the efficiency of solar energy systems under various conditions. Particularly for investors and engineers, PVsyst provides robust tools to assess the economic feasibility of solar power plants [10]. However, PVsyst requires more extensive data and necessitates users to have a comprehensive understanding of system design. On the other hand, PVGIS is a powerful tool based on large databases, such as the European Commission's Solar Energy Map, providing solar irradiance data geographically. PVGIS is effective, especially quickly and accurately, in providing solar irradiance data [11]. While PVGIS lacks detailed modeling and analysis features for system design, it is helpful for general efficiency assessments.

Several studies have examined the comparative performance of PVGIS and PVsyst under varying climate conditions and system configurations. For instance, Limem and Sezen (2021) evaluated both software tools for a 5.1 kWp grid-connected PV system in Central Anatolia, finding that PVsyst provided more accurate energy yield predictions due to its detailed treatment of system and component-level losses. Similarly, Karaoğlan and Öztürk (2023) investigated the efficiency of fixed and dual-axis tracking systems in Central Anatolia, highlighting that PVsyst accounts for factors such as temperature and shading more comprehensively. In contrast, PVGIS relies on extensive global datasets and thus offers a fast and user-friendly means of conducting preliminary feasibility analyses; however, it lacks extensive customization

options for specific panels and inverters. Across the literature, predicted energy output discrepancies between PVGIS and PVsyst are reported to range from approximately 2% to 30%, depending on local site conditions, the chosen meteorological database (e.g., SARAH-2, HelioClim, or Meteonorm), and how system losses (including soiling, cable resistance, and module mismatch) are modeled. Consequently, when deciding between these tools, researchers and practitioners are advised to consider the scope and detail required by the project, the representativeness of the available data, and the necessity for advanced loss modeling or rapid preliminary estimates.

Both tools have their limitations. While PVsyst offers in-depth analysis for more complex systems, it may require users to have experience and technical knowledge. PVGIS, with its more straightforward and user-friendly interface, has limitations in conducting in-depth performance analyses.

This study aims to compare PVGIS and PVsyst software to evaluate the solar energy production potential of the Bahşılı region. Both tools are widely used to model and simulate the performance of photovoltaic systems, each with its advantages and limitations. In this study, conducted for a solar power plant with an installed capacity of 15 MW, we aim to analyze the accuracy of the results obtained through both tools and assess the solar energy potential in the region. Additionally, considering solar radiation data and climatic conditions in the Bahşılı region, a comparison of simulations provided by both tools will be conducted. This analysis aims to contribute to developing recommendations to enhance the efficiency of solar energy projects in similar regions across Türkiye.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

2.1. Geographical and Solar Characteristics of the Region (Bölgenin Coğrafi ve Güneş Enerjisi Özellikleri)

In this study, the installation of a solar power plant in Kırıkkale province and the data obtained were examined. Analyses conducted using PVsyst and PVGIS software indicate that, according to data provided by the General Directorate of Renewable Energy, Kırıkkale's average solar radiation is approximately 1470 kWh/m². As shown in Figure 1, this value decreases to 1440 kWh/m² in the northern district of Sulakyurt, while it increases to 1490 kWh/m² in the southern district of Çelebi. Although Kırıkkale's solar energy potential is above the national average, it is generally considered low within the region [6].

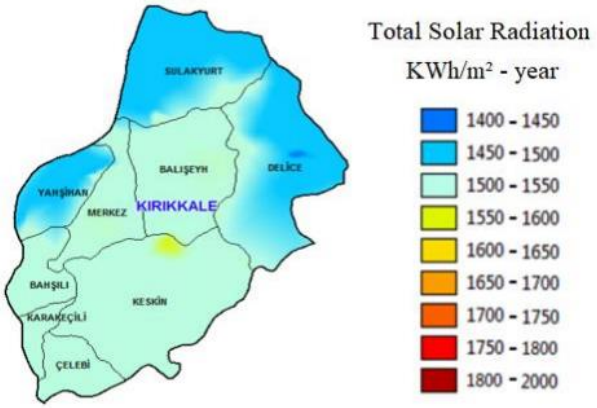


Figure 1. Solar energy potential of Kırıkkale [6] (Kırıkkle güneş enerjisi potansiyeli)

The location information and climate data of the Bahşili region in Kırıkkale province are presented in Table 1. Kırıkkale's geographical coordinates are 39.8451° N latitude and 33.5065° E longitude, with an elevation of 700 meters above sea level. The province exhibits continental climate characteristics characterized by hot summers and cold winters. These geographical and climatic features play a significant role in evaluating the region's solar energy potential.

Table 1. Geographical and Climatic Characteristics of Bahşılı/Kırıkkale Province (Bahşılı/Kırıkkale İlçesinin Coğrafi ve İklimsel Özellikleri)

Characteristic	Value
Latitude	39.8451° N
Longitude	33.5065° E
Elevation	700 meters
Climate Type	Continental Climate

2.2. Simulation Methods (Simülasyon Metodları)

The use of up-to-date and reliable simulation tools is of great importance for the performance analysis and design of solar energy systems. In this study, data obtained from PVGIS and PVsyst software were used. These software tools are widely recognized for their capabilities in photovoltaic system design, efficiency analysis, and performance evaluation [12]. They are essential tools in the design and performance analysis of solar energy systems, playing critical roles in project planning and implementation. Particularly in countries with high solar energy potential, such as Turkey, these tools help optimize photovoltaic systems and enhance the accuracy of energy production forecasts [13].

2.2.1 PVGIS Photovoltaic Georaphical Information Sytems (PVGIS Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi)

PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) is a simulation software developed by the Joint Research Centre (JRC) of the European Commission to assess solar energy potential on a global scale. In addition to providing solar radiation data for specific geographical locations, this software estimates energy production for different photovoltaic (PV) system configurations [12]. Using long-term meteorological datasets, PVGIS enables predicting solar energy system performance in real-world conditions. Due to this capability, it is widely regarded as a valuable tool for investment feasibility studies and potential energy efficiency analyses. PVGIS relies on historical meteorological data to provide reliable solar radiation estimates, making it a crucial resource for preliminary feasibility assessments. The calculations performed by PVGIS are based on standard radiation models specified in the technical documents of the European Commission [13].

The simulation outputs provided by PVGIS allow users to estimate the potential energy generation of a planned PV system based on specific system parameters. However, PVGIS is limited to analyzing the performance of fixed-angle PV systems and does not directly evaluate solar tracking systems. Therefore, additional software tools are required for the comparative analysis of dynamic systems. The PVGIS system interface is illustrated in Figure 2.

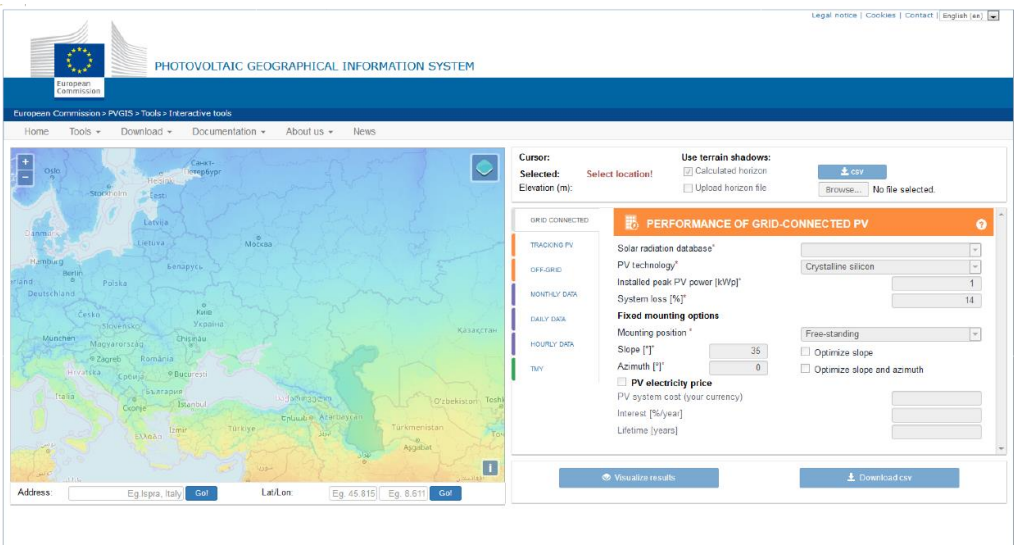


Figure 2. PVGIS system interface (PVGIS sistem arayüzü)

$$GT = GbT + GdT + GrT \tag{1}$$

$$P(G'_T, T') = G'_T * \left(\rho_{SCT,m} + k_1 \ln(G'_T) + k_2 \ln(G'_T)^2\right) + k_3 T' + k_4 T' \ln(G'_T) + k_5 T' \ln(G'_T)^2 + k_6 T'^2 \tag{2}$$

$$G'_T \equiv G_T / G_{SCT}$$

$$T' \equiv T_{mod} - T_{SCT}$$

$$\eta_{rel}(G'_T, T') \equiv P(G'_T, T') / \left(\rho_{SCT,m} G'_T\right) \tag{3}$$

According to equation 1; GT represents the total radiation value the panel shares. GbT is the inclined direct radiation value, GdT is the diffuse radiation value, and GrT is the reflected radiation value [W/m²] [14].

The PVGIS algorithm estimates the system's AC power output by accounting for losses from inverters, wiring, and soiling. According to research, total system losses typically range between 10% and 15%.

2.2.2 PVSyst / PV Systems (PVSyst / PV Sistem)

PVsyst is a simulation program developed by the University of Geneva in Switzerland for solar energy investments [15]. The software covers grid-connected and off-grid photovoltaic (PV) systems and offers various applications such as data analysis, system sizing estimates, equipment selection, and brand/model comparisons. Thanks to the Meteonorm database, users can access monthly and yearly temperature data for different countries and cities. At the same time, Google Maps integration allows them to examine land features and location information to identify suitable solar power plant sites [16] .

One of PVsyst's key features is its ability to perform energy production simulations by considering meteorological data, shading losses, and system components (inverters, batteries, etc.) [10]. The software uses the single-diode model to predict the current voltage (I-V) characteristics of PV modules.

It ensures accurate system performance calculation under varying irradiance and temperature conditions [17]. By separately evaluating the direct, diffuse, and albedo radiation components, it calculates shading losses, thereby improving the accuracy of energy production forecasts [18]. The ability to conduct time series simulations by integrating hourly meteorological data helps optimize system performance during the pre-design phase of solar energy projects. This function is especially important for feasibility studies and financial evaluations in large-scale solar investments [19]. The PVsyst system interface is shown in Figure 3.

surface of the workpiece was leveled and the position of the workpiece was fixed by verifying with the "line" formed from one side of the keyseat. "t1" measurement results were obtained by calculating the plane on the ground and the extreme point of the outer diameter. The "b" measurement results were obtained with the lines obtained by contacting two points on the side surfaces of the keyseat. Radius (R) measurements were obtained with circles created by touching three points, and the distance measurement between the circles and the "L" dimension were checked. Perpendicular to the ground "line" was formed from the side walls of the keyseat, and perpendicularity checks were made with the plane on the floor. All calibration and measurement processes were carried out at 21°C. The experimental setup and workflow are shown in Figure 3.

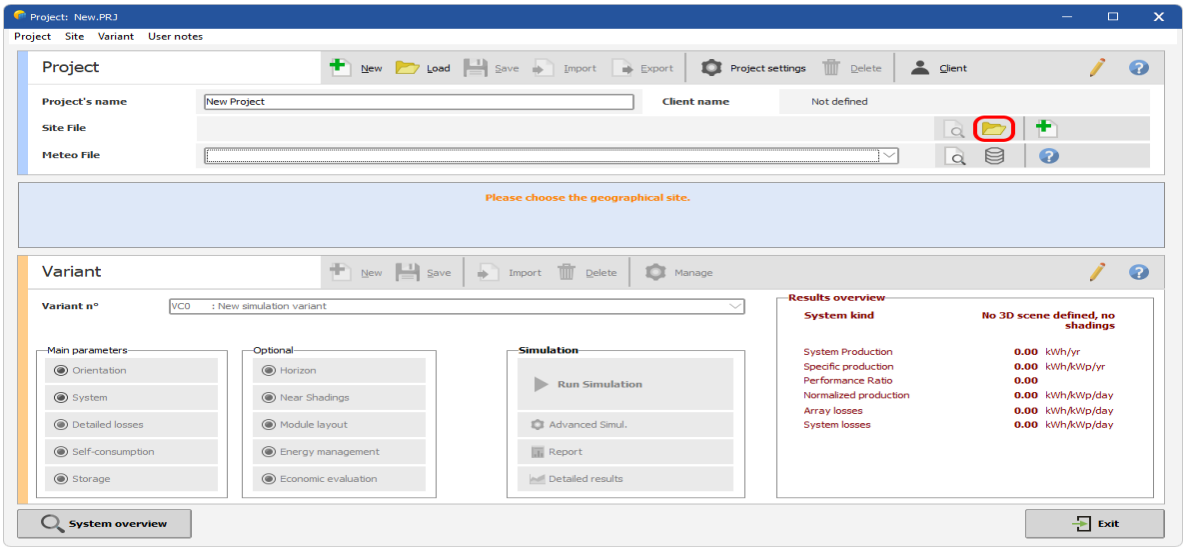


Figure 3. PVsyst system interface (PVSyst sistem arayüzü)

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{N_{cs} \cdot \gamma \cdot k_B \cdot T_c}{q \cdot (V + I \cdot R_s)}\right) - 1\right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}}$$

PVsyst uses the single-diode model to simulate the electrical behavior of solar panel modules. This model defines the voltage-current (I-V) characteristics of a PV cell and is based on the following equation:

The meanings and scientific explanations of the parameters in this equation are as follows. I represent the current generated by the module (amperes), while V denotes the voltage across the module terminals (volts). I_{ph}represents the photovoltaic current (amperes), and I_0, indicates the reverse saturation current of the diode (amperes). $R_s$is the series resistance (ohms), and $R_{sh}$is the shunt resistance (ohms). q refers to the electron charge (1.602×10^{-19} C), while N_{cs} represents the number of cells connected in series. γ indicates the quality factor of the diode, and k_B represents the Boltzmann constant (1.381×10^{-23} J/K). Finally, T_c, denotes the cell temperature (in Kelvin). This equation is used to predict the performance of solar panel modules by considering the effects of variables such as solar irradiance and cell temperature. Additionally, the PVsyst software analyzes the solar irradiance, composed of direct, diffuse, and albedo components, separately to calculate shading losses. For the direct irradiance component, a shading factor is determined based on the sun's position, while for the diffuse and albedo components, integration is performed over all sky directions [8]. This allows the shading factors to be calculated independently of the sun's position.

This model defines the current-voltage (I-V) characteristics of a PV module, allowing the prediction of its performance under varying irradiance and temperature conditions. Additionally, PVsyst separately analyzes the components of solar radiation, direct, diffuse, and albedo, and evaluates shading losses, calculating specific shading factors for each component. For the direct radiation component, a shading factor is determined based on the sun's position. In contrast, for the diffuse and albedo components, integration is performed over all sky directions, resulting in shading factors independent of the sun's position [8].

3. RESULT and DISCUSSINS (Sonuç ve Tartışma)

The findings obtained in this study provide a comparative evaluation of the performance of PVGIS and PVsyst simulation software in photovoltaic energy production forecasting. Previous studies conducted in Anatolia and surrounding regions have shown that PVGIS generally excels in large-scale regional analyses, while PVsyst stands out in more detailed system design and component optimization [4]. It is noted that PVGIS predicts average solar irradiance using satellite-based data, but it may not fully adapt to local conditions in detailed land-specific analyses [20]. On the other hand, due to PVsyst's more detailed calculation of meteorological data and system losses, it has been observed to provide more reliable results, especially in the investment and feasibility stages [20][21].

Our findings show that, compared to other studies conducted in similar climate conditions, PVsyst has a lower margin of error in energy production forecasts by more accurately modeling shading losses and temperature effects. However, it has been determined that PVGIS offers fast and accessible predictions on a regional scale using large datasets, providing an advantage especially in pre-feasibility analyses [22]. Other studies conducted in the Anatolia region also reveal that PVsyst provides more realistic results by accounting for detailed parameters such as system losses, panel temperature, and slope optimization [23]. Moreover, PVGIS's open database and the fact that it does not require any software installation provides a significant advantage, particularly for small-scale projects and academic studies.

The monthly average solar radiation data for the Bahşılı region of Kırıkkale obtained from PVsyst are presented in Figure 4. According to this graph, the highest radiation value for Kırıkkale occurs in July, while the lowest radiation value is observed in December.

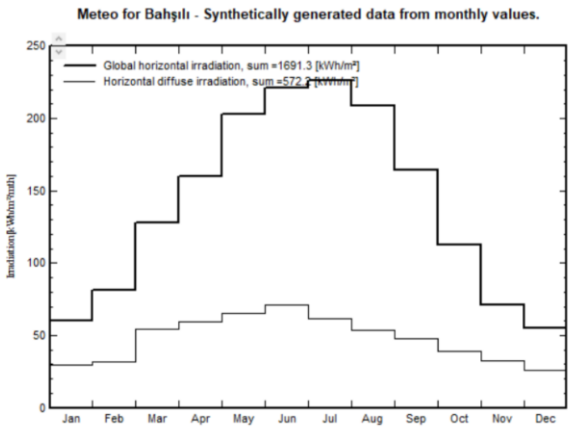


Figure 4. Kırıkkale PVsyst monthly radiation value (Kırıkkale PVsyst aylık güneşlenme değerleri)

3.1 PVGIS Result (PVGIS Sonucu)

In this study, the simulation for the Bahşılı region of Kırıkkale, Turkey, as specified in Table 2, was conducted using PVGIS. The PVGIS-SARAH-2 database containing solar irradiance data was used for the simulations. For the photovoltaic system performance analysis, the panel tilt angle was set to 30°, and the azimuth angle was set to 0°. In the system using crystalline silicon PV panels, the total installed capacity was modeled as 15 MW. The obtained results provide an important reference for evaluating the solar energy potential of the region and analyzing the accuracy of the PVGIS simulations.

Table 2. PVGIS simulation inputs (PVGIS simülasyon girdileri)

Simulation Inputs	Values
Location	Bahşili/Kırıkkale/Turkey
Database Used	PVGIS-SARAH-2
Tilt Angle	30°
Azimuth Angle	0 °
PV Used	Crystal Silicon
Installed Power	15 MW

When the fixed-system solar power plant planned for the Bahşılı/Kırıkkale location is analyzed using the PVGIS database, the values presented in Figure 5 are obtained. The simulation results indicate specific losses, including a 2.74% loss due to the angle of incidence, a 0.46% loss from spectral effects, and a 7.59% loss related to temperature and low irradiance. The estimated total overall system loss is calculated as 9.71% in the final report.

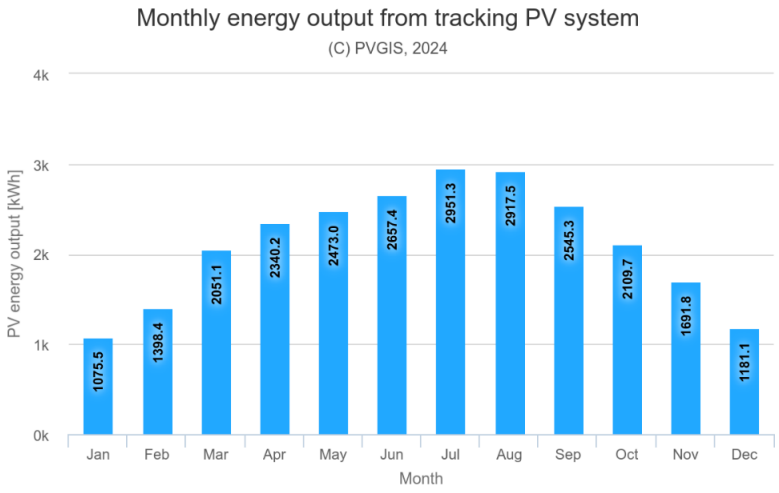


Figure 5. Monthly PVGIS energy output [kWh] (Aylık PVGIS enerji çıktısı [kWh])

3.2. PVsyst Result (PVsyst Sonucu)

In this study, the PS-550-M6H-24-TH-1500V photovoltaic panel from Phono Solar and the SUN2000-100KTL-M1-400Vac inverter manufactured by Huawei Technologies were selected. The details of these components are presented in Table 3.

Table 3. Panel and Inverter details used (Kullanılan panel ve invertör detayları)

Panel	Inverter
Manufacturer: Phono Solar	Manufacturer: Huawei Technology
Model: PS-550-M6H-24-TH-1500V	Model: SUN2000-100KTL-M1-400Vac
Unit Strength: 550 Wp	Unit Strength:100 kWac
Nominal (STC): 19.80 MWp	Operating Voltage:200-1000 V
Modules: 2250 String x 16 in Series	Pnom Ratio (DC:AC): 1.32
Total: 36000 Modules	Total: 150 Inverters

Fixed System (Sabit Sistem)

In this study, the tilt angle was set to 30°, as shown in Figure 6. This means that the angle between the photovoltaic panels and the ground surface is 30°. Considering that the system operates on a fixed axis, this configuration is optimized to ensure consistent solar irradiance exposure throughout the day. As a result, the energy received by the panel surface is maximized, enhancing the overall energy production efficiency throughout the year.

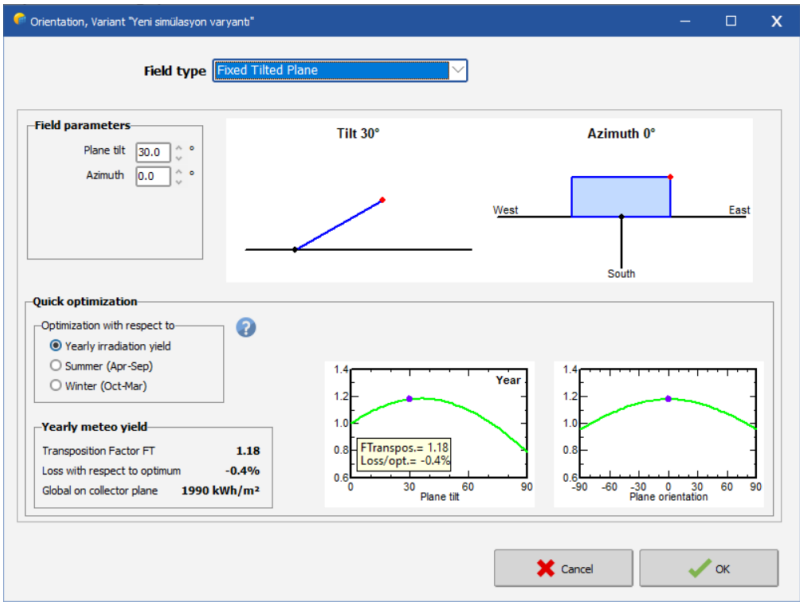


Figure 6. Fixed system placement angle (Sabit Sistem Yerleşim Açısı)

As shown in Figure 7, the total energy production of the system is 33.18 GWh per year. The analysis of system performance reveals that photovoltaic (PV) losses amount to 0.66 kWh per kWp per day, while inverter losses are calculated as 0.09 kWh per kWp per day. Considering these losses, the usable energy output of the system is determined to be 4.59 kWh per kWp per day. These values emphasize the overall efficiency of the system and illustrate the influence of different loss factors on the total energy yield.

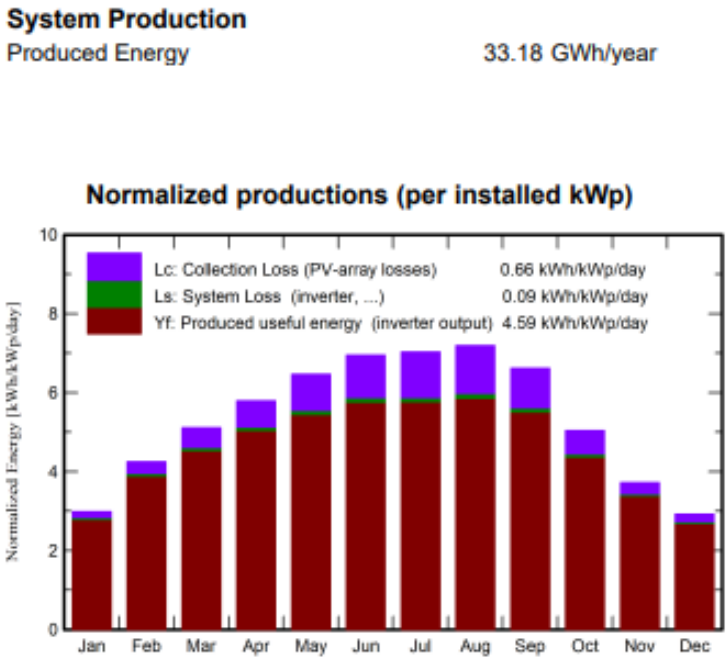


Figure 7. Monthly PVGIS fixed system energy output [kWh] (PVGIS sabit sisteminin aylık enerji üretimi [kWh])

Based on the calculations, the system is expected to generate 37.52 GWh of electricity. However, PV system losses, including inverter inefficiencies and cable resistance, significantly impact overall performance, as demonstrated in comparative studies as shown in table 4. Considering PV losses, inverter efficiency, cable losses, and other technical factors, the net energy output is estimated at approximately 33.18 GWh. These losses are critical factors affecting the actual energy production of the system, and the calculations have been optimized with measures aimed at minimizing them.

Table 4. PVsyst Fixed system monthly value based on simulation data (PVsyst sabit sisteminin simülasyon verilerine göre aylık çıktıları)

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	EArray GWh	E_Grid GWh	PR Ratio
Jan.	60.3	29.80	1.741	1.710	0.934
Feb.	81.2	31.70	2.197	2.158	0.917
Mar.	127.9	54.10	2.833	2.782	0.888
Apr.	159.6	59.30	3.051	2.996	0.872
May.	203.1	65.40	3.411	3.348	0.844
Jun.	221.4	70.80	3.492	3.426	0.830
Jul.	226.1	62.00	3.612	3.541	0.821
Aug.	209.1	53.60	3.675	3.601	0.816
Sep.	164.0	48.10	3.336	3.273	0.833
Oct.	112.3	38.80	2.735	2.686	0.868
Nov.	71.3	32.30	2.044	2.009	0.911
Dec.	55.0	26.30	1.679	1.649	0.921
Year	**1691.3**	**572.20**	**33.807**	**33.179**	**0.860**

Tracker System (Hareketli Sistem)

Tracking systems, unlike fixed systems, are not installed at a constant angle and adjust their orientation based on the sun's position throughout the day. This movement is enabled by tracker systems and communication modules. Figure 8 in the PVsyst report illustrates the panel layout, tracking system mounting type, and maximum-minimum tilt angles relative to the surface**.**

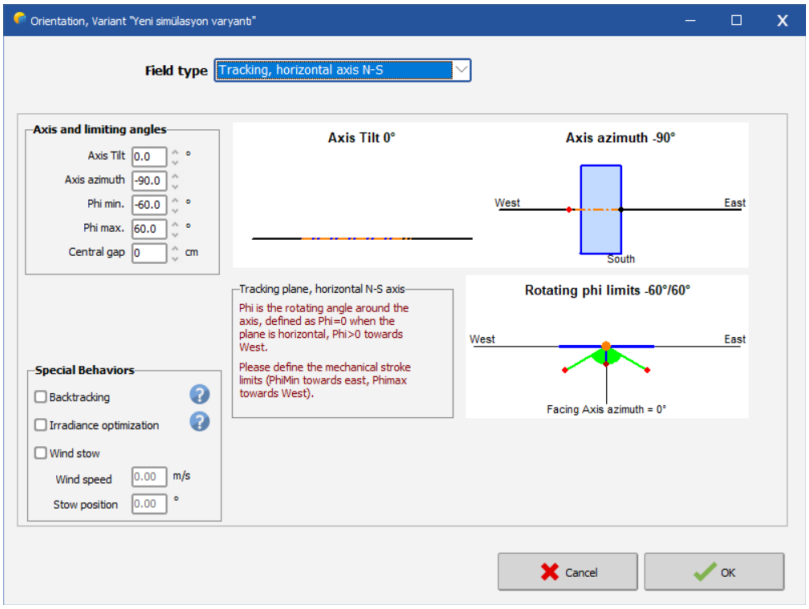


Figure 8. Tracker system placement angle (Takip sisteminin yerleşim açısı)

As seen in Figure 9 the total energy production is expressed in GWh/year, and the monthly losses are detailed as follows: PV losses (Lc) are 0.79 kWh/kWp/day, inverter losses (Ls) are 0.11 kWh/kWp/day, resulting in a usable energy output of 5.69 kWh/kWp/day.

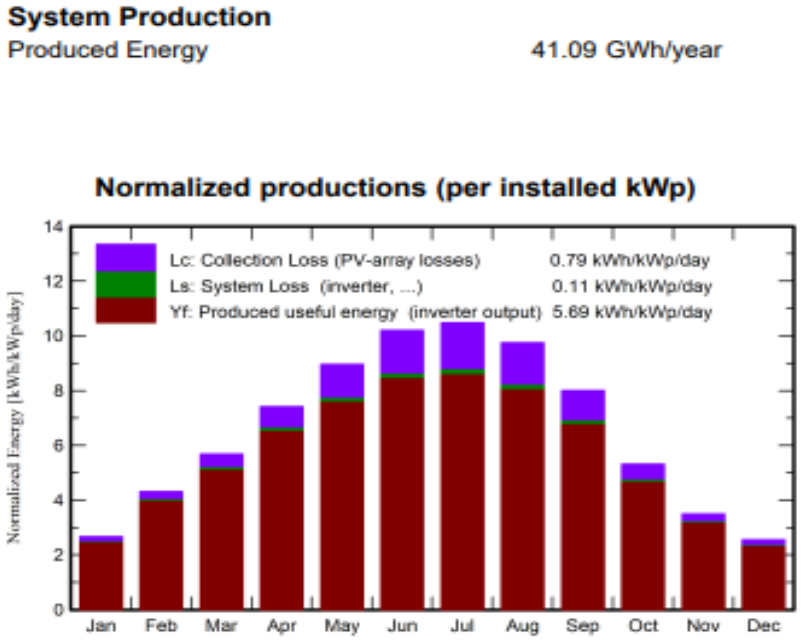


Figure 9. Monthly PVGIS tracker system energy output [kWh] (PVGIS sistemine ait aylık enerji çıktısı [kWh])

According to the report data obtained from the PVSyst simulation program (Table 5), it is projected that the 15 MW solar power plant, planned to be installed with a tracking system in the Bahşılı district of Kırıkkale, will generate a total of approximately 41.088 GWh of energy over the course of a year. August contributes the highest share to this production, while December has the lowest production level.

Table 5. PVsyst tracker system monthly value based on simulation (PVsyst sisteminin simülasyona göre çıktıları)

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	EArray GWh	E_Grid GWh	PR Ratio
Jan.	60.3	29.80	1.556	1.529	0.936
Feb.	81.2	31.70	2.263	2.223	0.928
Mar.	127.9	54.10	3.217	3.159	0.905
Apr.	159.6	59.30	3.974	3.902	0.886
May.	203.1	65.40	4.776	4.683	0.851
Jun.	221.4	70.80	5.147	5.045	0.832
Jul.	226.1	62.00	5.414	5.301	0.824
Aug.	209.1	53.60	5.067	4.961	0.829
Sep.	164.0	48.10	4.129	4.050	0.852
Oct.	112.3	38.80	2.938	2.886	0.885
Nov.	71.3	32.30	1.935	1.903	0.917
Dec.	55.0	26.30	1.472	1.447	0.922
Year	**1691.3**	**572.20**	**41.887**	**41.088**	**0.864**

The simulation outcomes obtained via PVSyst indicate that the annual energy yield for the fixed photovoltaic system configuration is approximately 33.18 GWh (E_Grid). In contrast, by setting the azimuth angle to -180° for the single-axis tracking configuration—while it was 30° for the fixed system—the projected energy output increases to 41.09 GWh annually. This analysis demonstrates that employing a tracking system enhances energy generation by approximately 23.82% compared to its fixed counterpart. It is important to note that these results were derived using PVSyst software, as PVGIS does not currently support energy simulations for tracking systems. Therefore, PVSyst was preferred in this study to enable a comprehensive comparison between fixed and tracking photovoltaic configurations.

3.3. Comparison of PVGIS and PVsyst (PVGIS ve PVsyst Karşılaştırılması)

Table 6 presents a comparative analysis of the PVsyst and PVGIS software, offering a comprehensive evaluation of their shared characteristics and distinct features. This comparison enables a systematic assessment of their capabilities in photovoltaic system modeling, including aspects such as meteorological data sources, simulation methodologies, system loss estimations, and performance evaluation metrics. By examining the similarities and differences between these two tools, it becomes possible to identify their respective strengths and limitations, thereby facilitating a more informed selection process based on the specific requirements of solar energy feasibility studies and system design applications.

Table 6. Comparison of PVGIS and PVsyst Simulation (PVGIS ve PVsyst simülasyonlarının karşılaştırılması)

Ability	PVGIS	PVsyst
Grid Design (On/Of Grid)	X	√
Meteonorm Data Access	√	√
PV and Inverter Selection	X	√
Loss Analysis	X	√
Radiation Value Data (KWh)	√	√
Determining the Tilt Angle	√	√
Fixed System Design	√	√
Tracker System Design	X	√

Table 7 presents a comparative analysis of the energy yield values obtained from PVGIS and PVsyst simulations for a fixed photovoltaic system with a tilt angle of 30°. This comparison provides insight into the consistency and variability of the results generated by both software tools, allowing for a detailed assessment of their accuracy in modeling solar energy production under identical system parameters.

Table 7. Comparison of PVGIS and PVsyst Simulation Results with the 30° Tilt Angle (30° panel eğimiyle PVGIS ve PVsyst simülasyon sonuçları karşılaştırması)

Months	PVGIS Data (KWh)	PVsyst Data (KWh)
Jan.	1.075	1.710
Feb.	1.398	2.158
Mar.	2.051	2.782
Apr.	2.340	2.996
May.	2.473	3.348
Jun.	2.657	3.426
Jul.	2.951	3.541
Aug.	2.917	3.601
Sep.	2.543	3.273
Oct.	2.109	2.686
Nov.	1.697	2.009
Dec.	1.181	1.649
TOTAL	**25.392**	**33.179**

The most apparent reasons for the differences in production estimates are:

- PVGIS does not allow the user to input specific information about the inverter and panel data, relying solely on the selection of land area.

- PVGIS cannot accurately account for material losses such as cables and panels.

- The methodological differences between PVGIS and PVsyst have been shown to cause significant deviations in energy efficiency predictions, especially in arid regions, as demonstrated in studies [24].

When comparing the simulation results obtained from PVGIS and PVsyst software for a 15 MW project, PVGIS predicts an annual energy production of 25,392 kWh, while PVsyst forecasts this value as 33,179 kWh. The difference between the two software predictions is approximately 30%, with the average annual energy production calculated as 29,285.5 kWh. This discrepancy arises from various factors, such as meteorological data sets, simulation algorithms, and underlying assumptions. PVsyst provides a more comprehensive simulation by offering a more detailed system component analysis and loss evaluations. Therefore, it is expected to provide higher production forecasts [25]. The analysis highlights the differences in energy production predictions between PVGIS and PVsyst software, offering valuable insights into which software might be more suitable for planning and evaluating solar energy systems.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study comparatively examines energy production forecasts and economic feasibility analyses for a 15 MW capacity fixed-axis photovoltaic (PV) system in the Kırıkkale/Bahşılı region. The PVGIS and PVsyst simulation tools used in the study revealed significant differences in annual energy production. The annual energy production predicted by PVGIS was 25.392 MWh, while the production calculated by PVsyst was found to be 33.179 MWh. This difference of approximately 30.6% highlights the significant impact of the modeling approaches on energy production forecasts. PVsyst's ability to conduct detailed component modeling and loss analysis enables more realistic system performance predictions. In this context, the differences are mainly due to PVsyst considering losses such as thermal losses, contamination, shading, and

mismatch, whereas PVGIS uses a more simplified loss model [26].

Additionally, it has been observed that solar tracking systems can increase energy production by up to approximately 20%. In this case, annual energy production rises to around 41.09 GWh with tracking systems [4]. Although tracking systems involve additional investment costs, the increase in production they provide can further shorten the payback period [27]. Therefore, opting for tracking systems instead of fixed systems can be considered a strategy that strengthens the economic feasibility of the investment.

Future research could approach the cost-effectiveness analysis of fixed and moving systems from a more detailed perspective, examining installation, operation, and maintenance costs and the achieved energy production levels. Comparative feasibility studies conducted in different geographical areas, considering regional climate conditions and economic variables, can provide critical information for investment decisions. Furthermore, long-term performance analyses of solar tracking systems, including component lifetimes, maintenance requirements, and their effects on investment payback periods, should be investigated in detail [28].

Advanced cost optimization methods and artificial intelligence-supported modeling techniques can be used to calculate the leveling energy cost more accurately. Moreover, calibrating simulation tools like PVGIS and PVsyst with actual field data to enhance their accuracy will increase the reliability of energy production forecasts [26]. Additionally, not only the economic aspects of solar energy investments but also their environmental impacts should be considered, and analyses related to greenhouse gas emission reductions, carbon footprint, and sustainability should be integrated [29].

Moreover, this comparative approach underscores a key scientific insight: while PVGIS offers a quick estimation framework, PVsyst's detailed modeling of factors such as temperature, soiling, and shading more accurately reflects real-world conditions. By identifying an approximate 30% discrepancy, our results highlight the importance of careful tool selection and parameter calibration, especially in regions with less-studied climatic and geographic characteristics. As a result, we provide a methodological foundation for future research to enhance the precision of renewable energy simulations, ultimately supporting more reliable feasibility assessments and investment decisions.

In this study, we performed a comprehensive evaluation of single-axis tracking systems relative to fixed-axis installations, highlighting the additional energy yield gained by using tracker technology. By incorporating the geographical and climatic characteristics of the Kırıkkale/Bahşılı region into data obtained from PVGIS and PVsyst, we found that, on average, annual energy production could increase by approximately 20% compared to fixed systems. This outcome is largely attributed to the dynamic alignment of the panels with the sun's path throughout the day, optimizing angles and orientations to minimize temperature and shading losses. Given the limited number of studies examining such systems at this level of detail, our findings offer new, practice-oriented insights for both local projects and comparable climatic regions. Consequently, stakeholders in solar energy ranging from investors to engineers—can more rigorously assess the feasibility and potential returns of single-axis tracking systems in project planning and system design processes

In conclusion, the methodological differences of simulation tools used for economic and technical feasibility analyses of solar energy investments should be considered, and comparative studies based on results validated with field data should be conducted. Future studies are expected to provide more robust data for investors and policymakers, contributing to optimizing solar energy systems.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Beyza YILDIRIM: She performed the simulation studies, analyzed the results, and carried out the writting process.

Benzetim çalışmalarını gerçekleştirdi, sonuçlarını analiz etti ve yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Hidir DUZKAYA: He performed the simulation studies, analyzed the results, and carried out the writting process.

Benzetim çalışmalarını gerçekleştirdi, sonuçlarını analiz etti ve yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] BP. (2020). BP Statistical Review of World Energy 2020. BP Global.

[2] Smil, V. (2017). Energy and Civilization: A History. MIT Press.

[3] Güven, A. F., & Demirtaş, M. (2021). Economic feasibility of solar tracking systems: A case study for Mediterranean climates. Applied Energy, 302, 117512

[4] Yıldırım, B., & Düzkaya, H. (2024). Analysis of fixed and single axis tracking systems in solar power plants: A case study for Kırıkkale province in Turkey. 2024 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), Muğla, Türkiye, 316-320

[5] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). Renewable energy statistics 2022: Turkey. https://www.irena.org/publications

[6] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024). Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA).

[7] Huld, T., & Šúri, M. (2020). PVGIS: A key tool for photovoltaic system planning in Europe and beyond. Solar Energy, 207, 1256-1265.

[8] PVsyst SA. (2024). PVsyst user manual: Advanced modeling for photovoltaic systems. https://www.PVsyst.com/manual

[9] Karaoğlan, M., & Öztürk, Z. (2023). Performance evaluation of fixed vs. dual-axis solar tracking systems in Central Anatolia. Energy Conversion and Management, 276, 116542.

[10] Jones, A. D., Kurtz, S. R., & King, D. L. (2021). Photovoltaic system modeling: Simulation and validation of energy yield predictions. IEEE Journal of Photovoltaics, 11(4), 897-905.

[11] Şahin, S., Yıldız, H., & Demir, M. (2022). Evaluation of PV system performance using PVsyst software: A case study in central Turkey. Journal of Renewable Energy Research, 12(4), 2158-2167.

[12] Šúri, M., Huld, T. A., Dunlop, E. D., & Ossenbrink, H. A. (2020). Potential of PV power generation across Europe using solar radiation data from PVGIS. Solar Energy, 185, 207-219.

[13] European Commission. (2023). Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS): Technical documentation. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

[14] İnan, A., Qali, A. A. J., Düzkaya, H., & Taplamacıoğlu, M. C. (2024). Optimization of the tilt angle of solar panels for seven cities in Türkiye. Turkish Journal of Electrical Power and Energy Systems, 4(3), 181-189.

[15] Korkmaz, M., & Dogan, Y. (2021). Applıcatıon and Economıc Contrıbutıon of the Solar Energy System in Agrıcultural Plants: Usıng Pvsyst Software. Engineering Sciences, 2021, 16(2):89-96

[16] Baqir, M., & Channi, K. H. (2022). Analysis and design of solar PV system using Pvsyst software. Department of Electrical Engineering, Chandigarh University, Gharuan, Mohali, Punjab, India.

[17] Alsadi S, Khatib T. (2018). Photovoltaic power systems optimization research status: A review of criteria, constrains, models, techniques, and software tools. Appl Sci, 8(10): 10.

[18] King, D. L., Kratochvil, J. A., & Boyson, W. E. (2019). Analysis of factors influencing the annual performance of photovoltaic systems. Sandia National Laboratories Report, 45(2), 1-34

[19] Branker, K., Pathak, M. J. M., & Pearce, J. M. (2020). A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(9), 4470-4482.

[20] Huld, T., Müller, R., & Gambardella, A. (2015). A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. Solar Energy, 116, 80-92.

[21] Huld, T., Gottschalg, R., Beyer, H. G., & Topič, M. (2018). Mapping the performance of PV modules, effects of module type and data averaging. Solar Energy, 84(2), 324-338.

[22] Shiva K. B., & Sudhakar, K. (2015). Performance evaluation of 10 MW grid connected solar photovoltaic power plant in India. Energy Reports, 1, 184-192.

[23] Şahin, Z. R., & Salihmuhsin, M. (2024). Gerçekten sanala: 1 MWP güneş santralinin PVsyst simülasyon programıyla performans analizi. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23, 203-215.

[24] Limem, F., & Sezen, S. (2021). Comparative Analysis of Different Photovoltaic Simulation Software: Case Study on Analyzing the Performance of a 5,1 kWp Grid Connected Photovoltaic System. European Journal of Science and Technology, (32), 816-826.

[25] Abbas, A. S., Hussain, A. N., & Mohammad, A. T. (2023). Energy losses of proposed grid-connected PV system in Iraq. Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Technology and its Applications (IICETA 2023), 363-367. IEEE.

[26] Chen, J., & Zhang, L. (2019). Comparative analysis of PV simulation tools: Accuracy and efficiency considerations. Journal of Solar Energy Engineering, 141(5), 051011.

[27] Patel, R., & Kumar, P. (2022). Performance enhancement of solar photovoltaic systems using tracking mechanisms: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 153, 111754.

[28] Lee, S., & Kim, H. (2020). Impact of simulation methodologies on photovoltaic performance assessment. International Journal of Energy Research, 44(7), 5271-5283.

[29] Türkmen, B., & Erdinç, O. (2020). Impact of climate change on photovoltaic performance: A case study for Central Turkey. Energy Reports, 6, 234-241.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 892-905 (2025)

Strengthened Key Method in Transition to Quantum Cryptology

Fatih SELVİ[1*] Mustafa ALKAN[2]

[1]*Gazi University, Faculty of Technology, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey*

[2]*Gazi University, Faculty of Technology, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 24/04/2025
Revision: 05/06/2025
Accepted: 23/06/2025

Keywords

Quantum Computers
Post-Quantum Cryptography
Hybrid Encryption
Pre-Shared Key

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/04/2025
Düzeltme: 05/06/2025
Kabul: 23/06/2025

Anahtar Kelimeler

Kuantum Bilgisayarlar
Kuantum Sonrası Kriptografi
Hibrit Şifreleme
Önceden Paylaşılan Anahtar

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the effects of quantum computers on classical encryption methods were evaluated and a hybrid encryption method that increases the security of asymmetric encryption algorithms using pre-shared symmetric key (PSK) was proposed. / Bu çalışmada, kuantum bilgisayarların klasik şifreleme yöntemlerine etkileri değerlendirilmiş ve önceden paylaşılan simetrik anahtar (PSK) kullanılarak asimetrik şifreleme algoritmalarının güvenliğini artıran bir hibrit şifreleme yöntemi önerilmiştir.

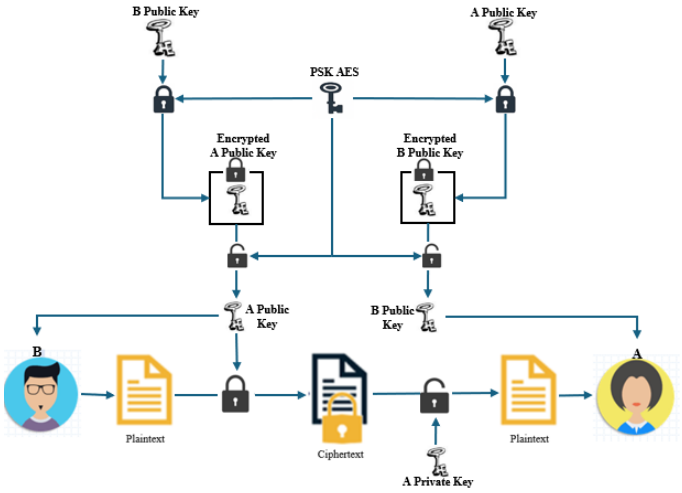


***Figure A**: System Architecture of the Proposed Method / **Şekil A:** Önerilen Yöntemin Sistem Mimarisi*

***Highlights (Önemli noktalar)** The effects of quantum computers on classical cryptographic algorithms have been studied in detail. / Kuantum bilgisayarların klasik kriptografik algoritmalar üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir.*

- *A hybrid encryption method supported by PSK (pre-shared key) has been proposed. / PSK (önceden paylaşılan anahtar) ile desteklenen hibrit bir şifreleme yöntemi önerilmiştir.*
- *The proposed hybrid model provides an additional layer of security during the transition process until the applicability of post-quantum algorithms is ensured. / Önerilen hibrit model, geçiş sürecinde kuantum sonrası algoritmaların uygulanabilirliği sağlanana kadar ek bir güvenlik katmanı sunmaktadır.*

***Aim (Amaç):** Developing a PSK-supported hybrid encryption method to protect data security during the transition period against threats posed by quantum computers. / Kuantum bilgisayarların oluşturduğu tehditlere karşı geçiş sürecinde veri güvenliğini korumak için PSK destekli hibrit bir şifreleme yöntemi geliştirmek.*

***Originality (Özgünlük):** The study proposes a PSK-based hybrid structure that strengthens classical asymmetric encryption methods against quantum attacks and can be integrated into existing systems. / Çalışma, klasik asimetrik şifreleme yöntemlerini kuantum saldırılarına karşı güçlendiren ve mevcut sistemlere entegre edilebilen PSK tabanlı hibrit bir yapı önermektedir.*

***Results (Bulgular):** The proposed hybrid structure provides higher resistance against Shor and Grover algorithms compared to classical systems. / Önerilen hibrit yapı, Shor ve Grover algoritmalarına karşı klasik sistemlere kıyasla daha yüksek dayanıklılık sağlamaktadır.*

***Conclusion (Sonuç):** The proposed PSK-supported hybrid encryption method provides an effective and feasible interim solution to protect data security during the evolution of quantum computers. / Önerilen PSK destekli hibrit şifreleme yöntemi, kuantum bilgisayarların gelişimi sırasında veri güvenliğini korumak için etkili ve uygulanabilir bir ara çözüm sunmaktadır.*

*Corresponding author, e-mail: fatih.selvi@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1682989

GU J Sci, Part C, 13(3): 892-905 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Strengthened Key Method in Transition to Quantum Cryptology

Fatih SELVİ[1*] Mustafa ALKAN[2]

[1]*Gazi University, Faculty of Technology, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey*

[2]*Gazi University, Faculty of Technology, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 24/04/2025
Revision: 05/06/2025
Accepted: 23/06/2025

Keywords

Quantum Computers
Post-Quantum Cryptography
Hybrid Encryption
Pre-Shared Key

Abstract

This study aims to increase security during the transition period against the threats posed by quantum computers to existing cryptographic systems. Since it will take time for post-quantum cryptography standards to become fully applicable, especially asymmetric encryption methods face serious security risks. In this context, a hybrid encryption method that is more resistant to quantum computer attacks is proposed in the study.

The proposed method aims to increase the security of asymmetric algorithms by using pre-shared symmetric key (PSK). In this approach, key distribution is made secure by using symmetric encryption algorithms resistant to quantum attacks such as AES-256. Thus, existing systems gain temporary protection against quantum threats and the transition process is managed more securely.

This study examines the integration of symmetric and asymmetric encryption methods, evaluating the performance and potential security risks of the hybrid approach. It is aimed that the proposed method will contribute to the modernization of national and international cryptographic infrastructure and provide a critical Intermediate solution in the transition process to the post-quantum era.

Kuantum Kriptolojiye Geçişte Güçlendirilmiş Anahtar Yöntemi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/04/2025
Düzeltme: 05/06/2025
Kabul: 23/06/2025

Anahtar Kelimeler

Kuantum Bilgisayarlar
Kuantum Sonrası Kriptografi
Hibrit Şifreleme
Önceden Paylaşılan Anahtar

Öz

Bu çalışma, kuantum bilgisayarlarının mevcut kriptografik sistemlere yönelik oluşturduğu tehditlere karşı geçiş döneminde güvenliği artırmayı amaçlamaktadır. Kuantum sonrası kriptografi standartlarının tam olarak uygulanabilir hale gelmesi zaman alacağından, özellikle asimetrik şifreleme yöntemleri ciddi güvenlik riskleriyle karşı karşıyadır. Bu bağlamda, çalışmada, kuantum bilgisayarlarının saldırılarına karşı daha dayanıklı hale getirilmiş bir hibrit şifreleme yöntemi önerilmektedir.

Önerilen yöntem, önceden paylaşılan simetrik anahtar (Pre Shared Key - PSK) kullanılarak asimetrik algoritmalarının güvenliğini artırmayı hedeflemektedir. Bu yaklaşımda, AES-256 gibi kuantum saldırılarına karşı dirençli simetrik şifreleme algoritmaları kullanılarak anahtar dağıtımı güvenli hale getirilmektedir. Böylece, mevcut sistemler kuantum tehditlerine karşı geçici bir koruma kazanmakta ve geçiş sürecinin daha güvenli bir şekilde yönetilmesi sağlanmaktadır.

Bu çalışma hem simetrik hem de asimetrik şifreleme yöntemlerinin entegrasyonunu ele alarak, hibrit yapının performans analizi ve potansiyel güvenlik risklerini değerlendirmektedir. Önerilen yöntemin, ulusal ve uluslararası kriptografik altyapının modernizasyonuna katkı sağlayarak, kuantum sonrası döneme geçiş sürecinde kritik bir ara çözüm sunması hedeflenmektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Quantum computers have the potential to initiate radical change, especially in the field of cryptography, thanks to their computational power that goes beyond classical computers. Traditional asymmetric encryption algorithms can be rendered ineffective in a short time thanks to the advanced capabilities of quantum computers. Quantum algorithms, such as the Shor algorithm, have the capacity to effectively break widely used asymmetric encryption methods, especially RSA, DSA and ECC [1]. This threatens existing digital security protocols, posing serious security risks for critical infrastructures, sensitive data and communication systems.

*Corresponding author, e-mail: fatih.selvi@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1682989

In this context, important work is being carried out to develop and standardize post-quantum cryptographic algorithms. In the process initiated by the National Institute of Standards and Technology (NIST), standards for algorithms resistant to quantum computers have been determined, but it is foreseen that a long transition period will be required for the integration of these algorithms into existing systems [2]. During this transition period, intermediate solutions are needed to secure existing systems and make them resistant to quantum threats.

The transition period refers to the critical period until post-quantum cryptographic algorithms become fully viable. During this period, existing encryption infrastructures face the risk of being vulnerable to quantum computers. In particular, it is imperative to implement practical, applicable and secure solutions during this period, especially for the security of sensitive data. At the same time, both existing systems need to be modernized and made compatible with post-quantum systems in the long term. The costs, technical challenges and integration problems that arise in this process represent a major challenge for both the public and private sectors.

This study aims to present a method for making existing asymmetric encryption algorithms more resistant to quantum computer threats during the transition process. In the proposed approach, symmetric encryption algorithms such as AES-256, which are also evaluated by NIST as being resistant to quantum computers, are used to support asymmetric encryption processes with the pre-shared key symmetric key method [3] [4]. This approach is particularly notable in terms of both its practical applicability and compatibility with existing systems.

The article focuses on the post-quantum transition process and discusses the integration of symmetric and asymmetric encryption techniques, the technical challenges of this integration, and the potential benefits. Thus, it aims to provide a temporary but effective solution to the threats posed by quantum computers.

1.1. Fundamentals of the Research (Araştırmanın Temelleri)

The development of quantum computers threatens classical asymmetric algorithms, especially RSA and ECC, and necessitates the transition to post-quantum cryptography [1]. This study proposes a hybrid encryption structure supported by pre-shared AES-256 symmetric keys in order to provide a solution resistant to quantum attacks during the transition process.

The proposed methodology aims to protect data security until the standardization of post-quantum algorithms and provides a structure that can form the basis for future adaptations.

1.2. Definition of the Existing Problem (Mevcut Sorunun Tanımlanması)

Asymmetric algorithms such as RSA and ECC are based on mathematical foundations that can be solved by quantum computers in a short time with the Shor algorithm. On the other hand, symmetric algorithms such as AES are more robust despite the Grover algorithm; they offer a high level of security, especially with key sizes of AES-256 and above [4].

For this reason, hybrid structures supported by pre-shared symmetric keys stand out as an effective and applicable intermediate solution against quantum attacks during the transition process.

2. LITERATURE REVIEW (LİTERATÜR İNCELEMESİ)

The impact of quantum computers on cryptographic systems has been intensively discussed in recent years, both in academic circles and in industry. The development of the Shor algorithm in 1994 was a significant turning point in the fact that asymmetric encryption algorithms could be effectively broken with quantum computers [1]. This development called into question the long-term security of common asymmetric algorithms such as RSA, ECC and DSA.

Symmetric encryption algorithms, on the other hand, have been evaluated more resistant to quantum computers. Although Grover's algorithm can effectively halve the encryption key size of symmetric algorithms, algorithms with longer key sizes such as AES-256 have been shown to be resistant to quantum threats [4]. Therefore, symmetric algorithms are considered to provide a durable foundation for quantum computers [5].

The studies initiated to develop algorithms resistant to the threats of quantum computers gained momentum with the standardization process of quantum-resistant crypto algorithms announced by NIST in 2016 [2]. As a result of this process, the publication of the first standards in 2024 has been an important step towards long-term solutions against quantum computer threats. However, the integration of these algorithms into existing systems

will take much longer and will require a costly transition period.

In the transition period, solutions are being sought against future-oriented threats, especially with quantum computers such as “harvest then decrypt” [6]. In this context, the idea of increasing the resilience of existing asymmetric systems using symmetric encryption algorithms comes to the fore. In particular, combining the AES-256 key distributed with the pre-shared symmetric key method and asymmetric encryption methods has the potential to provide effective intermediate solutions against quantum threats [7].

In recent years, intensive studies have been conducted in the literature on the feasibility, performance and cost impacts of these intermediate solutions. Studies show that the quantum transition process is considered a critical challenge both at the academic and industrial levels. This literature review examines in detail the current status of applicable intermediate solutions and the technical challenges that need to be solved in the transition period to quantum cryptography.

3. CLASSICAL CRYPTO METHODS (KLASİK KRİPTO YÖNTEMLERİ)

3.1. Symmetric Encryption Methods (Simetrik Şifreleme Yöntemleri)

Symmetric encryption is an encryption method in which the same secret key is used for encryption and decryption operations. This method is highly effective for encrypting large volumes of data due to its advantages of high speed and low computational cost. The parties involved in communication perform data encryption and decryption operations using a single, pre-shared secret key [8]. The security of the system depends on keeping this key secret. The system architecture of this structure is presented in Figure 1.

Symmetric encryption algorithms are divided into two main categories: block encryption (e.g. DES, AES) and stream encryption (e.g. RC4). Nowadays, block encryption algorithms, especially AES, are more widely preferred due to their high security and performance advantages.

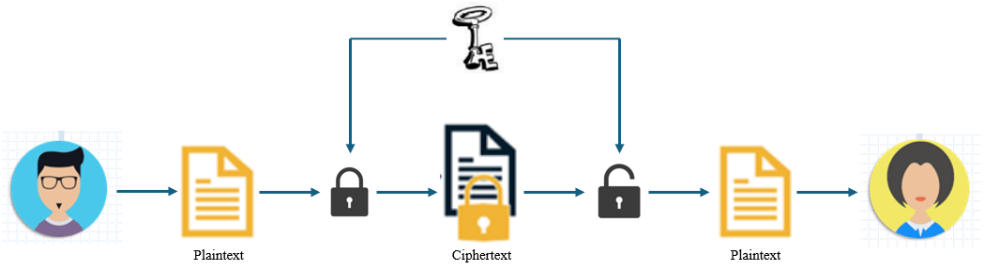


Figure 1. Symmetric Encryption and Decryption (Simetrik Şifreleme ve Şifre Çözme)

Symmetric encryption is preferred especially in applications where performance is at the forefront due to its high speed and low resource consumption [9]. However, the most important limitation of this method is the difficulty of securely sharing the secret key. In addition, key management in multi-user systems can become complex and lead to scalability problems.

3.2. Asymmetric Encryption Methods (Asimetrik Şifreleme Yöntemleri)

Asymmetric encryption is a method where two different, but mathematically related keys (public and private keys) are used for encryption and decryption operations in order to ensure data security [10]. While the public key is known and used by everyone, the private key is stored and used only by authorized persons. This method, whose system architecture is shown in Figure 2., plays an important role in applications such as secure communication, digital signatures and authentication, especially on the Internet. Among the asymmetric encryption methods, RSA (Rivest-Shamir-Adleman), ElGamal and ECC (Elliptic Curve Cryptography) algorithms are among the most widely used and preferred algorithms in security applications [11].

Asymmetric encryption offers significant advantages by overcoming the problem of key sharing and providing authentication. However, it is not suitable for large data sets because it requires higher processing power than symmetric encryption methods. In addition, quantum algorithms such as Shor's algorithm have the potential to break these methods.

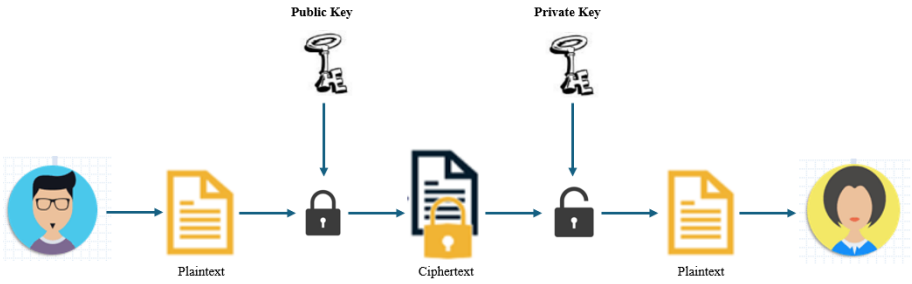


Figure 2. Asymmetric Encryption and Decryption (Asimetrik Şifreleme ve Şifre Çözme)

4. THE IMPACT OF QUANTUM COMPUTERS ON CURRENT ENCRYPTION METHODS (KUANTUM BİLGİSAYARLARININ MEVCUT ŞİFRELEME YÖNTEMLERİNE ETKİSİ)

The development of quantum computers fundamentally threatens the security of traditional cryptographic algorithms [12]. Existing encryption methods based on mathematical problems that are impractical to solve with classical computers are becoming breakable thanks to the high parallel processing power offered by quantum computers. This situation affects both asymmetric and symmetric encryption algorithms at different levels.

Quantum computers use units of information called qubits, which are based on the principles of quantum mechanics, instead of classical bits for information processing. Thanks to their superposition property, qubits can represent multiple states at the same time, giving quantum computers the ability to perform highly parallel computing. Entanglement allows the quantum states of multiple qubits to become interdependent, allowing all components of the system to work together faster and more efficiently.

These features allow quantum computers to work much more efficiently than classical systems on certain mathematical problems. In particular, quantum algorithms such as Shor and Grover have the potential to neutralize asymmetric encryption systems and weaken the security level of symmetric algorithms. Therefore, quantum computers pose a serious threat to existing cryptographic infrastructures.

4.1. Impact of the Shor Algorithm on Existing Encryption Methods (Shor Algoritmasının Mevcut Şifreleme Yöntemlerine Etkisi)

Developed by Peter Shor in 1994, the Shor algorithm is a quantum algorithm that demonstrates the superiority of quantum computers in solving certain mathematical problems that are very difficult for classical computers. The algorithm works especially on prime factorization and modular arithmetic. These features threaten the fundamental security principles of popular asymmetric encryption algorithms such as RSA.

4.1.1. Effect on RSA Encryption (RSA Şifreleme Üzerindeki Etkisi)

The RSA algorithm is based on the difficulty of factoring a number obtained by multiplying two large prime numbers. While on classical computers this process is so difficult that it can take years, thanks to Shor's algorithm, quantum computers can do it in a fraction of the time.

Fundamentals of RSA Encryption System: RSA Encryption is based on the value N obtained by multiplying two large prime numbers p and q. The difficulty of separating this value into prime factors ensures the security of the algorithm [10]. The key space ϕ (N) is calculated with the following Formula 1.

$$\phi(N) = (p - 1)(q - 1) \quad (1)$$

The relationship between the public key e and the private key d in formula 2 is provided

$$e \times d \equiv 1 \pmod{\phi(N)} \quad (2)$$

The Prime Factorization Problem: RSA encryption security relies on the difficulty of not knowing the prime factors p and q that make up N. For classical computers, this problem requires impractical computational time for large values of N. A 2048-bit N can take thousands of years to factorize with classical computers.

4.1.2. Solution Process of Shor Algorithm (Shor Algoritmasının Çözüm Süreci)

The Shor algorithm exploits quantum mechanical properties to find the prime factors of N. This

process consists of the following mathematical steps:

Period Finding Problem: Shor's algorithm reduces the prime factorization problem to a period finding problem [9]. The mathematical basis for this is:

- A random number a is chosen ($1 < a < N$)
- If a and N are prime between them, there is a smallest r (period) satisfying the equation $r \equiv 1 \pmod{N}$.
- With the help of r, the factors of N can be calculated with formula 3:

$$p = \text{ebob}(ar/2 - 1, N), \quad q = \text{ebob}(ar/2 + 1, N) \quad (3)$$

Quantum Fourier Transform: It is difficult to find r with classical methods. Shor's algorithm uses the quantum Fourier transform to find r much faster than classical computers [13].

4.1.3. Conclusion (Sonuç)

The security of the RSA algorithm is based on the difficulty of dividing a number obtained by multiplying two large prime numbers into prime factors. For classical computers, this process becomes exponentially more difficult as the size increases, and it is practically impossible to break. However, quantum computers make the difficult problems that form the basis of asymmetric algorithms such as RSA meaningless thanks to the power of Shor's algorithm.

While todays widely used 2048-bit RSA keys can take thousands of years to broken with classical computers, it is theoretically predicted that a quantum computer with a capacity of 4096 logical qubits could do it in a few hours. It is estimated that approximately 10-20 million physical qubits would be needed to obtain 4096 logical qubits [14]. Today, however, the quantum computers needed to implement the Shor algorithm do not yet have sufficient qubit capacity and error correction mechanisms.

In 2018, researchers used IBM's 5- and 16-qubit quantum processors to prime factorize numbers such as 4,088,459 and 966,887 [15]. In 2022, Chinese researchers reported that they were able to prime factor 48-bit integers using 10 superconducting qubits [16].

4.2. The Effect of Grover Algorithm on Current Encryption Methods (Grover Algoritmasının Mevcut Şifreleme Yöntemlerine Etkisi)

The Grover algorithm is a powerful quantum algorithm that allows quantum computers to be faster than classical computers in solving a certain type of problem [17]. This algorithm provides advantages especially in key search processes used in symmetric encryption methods. Its effect is more limited compared to the Shor algorithm and only accelerates brute-force attacks; therefore, it poses a threat only against symmetric algorithms, not asymmetric ones.

4.2.1. Impact on AES Encryption (AES Şifreleme Üzerindeki Etkisi)

AES (Advanced Encryption Standard) is one of the most widely used strong symmetric encryption algorithms today, offering different key lengths (AES-128, AES-192, AES-256). Its security is based on the fact that it is practically impossible to implement brute force attacks where all possible key combinations are tried. However, the new computational models offered by quantum computers, in particular the Grover algorithm, pose a potential threat by accelerating this search process by a square root.

The AES algorithm consists of SubBytes, ShiftRows, MixColums and AddRoundKey. Each round of these operations increases the randomness and complexity of the data. The number of rounds increases with the key length (10 rounds for AES-128, 12 rounds for AES-192, 14 rounds for AES-256) [8].

4.2.2. Grover Algorithm Solution Process (Grover Algoritmasının Çözüm Süreci)

Grover algorithm can solve the problem in $\sqrt{N}$ steps, the number of N attempts required in classical methods to find the correct key. This works as follows for the AES algorithm [18]:

- AES-128: $2^{128} \rightarrow$ Grover iteration number $\approx 2^{64}$
- AES-256: $2^{256} \rightarrow$ Grover iteration number $\approx 2^{128}$

4.2.3. Quantum Computer Requirements (Kuantum Bilgisayar Gereksinimleri)

In order to effectively implement the Grover algorithm on AES, quantum computers must meet certain technical requirements.

- Number of Logical Qubits: For Grover's algorithm, several thousand logical qubits are

required to represent a 246-bit key size in AES-256 and to run the algorithm.

- Physical Qubit Count: Due to error correction mechanisms, millions of physical qubits are required. For example, in Grassl et al.'s (2015) work, if approximately 6,681 logical qubits are used to break AES-256 and approximately 5,000 physical qubits are used for one logical qubit when error corrections are included, 33,405,000 physical qubits are required [4].

4.2.4. Estimated Processing Time (Tahmini İşlem Süresi)

How many quantum gates a quantum computer can run per second affects the processing time. Estimated processing time for the Grover algorithm:

- AES-256: 2^{128} steps are assumed to be required.
- On a system with 10^9 quantum operations per second, this would be $\approx 3.4\times10^{29}$ seconds [19].

As a result of this calculation, the search time is too long to be realized in practice, indicating that AES-256 is still secure against quantum.

4.2.5. Conclusion (Sonuç)

The AES algorithm is a symmetric encryption algorithm that is widely used and considered secure today. The development of quantum computing, especially with the Grover algorithm, poses some threats to the security of symmetric encryption methods such as AES, but its practical impact is limited.

The Grover algorithm poses a significant threat to the security of AES, but the capacity of existing quantum computers prevents the practical applicability of this attack. In addition, its impact can be significantly limited when the right precautions are taken (for example, switching to AES-256 or AES-512). Despite the theoretical power of quantum computers, the security of symmetric encryption methods is seen to be sustainable for a certain period of time in the quantum age.

As a result, symmetric encryption methods can be protected against the threats of the Grover algorithm by using longer key lengths and updating security standards. However, these threats will require continuous evaluation and adaptation in parallel with the development of quantum computers.

4.3. Comparative Analysis of Encryption Algorithms Against Quantum Computers (Kuantum Bilgisayarlarına Karşı Şifreleme Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi)

In this section, the resistance of widely used symmetric (AES) and asymmetric (RSA, ECC) encryption algorithms against quantum computers is analyzed comparatively with parameters such as the security basis of the algorithm used, its weaknesses against Grover and Shor algorithms, the number of logical qubits required and the estimated quantum breaking time.

The table below summarizes the post-quantum security levels of both symmetric and asymmetric algorithms and supports the necessity of the proposed hybrid structure with technical justifications.

Table 1. Durability Comparison of Encryption Algorithms Against Quantum Computer (Kuantum Bilgisayara Karşı Şifreleme Algoritmalarının Dayanıklılık Karşılaştırması)

Algorithm	Post-Quantum Security Level	Required Qubit (Logical)	Theoretical Breaking Time	Resistance
RSA-1024	0 bit (Shor)	≈2000	A few minutes	Very low
RSA-2048	0 bit (Shor)	≈4096	A few hours	Very low
ECC-256	0 bit (Shor)	≈2330	A few hours	Very low
AES-128	64 bit (Grover)	≈3000	$\approx1.84\times10^{10}$ Seconds	Medium
AES-256	128 bit (Grover)	≈6681	$\approx3.4\times10^{29}$ Seconds	High
AES-512	256 bit (Grover)	>>10000	$\approx1.16\times10^{60}$ Seconds	Very High
Proposed Model (PSK AES 256 + Asymmetric)	128 bit (Grover)	≈6681	$\approx3.4\times10^{29}$ Seconds	High

The data obtained from the table justifies why the symmetric structure should support the asymmetric structure in the proposed hybrid encryption model. Thus, the security of existing systems can be ensured during the transition to the post-quantum era.

5. TRANSITION PROCESS AND INTERMEDIATE SOLUTIONS (GEÇİŞ SÜRECİ VE ARA ÇÖZÜMLER)

The development of quantum computers is one of the most important technological advances that directly threaten the security of traditional cryptographic systems. Although fully widespread and stable quantum computer systems have not yet been achieved, the potential of these technologies to erode cryptographic infrastructures in the medium term has necessitated a cryptographic transition process [3]. In the transition period until the maturity of post-quantum algorithms, security measures to be taken and temporary solutions to be developed in order to protect existing systems are of strategic importance.

This transition process is not only a transformation at the algorithm level, but also a complex transformation process that requires updating the existing information systems architecture. In particular, hybrid cryptographic approaches stand out as an effective temporary solution in making the existing infrastructure quantum resistant.

5.1. Fundamental Challenges of the Post-Quantum Transition (Kuantum Sonrası Geçişin Temel Zorlukları)

The transition to the post-quantum era brings with it multidimensional challenges at technical, operational, economic and strategic levels. Existing encryption methods used in a wide range of fields, from government institutions to the private sector, are not resilient to quantum computing, requiring a fundamental restructuring of the system.

In addition, the applicability of post-quantum algorithms is still under research and development. In addition to software and hardware upgrades to make the algorithms viable, it also requires hardware compatibility, restructuring of communication protocols, changing data formats and implementing new key management mechanisms [6]. Realizing this transformation requires costly investments as well as multi-layered planning such as corporate strategy, personnel training and legal regulations.

The most critical need in this process is "intermediate solutions" that can provide temporary but effective protection. In this context, hybrid encryption approaches that use both classical and quantum-resistant algorithms together come to the fore. While hybrid systems work in harmony with classical infrastructures, they also provide a certain level of resistance against quantum attacks and allow the transition process to be managed more securely.

5.2. Transition Process (Geçiş Süreci)

Adapting existing crypto infrastructures to quantum-secure algorithms is a complex process. It requires not only technological change, but also a large-scale adaptation process. This process includes several important stages, listed below.

5.2.1. Awareness and Risk Assessment (Farkındalık ve Risk Değerlendirmesi)

It is of utmost importance for organizations to understand the potential impact of quantum computing on cryptographic systems and perform detailed risk analyses of their existing infrastructure. While asymmetric algorithms such as RSA can theoretically be broken in a short time with the Shor algorithm, symmetric algorithms such as AES can be weakened by halving the effective key space with the application of the Grover algorithm. Therefore, strategic decisions should be made by evaluating which algorithms can remain secure for how long.

The risk assessment conducted by NIST found that the United States should prioritize the timely transition of asymmetric cryptographic systems to quantum cryptography and aims to reduce quantum risk as much as possible by 2035 [3]. However, it was assessed that transition timelines may vary depending on the specific use case or application, and it was recommended that systems with long-term privacy needs or more complex cryptographic infrastructures may transition to quantum cryptography earlier. In addition, in its assessment of symmetric encryption methods, it was stated that at least 128-bit symmetric encryption algorithms meet the requirement of at least Category 1 security in the five security strength categories system for the evaluation parameters in the NIST post-quantum cryptography standardization process, while the 256-bit symmetric encryption algorithm meets Category 5 security and is resistant to attacks by quantum computers for many years. 112-bit symmetric encryption algorithms will be banned by 2030 [20].

Similarly, in the risk assessment conducted by the German Federal Information Office (BSI), it was emphasized that 128-bit symmetric encryption algorithms could be broken by quantum computers in the coming period and therefore 256-bit symmetric encryption algorithms would be resistant to quantum computers in the long term. Regarding asymmetric encryption algorithms, it was assessed that systems should be transformed in the short term [21].

5.2.2. Adaptation of Existing Systems (Mevcut Sistemlerin Uyarlanması)

Workarounds can be applied until quantum computers are fully operational. Especially the development of hybrid systems is important. Hybrid systems use both classical algorithms and post-quantum cryptographic solutions together, minimizing security vulnerabilities during the transition process.

5.2.3. Updating Standards (Standartların Güncellenmesi)

NIST's setting of post-quantum cryptography standards is a critical step in this process. With the standards published in August 2024, the applicability of quantum secure algorithms has accelerated. However, integrating these algorithms into existing systems will require a long transition period, both technically and operationally. According to NIST's estimates, this process will take between 10 and 20 years [3].

5.3. Intermediate Solutions (Ara Çözümler)

Since it will take time for post-quantum cryptography (PQC) algorithms to become fully applicable, it is critical to develop temporary but effective security solutions during the transition process. In this context, the inter solutions developed will help maintain data security by integrating into existing infrastructures, while also ensuring that the transition to quantum-resistant systems takes place on a more secure basis.

5.3.1. Hybrid Algorithms with PSK (Pre-shared key) Symmetric Encryption Keys (PSK (Önceden paylaşılan anahtar) Simetrik Şifreleme Anahtarları ile Hibrit Algoritmalar)

In line with the prediction that asymmetric algorithms will be vulnerable to quantum computers, hybrid encryption structures supported by pre-shared symmetric keys are proposed. In this approach, symmetric algorithms such as AES, which are relatively more resistant to quantum attacks, are used in combination with asymmetric algorithms that can become vulnerable. In particular, the quantum resistance of AES-256 is emphasized in literature, and PSK-based hybrid structures stand out as an effective intermediate solution in the transition process.

5.3.2. Strengthening Symmetric Encryption Keys (Simetrik Şifreleme Anahtarlarının Güçlendirilmesi)

Although symmetric algorithms are more resistant to quantum attacks than asymmetric systems, it is important to increase the key length due to the effect of the Grover algorithm. In order to mitigate the effect of Grover's algorithm, it is recommended to switch to longer key sizes such as AES-256 or AES-512 [4]. Such a measure provides additional resistance to the parallel computing power offered by quantum computers.

5.4. Application Areas and Strategic Approaches (Uygulama Alanları ve Stratejik Yaklaşımlar)

Intermediate solutions adopted in the transition process have strategic importance in areas requiring high security such as public institutions, the financial sector, healthcare services and the defense industry [22]. Effective planning of these solutions is directly related to their integration into systems and increasing the competence of the relevant personnel.

As a result, the transition process and intermediary solutions play a critical role both in the preparation process for the adoption of post-quantum algorithms and in ensuring the security of existing data. Intermediate solutions developed in this process will not only ensure the protection of the existing infrastructure, but also in preparation for the future post-quantum era. Therefore, studies on the transition process will create a more solid foundation for the post-quantum era, both technically and strategically.

6. PROPOSED METHOD AND METHODOLOGY (ÖNERİLEN YÖNTEM VE METODOLOJİSİ)

The steps of the hybrid encryption protocol designed by encrypting asymmetric parameters with a pre-shared symmetric key are presented below, and the schematic system architecture is shown in Figure 3.

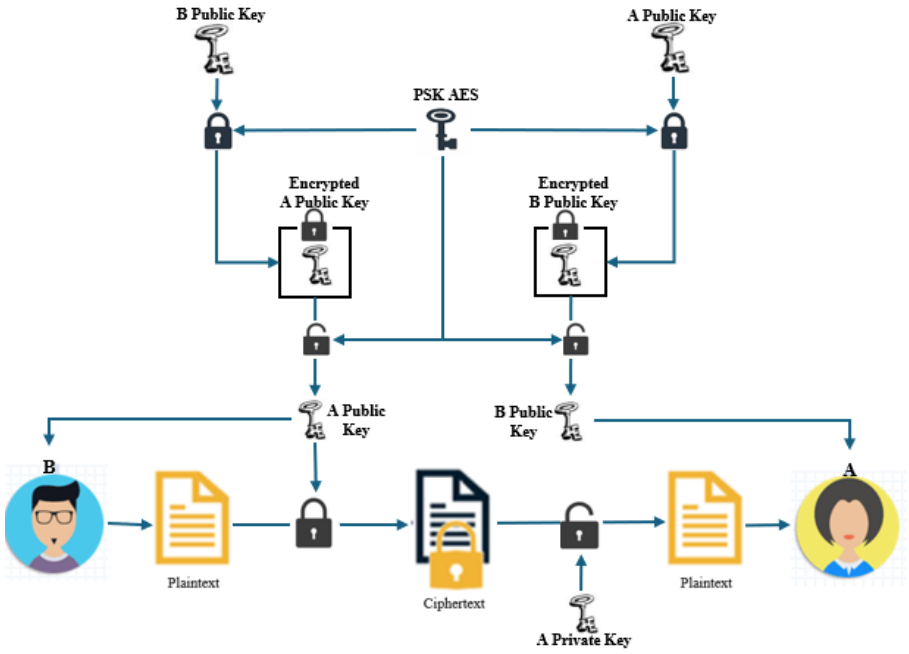


Figure 3. System Architecture of the Proposed Method (Önerilen Yöntemin Sistem Mimarisi)

Key Sharing: The Receiver (A) and the Sender (B) share a common symmetric key (PSK) through a secure channel (e.g. courier, face-to-face meeting). This key is a public and secret key for both parties.

Asymmetric Key Pair Generation: Both parties generate their own public and private key pairs using classical methods.

- A generates its own public (A Public) and private (A Private) key pair.
- B generates its own public (B Public) and private (B Private) key pair.

Asymmetric Key Encryption: The parties encrypt public key with the pre-shared AES-256 key.

- A encrypts public key with AES 256, AES-256 (PSK, A public).
- B encrypts public key with AES 256, AES-256 (PSK, B public).

Sending Encrypted Asymmetric Key: Encrypted public keys are exchanged.

- A sends the encrypted A public key (AES-256 (PSK, A public)) to B.
- B sends the encrypted B public key (AES-256 (PSK, B public)) to A.

Decryption of the Encrypted Asymmetric Key: The parties decrypt the encrypted keys they receive with the pre-shared symmetric key.

- B decrypts the encrypted public key A (AES-256 (PSK, A public)) received from A with PSK.
- A decrypts the encrypted public key B (AES-256 (PSK, B public)) received from B with PSK.

Asymmetric Encryption Process: After the key exchange is completed, the parties can continue secure communication using standard asymmetric encryption protocols.

This hybrid architecture offers additional protection against the threats posed by quantum computers to asymmetric encryption algorithms by using the robustness of symmetric encryption. It is a temporary but effective security measure that can be implemented especially during the transition period, before the post-quantum algorithms are fully standardized. This not only maintains compatibility with existing infrastructure but also provides an enhanced level of data security.

6.1. PSK Distribution, Model Integrity and Key Renewal Approach (PSK Dağıtımı, Model Bütünlüğü ve Anahtar Yenileme Yaklaşımı)

Since the security of the proposed hybrid model is based on the privacy of the symmetric PSK, how this key is distributed and managed is critical.

6.1.1. Safe Distribution of PSK (PSK'nın Güvenli Dağıtımı)

The secure sharing of PSK between the parties is one of the basic security assumptions of the system.

One of the methods of secure sharing is physical distribution such as courier, face-to-face meeting or manual transfer in a secure environment. The other method is to transfer PSK over isolated internal networks that are not connected to the outside world. Such networks can be preferred in terms of secure key transfer since they are closed systems protected from external threats. These options can be selected according to the operational conditions of the system and can be used together with the hybrid cryptography approach.

6.1.2. The Role of PSK in the Proposed Model (Önerilen Modelde PSK'nın Rolü)

In the general structure of the proposed model, PSK is used only for encryption of public keys used at the beginning of communication and acts as a preliminary protection layer of asymmetric encryption. Thanks to this usage, PSK does not carry continuous transmission throughout the entire session, it is only active for initial key sharing. The model follows the following structure:

- PSK is used only to hide public keys
- After the public keys are decrypted, standard asymmetric communication continues.
- PSK does not provide a direct encryption function for the message data.

6.1.3. Key Renewal Approach (Anahtar Yenileme Yaklaşımı)

It is recommended that PSK be renewed periodically to ensure the continuity of system security. In this context;

Renewal of PSK Used in the System According to Frequency of Use: PSK can be renewed daily or hourly depending on the intensity of the system, usage traffic and most importantly the security level. The renewal frequency can increase as the security level increases.

Distribution and Use of PSK According to Time Periods: PSKs are produced and distributed to the parties in 1-month, 3-month or 6-month periods according to secure distribution possibilities. During each distribution period, PSK is renewed and used within the system at certain time intervals (daily or hourly). In order to prevent confusion, these keys are marked with time codes and each key contains a validity period that matches the parties' system clock. In this way, the parties can correctly understand which PSK will be used in which time period. In addition, spare keys are produced and delivered to the parties during key distribution periods in case of a PSK being seized by someone else or suspected.

The process of periodic renewal of PSK is controlled by the central authority of the system or the security manager. This central structure generates new PSKs at specified time intervals and transmits them to the communicating parties through predetermined channels.

6.2. Strengths of Hybrid Encryption Method (Hibrit Şifreleme Yönteminin Güçlü Yanları)

6.2.1. Security (Güvenlik)

Hybrid encryption has been developed to provide a defense against potential threats from quantum computers by increasing the security level of existing encryption systems. In particular, the additional layer of security provided by symmetric encryption keys plays a critical role against the capacity of quantum computers to break existing asymmetric encryption algorithms.

Asymmetric Key Security: In asymmetric encryption algorithms, the public key is usually shared publicly. However, these keys are the weakest part against quantum computer attacks. The hybrid method provides a more resistant structure against attacks by quantum computers by ensuring that public keys are encrypted with a symmetric key.

Use of Secure Channel in Key Distribution: Since the symmetric key is transmitted between the parties through a secure channel (e.g. face-to-face meeting, physical courier, mail), it minimizes security gaps in the key sharing process. This significantly reduces the risk of third parties accessing the key.

Multi-Layered Security: With the double-layered security model offered by the hybrid method, protection is provided with symmetric encryption against the possibility of breaking the asymmetric encryption method. Even if the symmetric key is captured, the asymmetric encryption method needs to be broken in order to decrypt the system.

6.2.2. Adaptability (Uyarlanabilirlik)

It will take 10-20 years for quantum-resistant algorithms to become fully applicable, and this process will require modernization or replacement of existing infrastructures [3]. This poses a great challenge in terms of time and cost. Hybrid encryption method is compatible with existing encryption systems, allowing systems to transition to quantum security quickly and cost-effectively.

Use of Existing Infrastructure: Hybrid encryption does not require fundamental changes to the existing asymmetric encryption infrastructure. Common algorithms such as RSA and ECC are converted into a hybrid structure by integrating only symmetric keys. This approach increases the security of the existing infrastructure while eliminating costly infrastructure changes. Furthermore, hybrid methods continue to secure existing cryptosystems before quantum-resilient algorithms are implemented during the transition.

Integration: Integration of hybrid encryption method is a relatively simple process in terms of software and hardware. This increases the applicability in a wide range from small-scale systems to large networks.

6.2.3. Quantum Resistance (Kuantum Dayanıklılığı)

The hybrid encryption method offers a strong defense mechanism against the potential of quantum computers to break existing asymmetric encryption algorithms.

Resistance of Symmetric Encryption: Symmetric encryption algorithms (e.g. AES-256) are more resistant to quantum computers' methods, such as the Grover algorithm. Although Grover's algorithm reduces symmetric encryption to half the security level of classical encryption, a strong algorithm like AES-256 still provides a security level of 128 bits. In the event of the development of quantum computers, the level of security can be further increased by switching to stronger encryption methods such as AES-512 [19]. In addition, encrypting asymmetric encryption keys with symmetric keys provides additional security, as the attacker must break not only the asymmetric algorithm but also the symmetric key.

Preparation for the Post-Quantum Era: If quantum computers are fully developed and widespread, hybrid systems based on the strength of the symmetric encryption key can serve as a bridge to quantum crypto algorithms. Since this process will require many years and high costs, hybrid methods can continue to protect the security of existing systems.

6.3. Comparison of Classical and Hybrid Encryption Structures (Klasik ve Hibrit Şifreleme Yapılarının Karşılaştırılması)

The hybrid encryption model proposed in this study was developed based on the prediction that traditional asymmetric structures may be insufficient against quantum threats. The table below presents a comparison of the classical asymmetric encryption structure and the proposed symmetric PSK-supported hybrid model in terms of criteria such as quantum durability, key management, security level and transition process compatibility

Table 2. Comparison of Classical Asymmetric and PSK Supported Hybrid Encryption Structures (Klasik Asimetrik ve PSK Destekli Hibrit Şifreleme Yapılarının Karşılaştırılması)

Feature	Classical	Hybrid (PSK+Asymmetric)
Quantum attack resistance	⚠ Low	✅ High
Key encryption	❌ None	✅ Encrypted with AES
Key distribution protection	❌ Open	✅ Secure channel
Post-quantum preparation	❌ Weak	✅ Strong transition model

This comparison reveals that the proposed structure is particularly capable of serving as a bridge between the pre-quantum and quantum transition periods. An additional security layer is provided against open channel attacks thanks to the symmetrically encrypted asymmetric key parameters.

6.4. Security Assumptions (Güvenlik Varsayımları)

The security of the proposed hybrid encryption structure is built on the following basic assumptions.

Privacy of Symmetric PSK: The symmetric PSK is assumed to be transmitted between the parties in

a secure manner and is known only to the authorized parties. The disclosure of the PSK is a serious risk that will weaken the entire security structure of the proposed system.

AES Based Symmetric Encryption Security: The AES algorithm is assumed to be secure against both classical and quantum attacks. In particular, the use of AES-256 or AES-512 provides sufficient resistance against the Grover algorithm.

Asymmetric Key Integrity: It is assumed that both parties have reliably generated public and private key pairs and obtained the other party's public key with accuracy.

Reliability of Time Codes: It is assumed that PSKs are marked with time codes and that the validity periods of these codes are interpreted correctly by the parties. It is assumed that there is sufficient time synchronization between the parties.

7. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS (Sonuç ve Öneriler)

7.1. Conclusion (Sonuç)

This paper evaluates the potential impact of quantum computers on classical cryptographic methods and proposes a hybrid encryption model that provides additional security measures against these threats. As is well known, widely used asymmetric encryption algorithms such as RSA and ECC can be efficiently solved by quantum computers thanks to the Shor algorithm [1]. This shows that asymmetric systems have serious security vulnerabilities in the quantum era.

On the other hand, symmetric algorithms such as AES exhibit a relatively more resistant structure against quantum computers. Although the Grover algorithm reduces the security of symmetric encryption systems, this situation can be balanced by using longer keys. In this context, the key lengths of AES-256 and above provide a reasonable level of security against quantum attacks.

In the proposed hybrid model, asymmetric keys are protected by additionally encrypting them with a pre-shared symmetric key. This approach creates an additional layer of defense against quantum attacks on asymmetric systems, making the security of classical infrastructures sustainable even in the quantum era. One of the strongest aspects of the model is that it is compatible with the current system architecture and provides temporary but effective protection until the transition to post-quantum algorithms is fully achieved.

The transition process to post-quantum algorithms is expected to be long and costly. In this process, the use of hybrid approaches is of strategic importance for the protection of data integrity and confidentiality, especially for critical infrastructures. In this context, the hybrid encryption model presented in the study offers a solution proposal that increases the resilience of existing systems against the threats posed by quantum computers, is applicable and supports the transition process.

7.2. Recommendations (Öneriler)

In line with the findings obtained as a result of this study, the following recommendations are presented in order to plan an effective transition process against the threats posed by quantum computers.

Standardization of Hybrid Encryption Systems: The proposed PSK-based hybrid encryption model provides an important intermediate solution to ensure the security of existing systems until the transition to post-quantum algorithms is completed. This model should be included in international security standards and supported by sector-based adaptable protocols.

Develop Quantum Security Policies for Critical Infrastructures: The public and private sectors, with a priority on critical infrastructures, should develop comprehensive security policies that include hybrid encryption models. These policies will serve as a roadmap to prepare for post-quantum cryptography.

Increasing Symmetric Encryption Key Lengths: Considering the effects of the Grover algorithm, it is necessary to use AES-256 or higher-level keys instead of AES-128. This strengthening in symmetric algorithms also directly affects the overall security of the hybrid model.

Integration of Post-Quantum Encryption Algorithms: The high cost and time-consuming nature of the transition to post-quantum algorithms necessitates that this transition be carried out gradually and starting from critical systems. In this process, the proposed hybrid model will provide effective transition support.

Increasing Education and Awareness-Raising Activities: Raising awareness of public and private sector personnel on quantum security issues should be supported with training programs and seminars. In this way, institutional and social preparation for the post-quantum era will be strengthened.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***Fatih SELVİ*:** Creating the Idea of the Study, Literature Research, Creating Methodology, Writing the Original Draft.

Çalışmanın Fikrini Oluşturma, Literatür Araştırma, Metodoloji Oluşturma, Orijinal Taslak Yazımı.

Mustafa ALKAN: Editorial Review, Administration, Supervision.

Yazım İnceleme, Yönetim, Denetim.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] P. W. Shor, "Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring," in Proc. 35th Annu. Symp. Found. Comput. Sci., Santa Fe, NM, USA, 1994, pp. 124–134.

[2] National Institute of Standards and Technology (NIST), "NIST Releases First 3 Finalized Post-Quantum Encryption Standards," Aug. 13, 2024. [Online]. Available: https://www.nist.gov/newsevents/news/2024/08/nist-releases-first-3-finalized-post-quantum-encryption-standards

[3] D. Moody, R. Perlner, A. Regenscheid, A. Robinson, and D. Cooper, "Transition to Post-Quantum Cryptography Standards," NIST Interagency/Internal Report (NIST IR) 8547, Nov. 12, 2024. [Online]. Available: https://csrc.nist.gov/pubs/ir/8547/ipd

[4] M. Grassl, B. Langenberg, M. Roetteler, and R. Steinwandt, "Applying Grover's algorithm to AES: quantum resource estimates," in Lecture Notes in Computer Science, vol. 9562, pp. 29–43, 2016

[5] X. Bonnetain, M. Naya-Plasencia, and A. Schrottenloher, "Quantum security analysis of AES," in Advances in Cryptology – ASIACRYPT 2020, Cham: Springer, 2020, pp. 451–481. [Online]. Available: https://eprint.iacr.org/2019/1011.

[6] R. Perlner and D. Moody, "Harvesting and the threat of record now, decrypt later," NIST Cybersecurity White Paper, 2021. [Online]. Available: https://csrc.nist.gov/publications/detail/white-paper/2021/record-now-decrypt-later

[7] Y. Chen, N. Alharthi, M. Kamp, and D. Bernstein, "Hybrid Post-Quantum and Classical Cryptographic Schemes," Cryptology ePrint Archive, 2022. [Online]. Available: https://eprint.iacr.org/2022/205

[8] J. Daemen and V. Rijmen, The Design of Rijndael: AES - The Advanced Encryption Standard. Springer, 2002

[9] M. E. Hellman, "An overview of public key cryptography," IEEE Communications Magazine, vol. 16, no. 6, pp. 42–49, 1978.

[10] Rivest, R. L., Shamir, A., & Adleman, L. (1978). A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems. Communications of the ACM, 21(2), 120-126. DOI: 10.1145/359340.359342

[11] D. R. Stinson and M. B. Paterson, Cryptography: Theory and Practice, 4th ed., CRC Press, 2019.

[12] M. Nielsen and I. Chuang, Quantum Computation and Quantum Information, Cambridge Univ. Press, 2010

[13] M. S. Kues, J. C. Loredo, and A. G. White, "Quantum Fourier Transform Has Small Entanglement," PRX Quantum, vol. 4, no. 4, p. 040318, 2023. doi: 10.1103/PRXQuantum.4.040318

[14] C. Gidney and M. Ekerå, "How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits," arXiv preprint arXiv:1905.09749, 2019. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1905.09749. [Accessed: 1-Apr-2025].

[15] A. Dash, D. Sarmah, B. K. Behera ve P. K. Panigrahi, "Exact search algorithm to factorize large biprimes and a triprime on IBM quantum computer," arXiv preprint arXiv:1805.10478, 2018. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1805.10478. [Erişim: 1-Nis-2025]

[16] X. Xu, L. Li, Y. Li, Y. Ma, X. Li, J. Zhang, H. Wang, Y. Liu, Y. Xu, Z. Zhang ve diğerleri, "Experimental quantum factoring of 48-bit semiprimes," Nature, vol. 586, no. 7828, pp. 48-52, 2020. [Online]. Available: https://www.nature.com/articles/s41586-019-1503-0. [Erişim: 1-Nis-2025].

[17] L. K. Grover, "A fast quantum mechanical algorithm for database search," in *Proc. 28th ACM Symp. Theory of Computing (STOC)*, 1996, pp. 212–219.

[18] L. Jaques, M. Naehrig, M. Roetteler, and F. Virdia, "Implementing Grover oracles for quantum key search on AES and LowMC," arXiv preprint arXiv:1910.01700, 2019. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1910.01700. [Accessed: 1-Apr-2025].

[19] S. D. and P. C., "On the Practical Cost of Grover for AES Key Recovery," Fifth PQC Standardization Conf., NIST, 2024. [Online]. Available: https://csrc.nist.gov/csrc/media/events/2024/fifth-pqc/documents/papers/on-practical-cost-of-grover.pdf

[20] NIST, "Post-Quantum Cryptography: NIST's Plan for the Future," 2022. [Online]. Available: https://www.nist.gov/news-events/news/2022/07/post-quantum-cryptography -nists-plan-future

[21] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI), "Migration to Post-Quantum Cryptography," BSI White Paper, 2023. [Online]. Available: https://www.bsi.bund.de

[22] European Union Agency for Cybersecurity (ENISA), "Post-Quantum Cryptography: Current State and Quantum Threats," 2023. [Online]. Available: https://www.enisa.europa.eu/publications/post-quantum-cryptography-report

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 906-918 (2025)

Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Çok Amaçlı Geometrik Optimizasyona Dayalı Performans İyileştirmesi

Melda EYÜBOĞLU[1], Burak YENİPINAR[2], Cemil OCAK[3*]

[1] *Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical-Electronics Engineering, Ankara, Türkiye*

[2] *Department of Electronic Technology, Vocational School, Ostim Technical University, Ankara, Turkey*

[3] *Gazi University, Faculty of Technology, Department of Electrical-Electronics Engineering, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 19/05/2025
Revision: 24/06/2025
Accepted: 03/07/2025

Keywords

Salient-Pole Synchronous Generator
Geometric Optimization
Multi-Objective Genetic Algorithm
Total Harmonic Distortion
Finite Element Analysis

Makale Bilgisi

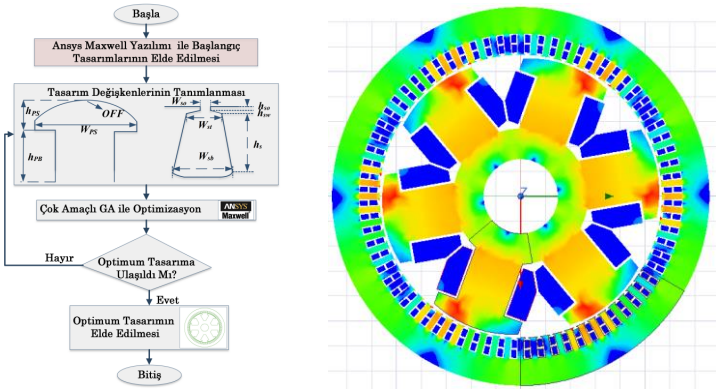
Araştırma makalesi
Başvuru: 19/05/2025
Düzeltme: 24/06/2025
Kabul: 03/07/2025

Anahtar Kelimeler

Çıkık Kutuplu Senkron Generator
Geometrik Optimizasyon
Çok Amaçlı Genetik Algoritma
Sonlu Elemanlar Analizi
Toplam Harmonik Bozulma

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, 600 kVA gücündeki çıkık kutuplu senkron generatörün tasarımı ve performans optimizasyon çalışmaları sunulmaktadır. Bu kapsamda Total Harmonik Bozunum (THD), verim ve manyetik akı yoğunluklarını iyileştirmek amacıyla belirlenen amaç fonksiyonu kullanılarak rotor ve stator geometrisi Çok Amaçlı Genetik Algoritma (ÇAGA) yöntemiyle optimize edilmiştir. / In this study, the design and performance optimization of a 600 kVA salient-pole synchronous generator are presented. For this purpose, the rotor and stator geometries were optimized using a Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) method, with an objective function defined to enhance Total Harmonic Distortion (THD), efficiency, and magnetic flux density.



(a) *(b)*

Şekil A: *(a) ÇAGA yöntemine dayalı optimizasyon akış şeması, (b) Manyetik akı yoğunluğu dağılımı / **Figure A**: (a) Optimization flowchart based on MOGA method, (b) Distribution of magnetic flux density*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Çıkık kutuplu senkron generatörün tasarım optimizasyon çalışması yapıldı. / A design optimization study was performed for the salient-pole synchronous generator.*
- *Optimizasyon sürecinde ÇAGA kullanıldı. In the optimization process, a MOGA was applied.*
- *2B Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ile optimum tasarımın doğrulaması yapıldı. / The optimal design was validated using 2D Finite Element Analysis (FEA).*

Amaç (Aim): *Senkron generatörün belirlenen amaç fonksiyonu doğrultusunda ÇAGA yöntemi ile tasarım parametrelerinin optimizasyonunu sağlamaktır. / To optimize the design parameters of the synchronous generator using the MOGA method in line with the defined objective function.*

Özgünlük (Originality): *Geometrik parametrelerin çok amaçlı optimizasyon yöntemiyle, farklı performans ölçütlerinin eş zamanlı olarak iyileştirilmesi sağlanmıştır. / Geometric parameters were optimized using a multi-objective optimization method to simultaneously improve different performance criteria.*

Bulgular (Results): *Başlangıç tasarım modeli optimize edilerek THD, verim gibi performans parametrelerinde önemli iyileşmeler sağlanmıştır. / The initial design model was optimized, resulting in significant improvements in performance parameters such as THD and efficiency.*

Sonuç (Conclusion): *Yapılan çalışma sonucunda %95.7 verime, %3.89 THD'ye ve nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğu 1.8 T'nın altında olan bir çıkık kutuplu senkron generatör tasarımı elde edilmiştir. / As a result of the study, a salient-pole synchronous generator design was achieved, exhibiting an efficiency of 95.7%, a Total Harmonic Distortion (THD) of 3.89%, and a magnetic flux density in the core below 1.8 T.*

*Corresponding author, e-mail: gulern@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1702303

GU J Sci, Part C, 13(3): 906-918 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Çok Amaçlı Geometrik Optimizasyona Dayalı Performans İyileştirmesi

Melda EYÜBOĞLU[1], Burak YENİPINAR[2], Cemil OCAK[3*]

[1] *Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical-Electronics Engineering, Ankara, Türkiye*

[2] *Ostim Technical University, Department of Electrical-Electronics Engineering, Ankara, Turkey*

[3] *Gazi University, Faculty of Technology, Department of Electrical-Electronics Engineering, Ankara, Turkey*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/05/2025
Düzeltme: 24/06/2025
Kabul: 03/07/2025

Anahtar Kelimeler

Çıkık Kutuplu Senkron Generator
Geometrik Optimizasyon
Çok Amaçlı Genetik Algoritma
Sonlu Elemanlar Analizi
Toplam Harmonik Bozulma

Öz

Bu çalışmada, çıkık kutuplu senkron generatörlerin elektromanyetik performanslarının artırılmasına yönelik olarak geometrik parametrelerin optimizasyonuna dayalı bir tasarım yaklaşımı sunulmuştur. Generatörün eşdeğer devresi ve elektromanyetik modeli geliştirilmiş, başlangıç tasarımı analitik olarak oluşturulmuş ve ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Kritik öneme sahip rotor ve stator geometrisine ait parametreler optimizasyon değişkeni olarak tanımlanmış ve Çok Amaçlı Genetik Algoritma (ÇAGA) yöntemiyle optimize edilmiştir. Optimizasyon sürecinde verimlilik, tam yük çıkış gerilimi toplam harmonik bozulma (THD), stator ve rotor akı yoğunlukları ile oluk doluluk oranı gibi çok sayıda performans kriteri dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, optimizasyonun generatör performansında anlamlı iyileşmelere yol açtığını göstermektedir. Tam yük çıkış gerilimi THD değerinde %64'e varan azalma sağlanırken, toplam kayıplar yaklaşık %16 oranında azaltılarak karşılık gelen generatör verimi değerinde %0,78 düzeyinde iyileşme sağlanmıştır. Nihai tasarım, 2B Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ile doğrulanarak akı yoğunluğu, akım yoğunluğu ve termal limitler açısından uygunluğu ortaya konmuştur.

Performance Enhancement of a Salient-Pole Synchronous Generator Through Multi-Objective Geometric Optimization

Article Info

Research article
Received: 19/05/2025
Revision: 24/06/2025
Accepted: 03/07/2025

Keywords

Salient-Pole Synchronous Generator
Geometric Optimization
Multi-Objective Genetic Algorithm
Total Harmonic Distortion
Finite Element Analysis

Abstract

This study presents a geometry-based design approach aimed at improving the electromagnetic performance of salient pole synchronous generators. The equivalent circuit and electromagnetic model of the generator were developed, and the initial design was analytically constructed and modeled using ANSYS Maxwell software. Geometrical parameters of critical importance in the rotor and stator structures were defined as optimization variables and optimized using a Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA). The optimization process considered multiple performance criteria, including efficiency, total harmonic distortion (THD) of the full-load output voltage, magnetic flux densities in the stator and rotor, and slot fill factor. The results demonstrate that the optimization approach leads to notable improvements in generator performance. Specifically, the THD of the output voltage was reduced by up to 64%, total losses were decreased by approximately 16%, and the corresponding generator efficiency was improved by about 0,78%. The final design was validated through two-dimensional 2D Finite Element Analysis (FEA), confirming its compliance with electromagnetic and thermal limits in terms of flux density, current density, and thermal constraints.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisi, iş üretme yeteneğini belirleyen ve toplumların yaşam tarzlarını şekillendiren temel bir enerji türüdür. Elektrik enerjisi doğrudan depolanamasa da uzun mesafelere etkin biçimde iletilebilmesi ve talebe göre kontrol edilebilmesi onu diğer enerji türlerinden ayıran ayırt edici bir özelliktir. Elektrik enerjisi, günümüzde yaşamın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiş ve buna bağlı olarak enerji talebi hızla artmıştır [1]. Artan enerji talebini karşılamak için enerji üretim kapasitesinin de aynı oranda artırılması gerekmektedir [2]. Ancak enerji üretiminin artışı, çevre kirliliği ve sera gazı

*Corresponding author, e-mail: gulern@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1702303

emisyonlarında da önemli bir artışa yol açmaktadır. Bu olumsuz çevresel etkileri en aza indirmek amacıyla birçok ülke yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedir [3]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının öne çıkan avantajları arasında; karbondioksit emisyonlarını azaltarak çevreyi korumaları, yerli kaynaklar olmaları nedeniyle dışa bağımlılığı azaltmaları ve istihdamı artırmaları sayılabilir. Başka bir ifadeyle, yenilenebilir enerji kaynakları ulaşılabilirlik, süreklilik ve çevresel kabul edilebilirlik gibi temel kriterleri bir arada sunmaktadır [4]. Türkiye, sahip olduğu enerji potansiyeline rağmen toplam enerji ihtiyacının önemli bir kısmını ithalat yoluyla karşılayan ve bu yönüyle enerjide dışa bağımlı bir ülkedir. Türkiye'deki birincil enerji kaynaklarının hem sınırlı olması hem de çevresel sorunlara yol açması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını kaçınılmaz hale getirmektedir [5]. Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları açısından değerlendirildiğinde, özellikle yüksek hidroelektrik potansiyeli ile öne çıkmakta ve bu durum hidroelektrik enerjiyi stratejik bir kaynak haline getirmektedir [6]. Elektrik enerjisine olan talep, dünya nüfusundaki hızlı artışa paralel olarak yükselmekte; kişi başına düşen elektrik tüketimi ise bir ülkenin gelişmişlik düzeyini gösteren önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Bu gelişmeler, çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını her zamankinden daha önemli hale getirmektedir [7]. Elektrik makineleri arasında yer alan senkron generatörler, elektrik enerjisi üretiminde kritik rol oynayan temel bileşenlerdendir. Senkron generatörler, kullanım alanlarına ve bağlı oldukları santral tiplerine göre farklı yapı ve özelliklerde tasarlanmaktadır. Düşük devirli çalışma karakteristikleri nedeniyle genellikle hidroelektrik santrallerde tercih edilen çıkık kutuplu senkron generatörler, genellikle 4 veya daha fazla kutuplu olarak tasarlanmaktadır [8]. Artan enerji ihtiyacı, elektrikli makinelerin tasarımına yönelik ilgiyi artırmakta; aynı zamanda enerji kaynaklarının tükenmesi ve birim enerji maliyetlerindeki artış, daha yüksek performanslı senkron generatörlerin geliştirilmesine yönelik araştırmaları teşvik etmektedir [9]. Enerji verimliliğinin artırılması ve kaliteli elektrik üretiminin sağlanması açısından senkron generatörlerin tasarım optimizasyonu büyük bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda, düşük verimliliğe sahip, ekonomik ömrünü tamamlamış santral generatörlerinin; modern ve yüksek verimli tasarımlarla yenilenmesi giderek yaygınlaşmaktadır. Uygulanan optimizasyon teknikleri ile senkron generatör tasarımlarında geometrik parametrelerin iyileştirilmesi, verimliliğin artırılması, kompakt yapı elde edilmesi ve manyetik yoğunluğunun artırılarak birim hacimde kullanılan aktif malzeme miktarının azaltılması gibi önemli çıktılar elde edilebilmektedir [10]. Ayrıca, santrallerde üretilen gerilim sinyallerindeki harmoniklerin minimize edilerek IEEE 519-2014 standardına uygun, düşük harmonikli sinüzoidal dalga şekline dönüştürülmesi için generatör tasarımında çeşitli optimizasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir [11].

Bu kapsamda, [12] numaralı çalışmada çıkık kutuplu senkron hidrogeneratörlerin dinamik ve geçici rejim analizleri doğrultusunda, ardışık karma değişkenli doğrusal olmayan programlama yöntemi kullanılarak optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmada; kısa devre oranı (SCR), kutup yay merkez uzaklıkları, rotor kutup gövde yüksekliği ve genişliği, kutup ayak boyutları ve iç çap gibi parametreler değişken olarak ele alınmış ve motor performansı bu değişkenler ışığında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Tasarım sonuçlarına göre, en uygun güç faktörü $0{,}49 < SCR < 0{,}50$ aralığında elde edilmiş; ayrıca $0{,}49 < SCR < 0{,}53$ aralığında çıkış gücünün 500–600 kW arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Toplam makine ağırlığının azaltılması ile birlikte stator ve rotor üzerindeki bakır kayıplarında anlamlı bir azalma tespit edilmiştir. Optimizasyon sonucunda, makinenin toplam ağırlığı 1223 kg'dan 934 kg'a düşürülerek yaklaşık %24'lük bir iyileşme sağlanmıştır. [13] numaralı çalışmada, çıkık kutuplu senkron generatörler için SEA yazılımı kullanılarak rotor geometrisine yönelik bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, stator sargı adımı ve damper çubuk dağılımı gibi değişkenler ele alınmakla birlikte, odak noktası hava aralığı olarak belirlenmiş ve harmonik içeriği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Hava aralığının artmasıyla birlikte manyetik devredeki relüktans geçişinin yükseldiği ve bu artışı telafi edebilmek için daha yüksek uyartım akımına ihtiyaç duyulduğu gözlemlenmiştir. Artan uyartım akımının, makine reaktansları ve toplam kayıplar üzerinde olumsuz etkiler yarattığı; bunun da verimliliği düşürdüğü belirlenmiştir. Optimizasyon sürecinde, THD değerinin minimize edilmesi ve gerilimin etkin değerinin 13,8 kV sınırları içinde tutulması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar,

kullanıcı müdahalesine ihtiyaç duymayan ve analiz süresini kısaltarak verimliliği artıran bir sonlu eleman optimizasyon döngüsünün geliştirildiğini göstermektedir. Ayrıca, hava aralığı değerinin, rotor sargı tasarımında fiziksel bir sınır oluşturarak THD değerinin optimum düzeye indirgenmesinde etkili olduğu belirlenmiştir. [14] numaralı çalışmada, genetik algoritma yöntemiyle senkron makine tasarımı gerçekleştirilmiş ve optimal tasarım parametreleri belirlenmiştir. Beş farklı parametrenin değişken olarak tanımlandığı çalışmada, statorda kullanılan bakır ve demir hacmi azaltılmış; böylece başlangıç tasarımına kıyasla kayıplarda önemli bir azalma sağlanmıştır. Çalışma sonucunda, çıkış gücü sabit tutulmak kaydıyla makine verimi maksimize edilmiş ve güç/ağırlık oranında iyileşme sağlanmıştır. Literatür çalışmaları incelendiğinde, rotor ve stator geometrik optimizasyonuna dayalı çalışmalarda farklı optimizasyon algoritmalarının ve amaç fonksiyonlarının kullanıldığı görülmektedir.

Tablo 1. *Çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarına yönelik çalışmaların karşılaştırılması (Comparison of studies on multi-objective optimization approaches)*

Kaynak	Makina Tipi	Optimizasyon Yöntemi	Amaç Fonksiyonları	Optimize Edilen Parametreler	Doğrulama
[15]	Sabit mıknatıslı senkron motor	Derin öğrenme (MLP)	Ortalama moment, moment salınımı, THD, verim	Mıknatıslar arası açı ve akı bariyeri genişliği	SEA
[16]	Çıkık kutuplu relüktans tipi manyetik dişli	Yapay sinir ağı (ANN), NSGA-II	Ortalama moment, moment salınımı, ağırlık	İç çap, kutup uzunluğu ve açısı, diş açısı	SEA
[17]	Çıkık kutuplu senkron generatör	Yarasa algoritması (BAT)	Verim, stator akı yoğunlukları	Stator oluk genişliği ve yüksekliği	SEA
[18]	Paralel manyetik devreli hibrit uyartımlı senkron generatör	Genetik Algoritma (GA)	Yüksüz THD ve indüklenen maksimum gerilim	Kutup genişliği ve yay açısı	SEA ve Test
[19]	Çıkık kutuplu hibrit uyartımlı senkron generatör	Çok amaçlı genetik algoritma (MOGA)	İndüklenen gerilim, vuruntu momenti, hava aralığı akı yoğunluğu	Mıknatıs açısı ve kalınlığı, kutup genişliği ve yüksekliği	SEA ve Test
Bu çalışma	Çıkık kutuplu senkron generatör	Çok amaçlı genetik algoritma (MOGA)	Verim, THD, akı yoğunlukları, oluk doluluk oranı	Stator diş ve oluk ağız genişliği, oluk yüksekliği, kutup yay ofseti, kutup gövde yüksekliği, kutup ayak yüksekliği, kutup ayak genişliği	SEA

Son yıllarda senkron makine tasarımında çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarına olan ilgi artmış ve özellikle hibrit uyartımlı yapılar, metamodel destekli analizler ve gelişmiş evrimsel algoritmalar öne çıkmıştır. Tablo 1 incelendiğinde, literatürde yer alan [15] numaralı çalışmada, elektrikli araçlar için geliştirilen PMSM tasarımı, derin öğrenme destekli bir metamodel aracılığıyla optimize edilmiştir. [16] numaralı çalışmada ise relüktans tipi manyetik dişli sistemi için Bayes optimizasyonu ile desteklenmiş yapay sinir ağı modeli kullanılarak çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Her iki çalışmada da FEM analiz süresi önemli ölçüde kısaltılırken moment salınımı, verim ve moment yoğunluğu gibi hedeflere odaklanılmıştır. [17] numaralı çalışmada ise Yarasa algoritması kullanılarak verim ve stator akı yoğunlukları iyileştirilmiştir. Diğer taraftan, [17] ve [19]

numaralı çalışmalarda farklı hibrit uyarımlı senkron generatör yapıları ele alınmış; genetik algoritma kullanılarak rotor geometrisini oluşturan sınırlı parametreler optimize edilmiştir. İlgili çalışmalarda optimizasyon probleminde değişken olarak tanımlanan parametreler sınırlı düzeyde kalmakla birlikte, bu çalışmada verildiği üzere verim, THD, akı yoğunlukları ve oluk doluluk oranı gibi bütüncül bir amaç fonksiyonunun kullanılmayarak optimizasyon problemi kısıtlı düzeyde tanımlanmıştır. Bu çalışmada ise hem rotor hem de stator parametrelerini kapsayan çok amaçlı bir optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bu yönüyle, önerilen yöntem literatürdeki hibrit ve veri destekli çalışmalara kıyasla geleneksel yapılarda yüksek performans elde etmeyi hedefleyen bir yaklaşım sunmaktadır.

Senkron generatörlerde kullanılan aktif malzemeler hem performans hem de maliyet açısından belirleyici bir faktördür. Bu kapsamda çalışmada malzeme seçimi, manyetik özellikler, mekanik sağlamlık ve termal iletkenlik gibi kriterleri sağlayacak malzeme kombinasyonları belirlenmiştir. Tanımlanan başlangıç tasarımı ANSYS Maxwell yazılımında modellenmiş ve sonrasında elektromanyetik analizlere tabi tutulmuştur. Tasarım sürecinde kritik rol oynayan geometrik değişkenler ile rotor ve stator yapısını belirleyen parametreler, amaç fonksiyonuna uygun biçimde tanımlanarak optimize edilmiştir. Bu optimizasyon süreci sonucunda, analitik tasarıma dayalı olarak verimlilik artırılmış; THD düşürülmüş, stator akı yoğunluğu, rotor kutup akı yoğunluğu ve stator boyunduruk akı yoğunluğu gibi elektromanyetik değişkenler hedeflenen sınırların altına çekilerek bütüncül bir yaklaşımla optimize edilmiştir. Bu çalışma ile literatüre sunulan ana katkılar üç temel başlık altında sunulmaktadır. ***(i)*** Geometrik parametrelerin çok amaçlı optimizasyonu ile verimlilik, akı yoğunlukları ve THD gibi farklı performans ölçütlerinin eş zamanlı iyileştirilmesi sağlanmıştır. ***(ii)*** Rotor ve stator geometrisine ait kritik değişkenlerin birlikte optimize edildiği parametrik bir arama uzayı tanımlanmış ve bu yapı, Pareto optimal çözümler temelinde analiz edilmiştir. ***(iii)*** Elde edilen optimizasyon çıktıları SEA ile doğrulanarak tasarım süreci elektromanyetik ve termal açıdan bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde çıkık kutuplu senkron generatörün tasarım gereksinimleri, boyutlandırılması ve teknik özellikleri sunulmuştur. Üçüncü bölümde stator ve rotor geometrik optimizasyonu detaylandırılmış; dördüncü bölümde ise araştırma sonuçları ve değerlendirmeler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

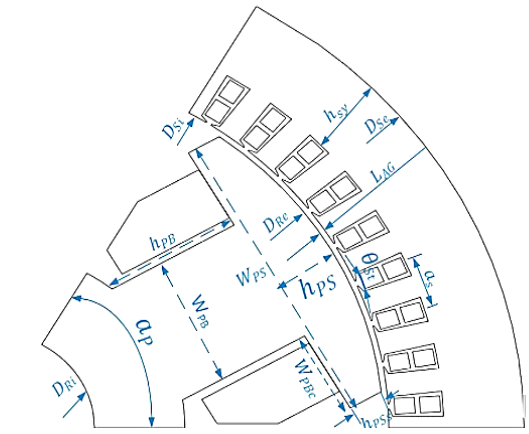
2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Tasarım Gereksinimleri (Design Requirements of Salient Pole Synchronous Generator)

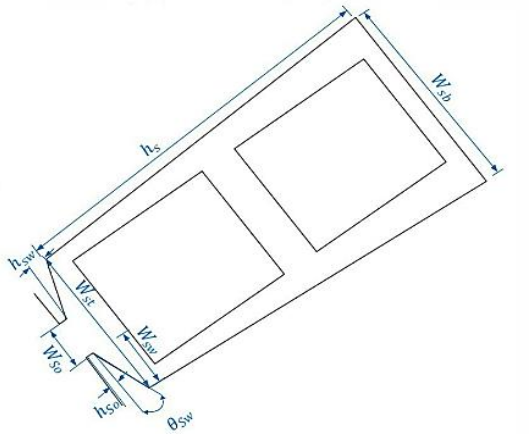
Senkron generatör tasarımında ilk adım, faz sayısı, anma gücü ve hızı, frekans, güç faktörü ve anma gerilimi gibi temel tasarım parametrelerinin belirlenmesidir. Hava aralığında izin verilen kesit alanına göre oluşabilecek paralel gerilmeler dikkate alınarak rotor dış çapı hesaplanır ve böylece generatörün ilk boyutlandırması gerçekleştirilir. Rotor boyutu belirlendikten sonra, alan sargısının yerleştirileceği bölge tanımlanarak iletken yüzeyi ve sarım sayısı gibi parametreler belirlenir. Statorun genel boyutlandırmasının ardından, oluk geometrisi belirlenerek stator tasarımı sonuçlandırılır. Stator tasarımı tamamlandıktan sonra, rotor ile stator arasındaki hava aralığı mesafesi mekanik toleranslar gözetilerek belirlenir. Hava aralığı, rotor ve stator arasında manyetik akının optimum dağılımını sağlayacak biçimde belirlenir ve bu bölgede oluşacak manyetik akı yoğunluğu hesaplanır. Bu aşamaya kadar yapılan tasarım hesaplamaları, generatörün yüksüz çalışma koşulları altında olduğu varsayımıyla gerçekleştirilir. Tam yük koşullarına ilişkin analizlere geçilmeden önce, elde edilen çıkış gücünün kabul edilebilir düzeyde olup olmadığı doğrulanmalıdır. Tasarlanan rotor ve stator parametreleri ile hedeflenen çıkış gücüne ulaşılamıyorsa, eksenel uzunluk gibi yapısal parametreler yeniden düzenlenerek uygun akım yoğunluğu değerine ulaşılır ve generatör çıkış gerilimi hesaplanır [20]. Çıkış geriliminin istenen seviyeye ulaşmasının ardından, sistemdeki kayıplar ve buna bağlı olarak generatörün verimliliği hesaplanır. Damper sargıları, uzay harmoniklerini azaltarak dönüş sırasında oluşabilecek geçici değişimlere karşı sönümleyici moment üreterek geçiş performansını artırmaktadır [21]. Verimlilik hesabının tamamlanmasının ardından, tasarlanan senkron generatörün belirlenen tasarım kriterlerini sağlayıp sağlamadığı SEA ile doğrulanabilir.

2.2. Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Boyutlandırılması (Sizing of Salient Pole Synchronous Generator)

Bu bölümde, belirlenen tasarım gereksinimleri doğrultusunda kullanılan temel boyutlandırma denklemleri verilmiştir. Şekil 1'de, boyutlandırma denklemlerinde kullanılan geometrik parametrelerin tanımları görsel olarak sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 1. *Senkron generatörün geometrik bileşenleri a) Stator ve rotor geometrisi b) Stator oluk detayı* *(Geometric components of a synchronous generator a) Stator and rotor geometry b) Stator slot detail)*

Elektrik makinalarının tasarımına kutup sayısının seçimi ile başlanmaktadır.

$$2p = 120 \cdot \frac{f}{n} \tag{1}$$

Eş. 1'de p kutup sayısını, f frekansı ve n d/dk cinsinden dönüş hızını ifade etmektedir. Rotor hacmi başına düşen kVA miktarını tanımlayan çıkış güç katsayısı C, manyetik ve elektriksel yükleme cinsinden ifade edilebilir. Ayrıca bu değer, kutup sayısı ve soğutma etkinliği ile doğrudan ilişkilidir.

$$C = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot K_w \cdot A.B_g \tag{2}$$

Eş. 2'de B_g hava aralığı akı yoğunluğunu, K_w sargı faktörünü ve A ise birim çevresel uzunluk başına düşen spesifik elektrik yüklemesini (A/m) temsil etmektedir. Belirlenen manyetik ve elektrik yükleme değerleri doğrultusunda generatörün elektromanyetik gücü aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$P_{elm} = 3.\frac{\omega_1}{\sqrt{2}}(W_1.K_w).\phi_1.I_1 \tag{3}$$

Burada ω_1 açısal hız, ϕ_1 ise kutup başına akı değerini ifade eder. Spesifik teğetsel kuvvet olarak tanımlanan f_t Eş. 4'te verilmiştir.

$$f_t = \frac{P_{elm}}{2\pi n_1.\pi\left(\frac{D}{2}\right).D.l_{\mathrm{i}}} = \frac{1}{\pi^2} \cdot C \tag{4}$$

Eşitlikte n_1 devir sayısını, l_{i} ideal paket uzunluğunu, D rotor dış çapını ifade eder. Generatörlerde rotor çapının belirlenmesinde etkili olan önemli parametrelerden biri de rotor çevresel hızıdır. Maksimum çevresel hız Eş. 5'te tanımlandığı şekilde hesaplanabilir.

$$U_{\max} = \pi \cdot D_{max}.n_n.\frac{n_{max}}{n_n} \tag{5}$$

$U_{\max}$ değeri, geçici rotor çapı D_{max} ile birlikte n_{max}/n_n oranıyla sınırlandırılır ve bu oran hidrogeneratörler için turbogeneratörlere kıyasla daha yüksek alınır. Rotor ataleti, hız ve güçle orantılı atalet sabiti ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\mathrm{H} = \frac{\mathrm{J}\left(\frac{\omega}{p_1}\right)^2}{2S_n} \tag{6}$$

Burada J rotor ataleti, ω açısal hız, S_n ise nominal görünür gücü ifade etmektedir. Üç fazlı simetrik yapı gözetilerek stator oluk sayısı N_{s} Eş. 7'de verilen ifade ile hesaplanır.

$$N_{\mathrm{s}} = 2p_1.q.m \tag{7}$$

Bu eşitlikte p_1 kutup çifti sayısı, m faz sayısı, q faz başına kutup başına oluk sayısıdır.

$$g = 4.0.10^{-7}\frac{A.\tau}{(x_{\mathrm{d}}-0.1)B_g} \tag{8}$$

Hava aralığı g; Eş. 8'de verildiği gibi hesaplanır. τ kutup adımını, x_{d} d-eksen senkron reaktansını ve A elektrik yükleme (A/m) değerini ifade eder.

$$A_{\mathrm{slot}} = \frac{6.W_{\mathrm{a}}.I_{\mathrm{n}}}{N_{\mathrm{s}}.K_{fill}.j} \;\; ; \;\; A_{\mathrm{slot}} = b_s.h_s \tag{9}$$

Oluk alanı A_{slot}, Eş. 9'da verildiği gibi akım yoğunluğu j, oluk doluluk oranı K_{fill}, nominal akım I_{n}, paralel kol başına düşen sarım sayısı W_{a} ile hesaplanabilir.

$$D_{Si} = D + 2g \tag{10}$$

Stator iç çapı D_{Si} Eş. 10'da verildiği üzere rotor dış çapı ve hava aralığı dikkate alınarak hesaplanır.

$$D_{St} = D_{Si} + 2.(h_{\text{So}} + h_{\text{Sw}}) \tag{11}$$

D_{St} oluk üst kenarının çapı, Eş.11'deki gibi h_{So} oluk ağzı yüksekliği ve h_{Sw} oluk kenar yüksekliği ile ifade edilir.

$$W_{St} = D_{So}.\tan\frac{\theta_{St}}{2} \tag{12}$$

W_{St} oluk üst kenar genişliğini ise θ_{St} bir oluğun üst kısmının kapladığı açı yardımıyla bulunur.

$$D_{So} = D_{St} + 2h_S + 2h_{SY} \tag{13}$$

D_{So} stator dış çapı ise, h_S oluk yüksekliği ve h_{SY} stator boyunduruk yüksekliği dahil edilerek bulunur.

$$l_{\text{i}} \approx \frac{S_{\text{n}}}{\text{C.D}^2.n_n} \tag{14}$$

Son olarak ideal paket uzunluğu olan l_{i} Eş.14'te yardımıyla hesaplanır [2,22].

2.3. Tasarlanan Çıkık Kutuplu Senkron Generatör ve Özellikleri (Designed Salient Pole Synchronous Generator and Specifications)

Tasarım gereksinimlerine göre yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen çıkık kutuplu senkron generatörün temel özellikleri Tablo 2'de sunulmaktadır.

***Tablo 2**. Tasarlanan çıkık kutuplu senkron generatörün temel özellikleri* (Key features of the designed salient pole synchronous generator)

Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Temel Özellikleri		**Stator ve Rotor Parametreleri**	
Nominal Görünür Güç (kVA)	600	Stator Oluk Sayısı	72
Nominal Güç Faktörü	0,9 (ind)	Stator Dış Çapı (mm)	760
Çıkış Gücü (kW)	540	Stator İç Çapı (mm)	568
Nominal Gerilim (V)	400	h_{s0}(mm)	0,75
Sipir Sayısı	10	h_{sw} (mm)	2
Adım Sayısı	12	h_s (mm)	30
Kutup Sayısı	6	W_{s0} (mm)	4
Frekans (Hz)	50	W_{st} (mm)	11,52
Nominal Hız (rpm)	1000	W_{sb}(mm)	14,66
Çalışma Sıcaklığı (°C)	115	Minimum Hava Aralığı (mm)	4
Rüzgâr Kaybı (W)	1000	Rotor İç Çapı (mm)	150
Sürtünme Kaybı (W)	2600	Paket Uzunluğu (mm)	440
Stator Sargısı Tel Kesiti (mm)	3,3	Rotor Kutup Ayak Genişliği (mm)	230
Nüve Malzemesi	M400-50A	Rotor Kutup Ayak Yüksekliği (mm)	50
Kısa Devre Oranı	0,3519	Rotor Kutup Gövde Genişliği (mm)	100
Uyartım Sargısı Tel Kesiti (mm)	5	Kutup Başına İletken Sayısı	190
Faz Gerilimi (V)	230,94	Faz Akımı (A)	866,02
Uyartım Akımı (A)	40,05	Uyartım Gerilimi (V)	93,45
Toplam Net Ağırlık (kg)	1242,15	Rotor Kutup Gövde Yüksekliği (mm)	100

Geometrik parametreleri belirlenen çıkık kutuplu senkron generatörün performans analizleri, ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş; elde edilen sonuçlar doğrultusunda tasarım doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda başlangıç tasarımına ait elde edilen performans parametreleri Tablo 3'te sunulmuştur.

***Tablo 3**. Başlangıç tasarımına ait performans parametreleri (Performance parameters of the initial design)*

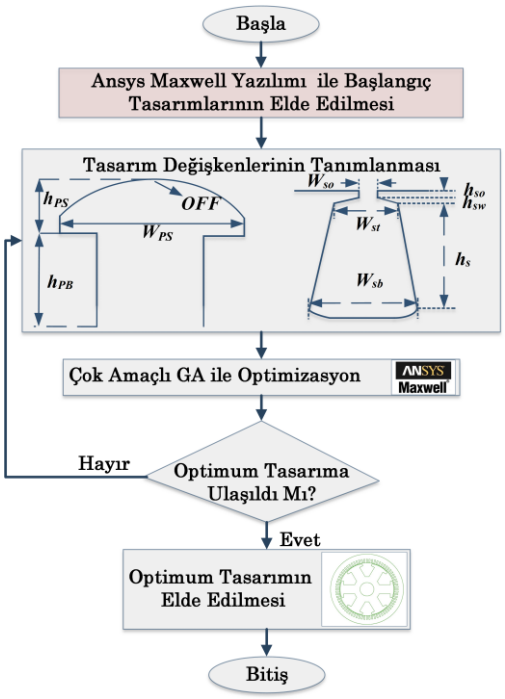
Parametreler	Başlangıç Tasarımı
Verim (%)	94,92
THD (%)	10,85
Stator Diş Akı Yoğunluğu (T)	1,25
Rotor Kutup Akı Yoğunluğu (T)	1,51
Stator Boyunduruk Akı Yoğunluğu (T)	1,35
Oluk Doluluk Oranı (%)	56,56
Toplam Kayıp (kW)	28,92

3. STATOR VE ROTOR GEOMETRİK OPTİMİZASYONU (GEOMETRIC OPTIMISATION OF STATOR AND ROTOR)

Optimizasyon, belirli bir amaç doğrultusunda tanımlanan hedef fonksiyonun maksimum veya minimum değerlerini, çeşitli kısıtlar altında en uygun şekilde elde etmeyi amaçlayan bir çözüm sürecidir. Çeşitli mühendislik alanlarında, probleme özgü matematiksel modeller ve yöntemsel analizler doğrultusunda farklı optimizasyon yaklaşımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Optimizasyon problemleri; doğrusal veya doğrusal olmayan yapıdaki hedef fonksiyonlara göre farklı yöntemlerle çözülebilmekte ve kullanılan teknikler problemin doğasına göre şekillenmektedir. Genel olarak bir optimizasyon problemi; amaç fonksiyonu, karar değişkenleri, kısıtlayıcı koşullar ve çözüm uzayı olmak üzere dört temel bileşenden oluşur [23].

Başlangıç tasarımı tamamlanan çıkık kutuplu senkron generatörün optimum geometrik yapısını elde etmek amacıyla, ANSYS Maxwell yazılımı ve ÇAGA kullanılarak optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. *ÇAGA yöntemine dayalı optimizasyon akış şeması (Optimization flow chart based on the MOGA method)*

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde temel hedef, birbirleriyle çelişebilen birden fazla performans kriterini aynı anda iyileştirebilecek çözümler elde etmektir. Karar vericinin sürece doğrudan müdahil olmadığı durumlarda, çok amaçlı bir optimizasyon problemi için tek bir nihai çözüm seçimi çoğunlukla zordur.

Bu amaçla, en uygun çözüm kümesi olan Pareto optimal çözümler tercih edilir. Genetik algoritmalarda tüm Pareto optimal çözümlerin elde edilebilmesi için, her nesilde popülasyon çeşitliliğinin korunması büyük önem taşımaktadır [23].

Tablo 4. *Optimizasyon sürecinde kullanılan geometrik tasarım değişkenleri ve sınır değerleri* (Geometric design variables and boundary values used in the optimization process)

Semboller	Parametreler	Başlangıç Değeri	Minimum Değeri	Maksimum Değeri
W_{S0}	Oluk Ağız Genişliği	5,97 mm	2mm	6 mm
h_S	Oluk Kanadı Yüksekliği	36 mm	18 mm	40 mm
OFF	Kutup Yay Ofseti	0 mm	0 mm	50 mm
h_{PB}	Kutup Gövde Yüksekliği	100 mm	75 mm	125 mm
h_{PS}	Kutup Ayak Yüksekliği	50 mm	19 mm	55 mm
W_{PS}	Kutup Ayak Genişliği	150 mm	140 mm	180 mm
TW	Stator Diş Genişliği	10 mm	9 mm	17 mm

Optimizasyon sürecinde kullanılan tasarım değişkenleri ile bunlara ait alt ve üst sınır değerlerinden oluşan arama uzayı Tablo 4'te sunulmuştur. Bu değişkenlerin fiziksel karşılıkları Şekil 1'de görsel olarak sunulmuştur. Rotor ve statorun geometrik parametreleri, generatörün verimi, üretilen gerilim dalga formu ve THD üzerinde doğrudan etkiye sahiptir.

Tablo 5'te, ÇAGA optimizasyon sürecinde kullanılan parametreler verilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada optimizasyon süreci rastgele oluşturulan 100 başlangıç örneğiyle başlamakta ve her bir iterasyonda 50 aday çözüm üzerinden analiz gerçekleştirilmektedir. Değişken sayısına bağlı olarak optimizasyon 20 iterasyon ile sınırlandırılmış ve çözümlerin %70'inin Pareto Optimum çözüm olmasına izin verilmiştir. Aynı zamanda yakınsama için de %0,0001 hassas bir kararlılık kriteri kullanılarak verimli bir optimizasyon süreci yürütülmesi amaçlanmıştır.

***Tablo 5**. ÇAGA parametre ayarları (MOGA parameter settings)*

Parametre	**Değer**
Başlangıç Örnek Sayısı	100
Her Bir İterasyondaki Örnek Sayısı	50
İzin Verilen Maksimum Pareto Yüzdesi (%)	70
Yakınsama Kararlılığı Yüzdesi (%)	0,0001
Maksimum İterasyon Sayısı	20

Tasarlanan çıkık kutuplu senkron generatörün optimizasyon sürecinde; verimlilik, tam yük çıkış gerilimi THD'si, stator dişi akı yoğunluğu, rotor kutup akı yoğunluğu ve stator boyunduruk akı yoğunluğunu içeren çok amaçlı bir amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Belirlenen amaç fonksiyonuna ilişkin sınır değerler ve her parametreye atanan ağırlık katsayıları Tablo 6'da verilmiştir.

***Tablo 6**. Belirlenen amaç fonksiyonuna ait sınır değerleri ve ağırlık katsayıları tablosu (Table of boundary values and weight coefficients for the specified objective function)*

Parametreler	**Sınır Değerleri**	**Ağırlıkları**
Verim (%)	>=96	[50]
THD	<=3	[35]
Stator Dişi Akı Yoğunluğu	<=1,5	[5]
Rotor Kutup Akı Yoğunluğu	<=1,5	[5]
Stator Boyunduruk Akı Yoğunluğu	<=1,5	[5]

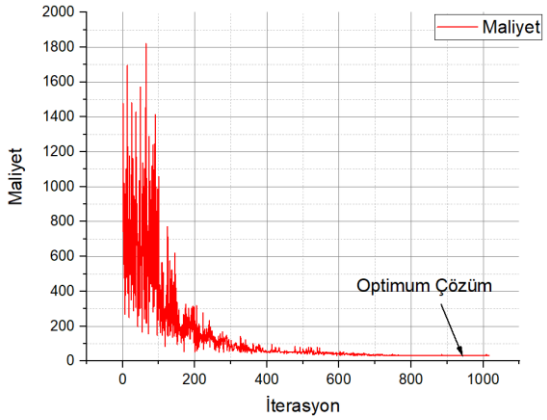
Çıkık kutuplu senkron generatörlerin verimliliği; manyetik akı dağılımı, güç kapasitesi, termal davranış, manyetik doyum, moment karakteristikleri ve sargı yapısı gibi çeşitli parametrelerden etkilenmektedir. Rotorun çıkıntılı geometrisinin uygun şekilde optimize edilmesi, hava aralığındaki manyetik akının istenilen dalga formunda elde edilmesi için oldukça önemlidir. Stator sargılarının düzgün ve dengeli biçimde yerleştirilmesi, sargı kayıplarını azaltarak verimliliğin artırılmasına doğrudan katkı sağlar. THD, elektriksel sistemlerdeki harmonik bileşenlerin temel frekansa oranını temsil eden ve genellikle yüzde cinsinden ifade edilen bir güç kalitesi göstergesidir. THD'nin yüksek olması, düşük güç kalitesi ve verimlilikle birlikte sistem performansının bozulmasına yol açar. Stator diş akı yoğunluğu, stator dişinden geçen manyetik akının birim alana düşen değeridir ve akı yoğunluğunun yüksek olması durumunda generatör daha fazla güç üretebilir. Ancak yüksek akı yoğunluğu, artan iç ısı oluşumuna ve manyetik kayıpların yükselmesine sebep olabilir; bu da sistemin verimliliğini olumsuz etkiler. Benzer şekilde, rotor kutup akı yoğunluğu da verimlilik, güç üretimi, manyetik kayıplar ve ısıl yönetim üzerinde doğrudan etkilidir. Vuruntu momenti, generatör rotorunun dönüşü sırasında oluşan ani ve geçici moment dalgalanmalarıdır; bu değerin yüksek olması, mekanik zorlanmalar, aşınma ve titreşim gibi olumsuz sonuçlara yol açabilir. Rotor geometrisi, manyetik akı dağılımı, damper sargılarının yerleşimi ve sargı yapısının optimize edilmesi, vuruntu momentinin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte, sistemdeki titreşim kontrolü ve mekanik dengeleme önlemleri, moment dalgalanmalarının azaltılmasına ilave katkı sunar. Ayrıca, stator boyunduruk akı yoğunluğu değerinin uygun aralıkta tutulması, nüve kayıplarının azaltılmasına ve generatörün verimli çalışmasına olanak tanır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA (RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION)

Bu bölümde, çıkık kutuplu senkron generatörün tasarım süreci ve ANSYS Maxwell yazılımında ÇAGA kullanılarak yürütülen optimizasyon çalışmalarının çıktıları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Geometrik tasarım değişkenlerinin optimize edilmesiyle, performans ölçütlerinde anlamlı gelişmeler elde edilmiştir. Rotor ve stator geometrisinin optimize edilmesi sonucunda,

özellikle THD ve verimlilik değerlerinde önemli iyileşmeler sağlanmıştır. Şekil 3'te, ÇAGA kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait iterasyon sayıları ve her bir iterasyonda elde edilen çözümlerin yakınsama eğilimi sunulmuştur.

Başlangıç tasarımına ait geometrik parametreler ile optimizasyon sonucunda elde edilen optimum tasarım değişkenleri ve ilgili performans çıktıları karşılaştırmalı biçimde Tablo 7'de sunulmuştur.



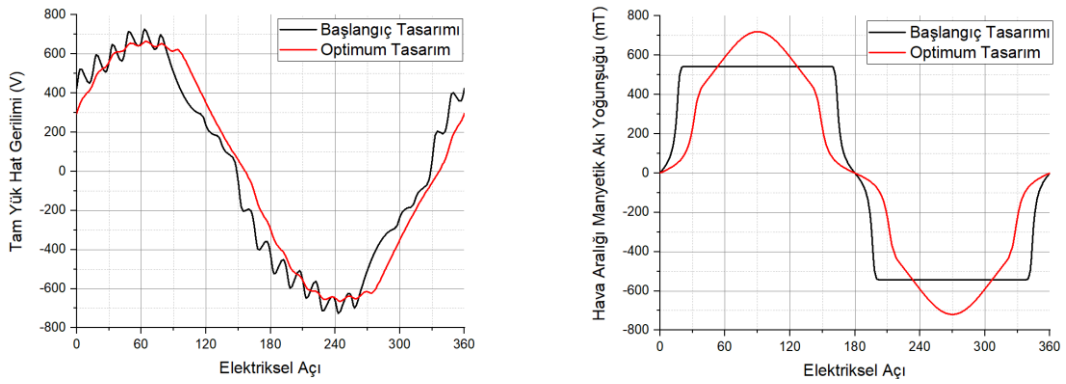
Şekil 3. *ÇAGA İterasyon Sonuçları (MOGA Iteration Results)*

Tablo 7. *Başlangıç ve optimum tasarımın geometrik ve performans parametreleri karşılaştırması (Comparison of geometric and performance parameters of initial and optimal designs)*

Tasarım Değişkenleri			**Performans Parametreleri**		
Parametreler	**Başlangıç Tasarımı**	**Optimum Tasarım**	**Parametreler**	**Başlangıç Tasarımı**	**Optimum Tasarım**
W_{S0}(mm)	4	5,92	Verim (%)	94,92	95,70
h_S(mm)	36	39,55	THD (%)	10,80	3,89
OFF (mm)	0	49,65	Stator Dişi Akı Yoğunluğu (T)	1,25	1,80
h_{PB}(mm)	100	110,84	Rotor Kutup Akı Yoğunluğu (T)	1,51	1,33
h_{PS}(mm)	50	42,46	Stator Boyunduruk Akı Yoğunluğu (T)	1,36	1,39
W_{PS} (mm)	230	179,69	Oluk Doluluk Oranı (%)	56,56	58,67
TW (mm)	13,5	12,16	Toplam Kayıp (kW)	28,92	24,24

Tablo 7 incelendiğinde, rotor ve stator geometrilerine ait değişkenlerin, tanımlanan amaç fonksiyonu doğrultusunda optimize edilerek anlamlı düzeyde iyileştirildiği görülmektedir. Ayrıca, generatör performansına ilişkin parametrelerin optimizasyon hedefleriyle uyumlu şekilde iyileştirildiği açıkça gözlemlenmektedir.

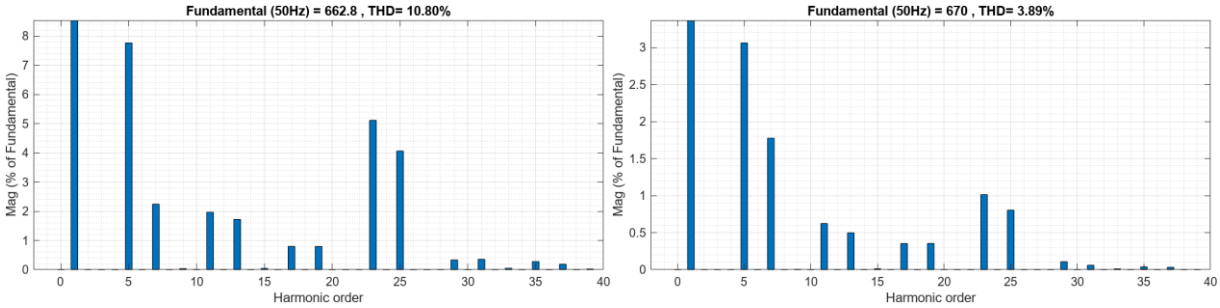
Şekil 4'te başlangıç ve optimum tasarım için tam yük altında çıkış gerilim dalga formları ile hava aralığı manyetik akı yoğunluğundaki değişim karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



(a) (b)

Şekil 4. *Başlangıç ve optimum tasarımların karşılaştırılması, (a) Tam yük hat gerilimi, (b) Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu (Comparison of initial and optimal designs, (a) Full load line voltage, (b) Air gap magnetic flux density)*

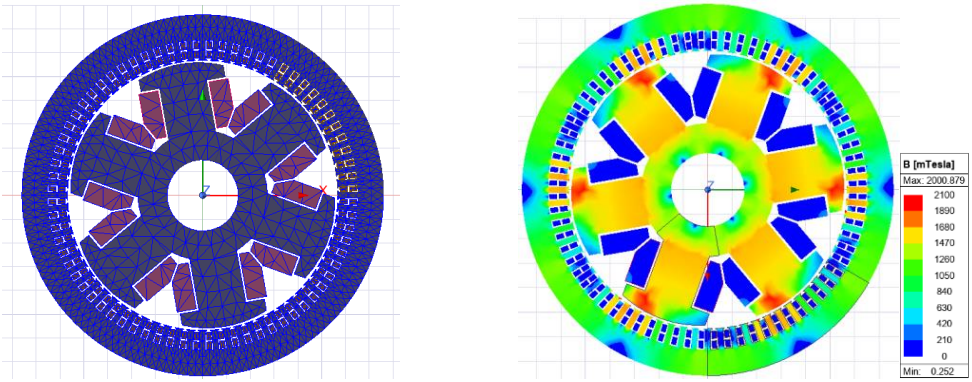
Şekil 4'te görüldüğü üzere, tam yük koşullarındaki hat gerilimi ile hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, optimizasyon sonucunda sinüs formuna daha yakın hale gelmiştir. Bu durum, THD'deki anlamlı düşüşü doğrulamaktadır. Başlangıç ve optimize tasarıma ait gerilim değerleri MATLAB/Simulink ortamına aktarılarak THD değerleri hesaplanmıştır.



(a) (b)

Şekil 5. *Başlangıç ve optimum tasarıma ait harmonik dağılımı karşılaştırması, (a) Başlangıç tasarımı, (b) Optimum tasarım (Comparison of harmonic distribution between initial and optimal designs, (a) Initial design, (b) Optimal design)*

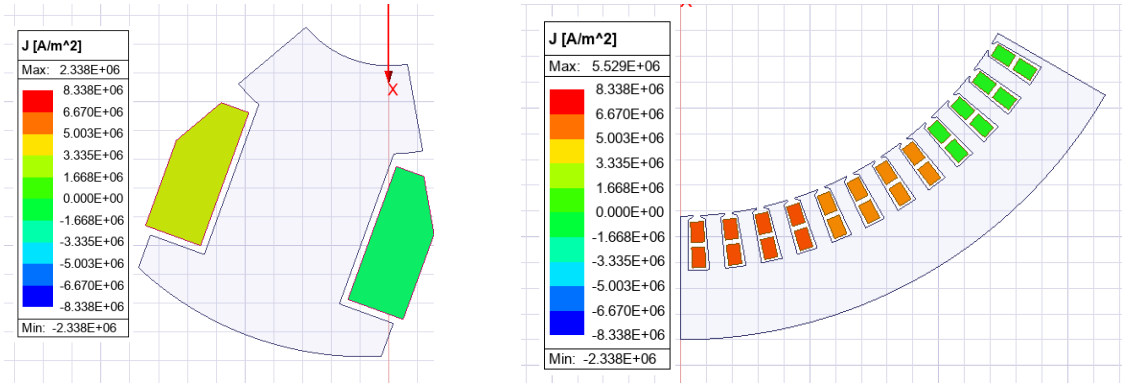
Şekil 4'te görüldüğü üzere, tam yük koşullarındaki hat gerilimi ile hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, optimizasyon sonucunda sinüs formuna daha yakın hale gelmiştir. Bu durum, THD'deki anlamlı düşüşü doğrulamaktadır. Başlangıç ve optimize tasarıma ait gerilim değerleri MATLAB/Simulink ortamına aktarılarak THD değerleri hesaplanmıştır. Şekil 4 ve 5'te yer alan sonuçların incelenmesiyle birlikte, çıkık kutuplu senkron generatörün tasarım sürecinde yapılan optimizasyonun başarıyla uygulandığı ve optimal tasarım parametrelerinin elde edildiği görülmektedir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, generatör performansında başta THD olmak üzere performans açısından anlamlı ve çok boyutlu iyileşmeler elde edilmiştir. Ayrıca, analiz sonuçlarının doğrulanması ve özellikle nüvenin doyum karakteristiğini değerlendirmek amacıyla ANSYS Maxwell 2D ortamında SEA gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılan analiz sonuçları Şekil 6'da sunulmuştur.



(a) (b)

Şekil 6. *Optimum tasarım, (a) Mesh dağılımı, (b) Manyetik akı yoğunluğu dağılımı (Optimum design, (a) Mesh distribution, (b) Magnetic flux density distribution)*

Şekil 6'da, optimum tasarım için SEA'da oluşturulan ağ yapısı (mesh) ve manyetik akı yoğunluğu dağılımı sunulmuştur. Elde edilen analiz bulguları, nüvenin manyetik doyum sınırına ulaşmadan çalıştığını ve amaç fonksiyonunda tanımlanan ağırlık katsayılarının uygunluğu ortaya koymaktadır. Senkron generatörlerde akım yoğunluğu, sargı kayıplarını doğrudan etkileyen ve dolayısıyla verim üzerinde belirleyici olan kritik bir parametredir. Bu kapsamda, stator ve uyartım sargılarındaki akım yoğunlukları analiz edilmiş ve sonuçlar Şekil 7'de sunulmuştur.



(a) (b)

Şekil 7. *Optimum tasarımda akım yoğunluğu dağılımı, (a) Uyartım sargısı, (b) Stator sargısı* (Current density distribution in the optimum design, (a) Excitation winding, (b) Stator winding)

Şekil 7 incelendiğinde, stator sargılarındaki maksimum akım yoğunluğu yaklaşık 5,53 A/mm², uyartım sargılarındaki akım yoğunluğu ise 2,38 A/mm² olarak elde edilmiştir. Akım yoğunluğu değerleri, fan soğutmalı generatörde aşırı termal yüke neden olmayacak seviyelerde olup tasarımda hedeflenen termal sınırlar içerisinde yer almaktadır.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma, çıkık kutuplu senkron generatörlerin elektromanyetik performanslarını iyileştirmeye yönelik olarak geometrik optimizasyona dayalı bir yaklaşım dayalı bir yaklaşım önerilmektedir. Generatörün tasarımı ve optimizasyonuna yönelik gerçekleştirilen analizler sonucunda, optimizasyon sürecinin başarıyla uygulandığı ve tasarım parametrelerinde önemli ölçüde iyileşme sağlandığı ortaya konmuştur. ÇAGA yöntemiyle yürütülen optimizasyon sürecinde, verimlilik, akı yoğunlukları, THD ve oluk doluluk oranını etkileyen rotor ve stator parametreleri belirlenmiş ve bu değişkenler temel alınarak çok amaçlı bir hedef fonksiyonu oluşturulmuştur. Başlangıçta analitik yöntemlerle elde edilen ilk tasarım modeli optimize edilerek performans iyileştirmesi sağlanmıştır. Optimizasyon sonucunda, tam yük altında generatör gerilimi THD değeri %10,80'den %3,89'a düşürülerek başlangıç değerine göre %64 oranında iyileşme sağlanmıştır. Toplam kayıplar 28,92 kW seviyesinden 24,24 kW seviyesine düşürülerek yaklaşık %16'lık bir düşüş sağlanmış ve karşılık gelen generatör verimi %94,92'den %95,70'e yükseltilerek yaklaşık %0,78 iyileştirme sağlanmıştır. Çalışma sonucunda, çıkık kutuplu senkron generatörlerin tasarımında kullanılan çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinin, sistem performansını artırma ve kayıpları minimize etmede etkili bir araç olduğu görülmüştür. Bu yaklaşım, özellikle hidroelektrik santraller gibi düşük devirli uygulamalarda kullanılan generatörlerin tasarım kalitesini artırmaya yönelik önemli bir katkı sunmaktadır. Ayrıca, bu çalışma farklı geometrik parametrelerin eş zamanlı olarak optimize edilmesine olanak sağlayarak çoklu performans kriterlerinin dengelenmesine yönelik örnek bir uygulama sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda optimizasyon sürecine ısıl analiz ve mekanik gerilme parametreleri de entegre edilerek çok disiplinli bir optimizasyon yaklaşımı hedeflenmektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

***Melda EYÜBOĞLU*:** Araştırmayı yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted the research, analyzed the results and performed the writing process.

***Burak YENİPINAR*:** Simülasyon çalışmaları ve teorik aşamalarda katkı sağlamıştır.

He contributed to simulation studies and theoretical parts.

***Cemil OCAK*:** Konu ve makale değerlendirmesinde katkıda bulunmuştur.

He has contributed subject and article evaluation.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Çıtak, E., & Kılınç Pala, P. B. "Yenilenebilir Enerjinin Enerji Güvenliğine Etkisi." Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi (25), 79-102., 2016.

[2] T. d. P. M. Bazzo, V. d. O. Moura, and R. Carlson, "A step-by-step procedure to perform preliminary designs of salient-pole synchronous generators," Energies, vol. 14, no. 16, p. 4989, 2021.

[3] O. G. Usta ve S. Akkaya Oy, "Rüzgâr Temelli Piezoelektrik Jeneratör Tasarımı", DÜBİTED, c. 12, sy. 2, ss. 1166–1177, 2024.

[4] Paish O., "Small HydroPower: TechnologyandCurrentStatus", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier Science Ltd., 6: 537-556, 2002.

[5] Lugaresi, A.,Mass, A., "Designing Francis Turbines, Trends in theLastDecade", Water Power and Dam Cont., 23-28, 1987.

[6] A. Ruprecht, "Unsteady flow simulation in hydraulic machinery," Task Quarterly Scientific Bulletin Academic Computer Centre, vol. 61, pp. 187-208, 2002, Gdansk, Poland.

[7] H. -J. Kim, J. -S. Jeong, M. -H. Yoon, J. -W. Moon and J. -P. Hong, "Simple Size Determination of Permanent-Magnet Synchronous Machines," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 10, pp. 7972-7983, Oct. 2017.

[8] K. Weeber and S. R. H. Hoole, "Geometric parametrization and constrained optimization techniques in the design of salient pole synchronous machines," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 28, no. 4, pp. 1948-1960, July 1992.

[9] Y. Duan and D. M. Ionel, "A Review of Recent Developments in Electrical Machine Design Optimization Methods With a Permanent-Magnet Synchronous Motor Benchmark Study," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, no. 3, pp. 1268-1275, May-June 2013.

[10] S. Pal and S. Haldar, "Optimization of drilling parameters for composite laminate using genetic algorithm," Data-Driven Optimization of Manufacturing Processes, pp. 194-216, 2020.

[11] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," in IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992) , vol., no., pp.1-29, 11 June 2014.

[12] İ. Topaloğlu ve O. Gürdal, "Çıkık Kutuplu Senkron Hidrogeneratörlerin Dinamik ve Geçici Zaman Analiz Koşullarında Ardışık Karma Değişken Nonlineer Programlama Metodu Kullanılarak Optimizasyonu", Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. DerCilt, c. 25, No 2, 355-361, 2013.

[13] A. Spargo, S. Ilie and J. Chan, "Salient-pole rotor optimisations for synchronous generators using FEA software," in 2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), pp. 158-162, 2017.

[14] N. Pamuk, "Genetik Algoritma Optimizasyonu Kullanılarak Senkron Makine Tasarımı ve Uygunluk Parametrelerinin Belirlenmesi", J. InnovativeEng. Nat. Sci., c. 4, s. 2, ss. 276-288, 2024.

[15] Y.-m. You, "Multi-objective optimal design of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle based on deep learning," Applied Sciences, vol. 10, no. 2, p. 482, 2020, doi: 10.3390/app10020482.

[16] A. Shoaei, F. Farshbaf-Roomi, and Q. Wang, "Enhanced multi-objective design optimisation of salient pole reluctance magnetic gear using Bayesian-optimised artificial neural networks," IET Electric Power Applications, vol. 19, no. 3, p. e70017, 2025, doi: 10.1049/elp2.70017.

[17] A. D. Karaoglan, D. Perin, and K. Yilmaz, "Multiobjective design optimization of stator for synchronous generator using bat algorithm and analysis of magnetic flux density distribution," Electric Power Components and Systems, vol. 49, no. 9–10, pp. 919–929, 2021, doi: 10.1080/15325008.2022.2049651.

[18] T. Sun et al., "Multi-objective optimization of a hybrid excitation generator with a parallel magnetic circuit based on the coupling of dual optimization algorithms," Archives of Electrical Engineering, vol. 74, no. 1, pp. 127–149, 2025, doi:10.24425/aee.2025.153016

[19] K. Chen, S. Ma, C. Li, Y. Wu, and J. Ma, "Optimization and design of built-in U-shaped permanent magnet and salient-pole electromagnetic hybrid excitation generator for vehicles," Symmetry, vol. 17, no. 6, p. 897, 2025, doi: 10.3390/sym17060897.

[20] Hendershot, JR; Miller, TJE Fırçasız Kalıcı Mıknatıslı Makinelerin Tasarımı, 1. baskı; Motor Tasarım Kitapları: Venice, CA, ABD, 2010

[21] Jones, CV Elektrik Makinelerinin Birleşik Teorisi, 1. basım; Butterworths: Londra, İngiltere, 1967.

[22] Boldea, I. "Synchronousgenerators" Taylor & Francis Group LLC, New York, A.B.D., ISBN 0- 8493-5725-X, 1.1-8.23, 2006.

[23] T. Murata and H. Ishibuchi, "MOGA: multi-objective genetic algorithms," Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Perth, WA, Australia, pp. 289-294, 1995.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 919-931 (2025)

Capacity Balancing and Variation Minimization in Unrelated Parallel Machine Scheduling with Sequence-Dependent Setup Times: A Mathematical Model and Matheuristic Approach

Merhad AY[1*]

[1]*Düzce University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Duce, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 16/12/2024
Revision: 13/05/2025
Accepted: 20/06/2025

Keywords

Parallel machine scheduling
Matheuristic
Optimization
Capacity balancing

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 16/12/2024
Düzeltme: 13/05/2025
Kabul: 20/06/2025

Anahtar Kelimeler

Paralel makine çizelgeleme
Matsezgisel
Optimizasyon
Kapasite dengeleme

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

A matheuristic method integrating MILP and genetic algorithm is proposed for scheduling unrelated parallel machines with setup times. The matheuristic algorithm finds near-optimal solutions for large-scale problems within 904–1378 seconds, while the exact model fails to reach optimality within 18,000 seconds. / Hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makinelerin çizelgelenmesi için MILP ve genetik algoritmayı entegre eden bir matsezgisel yöntem önerilmektedir. Matsezgisel algoritma, büyük ölçekli problemler için 904–1378 saniye içinde optimal çözüme yakın sonuçlar üretirken, matematiksel model 18.000 saniye içinde optimalliğe ulaşamamaktadır.

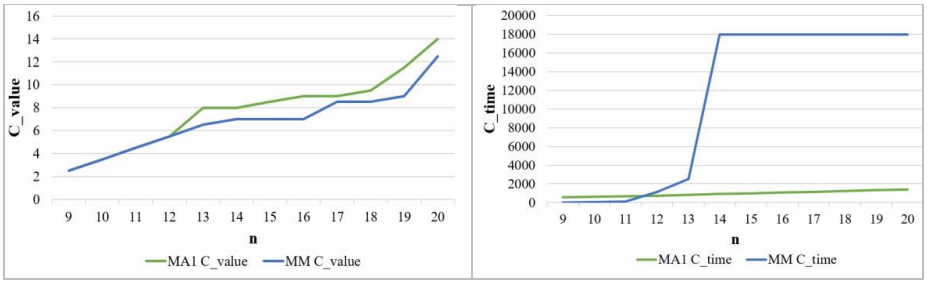


***Figure A**: Comparison of the mathematical model and matheuristic algorithm (solution quality and time for different problem sizes). / **Şekil A:** Matematiksel model ile matsezgisel algoritmanın karşılaştırılması (farklı problem boyutları için çözüm kalitesi ve süresi).*

Highlights (Önemli noktalar)

- *A mathematical model is proposed for capacity balancing and variation minimization. / Kapasite dengeleme ve varyasyon minimizasyonu için bir matematiksel model önerilmektedir.*
- *Two customized genetic algorithm-based mathematical heuristic algorithms are presented. / Genetik algoritma tabanlı iki özelleştirilmiş matsezgisel algoritma sunulmaktadır.*
- *The constrained mutation operator enhances solution feasibility. / Sınırlandırılmış mutasyon operatörü çözüm geçerliliğini artırmaktadır.*
- *Near-optimal solutions are obtained for large-scale problems in short time. / Büyük ölçekli problemlerde kısa sürede optimal çözüme yakın sonuçlar elde edilmektedir.*

***Aim (Amaç):** This study aims to minimize capacity imbalance and variation in job characteristics in unrelated parallel machine scheduling with sequence-dependent setup times. / Bu çalışma, sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgelemesinde kapasite dengesizliğini ve iş özelliklerindeki varyasyonu en aza indirmeyi amaçlamaktadır.*

***Originality (Özgünlük):** The study integrates a MILP model with a problem-specific genetic algorithm-based matheuristic, introducing constrained mutation and customized chromosome structure. / Çalışma, probleme özgü genetik algoritma tabanlı bir matsezgisel yöntem ile MILP modelini entegre ederek sınırlandırılmış mutasyon ve özelleştirilmiş kromozom yapısı sunmaktadır.*

***Results (Bulgular):** While the mathematical model yields optimal results for small problems, matheuristic algorithms provide near-optimal solutions for large problems in significantly shorter time. / Matematiksel model küçük problemler için optimal çözümler üretirken, matsezgisel algoritmalar büyük problemler için çok daha kısa sürede optimal çözüme yakın sonuçlar sunmaktadır.*

***Conclusion (Sonuç):** The proposed hybrid approach shows strong potential in real-world production planning by exhibiting satisfactory performance in terms of accuracy and speed. / Önerilen hibrit yaklaşım, doğruluk ve hız konularında gayet yeterli performans sergileyerek gerçek dünya üretim planlamasında güçlü bir potansiyel göstermektedir.*

*Corresponding author, e-mail: merhaday@duzce.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1598698

GU J Sci, Part C, 13(3): 919-931 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Capacity Balancing and Variation Minimization in Unrelated Parallel Machine Scheduling with Sequence-Dependent Setup Times: A Mathematical Model and Matheuristic Approach

Merhad AY[1*]

[1]*Düzce University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Düzce, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 16/12/2024
Revision: 13/05/2025
Accepted: 20/06/2025

Keywords

Parallel machine scheduling
Matheuristic
Optimization
Capacity balancing

Abstract

Scheduling of unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times presents significant theoretical and practical challenges due to its combinatorial complexity and frequent occurrence in various production environments. This study addresses a scheduling problem specific to tire manufacturing, focusing on capacity balancing and variation minimization in unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times. For small and medium-sized problem sets consisting of 9 to 13 jobs, optimal solutions were obtained using a mathematical model. However, when the number of jobs increased to 14 or more, the solution time exceeded 18000 seconds, and optimality could not be achieved. Therefore, two genetic algorithm-based matheuristic algorithms ($MA1$ and $MA2$) with problem-specific customized chromosome structures are proposed for large-scale problem sets. Additionally, the classical random mutation operator is modified into a constrained random mutation operator tailored to the problem. Experimental results and statistical analyses ($p < 0.05$) show that the $MA1$ algorithm performs better than $MA2$ in terms of solution quality and find solutions similar to the best feasible solutions produced by the mathematical model within a significantly shorter time frame, averaging between 904 and 1378 seconds for large-scale problems. The study offers notable advantages in terms of both solution time and quality in solving real-world problems. The proposed matheuristic algorithm contributes to the literature through its problem-specific chromosome design, initial population generation method, and constrained random mutation operator.

Sıra Bağımlı Hazırlık Süreli Özdeş Olmayan Paralel Makine Çizelgelemede Kapasite Dengeleme ve Varyasyon Minimizasyonu: Matematiksel Model ve Matsezgisel Yaklaşım

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 16/12/2024
Düzeltme: 13/05/2025
Kabul: 20/06/2025

Anahtar Kelimeler

Paralel makine çizelgeleme
Matsezgisel
Optimizasyon
Kapasite dengeleme

Öz

Sıra bağımlı hazırlık sürelerine sahip özdeş olmayan paralel makinelerin çizelgelenmesi, kombinatoryal karmaşıklığı ve pek çok üretim sürecinde yaygın olarak karşılaşılması nedeniyle hem teorik hem de pratik düzeyde önemli zorluklar barındırmaktadır. Bu çalışmada, sıra bağımlı hazırlık sürelerine sahip özdeş olmayan paralel makineler için lastik imalatında kapasite dengeleme ve varyasyon minimizasyonu özelinde bir çizelgeleme problemi ele alınmaktadır. Probleme yönelik 9 ila 13 işten oluşan küçük ve orta ölçekli problem setlerinde matematiksel model ile optimal çözümler üretilmiş; ancak, iş sayısı 14 ve üzerine çıktığında çözüm süresi 18000 saniyeyi aşmış ve optimum çözümlere ulaşılamamıştır. Bu nedenle, büyük problem setleri için probleme özgü özelleştirilmiş kromozom yapısıyla genetik algoritma tabanlı iki farklı matsezgisel algoritma ($MA1$ ve $MA2$) önerilmektedir. Ayrıca, mutasyon aşamasında klasik rastgele mutasyon operatörü, probleme özgü olarak modifiye edilerek sınırlandırılmış rastgele mutasyon operatörü olarak kullanılmaktadır. Deneysel sonuçlar ve istatistiksel analizler (p<0.05), $MA1$ algoritmasının çözüm kalitesi açısından $MA2$'ye göre daha başarılı olduğunu ve büyük problem setlerinde matematiksel modelin 18000 saniyede bulabildiği en iyi uygun çözümlere benzer çözümleri ortalama 904–1378 saniye gibi oldukça kısa sürelerde bulabildiğini göstermektedir. Çalışma, çözüm süresi ve kalitesi açısından gerçek hayat problemlerinin çözümünde önemli avantajlar sunmaktadır. Önerilen matsezgisel algoritma, probleme özgü olarak tasarlanan kromozom yapısı, başlangıç popülasyonu oluşturma yöntemi ve sınırlandırılmış rastgele mutasyon operatörü ile benzer problemlerin çözümüne yönelik literatüre önemli katkılar sunmaktadır.

*Corresponding author, e-mail: merhaday@duzce.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1598698

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

In today's highly dynamic and competitive manufacturing environments, efficient production scheduling is no longer a choice, it is a necessity for survival. Factories producing products in a wide variety of sizes and features, such as tires with varying dimensions and compound structures, must deal with an overwhelming number of constraints, including machine compatibility, sequence-dependent setup times, and resource balancing. Failure to manage these complexities can result in serious inefficiencies, production delays, and rising costs.

Parallel machine scheduling problems, particularly those involving unrelated machines and sequence-dependent setup times, are among the most challenging classes of combinatorial optimization problems. Existing studies in the literature have generally focused on minimizing time-based performance metrics like makespan or tardiness [1-4], leaving a research gap in addressing capacity balancing and variation reduction in job characteristics. For instance, balancing workload across machine groups and minimizing product variation within each machine are critical to ensuring consistent quality and efficient operation. These multifaceted requirements necessitate novel approaches that blend exact optimization with flexible heuristics. To address this, a mixed-integer linear programming (MILP) model is proposed to obtain exact solutions for small and medium sized problems (9-13 jobs), while two genetic algorithm-based matheuristic algorithms are developed to efficiently solve large-scale problems (14-20 jobs) where the mathematical model becomes computationally infeasible.

The proposed methods have been evaluated through real-world case studies, and the results have been analyzed comparatively using statistical methods. This study not only makes a significant contribution to the existing solution approaches for parallel machine scheduling problems but also demonstrates the potential to guide time-critical real-world applications by providing fast and efficient solutions. In this context, the study is expected to make substantial contributions to the literature. The remainder of this paper is structured as follows: Section 2 reviews the relevant literature on parallel machine scheduling problems, emphasizing both mathematical models and matheuristic approaches. Section 3 provides a detailed description of the problem definition and introduces the proposed methods, including the mathematical model and the genetic algorithm-based matheuristic approach. Section 4 presents the experimental results, along with a comparative analysis of the proposed methods using statistical techniques. Finally, Section 5 concludes the paper with key findings and suggestions for future research directions.

2. LITERATURE (LİTERATÜR)

Parallel machine scheduling problems, due to their NP-hard nature, require complex mathematical models for their solutions. These models are often based on mixed-integer linear programming (MILP) or nonlinear programming approaches. Tavakkoli-Moghaddam et al. [5] developed a two-level mathematical model that considers sequence-dependent setup times in unrelated parallel machines, aiming to optimize makespan and tardiness. Akyol and Sarac [6] proposed a mixed integer programming model for the problem of scheduling jobs using shared resources on parallel machines. Safaei et al. [7] designed a multi-objective optimization model for parallel machines, simultaneously optimizing tardiness and completion time. Yepes-Borrero et al. [8] applied mathematical models to multi-objective scheduling problems by incorporating resource constraints. Mathematical models are particularly preferred for small and medium scale problems due to their theoretical accuracy and potential to provide optimal solutions. However, the long solution times of mathematical models in large-scale problems have led to the development of heuristic, metaheuristic or matheuristic algorithms. These methods, while not guaranteeing optimality compared to mathematical models, significantly reduce solution times. Ji et al. [9] applied an adaptive large neighborhood search algorithm to parallel machine scheduling problems, providing solutions for large datasets. Ezugwu [10] achieved efficient results for complex scheduling problems using a firefly algorithm. Haddad et al. [11] combined genetic algorithms with variable neighborhood search methods to effectively explore large solution spaces, offering solutions for large-scale problems.

Genetic algorithms are widely used metaheuristic methods in parallel machine scheduling problems, generating solutions inspired by the fundamental principles of biological evolution. Vallada and Ruiz [12] demonstrated the effectiveness of genetic algorithms in unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times. Ozcelik and Sarac [13] used genetic algorithm to minimize the makespan by taking into account the unavailable time periods in parallel machine scheduling problems. Zeidi and Hosseini [14] combined

genetic algorithms with simulated annealing to develop an approach aimed at minimizing total tardiness costs. Kim and Kim [15] achieved solutions by integrating genetic algorithms with sequence-dependent setup times. Antunes et al. [16] compared the performance of genetic algorithms with other metaheuristic methods for unrelated parallel machines and concluded that genetic algorithms outperform others, especially in large-scale problems. Due to their ability to explore vast solution spaces and their rapid performance in large-scale problems, genetic algorithms are extensively employed in the literature.

Matheuristic algorithms, which combine mathematical models and genetic algorithms, have the potential to balance solution quality and computational efficiency. These hybrid approaches integrate the precision advantage of mathematical models with the flexibility and speed of genetic algorithms. For instance, Chang et al. [17] applied hybrid approaches in complex manufacturing processes such as surface-mount technology to derive diverse solutions. The approach proposed in this study offers a novel framework that integrates mathematical model with genetic algorithms. The proposed matheuristic algorithms featuring problem-specific chromosome structure, a constrained mutation operator, and alternative crossover strategies are designed to deliver high quality solutions for large-scale problems within practical time limits. This integrated methodology presents both theoretical novelty and practical applicability for complex scheduling problems.

3. PROBLEM DEFINITON and METHODOLOGY (PROBLEM TANIMI VE METODOLOJİ)

The study presents a solution approach inspired by the machine scheduling problem encountered in a tire manufacturing facility. The facility operates with two distinct machine groups: one group consisting of four machines ($V1$, *V2*, *V3*, *V4*) and another group with two machines (*T1*, *T2*). The tire production process is characterized by various constraints and parameters, which contribute to the complexity of the scheduling problem.

The processing time for each job varies across machines, resulting in $n \times m$ distinct processing time combinations in a system with n jobs and m machines. These processing times are represented by the P matrix in this study. Additionally, every machine is not capable of performing every job. To address this, a compatibility matrix (Y) is defined, where binary values (0-1) indicate machine-job compatibility: $Y_{ij} = 1$, denotes that job i can be processed on machine j, while $Y_{ij} = 0$ indicates that it cannot be processed.

The characteristics of the jobs are defined by parameters such as aspect ratio (TG), rim size (JG), and mixture group (KG). These parameters represent the unique requirements of each job and vary across different jobs. Independently of the machines, jobs have sequence-dependent setup times, which are represented by the S matrix. For example, in a system with n jobs, there are $n \times n$ distinct setup time values. Additionally, the production quantity for each job is defined as an integer in the U matrix, where all values are strictly greater than zero. The problem also includes the following constraints:

- Jobs cannot be split.
- Each job must be processed on a single machine.
- A machine cannot process more than one job simultaneously.
- Jobs must be executed consecutively without skipping any in the sequence, ensuring no gaps in the sequence.
- Each machine must operate within its daily working time limit and cannot exceed this constraint.

The objective function of the problem aims to minimize the difference in capacity utilization rates between machine groups V and T. Additionally, it seeks to minimize the variations in TG, JG, and KG values among the jobs assigned to each machine. This approach strives to achieve balanced capacity utilization among machine groups and reduce variability in the assigned jobs. The objective function incorporates four distinct goals, each assigned weighted coefficients based on their importance. This weighting ensures that higher priority objectives are given more significance in the solution process and allows decision variables with different units to be effectively incorporated into the same objective function

3.1. Mathematical Model (Matematiksel Model)

To address the problem, a mixed-integer linear programming (MILP) model has been proposed. In the literature, various mathematical models for unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times focus on different objective functions and constraints, such as minimizing total tardiness [3, 14], optimizing constrained resource usage [5], employing compatibility matrices [18], and minimizing makespan [19, 20]. Unlike previous studies, the proposed mathematical model (MM)

introduces a multi-objective structure that emphasizes minimizing the difference in capacity utilization rates among machine groups and reducing parameter variability (TG, JG, and KG) within each machine. Furthermore, by simultaneously incorporating job characteristics, capacity utilization constraints, and compatibility matrix constraints, the proposed model distinguishes itself from existing approaches in the literature.

Indices

i, b: jobs

j : machines

k: sequences

Parameters

f: Maximum job sequence

v: Number of machines in group V

t: Number of machines in group T

OT: Maximum operating time of machines

M: Big number

S_{ib}: Setup time of job b done after job i

P_{ij}: Processing time of job i on machine j

U_i: Amount of production job i

Y_{ij}: Matrix indicating whether job i is compatible machine j

TG_i: Aspect ratio of job i

JG_i: Rim size of job i

KG_i: Mixture type of job i

W_1: Weight of the importance level of difference in capacity utilization rates

W_2: Weight of the importance level of differences in aspect ratios

W_3: Weight of the importance level of differences in rim sizes

W_4: Weight of the importance level of differences in mixture types

Decision variables

X_{ijk}: $\begin{cases} 1, & \text{if job } i \text{ assigned to machine } j \text{ in sequence } k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

Z_{ibjk}:
$\begin{cases} 1, \text{if job } b \text{ is assigned to machine } j \text{ in sequence } k \text{ following job } i \\ 0, \text{otherwise} \end{cases}$

C_{jk}: completion time of the job in sequence k on machine j

D_j: Makespan of machine j

ZZ_j: The capacity utilization rate of machine j

V: The capacity utilization rate of machine group V

T: The capacity utilization rate of machine group T

TG_max_j: Maximum aspect ratio on machine j

TG_min_j: Minimum aspect ratio on machine j

TG_dif_j: Difference between TG_max_j and TG_min_j on machine j

JG_max_j: Maximum rim size on machine j

JG_min_j: Minimum rim size on machine j

JG_dif_j: Difference between JG_max_j and JG_min_j on machine j

KG_max_j: Maximum mixture type value on machine j

KG_min_j: Minimum mixture type value on machine j

KG_dif_j: Difference between KG_max_j and KG_min_j on machine j

Formulation

$$minimize \quad W_1 * |V - T| + W_2 * \sum_j TG_dif_j + W_3 * \sum_j JG_dif_j + W_4 * \sum_j KG_dif_j \tag{1}$$

subject to:

$$D_j \geq C_{jk} \qquad \forall\, j,k \tag{2}$$

$$C_{j0} \geq X_{ij0} * P_{ij} * U_i \qquad \forall\, i,j \tag{3}$$

$$Z_{ibjk} \leq (X_{ijk} + X_{bjk+1})/2 \qquad \forall\, i,b,j,k : k \neq f \tag{4}$$

$$Z_{ibjk} \geq (X_{ijk} + X_{bjk+1}) - 1 \qquad \forall\, i,b,j,k : k \neq f \tag{5}$$

$$C_{jk+1} \geq C_{jk} + P_{bj} * U_b * Z_{ibjk} + S_{ib} * Z_{ibjk} \qquad \forall\, i,b,j,k : k \neq f \tag{6}$$

$$\sum_j \sum_k X_{ijk} = 1 \qquad \forall i \tag{7}$$

$$\sum_k X_{ijk} \leq Y_{ij} \qquad \forall\, i,j \tag{8}$$

$$\sum_i X_{ijk} \leq 1 \qquad \forall\, j,k \tag{9}$$

$$\sum_b X_{bjk+1} \leq \sum_i X_{ijk} \qquad \forall\, j,k : k \neq f \tag{10}$$

$$D_j \leq \text{OT} \qquad \forall\, j \tag{11}$$

$$ZZ_j = D_j / OT \qquad \forall\, j \tag{12}$$

$$V = \sum_j ZZ_j / v \qquad \forall\, j : j = \{1, 2, \dots, v\} \tag{13}$$

$$T = \sum_j ZZ_j / t \qquad \forall\, j : j = \{1, 2, \dots, t\} \tag{14}$$

$$TG_max_j \geq TG_i * X_{ijk} \qquad \forall\, i,j,k \tag{15}$$

$$TG_min_j \leq TG_i * X_{ijk} + M * (1 - X_{ijk}) \qquad \forall\, i,j,k \tag{16}$$

$$TG_min_j \geq 1 \qquad \forall\, j \tag{17}$$

$$TG_dif_j = TG_max_j - TG_min_j \qquad \forall\, j \tag{18}$$

$$JG_max_j \geq JG_i * X_{ijk} \qquad \forall\, i,j,k \tag{19}$$

$$JG_min_j \leq JG_i * X_{ijk} + M * (1 - X_{ijk}) \qquad \forall\, i,j,k \tag{20}$$

$$JG_min_j \geq 1 \qquad \forall\, j \tag{21}$$

$$JG_dif_j = JG_max_j - JG_min_j \qquad \forall\, j \tag{22}$$

$$KG_max_j \geq KG_i * X_{ijk} \qquad \forall\, i,j,k \tag{23}$$

$$KG_min_j \leq KG_i * X_{ijk} + M * (1 - X_{ijk}) \qquad \forall\, i,j,k \tag{24}$$

$$KG_min_j \geq 1 \qquad \forall\, j \tag{25}$$

$$KG_dif_j = KG_max_j - KG_min_j \quad \forall j \quad (26)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i,j,k \quad (27)$$

$$C_{jk} \geq 0 \quad \forall j,k \quad (28)$$

$$Z_{ibjk} \in \{0,1\} \quad \forall i,b,j,k \quad (29)$$

$$D_j, ZZ_j, V, T \geq 0 \quad \forall j \quad (30)$$

$$TG_max_j, TG_min_j, TG_dif_j \geq 0 \; and \; integer \quad \forall j \quad (31)$$

$$JG_max_j, JG_min_j, JG_dif_j \geq 0 \; and \; integer \quad \forall j \quad (32)$$

$$KG_max_j, KG_min_j, KG_dif_j \geq 0 \; and \; integer \quad \forall j \quad (33)$$

The objective function of the model is defined by Equation 1, aiming to minimize the absolute difference in capacity utilization between machine groups $|V - T|$ and the variability in aspect ratio (TG), rim size (JG), and mixture group (KG) on each machine using weighted importance coefficients. Equation 2 determines the completion time of the last job on each machine, while Equation 3 defines the completion time of the first job. To arrange job sequences, Equations 4 and 5 use the Z variable to identify whether a specific job follows another, assigning a value of 1 or 0 accordingly. Equation 6 calculates the completion time of a job by considering the sequence-dependent setup time from the previous job. Equation 7 ensures that each job is assigned to only one machine and in a specific order, while Equation 8 enforces that jobs are assigned only to machines capable of performing them, based on the compatibility matrix. To regulate sequencing, Equation 9 restricts each position on a machine to one job, and Equation 10 prohibits gaps in the sequence of jobs on a machine. Equation 11 imposes a constraint to prevent machines from exceeding their daily operating time. Capacity utilization rates are computed for each machine using Equation 12, and for the V and T machine groups using Equations 13 and 14, respectively. The maximum and minimum values of TG, JG, and KG parameters, along with their differences, are defined and minimized through Equations 15-26. Finally, Equations 27-33 specify sign constraints, establishing the permissible value ranges and types of the decision variables.

The developed mathematical model provides effective solutions for small-scale problems; however, its practical applicability is limited for large-scale problems due to the exponential increase in solution times. This limitation arises because the problem belongs to the NP-hard class, where solution times grow exponentially with problem size. To address this, heuristic, metaheuristic, or matheuristic algorithms are commonly employed to achieve near-optimal solutions within shorter timeframes. In this context, a genetic algorithm-based matheuristic approach has been developed to meet critical time-bound requirements, such as the efficient scheduling of daily production plans.

3.2. Matheuristic Algorithm (Matsezgisel Algoritma)

The matheuristic algorithm is designed to provide faster and more efficient solutions by integrating heuristic algorithms with mathematical models [21]. The proposed algorithm in this study is a genetic algorithm-based matheuristic approach. Its fitness function partially utilizes the modified version of the proposed mathematical model (MM). The matheuristic algorithm generates new chromosomes by maintaining the solution representation and applying feasible initial population, crossover, and mutation operations. In this study, two different crossover operators are employed, resulting in two distinct matheuristic algorithms ($MA1$ and $MA2$). The sole difference between $MA1$ and $MA2$ is the crossover operator used; all other steps remain identical. These hybrid methods combine the speed and flexibility of genetic algorithms with the mathematical precision of linear models, offering a robust approach to solving complex problems such as unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times. The algorithm's flowchart is illustrated in Figure 1.

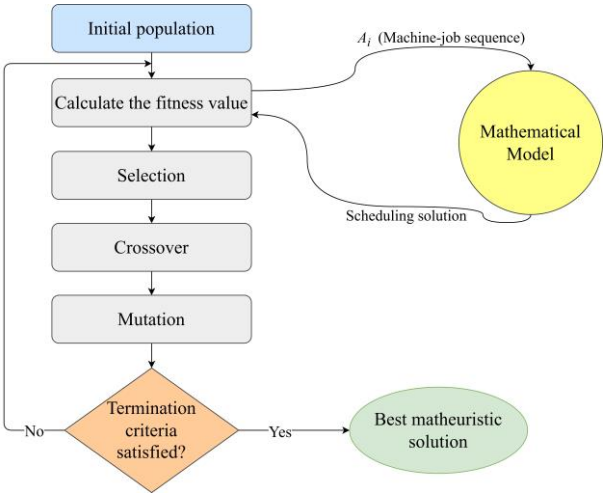


Figure 1. Flowchart of the genetic algorithm-based matheuristic approach (Genetik algoritma tabanlı matsezgisel yaklaşımın akış şeması)

In the matheuristic algorithm, an initial population [22] is generated by creating a problem-specific number of chromosomes, corresponding to the predefined population size. An example chromosome is illustrated in Figure 2. The chromosome structure developed specifically for the problem, represents a one-dimensional

machine-job assignment sequence A_i, which is sent to the mathematical model. In the chromosome, genes sequentially represent jobs, while the values of the genes denote the machines to which these jobs are assigned. This customized representation replaces the two-dimensional compatibility matrix Y_{ij} used in the mathematical model (MM) with a one-dimensional compatibility sequence A_i. When generating chromosomes for the initial population, gene values (machine assignments) are randomly assigned based on the compatibility matrix Y_{ij}. For instance, if the compatible machines for the first job are given by Y_{1j}= [0, 1, 1, 0, 1], the corresponding set of suitable machines is {2, 3, 5}. Machine numbers are assigned to genes by randomly selecting values from this set.

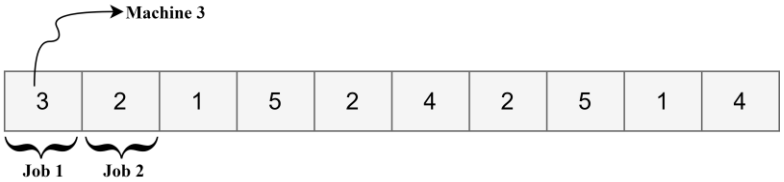


Figure 2. Chromosome structure (solution representation) (Kromozom yapısı (çözüm gösterimi))

To adapt the mathematical model to the chromosome structure used in the matheuristic algorithm, the parameter Y_{ij} is transformed into A_i, and one of the model's constraints, Equation 8, is replaced with the Equation 34. This new equation ensures that the machine-job assignments in the chromosomes generated by the matheuristic algorithm remain consistent with the compatibility constraints. The newly introduced parameter A_i in the mathematical model helps reduce the solution space, enabling the algorithm to achieve near-optimal solutions in a shorter time frame.

$$\sum_{j}\sum_{k} j * X_{ijk} = A_i \qquad \forall i \qquad (34)$$

After generating the initial population and calculating fitness values in the matheuristic algorithm, the process continues with selection, crossover, and mutation stages. The selection phase determines which chromosomes will proceed to the next generation. In this study, the roulette wheel selection method is employed. This method calculates the selection probabilities of chromosomes based on their fitness values [23]. Among the candidate chromosomes, the one with the highest fitness value has the greatest probability of being selected. While chromosomes with higher fitness values have a greater probability of being selected, chromosomes with lower fitness values also retain a chance of selection, ensuring genetic diversity within the population. This approach allows the evolutionary process to avoid local optima and enables a broader exploration of the solution space. Figure 3 illustrates an example of the selection probabilities in a population of three chromosomes using the roulette wheel method. Fitness value reflects the quality of a chromosome's solution to the problem, while probability represents its relative advantage within the population. For instance, Chromosome 3, having the highest fitness value, has a 60% probability of being selected, whereas Chromosome 1, with the lowest fitness value, has a 10% probability. This structure promotes the selection of high-quality chromosomes while preserving diversity within the population, supporting the principles of robust evolutionary search.

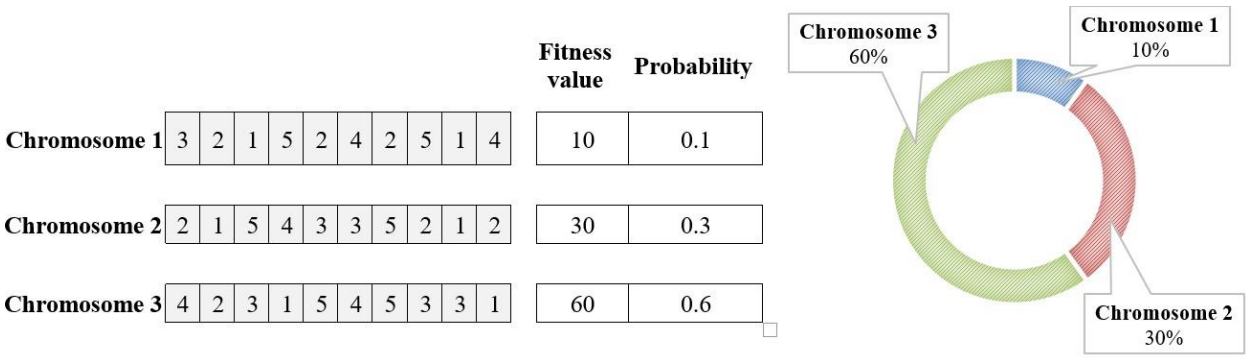


Figure 3. Roulette wheel selection method (Rulet tekerleği seçim yöntemi)

The crossover phase is a critical process where two new children are generated through the exchange of genes between two selected chromosomes. In this study, two different crossover operators, specifically designed to align with the solution representation, are utilized. The first operator is implemented in the $MA1$ algorithm, and second operator is applied in the $MA2$ algorithm to evaluate performance using an alternative crossover strategy. The effectiveness of both operators is analyzed through comparative evaluations presented in the experimental results section, where the performance differences between the algorithms are assessed using statistical methods.

In the $MA1$ algorithm, a uniform crossover operator [24] is employed. This operator performs crossover by exchanging genes between two chromosomes based on a predefined probability value. In this study, the probability value is set to 0.5. If a randomly generated number between 0 and 1 exceeds 0.5, the genes are exchanged. Figure 4 provides an example of the uniform crossover method. In the machine-job assignment representation used in this study, genes (jobs) are exchanged in the same order, ensuring no conflicts occur. However, if operators that alter the order of genes are used, there is a risk of assigning incompatible jobs to machines due to the crossover of genes in different positions. To mitigate such risks, carefully selected operators have been utilized in this study, ensuring the accuracy and validity of the solution process are preserved.

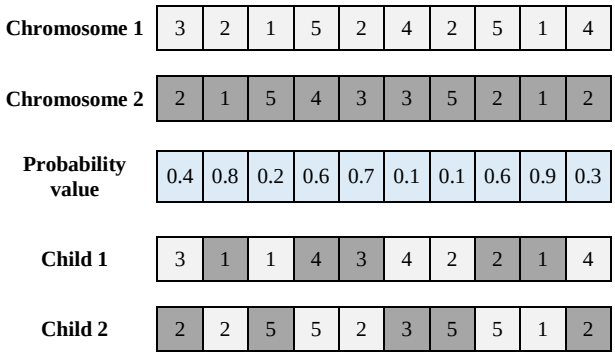


Figure 4. Uniform crossover operator (Tekdüze çaprazlama operatörü)

In the $MA2$ algorithm, a two-point crossover operator [25] is utilized. Figure 5 presents an example of the operator. In the method, two random points are selected on the chromosomes, and a segment is exchanged between the two chromosomes, resulting in the creation of two new child. The gene order is preserved in this operator, and no alterations are made to the sequence of genes. Consequently, there are no conflicts or inconsistencies in the fitness evaluation performed through the mathematical model. This ensures the integrity and validity of the solution process.

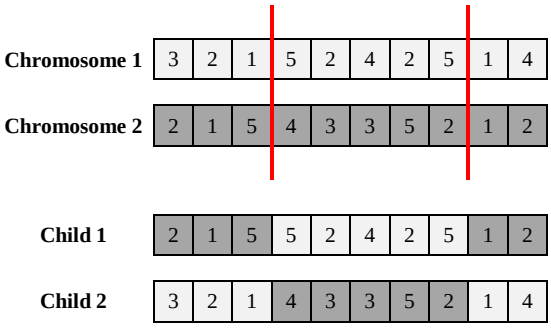


Figure 5. Two-point crossover operator (İki noktalı çaprazlama operatörü)

The next phase of the algorithm, mutation, aims to enhance genetic diversity within the population and prevent convergence to local optima by introducing changes to genes with a low probability. Various operators representing different gene alteration strategies, such as swap, shift, and inversion, are commonly used in this stage [26]. However, the chromosome structure employed in the matheuristic algorithm is not compatible with methods that alter gene order. Another category of mutation operators, including random, uniform, and creep mutations, assigns random or bounded values to selected genes instead of altering their order [27]. In this study, the random mutation operator has been modified to align with the chromosome structure. In its standard form, random mutation replaces genes with values

randomly selected within predefined lower and upper bounds. However, this operator is not directly compatible with the chromosome structure used in the study, as the gene values cannot take any value within the specified range. To address the incompatibility, the mutation operator has been constrained and adapted to the compatibility matrix Y_{ij}, similar to the approach used for generating the initial population. With this modification, the values assigned to the mutated genes are randomly selected from the feasible values determined by the compatibility matrix, ensuring the validity and integrity of the chromosome structure throughout the mutation process.

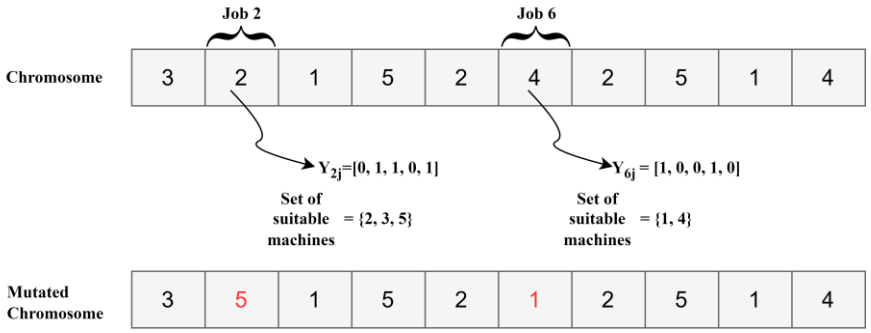


Figure 6. Constrained random mutation (Sınırlandırılmış rastgele mutasyon)

Figure 6 presents an example application of the constrained random mutation operator. For instance, in a chromosome with 10 genes, the 2nd and 6th genes are selected for mutation. To determine the possible values for these genes, compatibility arrays Y_{2j} and Y_{6j} first generated from the compatibility matrix. Arrays are then used to derive the sets of suitable machines for each selected gene. During the mutation process, a value is randomly assigned to each selected gene from its respective set of suitable machines. This method ensures that genes are replaced with random but constrained values, allowing the algorithm to produce valid and meaningful results within the solution space.

Finally, the execution of the matheuristic algorithm terminates based on termination criteria such as the target fitness value or the maximum number of iterations. These criteria ensure that the algorithm either achieves a predefined performance threshold or completes the specified maximum number of steps. Thus, the algorithm operates efficiently in terms of computational time while striving to achieve the desired solution quality.

4. EXPERIMENTAL RESULTS (DENEYSEL SONUÇLAR)

In the experimental studies, various problem sets (PS) were derived based on a real-world daily machine scheduling problem from a tire manufacturing company. While preparing the problem sets, several constraints, such as time, quantities, and intervals observed in the company, were taken into account. The parameters for the problem sets, which were created based on different job sizes (n), are summarized in Table 1. Each problem set also includes a setup time matrix (S), a sequence representing production quantities (U), a machine-job compatibility matrix (P), an array of aspect ratios (TG), an array of rim widths (JG), and a mixture group (KG) sequence.

Table 1. Parameters of the problem sets (Problem setlerinin parametreleri)

	n	v	t	TG_min, TG_max	JG_min, JG_max	KG_min, KG_max
PS_1	9	4	2	25, 55	15, 17	1, 2
PS_2	10	4	2	25, 55	15, 17	1, 2
PS_3	11	4	2	25, 55	15, 17	1, 2
PS_4	12	4	2	25, 55	15, 17	1, 2
PS_5	13	4	2	25, 55	15, 17	1, 2
PS_7	14	4	2	25, 55	15, 17	1, 2
PS_8	15	4	2	25, 55	15, 17	1, 2
PS_9	16	4	2	25, 55	15, 17	1, 2
PS_{10}	17	4	2	25, 55	15, 17	1, 2
PS_{11}	18	4	2	25, 55	15, 17	1, 2
PS_{12}	19	4	2	25, 55	15, 17	1, 2
PS_{13}	20	4	2	25, 55	15, 17	1, 2

The proposed matheuristic algorithms ($MA1$, $MA2$) and the mathematical model (MM) were implemented using the Python programming language and executed on a computer equipped with an Intel Core i5 2.40 GHz processor and 8 GB of RAM. Initially, the mathematical model was tested on 13 different problem sets. All tests were limited to a maximum runtime of 18000 seconds (5 hours) and repeated multiple times. The objective function values (C_{value}) and average solution times (C_{time}) obtained from these tests are presented in Table 2.

The test results indicate that the time required to obtain optimal solutions increases exponentially with the number of jobs. When the test duration reached the 18000 seconds, the process was automatically terminated. Consequently, optimal* solutions were achieved for problem sets with 9 to 13 jobs, while optimal* solutions could not be obtained for problem sets with 14 to 20 jobs. Furthermore, the fact that even longer durations than 18000 seconds are required for daily scheduling applications highlights the practical limitations of the mathematical model. This underscores the necessity of employing alternative methods for daily operational planning, where quick and effective solutions are critical.

Table 2. Test results for the mathematical model (Matematiksel model için test sonuçları)

	n	MM - C_{value}	MM - C_{time}
PS_1	9	2.5*	8.27
PS_2	10	3.5*	28.42
PS_3	11	4.5*	122.78
PS_4	12	5.5*	1113.71
PS_5	13	6.5*	2525.50
PS_7	14	7.0	18000
PS_8	15	7.0	18000
PS_9	16	7.0	18000
PS_{10}	17	8.5	18000
PS_{11}	18	8.5	18000
PS_{12}	19	9.0	18000
PS_{13}	20	12.5	18000

As an alternative to the mathematical model and to achieve rapid results in daily scheduling, the proposed matheuristic algorithm aims to provide near-optimal solutions within a short time frame. The matheuristic algorithm was configured with fixed parameters for all tests, which include a population size of 45, 30 iterations, a crossover rate of 0.9, and a mutation rate of 0.01. The runtime of the matheuristic algorithm was limited to 18000 seconds and algorithm was executed multiple times, as with the mathematical model. During the testing process, results were obtained using two different crossover operators (uniform and two-point). The performance of these operators was evaluated in terms of average solution value and runtime, and the detailed results are presented in Table 3. The test results demonstrate that the matheuristic algorithm offers significant advantages over the mathematical model, particularly in time-constrained applications such as daily scheduling, by giving fast and effective solutions.

Table 3. Test results for the matheuristic algorithms (Matsezgisel algoritmalar için test sonuçları)

	n	MA1 - C_{value}	MA2 - C_{value}	MA1 - C_{time}	MA2 - C_{time}
PS_1	9	2.5*	2.5*	571.17	578.91
PS_2	10	3.5*	4	633.00	583.96
PS_3	11	4.5*	5	668.84	663.47
PS_4	12	5.5*	6	734.65	731.02
PS_5	13	8	8	836.13	881.04
PS_7	14	8	9.5	907.54	915.18
PS_8	15	8.5	10.5	995.01	986.60
PS_9	16	9	11.5	1084.32	1092.16

PS_{10}	17	9	12	1142.56	1102.91
PS_{11}	18	9.5	12.5	1242.16	1257.00
PS_{12}	19	11.5	15	1353.82	1325.42
PS_{13}	20	14	15.5	1378.21	1399.33

$MA1$ represents the matheuristic algorithm utilizing the uniform crossover operator, while $MA2$ represents the matheuristic algorithm employing the two-point crossover operator. Both methods were statistically compared in terms of the obtained solution values (C_{value}) and solution times (C_{time}). The statistical test results, conducted using the Wilcoxon signed ranks test method at a significance level of $p < 0.05$, are presented in Table 4.

Table 4. Wilcoxon signed ranks test results (Wilcoxon işaretli sıralar testi sonuçları)

	Pairs	***Z***	***p*-value**
Pair 1	MA1 - C_{value} & MA2 - C_{value}	-2.814	0.0049
Pair 2	MA1 - C_{time} & MA2 - C_{time}	-0.0784	0.9375
Pair 3	MA1 - C_{value} &MM - C_{value}	-2.536	0.0112
Pair 4	MA2 - C_{value} & MM - C_{value}	-2.941	0.0033

The statistical test results indicate that a p-value less than 0.05 signifies a significant difference in the solution values obtained by the $MA1$ and $MA2$ algorithms. This finding demonstrates that the $MA1$ algorithm outperforms $MA2$ in terms of solution quality. However, when comparing solution times, the p-value greater than 0.05 indicates no statistically significant difference between the two algorithms' runtimes. These results suggest that the $MA1$ algorithm achieves lower solution values within the same solution time as $MA2$. Consequently, the $MA1$ algorithm emerges as a more effective solution method.

When comparing the results of the $MA1$ algorithm with the results of the mathematical model (MM), it is evident that the $MA1$ algorithm can produce near-optimal solutions in significantly shorter solution time. The comparative graphs presented in Figure 7 clearly support this observation. An analysis of the graph in Figure 7.a reveals that the matheuristic algorithm generates solution values close to those of the mathematical model, demonstrating its effectiveness as a viable alternative in terms of solution quality.

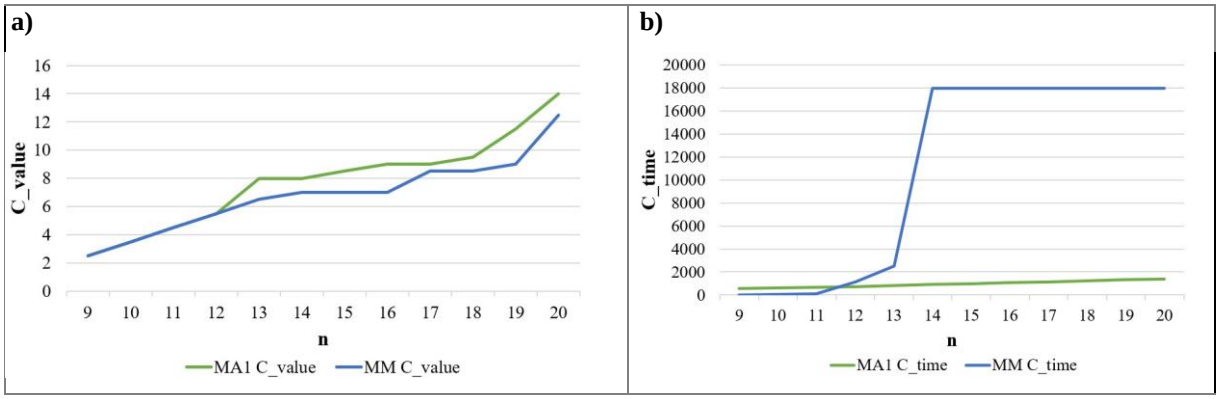


Figure 7. a) Comparison of solution values: $MM - MA1$, b) Comparison of solution times: $MM - MA1$ (a) Çözüm değerlerinin karşılaştırılması: $MM - MA1$, b) Çözüm sürelerinin karşılaştırılması: $MM - MA1$)

Figure 7.b compares the solution times of the two methods. Analyzing the graph reveals that for larger problem sets, where the number of jobs increases significantly, the solution time for the mathematical model (MM) escalates dramatically. In contrast, the $MA1$ algorithm consistently achieves results within shorter solution time.

The experimental results demonstrate that the proposed matheuristic algorithms, particularly $MA1$, produce high quality solutions in significantly shorter times compared to the mathematical model, especially for large-scale problem instances. These findings align with previous studies [12-17] in the literature that emphasize the scalability and efficiency of genetic algorithm-based methods in

unrelated parallel machine scheduling problems with sequence dependent setup times. Unlike many prior works that focus primarily on minimizing makespan, the proposed approach incorporates multiple real-world constraints, such as capacity balancing and job diversity, making it more applicable to industrial environments. Furthermore, the use of a constrained random mutation operator and problem specific chromosome structure adds a layer of problem awareness that enhances search efficiency which are not commonly observed in standard genetic algorithm implementations.

5. CONLUSION (SONUÇ)

This study addresses a scheduling problem for unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times and develops both a mathematical model and matheuristic algorithms to solve it. The mathematical model provided optimal solutions for small and medium sized problems but demonstrated practical limitations due to its exponentially increasing solution time for large-scale problems. To overcome this issue, genetic algorithm-based matheuristic methods were proposed and tested with two different crossover operators.

Experimental results and statistical analyses revealed that the proposed matheuristic algorithms, particularly for large-scale problems, could produce near-optimal solutions in significantly shorter solution times compared to the mathematical model. The $MA1$ algorithm outperformed the $MA2$ algorithm in terms of solution quality and demonstrated an ability to achieve results close to those of the mathematical model. However, no statistically significant difference was observed between the two matheuristic algorithms in terms of solution times. The proposed matheuristic algorithm produced results that are either identical or very close to the exact solutions obtained by the mathematical model for small and medium sized problems. For large scale problems, due to the time constraint (18000 seconds), the solution process of the mathematical model ended without proving optimality. Therefore, the solutions obtained by the mathematical model in large-scale problems were the best feasible solutions that were obtained within the specified time. The matheuristic algorithm, on the other hand, found solutions close to these best feasible solutions in large-scale problems in short periods of time, such as 904-1378 seconds. Therefore, the developed matheuristic approach is not only theoretically reliable but also practically suitable for generating fast and effective solutions in real-world production environments, particularly for daily scheduling tasks.

Future studies may focus on enhancing the performance of the proposed matheuristic algorithms through adaptive parameter tuning, integration with other metaheuristic strategies, or the integration of local search components to further improve solution quality. In addition, alternative objective formulations and operator designs may be explored to better accommodate highly dynamic or large-scale problems.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

I would like to thank the Brisa Company and Mustafa Tacettin for providing case study and data that significantly contributed to the development of this study. / Bu çalışmanın geliştirilmesinde, vaka çalışması ve veri seti sağlayarak önemli katkıda bulunan Brisa firmasına ve Mustafa Tacettin'e teşekkür ederim.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***Merhad AY*:** He developed method, conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Yöntem geliştirmiş, deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Lin, Y.-K., Pfund, M., & Fowler, J. (2011). Heuristics for minimizing regular performance measures in unrelated parallel machine scheduling problems. Computers & Operations Research, 38(6), 901-916.
[2] Su, L. (2009). Minimizing earliness and tardiness subject to total completion time in an

identical parallel machine system. Computers & Operations Research, 36(2), 461-471.

[3] Kongsri, P., & Buddhakulsomsiri, J. (2020). A Mixed Integer Programming Model for Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem with Sequence Dependent Setup Time to Minimize Makespan and Total Tardiness. 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), 605-609.

[4] Diana, R. O. M., Souza, S. R., & Wanner, E. (2021). A robust multi-response VNS-aiNet approach for solving scheduling problems under unrelated parallel machines environments. Expert Systems with Applications, 182, 115140.

[5] Tavakkoli-Moghaddam, R., Taheri, F., Bazzazi, M., Izadi, M., & Sassani, F. (2009). Design of a genetic algorithm for bi-objective unrelated parallel machines scheduling with sequence-dependent setup times and precedence constraints. Computers & Operations Research, 36(11), 3224-3230.

[6] Akyol, E., & Saraç, T. (2017). Paralel makina çizelgeleme problemi için bir karma tamsayılı programlama modeli: ortak kaynak kullanımı. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 5(3), 109-126.

[7] Safaei, S., Naderi, R., Sohrabi, A., & Hatami, A. (2015). Scheduling of unrelated parallel machines using two multi-objective genetic algorithms with sequence-dependent setup times. International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, 8, 11-22.

[8] Yepes-Borrero, J. C., Perea, F., Ruiz, R., & Villa, F. (2020). Bi-objective parallel machine scheduling with additional resources during setups. European Journal of Operational Research, 292(2), 443-455.

[9] Ji, B., Zhang, S., Yu, S. S., & Zhang, D. (2023). An enhanced adaptive large neighborhood search for unrelated parallel machine scheduling with sequence dependent setup times. IEEE Access.

[10] Ezugwu, A. (2021). Advanced discrete firefly algorithm with adaptive mutation-based neighborhood search for scheduling unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times. International Journal of Intelligent Systems, 37(3), 4612-4653.

[11] Haddad, M. N., Coelho, I. M., Souza, M., Ochi, L., Santos, H., & Martins, A. X. (2012). GARP: A new genetic algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with setup times. 31st International Conference of the Chilean Computer Science Society, 152-160.

[12] Vallada, E., & Ruiz, R. (2011). A genetic algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times. European Journal of Operational Research, 211(3), 612-622.

[13] Özçelik, F., & Saraç, T. (2022). Kullanılamayan Zaman Dilimlerinin ve Sıra Bağımlı Hazırlık Sürelerinin Olduğu Paralel Makina Çizelgeleme Problemi. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 10(3), 588-600.

[14] Zeidi, J. R., & Mohammad Hosseini, S. (2015). Scheduling unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 81(1-4), 1487-1496.

[15] Kim, J., & Kim, H.-J. (2020). Parallel machine scheduling with multiple processing alternatives and sequence-dependent setup times. International Journal of Production Research, 59(18), 5438-5453.

[16] Antunes, A., Matos, M. A., Rocha, A. M., Costa, L., & Varela, L. (2022). A statistical comparison of metaheuristics for unrelated parallel machine scheduling problems with setup times. Mathematics.

[17] Chang, Y.-C., Chang, K.-H., & Zheng, C.-P. (2022). Application of a non-dominated sorting genetic algorithm to solve a bi-objective scheduling problem regarding printed circuit boards. Mathematics.

[18] Bektur, G., & Saraç, T. (2019). A mathematical model and heuristic algorithms for an unrelated parallel machine scheduling problem with sequence-dependent setup times, machine eligibility restrictions and a common server. Journal of Industrial and Management Optimization, 15(3), 845-864.

[19] Bozorgirad, M. A., & Logendran, R. (2012). Sequence-dependent group scheduling problem on unrelated-parallel machines. International Journal of Production Economics, 140(2), 844-853.

[20] Fanjul-Peyro, L., Ruiz, R., & Pérez, Á. (2019). Reformulations and an exact algorithm for unrelated parallel machine scheduling problems with setup times. Computers & Operations Research, 102, 199-213.

[21] Thiruvady, D., Blum, C., & Ernst, A. T. (2020). Solution merging in matheuristics for resource constrained job scheduling. Algorithms, 13(10), 256.

[22] Maaranen, H., Miettinen, K., & Penttinen, A. (2007). On initial populations of a genetic

algorithm for continuous optimization problems. Journal of Global Optimization, 37(3), 405-436.
[23] Cerf, R. (2015). The quasispecies regime for the simple genetic algorithm with roulette wheel selection. Advances in Applied Probability, 49(4), 903-926.
[24] Semenkin, E., & Semenkina, M. (2012). Self-configuring genetic algorithm with modified uniform crossover operator. Lecture Notes in Computer Science, 7431, 414-421.
[25] Zainuddin, F. A., Abd Samad, M. F., & Tunggal, D. (2020). A review of crossover methods and problem representation of genetic algorithm in recent engineering applications. International Journal of Advanced Science and Technology, 29(6s), 759-769.
[26] Soni, N., & Kumar, T. (2014). Study of various mutation operators in genetic algorithms. International Journal of Computer Science and Information Technologies, 5(3), 4519-4521.
[27] Rajakumar, B. R. (2013). Static and adaptive mutation techniques for genetic algorithm: a systematic comparative analysis. International Journal of Computational Science and Engineering, 8(2), 180-193.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 932-954 (2025)

A Novel Approach to Objective Criterion Weighting: Extended Statistical Variance Procedure (ESVP)

Furkan Fahri ALTINTAŞ [1*]

[1] *Aydın Provincial Gendarmerie Command, Aydın, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 04/05/2025
Revision: 12/07/2025
Accepted: 22/07/2025

Keywords

Variance
SVP
ESVP
Intrinsic Distinction
External Distinction

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/05/2025
Düzeltme: 12/07/2025
Kabul: 22/07/2025

Anahtar Kelimeler

Varyans
SVP
ESVP
İçsel Dağılım
Dışsal Dağılım

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

A novel criterion weighting method, the Extended Statistical Variance Procedure (ESVP), is proposed to enhance decision-making by integrating both internal variances and inter-criterion contrasts. ESVP outperforms classical SVP in robustness, sensitivity, and discrimination, offering a more balanced and comprehensive analytical framework. / Bu çalışmada, kriter ağırlıklandırma sürecine yeni bir bakış sunan Genişletilmiş İstatistiksel Varyans Yöntemi (ESVP) önerilmiştir. ESVP, içsel varyans ve kriterler arası karşıtlıkları bütüncül şekilde değerlendirerek, klasik SVP'ye kıyasla daha dengeli, duyarlı ve sağlam sonuçlar üretmektedir.

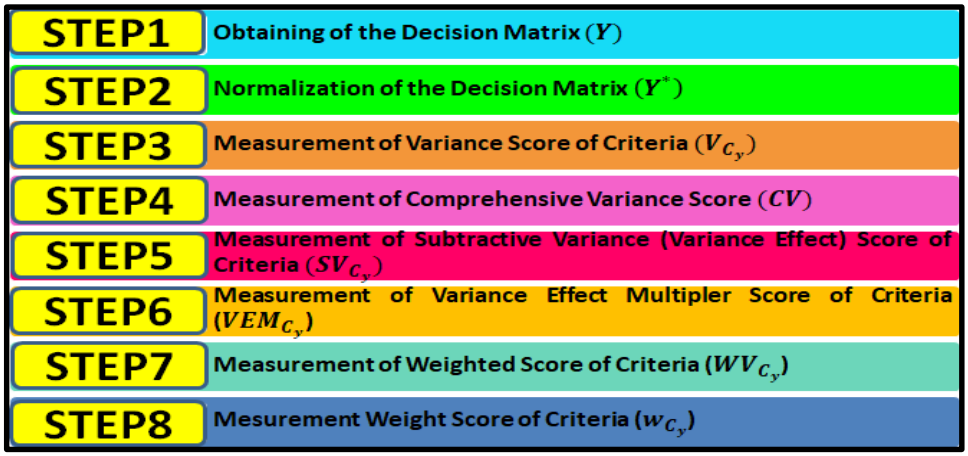


***Figure A**: ESVP model /**Şekil A:**.ESVP modeli*

Highlights (Önemli noktalar)

- *The ESVP method offers a novel weighting approach by integrating internal variance with inter-criterion contrast. / ESVP yöntemi, içsel varyansla birlikte kriterler arası karşıtlığı entegre eden yeni bir ağırlıklandırma yaklaşımı sunmaktadır.*
- *The method's sensitivity, reliability, and structural consistency were validated through sensitivity, simulation and comparative analyses. / Duyarlılık, simülasyon ve karşılaştırmalı analizlerle yöntemin duyarlılık, güvenilirlik ve yapısal tutarlılığı doğrulanmıştır.*
- *It surpasses existing methods in sensitivity to zero/negative values, discriminative power, and variance homogeneity. / Yöntem, sıfır ve negatif değerlere duyarlılığı, yüksek ayırt ediciliği ve dağılım homojenliği açısından literatürdeki diğer yöntemlerden üstündür.*

***Aim (Amaç):** The aim of this study is to propose an extended variance-based weighting method that simultaneously captures internal and external distributional structures of criteria./ Bu çalışmanın amacı, kriterlerin içsel ve dışsal dağılım yapısını eşzamanlı olarak dikkate alan genişletilmiş bir varyans temelli ağırlıklandırma yöntemi önermektir.*

***Originality (Özgünlük):** Unlike SVP, ESVP considers both internal distributions and inter-criterion contrasts, offering a more holistic weighting approach./ SVP'den farklı olarak ESVP, içsel dağılımı ve kriterler arası karşıtlığı dikkate alarak daha bütüncül bir ağırlıklandırma sunar.*

***Results (Bulgular):** ESVP showed high correlation with ENTROPY, SVP, SD, and MEREC, while maintaining stable rankings and homogeneous variance across simulations. ESVP, ENTROPY, SVP, SD ve MEREC ile yüksek korelasyon göstermiş, simülasyonlarda sıralama istikrarı ve homojen varyans sağlamıştır.*

***Conclusion (Sonuç):** ESVP offers a robust and balanced alternative to SVP and other methods, particularly in complex MCDM problems requiring variance sensitivity and structural integrity./ ESVP, özellikle varyans duyarlılığı ve yapısal bütünlük gerektiren karmaşık MCDM problemlerinde, SVP ve diğer yöntemlere güçlü ve dengeli bir alternatiftir.*

*Corresponding author, e-mail: furkanfahrialtintas@yahoo.com
DOI: 10.29109/gujsc.1691115

GU J Sci, Part C, 13(3): 932-954 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

A Novel Approach to Objective Criterion Weighting: Extended Statistical Variance Procedure (ESVP)

Furkan Fahri ALTINTAŞ[1*]

[1] *Aydın Provincial Gendarmerie Command, Aydın, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 04/05/2025
Revision: 12/07/2025
Accepted: 22/07/2025

Keywords

Variance
SVP
ESVP
Intrinsic Distinction
External Distinction

Abstract

This study proposes the Extended Statistical Variance Procedure (ESVP) method to introduce a new perspective to criterion weighting processes. To address the limitations of the traditional SVP method, which focuses solely on the internal variations of criteria, the proposed method comprehensively examines the contrasts among criteria and their contributions to decision-making processes. In this context, criterion weights are calculated through a mathematical model that integrates the internal distribution of each criterion with the effects of its contrasts with other criteria. The effectiveness of the method has been tested through analyses focusing on sensitivity, reliability, and robustness. When compared to other widely used weighting methods such as ENTROPY, CRITIC, SVP, SD, and MEREC, the ESVP method demonstrated high correlations with these methods and superior performance. The Simulation analyses further validated the stability of the method under varying scenarios, revealing that the variances of criterion weights remained homogeneous. Moreover, the method's sensitivity to zero and negative values, computational comprehensiveness, and its ability to evaluate contrasts among criteria to strengthen decision-making processes provide distinct advantages over other approaches in the literature. In conclusion, the ESVP method is considered an effective and reliable tool for decision-makers in multi-criteria decision-making problems that require criterion weighting.

Nesnel Kriter Ağırlıklandırmasına Yönelik Yeni Bir Yaklaşım: Genişletilmiş İstatistiksel Varyans Yöntemi (ESVP)

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/05/2025
Düzeltme: 12/07/2025
Kabul: 22/07/2025

Anahtar Kelimeler

Varyans
SVP
ESVP
İçsel Dağılım
Dışsal Dağılım

Öz

Bu çalışma, kriter ağırlıklandırma süreçlerine yeni bir bakış açısı kazandırmak amacıyla Genişletilmiş İstatistiksel Varyans Yöntemi'ni (Extended Statistical Variance Procedure – ESVP) önermektedir. Geleneksel SVP yönteminin yalnızca kriterlerin içsel varyasyonlarına odaklanması nedeniyle ortaya çıkan sınırlılıkları gidermek üzere geliştirilen bu yöntem, kriterler arasındaki karşıtlıkları ve bu karşıtlıkların karar verme süreçlerine olan katkılarını bütüncül bir biçimde incelemektedir. Bu bağlamda, kriter ağırlıkları; her bir kriterin içsel dağılımını, diğer kriterlerle olan karşıtlık etkileriyle birlikte entegre eden matematiksel bir model aracılığıyla hesaplanmaktadır. Yöntemin etkinliği; duyarlılık, güvenilirlik ve sağlamlık odaklı analizlerle test edilmiştir. ENTROPY, CRITIC, SVP, SD ve MEREC gibi yaygın biçimde kullanılan ağırlıklandırma yöntemleriyle karşılaştırıldığında, ESVP yönteminin bu yöntemlerle yüksek korelasyon gösterdiği ve performans açısından üstünlük sergilediği ortaya konmuştur. Simülasyon analizleri, yöntemin farklı senaryolar altındaki istikrarını doğrulamış ve kriter ağırlıklarının varyanslarının homojen kaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca, yöntemin sıfır ve negatif değerlere duyarlılığı, hesaplama kapsamlılığı ve kriterler arası karşıtlıkları değerlendirerek karar süreçlerini güçlendirme kapasitesi, literatürdeki diğer yaklaşımlara kıyasla özgün avantajlar sunmaktadır. Sonuç olarak, ESVP yöntemi, kriter ağırlıklandırması gerektiren çok kriterli karar verme problemlerinde karar vericiler için etkili ve güvenilir bir araç olarak değerlendirilmektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methodologies offer structured and systematic frameworks for evaluating alternatives based on multiple criteria [1]. One of the most critical components of these processes is determining the relative importance of each criterion, as this directly influences the accuracy and reliability of the resulting decisions [2]. Criterion weighting is

*Corresponding author, e-mail: furkanfahrialtintas@yahoo.com
DOI: 10.29109/gujsc.1691115

generally categorized into two fundamental approaches: subjective and objective methods [3]. Subjective methods rely on the experience and judgment of decision-makers, whereas objective methods derive weights directly from data using mathematical models [4]. The primary aim of objective weighting techniques is to minimize the influence of decision-maker bias and to enable a more impartial, data-driven evaluation process [5]. In today's increasingly complex and multidimensional decision environments, MCDM problems present significant challenges for practitioners and analysts [2]. Within this context, accurately identifying the relative significance of decision criteria becomes essential for ensuring the validity, consistency, and credibility of the decision-making process. Objective weighting methods are widely recognized in the literature for their ability to facilitate analytical and data-oriented assessments that are independent of subjective judgments [1].

Among the most prominent objective weighting techniques in the literature are Standard Deviation (SD) [6], ENTROPY [7], Criteria Importance Through Inter-Criteria Correlation (CRITIC) [8], Statistical Variance Procedure (SVP) [9], Method Based on Removal Effects of Criteria (MEREC) [10], and Logarithmic Percentage Change-Driven Objective Weighting (LOPCOW) [11]. The SVP method represents a statistical approach that determines weights by analyzing the variance levels of the criteria. Its fundamental assumption is that criteria with higher variance carry more informational value for the decision-making process [12]. However, the classical SVP approach focuses exclusively on the internal variation of individual criteria, without considering their external positions or the comparative relationships among them. This methodological limitation hinders the comprehensive assessment of contrast among criteria within the decision matrix, thereby offering a constrained perspective for distinguishing between alternatives. Furthermore, this restriction prevents the holistic evaluation of the overall variance structure embedded in the decision matrix and limits the model's ability to ensure adequate discrimination among criteria. In this context, the existing SVP methodology fails to adequately address a significant gap in the literature, particularly with respect to ensuring high discriminative capacity, structural consistency, and scenario-independent robustness.

In order to address the aforementioned limitations, this study proposes the Extended Statistical Variance Procedure (ESVP), an enhanced version of the classical SVP method. The ESVP method offers a more comprehensive weighting mechanism by holistically accounting for both the internal variation of each criterion and the interdependencies among criteria. Rather than merely evaluating the variance distribution of individual criteria in isolation, ESVP also considers the variance potentials of other criteria within the decision matrix during the weighting process. By doing so, the method analyzes the contribution of each criterion's variance to the overall variance structure of the full criterion set. This enables a more integrated assessment of both inter-criterion contrast and the overall structure of the dataset. In this regard, the ESVP method exhibits conceptual similarities with the weighting mechanism of the CRITIC method, where the internal dispersion of each criterion is measured by standard deviation and its external divergence from others is captured via correlation analysis [8]. Accordingly, ESVP goes beyond the classical SVP framework by simultaneously evaluating both internal distributions and external variance-based contrasts in a unified structure. This proposed approach does not only capture the influence of each criterion's variance on its own distribution but also considers its impact on the variance potential of other criteria. In this way, ESVP delivers a more balanced, discriminative, and consistent weighting structure. Such an integrative perspective allows ESVP to outperform traditional techniques, particularly in capturing the multidimensional variance structure embedded within the decision matrix.

The primary objective of this study is to comprehensively evaluate the effectiveness, sensitivity, and structural reliability of the proposed Extended Statistical Variance Procedure (ESVP) in comparison with the classical SVP approach and other widely adopted objective weighting techniques. To this end, sensitivity analyses were conducted, variance homogeneity tests were applied, and multi-scenario simulations were employed to assess the method's stability under varying conditions. The empirical results indicate that the ESVP method exhibits strong explanatory power and maintains its reliability across different decision environments. In this context, the present study aims to overcome the inherent limitations of the traditional SVP method and to fill a significant gap in the literature by offering a more robust, balanced, and consistent objective weighting approach. ESVP is introduced as a next-generation tool specifically designed for data-driven MCDM applications, providing both original and functional contributions to the field. The robustness of the ESVP method was verified through extensive

sensitivity analyses, while its reliability and validity were tested through comparative evaluations. Furthermore, scenario-based simulation experiments were utilized to evaluate the methodological stability. The empirical findings consistently demonstrate that the proposed approach offers a high level of sensitivity, dependability, and robustness. Based on these results, ESVP is regarded as a valuable and practical tool for decision-makers.

In conclusion, this study seeks to address a critical deficiency in the literature by advancing beyond the constraints of the SVP method and proposing a stronger, more balanced, and structurally sound objective weighting mechanism. ESVP, tailored for contemporary data-intensive MCDM contexts, is expected to make a meaningful and impactful contribution to the decision sciences. Accordingly, the study first provides a comprehensive review of existing objective weighting techniques, followed by a detailed exposition of the mathematical formulation underlying the proposed method. Subsequently, the performance of the ESVP model is rigorously evaluated using a range of analytical tools and benchmarked against both the classical SVP and alternative objective approaches. The paper concludes with a discussion of the findings and offers directions for future research.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

2.1. Various Objective Methods for Weighting Techniques and Their Characteristics (Ağırlıklandırma teknikleri için çeşitli nesnel yöntemler ve bu yöntemlerin özellikleri)

Selecting the most suitable option from a set of alternatives is a core component of decision-making. In such scenarios, alternatives often demonstrate varying performance levels across multiple criteria [13]. Accurate determination of the relative importance of these criteria is therefore crucial for effective alternative evaluation and optimal choice selection [14]. This holds particularly true in traditional MCDM problems, where criterion importance is typically represented by assigned weight values [15].

Subjective weighting approaches rely heavily on individual decision-maker judgment and experience, making them prone to personal biases. Consequently, assigned weights can differ significantly depending on the individual performing the evaluation [2]. Although expert opinions are often utilized to determine these weights, relying solely on subjective evaluations may lead to inconsistencies and biases in the decision-making process [3]. Conversely, objective weighting methods mitigate such biases by employing mathematical models and the data within the decision matrix to calculate weights, incorporating the inherent characteristics of the data into the evaluation [4].

The MCDM field offers a range of objective weighting techniques, including CRITIC [16], ENTROPY [17], SD [12], SVP [6], MEREC [18], and LOPCOW [19]. The CRITIC method operates by extracting pertinent information from the data. This method assigns higher importance to criteria exhibiting greater distinctiveness or variability [16]. Furthermore, CRITIC considers inter-criterion relationships by analyzing correlations to identify inconsistencies or conflicts. Weights are derived using calculated SD values, reflecting these interrelationships. This process involves constructing a decision matrix, normalizing it, and subsequently determining weight coefficients based on inter-criterion correlations [20].

The ENTROPY method provides a structured approach for determining the relative importance of criteria in decision-making. The method starts with the construction of a decision matrix and then continues by computing standardized values. ENTROPY is then employed to assess the degree of uncertainty or disorder associated with each criterion, capturing the information content inherent within each [21]. By applying the ENTROPY measure to these standardized values, weights are assigned to criteria based on their variability. Criteria exhibiting greater variability are assigned higher weights. This systematic approach ensures an objective, data-driven process, enabling decision-makers to conduct well-informed and balanced evaluations [22].

In the SD method, weights are determined by analyzing the extent to which each criterion's values deviate from their mean. Following normalization of the decision matrix, the SD for each criterion is computed, and these values are then used to derive the weights [23].

The SVP method, conversely, calculates weights by evaluating the variance of the data within the decision matrix [6]. Higher variance indicates greater significance in the decision-making process, implying that criteria demonstrating more variability are assigned larger weights. This ensures that criteria with higher variability exert a greater influence on the overall evaluation [12].

The MEREC method, like other weighting approaches, begins with constructing and normalizing the decision matrix. Next, the overall performance scores of the decision alternatives are computed using a natural logarithm-based framework [20]. These scores are then adjusted by incorporating the contribution of each alternative, with additional calculations utilizing the natural logarithm function. In the final step, the weight coefficients of the criteria are determined by evaluating the impact of removing each criterion, quantified as the sum of absolute deviations. Moreover, a criterion's weight coefficient increases in direct proportion to its influence on the decision alternatives [18].

The LOPCOW method utilizes a multidimensional approach to derive weights while minimizing the difference between the most and least influential criteria. It also accounts for interdependencies between criteria. The process commences by constructing and normalizing the decision matrix. Subsequently, the method calculates the average squared value as a percentage of each criterion's SD to mitigate the effects of differing data scales. This method ultimately generates weight coefficients for each criterion through a structured and systematic calculation [19].

2.2. Variance (Varyans)

Variance is calculated by dividing the sum of the squared deviations of values from their mean by the total number of values [24]. In other words, variance reflects the measurement of distributions within a dataset. Therefore, variance represents the variability within the dataset [25]. Variance stands out as a fundamental measure of dispersion in statistical data analysis, extending beyond central tendency measures to quantify the extent to which individual observations within a dataset deviate from one another and from the mean [26,27]. In its simplest definition, variance refers to the arithmetic mean of the squared deviations of observations from their mean [28,29]. In this regard, variance quantitatively reflects the degree of homogeneity or heterogeneity present in a given dataset [30,31].

As a core indicator of statistical variability, variance captures the spread and density of the distribution by measuring how far data points lie from the mean [32,33]. A high variance value indicates that observations are widely dispersed around the mean, suggesting a more scattered and heterogeneous data structure [34]. Conversely, low variance values imply that data points are tightly clustered around the mean, indicating a more homogeneous distribution [35]. A proper understanding and interpretation of variance is particularly important in relation to its mathematical and conceptual linkage with standard deviation (SD) [36]. While variance is expressed in squared units of the observed variable, standard deviation retains the original unit of measurement, making it more directly interpretable in practical contexts [37]. However, this difference does not diminish the analytical value of variance; on the contrary, as the square root of variance defines the standard deviation, variance remains a foundational construct in statistical theory and modeling [38]. Accordingly, clearly defining the relationship between variance and standard deviation is critical to ensuring methodological robustness in statistical analyses [39]. Standard deviation can be understood as the square root of variance, and this fundamental relationship is widely utilized across various analytical frameworks. In this context, the mathematical formulations for variance and standard deviation are presented in Equation 1 and Equation 2, respectively. Furthermore in the statistical literature, the unbiased estimator of the population variance is defined by Equation 3. Accordingly, the sample standard deviation is calculated based on the unbiased variance using Equation 4 [40].

σ: Standard deviation

n: Sample size

X: Each observation in the dataset

$\bar{X}$: Sample means

ϑ: Variance

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X-\bar{X})^2}{n}} \quad (1)$$

$$\vartheta = \frac{\sum(X-\bar{X})^2}{n} \quad (2)$$

$$\vartheta = \frac{\sum(X-\bar{X})^2}{n-1} \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X-\bar{X})^2}{n-1}} \quad (4)$$

2.3. The Use of Variance in Criteria Weighting: Statistical Variance Procedure (Kriter Ağırlıklandırmada varyansin kullanımı: İstatistiksel varyans yöntemi)

SVP is one of the objective weighting methods for decision alternatives. Therefore, in this method, the determination of the criteria weights is not

influenced by the subjective assessments of experts [23]. In this approach, the weighting of criteria is based on measuring the variance values of the criteria [9]. After the variance values of the criteria are measured, the weights of the criteria are determined by calculating the ratio of the variance of a single criterion to the total variance of all criteria [41]. Accordingly, the literature related to the SVP method used for criterion weighting is presented in Table 1.

Table 1. SVP studies (SVP çalışmaları)

Author(s)	Method(s)	Theme
[42]	WED and SVP	Analysis of healthcare decision process
[43]	SVP	Analysis of normalization methods
[44]	SVP, SD and ENTROPY-CODAS	Comparative of criteria weight scores in CODAS
[45]	SVP-TOPSIS	Assessment of Athlete
[46]	SD and SVP-TOPSIS	Comparative analysis of methods
[47]	Entropy, CRITIC, LOPCOW, SVP, SD, and MEREC	Combined method analysis
[48]	SVP-TOPSIS	Determining of network for IoT

A review of the existing literature on the SVP method reveals that its integration with other MCDM techniques has been represented by a rather limited number of studies. Most of these investigations have been conducted by a small group of research teams, which restricts the scientific diversity, global awareness, and interdisciplinary diffusion of the method. In this context, the lack of broader research addressing SVP both in terms of methodological development and practical application has hindered the full recognition of its potential contributions. A key reason behind this limitation lies in the classical formulation of SVP, which adopts a unidimensional perspective focused solely on the internal variation of criteria. Such an approach falls short of satisfying the holistic assessment requirements demanded by complex multi-criteria decision-making environments. In particular, by disregarding the structural contrasts and inter-criterion divergences embedded within the decision matrix, the classical SVP model reduces methodological flexibility and complicates its integration with other MCDM frameworks. Nonetheless, SVP's core philosophy variance-based weighting offers significant advantages, as it enables an objective, data-driven evaluation. The method possesses strong explanatory power and, due to its sensitivity to the distributional structure of the decision matrix, it can play a critical role in data-intensive decision problems. To fully capitalize on these advantages, however, it is necessary to move beyond the conventional SVP formulation and develop extended, next-generation models that can better accommodate the complexity of real-world decision contexts. In this context, the steps of applying the IVP method are outlined below [6, 41].

C_r: $r-th$ evaluation criterion

d_{pr}: value of the $p-th$ alternative according to the $r-th$ evaluation criterion

w_r: weight of the $r-th$ evaluation criterion ($r = 1, 2, \dots, n$)

e_{pr}: Normalized score of d_{pr}

Step 1: Construction of the Decision Matrix (X)

In the initial phase of the MCDM process, the decision matrix is constructed to systematically represent the quantitative performance of each alternative with respect to the relevant criteria. Denoted as X, this matrix comprises elements where d_{pr}indicates the performance value of the p alternative under the r criterion. The matrix is formulated in accordance with the structure defined in Equation 5 of the study, thereby establishing a robust analytical foundation that enables comprehensive evaluation across all criteria. The input data may derive from direct measurements or expert assessments. During the matrix construction, critical aspects such as the directionality of criteria, data scale compatibility, and inter-criteria comparability must be rigorously considered.

$$X = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ d_{11} & d_{12} & & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Step 2: Construction of normalized matrix (X^*)

At this stage, normalization is performed based on the orientation of each criterion. For benefit-oriented (maximization) criteria, normalization values are computed using Equation 6, whereas for cost-oriented (minimization) criteria, the calculations are carried out in accordance with Equation 7. In both cases, the primary objective is to transform the data into a dimensionless and comparable format across different measurement scales. Subsequently, the normalized decision matrix (X^*) is constructed by applying Equation 8 to the previously obtained normalized values. This matrix enables a balanced and scale-independent evaluation of all alternatives across the full set of criteria. In doing so, it establishes a robust and coherent data foundation for the subsequent phases of the decision-making process.

$$e_{pr} = \frac{d_{pr}}{max_{d_{pr}}} \tag{6}$$

$$e_{pr} = \frac{min_{d_{pr}}}{d_{pr}} \tag{7}$$

$$X^* = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ e_{11} & e_{12} & & e_{1n} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{m1} & e_{m2} & \cdots & e_{mn} \end{bmatrix} \tag{8}$$

Step 3: Calculation of variance score of each criteria (ϑ_{Cr})

At this stage, the variance value for each criterion is calculated using the previously obtained normalized values, as defined in Equation 9. Variance serves as a quantitative indicator of how dispersed the alternatives are with respect to a given criterion, and simultaneously reflects the discriminative power of that criterion. In this context, criteria with higher variance indicate a greater potential to differentiate among alternatives, thereby assuming a more influential role in the decision-making process. Accordingly, this step is not merely a numerical computation, but a critical analytical phase aimed at quantifying the relative distinctiveness of each criterion. The resulting variance values are subsequently utilized as a foundational input in the weighting procedures of the next stage.

$$\vartheta_{Cr} = \frac{\sum(e_{pr} - \overline{C_r})^2}{m} \tag{6}$$

Step 4: Measurement of the weight of criteria (w_r)

At this stage, the weight of each criterion is calculated using Equation 10. The computation involves dividing the variance of each criterion by the total variance across all criteria. As a result, the obtained weights are normalized values within the [0, 1] range, and the sum of all criterion weights equals 1. This ensures that the relative contribution of each criterion to the decision-making process is quantitatively and proportionally represented. This variance-based weighting approach objectively reflects the discriminative capacity of each criterion within the decision model. In particular, criteria with higher variance indicating greater differentiation among alternatives are assigned proportionally higher weights. This step not only preserves the analytical integrity of the decision matrix but also establishes a balanced and coherent weighting structure among criteria.

$$w_r = \frac{\vartheta_{Cr}}{\sum_{r=1}^{n} \vartheta_{Cr}} \tag{9}$$

2.4. Proposed method (Expanded Statistical Variance Procedure-ESVP) (Önerien yöntem: Genişletilmiş istatistiksel varyans prosedürü)

When determining criterion weights, the degree of contrast, uniqueness, and discordance among criteria serves as an indicator of their inherent characteristics [4]. Consequently, criteria that exhibit greater divergence or opposition within a defined mathematical framework are assigned greater importance or weight [5]. In this respect, the proposed methodology shares conceptual similarities with the SVP method in its fundamental logic. The SVP method assigns importance to criteria based on the extent of variation present within their individual datasets, without considering the datasets of other criteria [6].

The proposed method extends the traditional SVP method by enhancing the representation of contrast and uniqueness among criteria, rendering these attributes more apparent and thorough. To accomplish this, the proposed approach evaluates the complete numerical sequence of each criterion to assess its degree of contrast holistically. Specifically, the method computes the change in the SVP of the remaining criteria after excluding the numerical sequence of a given criterion. This calculation quantifies the contribution of the removed criterion to the overall SD.The resulting influence is transformed into a factor that, when combined with the SVP values of the other criteria, defines the spatial arrangement of all criteria within a more comprehensive framework. The intrinsic SVP value of each criterion (representing its internal variability) is then multiplied by this factor (representing external variability). This adjustment amplifies the relative contrast of criteria by incorporating both their internal and external dispersion. Through this approach, the contrasts

among criteria can be evaluated more comprehensively.

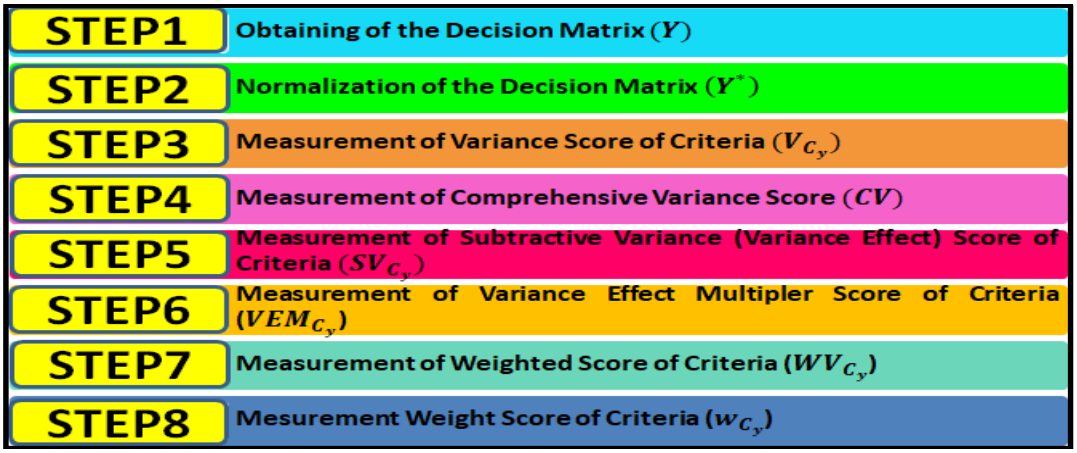


Figure 1. Basic logic of the proposed method (ESVP) (Önerien yöntemin temel mantığı)

As illustrated in Figure 1, Steps 1 through 3 correspond to the conventional Statistical Variance Procedure (SVP), which calculates the individual variance values for each criterion. In this traditional approach, the criterion with the highest variance is regarded as the most significant or influential in the decision-making process. However, this method focuses solely on the internal distribution of each criterion, based on its own values, and does not consider its interaction with other criteria. In contrast, the proposed method enhances the classical SVP starting from Step 4 by introducing the calculation of the Comprehensive Variance (CV), which represents the overall variance of the dataset, including all criteria. In Step 5, when a specific criterion is removed from the dataset, the change (increase or decrease) in the variance of the remaining criteria is observed. This change reflects the holistic influence of the removed criterion on the total variance and is denoted as Subtractive Variance (SV). In Step 6, the SV value obtained after the exclusion of a criterion is compared with the CV value of the full dataset. If SV>CV, it indicates that the removed criterion had a reducing effect on the overall variance. Conversely, if SV<CV, the criterion is interpreted as contributing positively to the increase in total variance. Based on this logic, the weight of the removed criterion in terms of its contribution to overall variance denoted as WEM is calculated by the ratio CV/SV. Here, SV is a derived variance measure that captures the shift in total variance resulting from the removal of a specific criterion, reflecting its external distribution relative to the others. In the subsequent step, the individual variance of each criterion (V) is multiplied by its corresponding WEM value to obtain the Weighted Variance (WV). Finally, in the last step of the method, the WV value of each criterion is divided by the sum of all WV values to determine the final normalized weights of the criteria. In this respect, the proposed method not only accounts for the intrinsic variance of each criterion but also integrates its extrinsic impact on the dataset as a whole. This dual consideration aligns the method closely with the CRITIC approach. In CRITIC, the weight of a criterion is calculated by multiplying its standard deviation (representing internal contrast, based on its own normalized values) with a measure of its conflict with other criteria (computed as the sum of one minus the Pearson correlation coefficients). To summarize, the proposed method simultaneously incorporates both the individual (intrinsic) variance and the systemic (extrinsic) contribution of each criterion. By doing so, it captures the contrast effect among criteria more comprehensively and refines the traditional SVP into a more balanced, robust, and informative weighting mechanism. The procedural steps of the method are detailed in the subsequent section.

V: Variance score

Y: Decision matrix

Y^*: Normalized decision matrix

C_y: $y-th$ evaluation criterion

e_{vy}: value of the $v-th$ alternative according to the $y-th$ evaluation criterion

σ_y: SD of the $y-th$ criterion $(y = 1, 2, \dots, n)$

w_y: Weight of the $y-th$ evaluation criterion $(y = 1, 2, \dots, n)$

f_{vy}: Normalized score of e_{vy}

Step 1: Obtaining of the Decision Matrix (Y)

The formulation presented in Equation 11 constitutes the foundational structure for constructing the decision matrix. This formulation enables the systematic and quantitative representation of alternatives with respect to the relevant criteria within the context of multi-criteria decision-making. As a result, a decision matrix is obtained that is both analytically processable and mutually comparable, thereby facilitating consistent evaluation by the decision-maker. Equation 13 provides the mathematical basis for generating this matrix, ensuring that the method can be implemented in a coherent and repeatable manner across different decision problems.

$$Y = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ e_{11} & e_{12} & & e_{1n} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{m1} & e_{m2} & \cdots & e_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Step 2: Normalization of the Decision Matrix (Y^*)

In the second stage, the normalization of the criterion values is performed to ensure comparability across different measurement scales. For benefit-oriented criteria, normalization is conducted using Equation 12, while Equation 13 is employed for cost-oriented criteria. This distinction allows the method to appropriately handle criteria with different directional objectives (maximization vs. minimization). Following the application of these normalization procedures, the normalized decision matrix is constructed using Equation 14. This matrix provides a standardized framework in which all criteria are dimensionless, facilitating a fair and consistent basis for further analysis in the multi-criteria decision-making process.

$$f_{pr} = \frac{e_{vy}}{max_{e_{vy}}} \quad (12)$$

$$f_{pr} = \frac{min_{e_{vy}}}{e_{vy}} \quad (13)$$

$$Y^* = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ f_{11} & f_{12} & & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \cdots & f_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Step 3: Measurement of Variance Score of Criteria (V_{C_y})

At this stage, the variance value of each criterion is calculated using Equation 15, independently of the normalized values of the other criteria. This computation is based solely on the normalized decision matrix and quantitatively reveals the degree of dispersion in the values associated with each individual criterion. In other words, the variance value can be interpreted as a statistical indicator that measures the discriminative power of a criterion, considering only the internal distribution of its own normalized values without reference to the behavior or distribution of the remaining criteria. This reflects the extent to which a given criterion contributes to the decision-making process on the basis of its intrinsic variability.

$$V_{C_y}(\sigma_y) = \sqrt{\frac{\sum(f_{vy} - \overline{C_y})^2}{m}} \quad (15)$$

Step 4: Measurement of Comprehensive V Score (CV)

At this stage, the overall variance of the dataset is calculated by considering the distribution of all normalized criterion values across all alternatives. This computation is performed using Equation 16. The resulting Comprehensive Variance Score (CV) serves as a singular metric representing the overall variability of the decision matrix. In other words, the CV value statistically quantifies the degree of dispersion within the system when all normalized values of all criteria are evaluated collectively. This comprehensive measure functions as a higher-order variance indicator, taking into account the global distribution characteristics of the entire dataset. It provides a critical reference point for the subsequent steps, enabling a comparative assessment of each criterion's holistic influence on the system.

$$Y^* = [f_{11}, \quad f_{21}, \quad \dots \quad f_{m1},$$

$$f_{12}, \quad f_{22}, \quad \dots \quad f_{m2}, \quad f_{1n}, \quad f_{2n}, \quad \dots \quad f_{mn}]$$

$$CV = \sqrt{\frac{\sum(f_{vy} - \overline{Y^*})^2}{mxn}} \quad (16)$$

Step 5: Measurement of Subtractive Variance (Variance Effect) Score of Criteria (SV_{C_y})

At this stage, the variance of the normalized dataset is recalculated by systematically removing each individual criterion, with the aim of evaluating how the exclusion of a specific criterion influences the overall variance of the system. In this context, the subtractive variance score, denoted as SV_{C_y}, is obtained by excluding the normalized values of the criterion in question and computing the resulting variance of the remaining dataset. This newly computed value is then compared with the

Comprehensive Variance (CV) of the complete dataset, which includes all criteria. The outcome of this comparison reveals both the direction and the magnitude of the excluded criterion's contribution to the system's overall variability. If the CV value is greater than the corresponding SV_{Cy}, it indicates that the excluded criterion had a positive effect on the overall variance, meaning its presence increased the variability of the dataset. Conversely, if the SV_{C_y} exceeds the CV, it implies that the criterion had a dampening effect, thereby reducing the system's overall variance. The entire procedure is conducted for each criterion individually, and the corresponding SV_{C_y} values are determined in accordance with Equations 17 through 21. This step enables the evaluation of each criterion's external influence on the global structure of the dataset, extending beyond the scope of its internal dispersion. In doing so, the method not only accounts for the intrinsic variability of a criterion but also captures the degree to which it structurally affects the variance of the decision space when removed, offering a more comprehensive and system-aware assessment of criterion importance.

$$1)\{\boldsymbol{C_1} \notin \boldsymbol{C}\};\ \{C_2, C_3, C_4, .., C_n\ \in C\};$$

$$\boldsymbol{SV_{C_1}}: [f_{12}f_{22}..f_{m2}f_{13}f_{23}..f_{m3}f_{14}f_{24}..f_{m4}f_{1n}f_{2n}..f_{mn}] = \sqrt{\frac{\sum(f_{vy}-\overline{SV_{C_1}})^2}{m*(n-1)}} \quad (17)$$

$$2)\{\boldsymbol{C_2} \notin \boldsymbol{C}\};\ \{C_2, C_3, C_4, .., C_n\ \in C\};$$

$$\boldsymbol{SV_{C_2}}: [f_{11}f_{21}..f_{m1}f_{13}f_{23}..f_{m3}f_{14}f_{24}..f_{m4}f_{1n}f_{2n}..f_{mn}] = \sqrt{\frac{\sum(f_{vy}-\overline{SV_{C_2}})^2}{m*(n-1)}} \quad (18)$$

$$3)\{\boldsymbol{C_3} \notin \boldsymbol{C}\};\ \{C_2, C_3, C_4, .., C_n\ \in C\};$$

$$\boldsymbol{SV_{C_3}}: [f_{11}f_{21}..f_{m1}f_{12}f_{22}..f_{m2}f_{14}f_{24}..f_{m4}f_{1n}f_{2n}..f_{mn}] = \sqrt{\frac{\sum(f_{vy}-\overline{SV_{C_3}})^2}{m*(n-1)}} \quad (19)$$

$$\boldsymbol{SV_{C_4}}: [f_{11}f_{21}..f_{m1}f_{12}f_{22}..f_{m2}f_{13}f_{23}..f_{m3}f_{1n}f_{2n}..f_{mn}] = \sqrt{\frac{\sum(f_{vy}-\overline{SV_{C_4}})^2}{m*(n-1)}} \quad (20)$$

$$\ldots, \ldots, \ldots, \ldots, \ldots, \ldots, \ldots, \ldots, \ldots, \ldots, \ldots$$

$$\ldots, \ldots, \ldots, \ldots, \ldots, \ldots, \ldots, \ldots, \ldots, \ldots, \ldots$$

$$\boldsymbol{m})\ \{\boldsymbol{Cm} \notin \boldsymbol{C}\};\{C_1, C_2, C_3, .., C_{(n-1)}\ \in C\} \in C;$$

$$\boldsymbol{SV_{C_m}}: [f_{11}f_{21}..f_{m1}f_{12}f_{22}.f_{m2}f_{13}f_{23}.. f_{2(n-1)}..f_{m(n-1)}]] = \sqrt{\frac{\sum(f_{vy}-\overline{SV_{C_{(n-1)}}})^2}{m*(n-1)}} \quad (21)$$

Step 6: Measurement of Variance Effect Multipler Score of Criteria (VEM_{C_y})

In the subsequent step, the Variance Effect Multiplier Score (VEM_{C_y}) is calculated for each criterion. This calculation is performed by determining the ratio between the overall variance of the complete dataset (CV) and the variance of the remaining normalized dataset obtained after the exclusion of the respective criterion (SV). If CV is greater than SV, the resulting CV/SV ratio reflects the amplifying effect of the excluded criterion on the dataset's variability. Conversely, if SV exceeds CV, the same ratio indicates a dampening effect, implying that the exclusion of the criterion has reduced the overall variance. According to this approach, the (VEM_{C_y}) value for each criterion is systematically computed in accordance with Equations 22 and 23. In this way, the criterion's enhancing or diminishing influence on the system's total variance is quantitatively revealed. This step not only captures the distributional disparities among criteria, but also enables a more comprehensive evaluation of their structural contribution to the dynamic behavior of the overall decision system.

Contribution multiplier:

$$\boldsymbol{CV} > \boldsymbol{SV_{C_y}} \rightarrow VEM_{C_y} = (\boldsymbol{CV})\backslash(\boldsymbol{SV_{C_y}}) \quad (22)$$

Reduction multiplier:

$$\boldsymbol{SV_{C_y}} > \boldsymbol{CV} \rightarrow VEM_{C_y} = (\boldsymbol{CV})\backslash(\boldsymbol{SV_{C_y}}) \quad (23)$$

Step 7: Measurement of Weighted V_{Cr}Score of Criteria (WV_{C_y})

At this stage, consistent with the logic of the CRITIC method, the internal distribution state (V_{C_y}) of each criterion is multiplied by its external distribution state VEM_{C_y} in order to evaluate its overall spatial distribution within the system. In other words, the intrinsic variance of a given criterion calculated solely based on its own normalized values is adjusted by the variance effect multiplier, which reflects the criterion's relationship with all other criteria. Through this adjustment, the relative position and influence of each criterion within the global variance structure of the system are captured in a more holistic and integrated manner. As a result of this multiplication, the weighted standard deviation score (WV_{C_y}) is obtained for each criterion. This computation is carried out in accordance with Equation 24. The significance of this step lies in its ability to provide the decision-maker not only with a measure of individual variance, but also with a more refined and powerful weighting mechanism that incorporates the degree of interaction among criteria within the overall system.

$$WV_{C_y} = V_{C_y} * VEM_{C_y} \quad (24)$$

Step 8: Measurement of Weight of Criteria (w_{C_y})

In the final stage, the ultimate weight assigned to each criterion is calculated by evaluating the ratio between its weighted variance score (WV_{C_y}) and the total weighted variance scores ($\sum_{j=1}^{n} WV_{C_y}$) of all criteria. This ratio reflects the relative contribution of each criterion to the overall system variance and is expressed as a normalized value within the range of [0, 1]. As a result, the weights of all criteria are proportionally distributed such that their sum equals one. This computation process is formally defined in Equation 25 and constitutes the final step of the method's integrated weighting structure.

$$w_{C_y} = \frac{WV_{C_y}}{\sum_{j=1}^{n} WV_{C_y}} \quad (25)$$

The proposed methodology advances beyond the traditional SVP method by incorporating external influences, unlike the classical SVP which solely relies on intra-criterion observation distributions. This integration enhances the method's ability to accurately capture inter-criteria contrast. By considering impact multipliers, a more nuanced assessment of each criterion's influence is achieved, leading to more comprehensive and accurate decision-making outcomes. Furthermore, the proposed method provides an improved representation of criterion distribution within the dataset compared to the classical SVP approach. While latter primarily focuses on deviations from the mean, proposed method evaluates the distribution and criterion effect in significantly greater detail. This allows for a deeper understanding of each criterion's role in the final decision. Unlike the classical SVP method, which simply measures variance from the mean [43], proposed method assesses the individual contributions of each criterion to the overall decision, offering a clearer picture of its impact.

Furthermore, in contrast to the classical SVP method, which identifies outliers based solely on a criterion's own values, the proposed method detects outliers through a holistic evaluation, considering both the criterion's intrinsic and external status with other criteria. In short, proposed method provides a far more detailed, flexible, and realistic alternative to the classical SVP method, enhancing the reliability and validity of decision-making by incorporating weighting, external influences, and adaptability to diverse criteria. Moreover, the proposed method exhibits distinct advantages over other objective weighting techniques. A major benefit is its robustness to zero and negative values. For example, the ENTROPY and MEREC methods are sensitive to such values, which can result in undefined results within the decision matrix due to the logarithmic operations involved [17-18]. When the ENTROPY method is examined, the characteristics of the criteria are determined by entropy without considering the values of the other criteria. Therefore, in the ENTROPY method, the weights of the criteria are only evaluated based on their own intrinsic entropy distributions (internal distribution) [17]. In contrast, in the proposed method, the characteristics of the criteria are determined by considering both their own intrinsic values as well as the values of other criteria, thereby accounting for both internal and external distributions. In the MEREC method, the performance of each criterion associated with an alternative's cell is computed using a nonlinear logarithmic function. Following this, once the criterion is removed, the performance of the alternatives is recalculated. The influence of each criterion is assessed by analyzing the difference between the performance of the cell corresponding to that criterion and the recalculated performance of the alternatives after excluding the criterion [18]. Consequently, the MEREC method takes into account both the internal distribution of each criterion and its effect on the overall dataset (external distribution of each criterion), aligning with the framework of the proposed method. The key distinction between the two approaches lies in

their respective methodologies: in the MEREC method, the focus is on the performance of the decision alternatives once the criteria are excluded, while in the proposed method, the performance of the criteria themselves is evaluated after their exclusion.

Compared to the CRITIC method, the proposed approach demonstrates technical similarities. Both methods determine criterion weights by considering the intrinsic distribution of each criterion (internal differentiation: standart deviation: (σ)) and its relationships with other criteria (external differentiation: Pearson cerrelation (p) ($\sum_{j=1}^{n}(1-p)$: Position of criteria according to other criteria) [4]. However, the proposed method refines the CRITIC approach by calculating the SV and VEM values, where internal differentiation is based on each criterion's variance, and external differentiation includes the influence of other criteria. Despite these similarities, the proposed method yields more accurate results. This is because the CRITIC method relies on Pearson's correlation coefficient, which assumes a normal distribution. In non-normally distributed datasets, Pearson's correlation coefficient can produce unreliable results [28].

The proposed method, by not relying on this assumption, offers a more adaptable and robust evaluation. Variance, being the square of the SD, means that, like the classical SD method, the SVP method identifies differences among criteria based solely on their intrinsic distributions or variance values [12]. However, the proposed method provides a more holistic weighting approach, making it more comprehensive than the SVP method. The LOPCOW method, while robust in addressing data scale issues, handles gaps in the dataset based only on the intrinsic values of the criteria, without considering the impact of other criteria [19]. Conversely, the proposed method incorporates the values of all other criteria in the weighting process. This integration allows for a more relational structure in evaluating differences among criteria, making their mutual influences more explicit.

In summary, the proposed method surpasses the classical SVP method by offering a more comprehensive, adaptable, and dependable weighting approach. Compared to other objective weighting methods, it presents several advantages, particularly in promoting more informed and effective decision-making. However, a limitation is that, unlike some other objective weighting methods, the weighting process in this approach is more complex and computationally intensive. This limitation becomes more prominent as the number of criteria and alternatives increases. In the application of the classical SVP, the skewness and kurtosis values of the criteria are not taken into account during the weighting process.

In contrast, the ESVP enhances the variance-based weighting mechanism by integrating both the intrinsic distributions of the criteria and their levels of contrast with one another. In this regard, ESVP represents a multidimensional and comprehensive approach that distinctly departs from the unidimensional structure of the traditional SVP method. Although the proposed method does not impose a strict assumption of normality, it is theoretically plausible that significant deviations in data distribution such as pronounced skewness or kurtosis may influence the calculation of variances, especially in the presence of outliers. Such deviations could, under certain conditions, lead to an artificial inflation of the variance for specific criteria, thereby resulting in disproportionally higher weight values.

2.5. Data Set (Veri seti)

The method proposed for the quantitative determination of criterion weights utilizes the most recent 2024 Global Innovation Index (GII) values for selected countries as its dataset. The reasoning behind choosing these data is that the criterion values do not exhibit extreme outliers, thereby facilitating a more accurate evaluation of the method's ability to differentiate between the criteria under these conditions. For ease of reference, the abbreviations for the GII criteria are presented in Table 2.

Table 2. Abbreviations of alternatives and criteria (Alternatif ve kriterlerin kısaltmaları)

GEHI Criteria	Abbreviations
Institutions	C1
Human Capital and Research	C2
Infrastructure	C3
Market Sophistication	C4
Business Sophistication	C5
Knowledge and Technology Outputs	C6

Creative Outputs	C7
Countries	**Abbreviations**
Austria	A1
Estonia	A2
Hong Kong	A3
Iceland	A4
Ireland	A5
Luxembourg	A6
Norway	A7

3. RESULTS (BULGULAR)

3.1. Computational examination (Hesaplamalı inceleme)

In the study, the decision matrix was first constructed using Equation 11. Subsequently, the normalization of the decision matrix values was performed through Equation 12 and 14. Accordingly, the decision matrix and the normalized decision matrix are presented in Table 3.

Table 3. Decision and normalized decision matrix (Karar ve normalize karar matrisi)

Decision Matrix							
Countries	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**C6**	**C7**
A1	74.7	59.4	56.8	45.2	51	41.8	44.5
A2	78.7	44.5	61.3	66.5	48.1	39.9	49.7
A3	82.1	55.7	55.4	71.9	49.7	22.8	51.8
A4	78.6	47.5	64.9	52.4	52.4	30.3	45.6
A5	79.1	48.1	54.8	37.9	55.7	47.3	42.3
A6	83.9	46.9	45.7	45.8	58.3	30.5	53.6
A7	83.3	50.9	64.6	45.2	51.2	34.7	43.4
Maximum	83.9	59.4	64.9	71.9	58.3	47.3	53.6
Normalized Decision Matrix							
Countries	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**C6**	**C7**
A1	0.890	1.000	0.875	0.629	0.875	0.884	0.830
A2	0.938	0.749	0.945	0.925	0.825	0.844	0.927
A3	0.979	0.938	0.854	1.000	0.852	0.482	0.966
A4	0.937	0.800	1.000	0.729	0.899	0.641	0.851
A5	0.943	0.810	0.844	0.527	0.955	1.000	0.789
A6	1.000	0.790	0.704	0.637	1.000	0.645	1.000
A7	0.993	0.857	0.995	0.629	0.878	0.734	0.810

In the third stage of the study, the variance value for each criterion was calculated using the normalized values through Equation 15. In the fourth stage, all criteria were considered in an integrated manner with the aid of Equation 16, and the comprehensive variance (CV) of the matrix, accounting for the normalized values of all criteria, was determined. In the fifth stage, based on the normalized values and CV values, the subtractive variance (SV) for each criterion was identified using Equations 17, 18, 19, 20, and 21. In the sixth stage, the variance effect multiplier (VEM) for each criterion was computed using Equations 22 or 23. In the seventh stage of the method, the weighted variance (WV) values were determined using Equation 24. Finally, in the last stage, the weights of the criteria (w) were obtained through Equation 25. The values obtained at each stage are presented in detail in Table 4.

Table 4. V, CV, SV, VEM, WV and w scores of criteria (Kriterlerin V, CV, SV, VEM, WV and w değerleri)

Criteria	**V**	**CV**	**SV**	**VEM**	**WV**	**w**	**Rank**
C1	0.0013	0.0172	0.0177	0.9717	0.0012	0.013	7
C2	0.0069		0.0189	0.9092	0.0063	0.068	4

C3	0.0092		0.0182	0.9432	0.0087	0.094	3
C4	0.0259		0.0128	1.3476	0.0349	0.378	1
C5	0.0031		0.0191	0.9015	0.0028	0.031	6
C6	0.0263		0.0136	1.2599	0.0331	0.359	2
C7	0.0058		0.0189	0.9106	0.0053	0.057	5
Sum					0.0923	---	

Upon examining Table 4, the ranking of the criterion weights is determined as C4, C6, C3, C2, C7, C5, and C4. As part of the study's findings, an illustrative solution for determining the weight of C1 is provided.

Normalized Value:

$A1 \rightarrow C_1 : Equ.12 \coloneqq 74{,}7/83{,}9 = 0{,}890$

$$\boldsymbol{Equ.16}: \boldsymbol{CV} = \begin{bmatrix} 0.890 \\ 0.938 \\ 0.979 \\ \cdots \\ \cdots \\ \cdots \\ 1 \\ 0.749 \\ \cdots \\ \cdots \\ \cdots \\ 1 \\ 0.810 \end{bmatrix} = 0.0172$$

$$\boldsymbol{Equ.17}: \boldsymbol{SV_{C_1}}\ (\boldsymbol{C_1} \notin \boldsymbol{Criteria}) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.749 \\ 0.938 \\ \cdots \\ \cdots \\ \cdots \\ 0.875 \\ 0.945 \\ \cdots \\ \cdots \\ \cdots \\ 1 \\ 0.820 \end{bmatrix}$$

$= 0.0177$

$$\boldsymbol{Equ.22}: \boldsymbol{VEM_{C_1}} = \frac{0.0172}{0.0177} = 0{,}9717$$

$$\boldsymbol{Equ.24}: \boldsymbol{WV_{C_1}} = 0.0013 * 0.9717 = 0.0012$$

$$\boldsymbol{Equ.25}: \boldsymbol{w_{C_1}} = \frac{0.0012}{0.0923} = 0.013$$

3.2. Sensitivity analysis (Duyarlılık analizi)

A robust method for assessing the sensitivity of weighting techniques involves introducing new alternatives into the original dataset or excluding less favorable ones. In such scenarios, the MCDM approach is expected to maintain stability by ensuring that the rankings of criteria remain largely consistent or experience minimal changes [49]. Given that the removal of any criteria modifies the criterion values, the scores assigned to the remaining alternatives are also likely to change (Rank reversal). To address this issue, a sensitivity analysis was conducted, beginning with the criteria identified as the least significant by the proposed method. The results of this analysis, including the revised criteria rankings, are detailed in Table 5, while a graphical representation is provided in Figure 2.

Table 5. Rank of criteria in scope of rank reversal method (Ters sıralama yöntemi kapsamında kriterlerin sıralaması)

Criteria	S0	S1	S2	S3	S4	S5
C1	7					
C5	6	6				
C7	5	5	5			
C2	4	4	3	4		
C3	3	3	4	3	3	
C4	2	2	2	2	2	2
C6	1	1	1	1	1	1

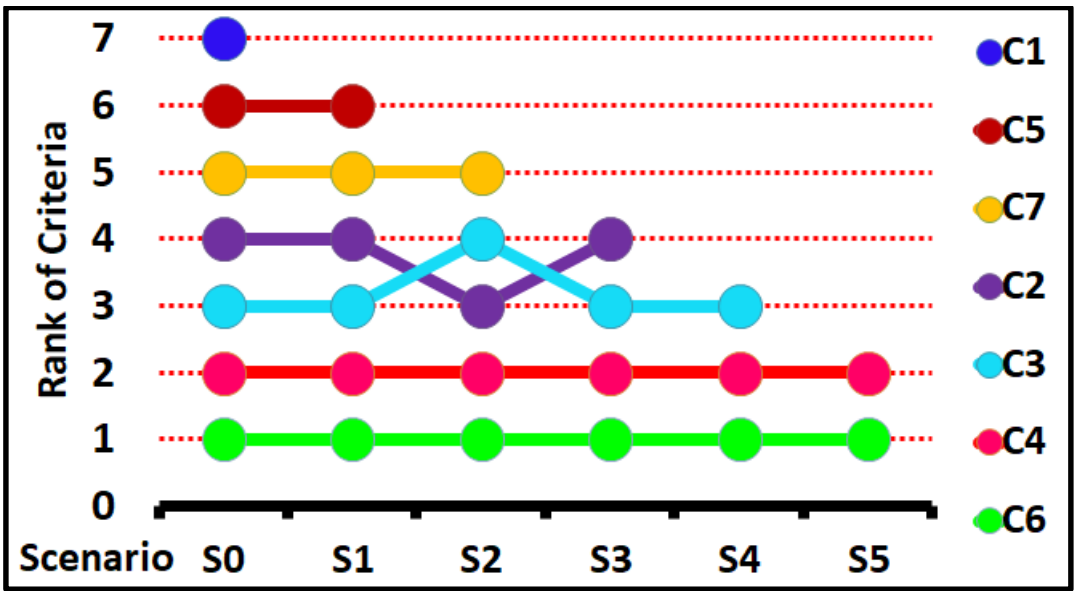


Figure 2. Rank reversal graph (Ters sıralama grafiği)

The rank reversal analysis conducted based on Table 5 and Figure 2 aims to evaluate the ranking stability and sensitivity level of the proposed ESVP method. Within this scope, the criteria were sequentially eliminated from the system in ascending order of their weight values, and changes in the rankings of the remaining criteria were examined at each scenario. The reference scenario, denoted as S0, includes all seven criteria and serves as the baseline for comparison across subsequent scenarios. In scenario S1, the criterion with the lowest weight, C1, was removed from the system. This elimination did not induce any changes in the ranking positions of the remaining criteria, indicating that the method maintains a high level of stability against the exclusion of low-impact elements. In scenario S2, where C5 the second least weighted criterion was additionally removed alongside C1, a minor shift was observed: criterion C2 moved from the fourth to the second position, while C3 dropped from third to fourth. Nevertheless, this change did not result in a structural disruption, and the overall ranking integrity was largely preserved. Scenario S3 involved the removal of C1, C5, and C7. Despite these exclusions, the rankings of the remaining four criteria remained unchanged, reflecting a consistent internal structure. Similarly, in scenario S4, where criterion C2 was further excluded, the rankings of the remaining three criteria were entirely unaffected. Finally, in scenario S5, following the elimination of C3 in addition to the aforementioned criteria, only C4 and C6 remained in the system, and their relative positions were maintained identically across all prior scenarios. These findings clearly demonstrate that the proposed method exhibits a high degree of robustness against the rank reversal phenomenon, with the ranking structure remaining substantially intact despite the sequential removal of criteria. The extraction of criteria induced only minimal and localized effects on the ranking outputs, suggesting that the method provides a stable and reliable analytical framework for decision-makers. Particularly noteworthy is the fact that even when criteria are removed from the least to the most significant in terms of weight, the method yields highly consistent results. This outcome affirms the ideal sensitivity characteristics of the ESVP method and its strong performance in stability-driven analyses.

3.3. Comparative analysis (Karşılaştırma analizi)

The comparative analysis evaluates the relationships and relative positions of the proposed approach against other methods used for determining weight values. The goal of the proposed method is to establish its reliability, consistency, and compatibility with widely accepted techniques, while also demonstrating a strong and statistically significant correlation with various weighting methods [18].

In the initial stage of the comparative analysis, criterion weights were calculated using ENTROPY, CRITIC, SD, SVP, LOPCOW, and MEREC methods, which are commonly employed in MCDM studies. As a result, the weight values of the GEHI criteria and their respective rankings, as determined by these weighting methods, are presented in Table 6 and Figure 3.

Table 6. Weight scores of criteria (Kriterlerin ağırlık skorları)

Methods	CRITIC		SVP		LOPCOW		SD		ENTROPY		MEREC	
	S.	R.	S.	R.	S.	R.	S.	R.	S.	R.	S.	R.
C1	0.120	7	0.016	7	0.179	2	0.074	7	0.011	7	0.063	6
C2	0.156	2	0.088	4	0.112	7	0.121	4	0.072	4	0.100	5
C3	0.145	4	0.117	3	0.193	1	0.153	3	0.092	3	0.213	1
C4	0.129	6	0.330	2	0.115	5	0.284	1	0.367	2	0.194	2
C5	0.150	3	0.040	6	0.124	4	0.080	6	0.030	6	0.052	7
C6	0.162	1	0.335	1	0.163	3	0.188	2	0.371	1	0.186	4
C7	0.138	5	0.074	5	0.114	6	0.100	5	0.057	5	0.191	3

S.: Score. **R.:** Rank

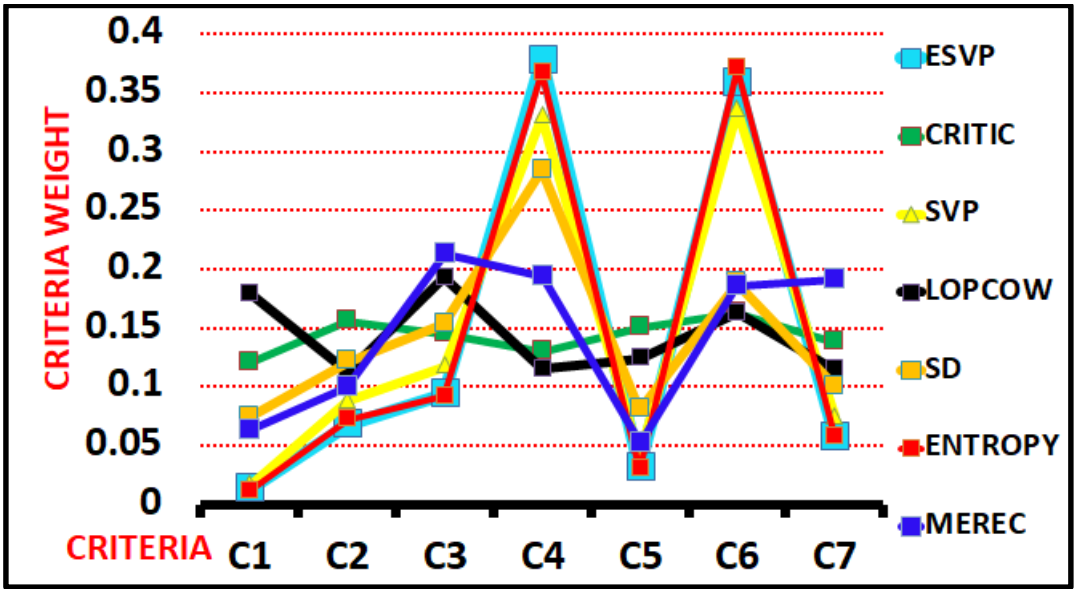


Figure 3. Positions of weighting methods (Ağılıklandırma yöntemlerinin pozisyonları)

When Table 4, Table 6, and Figure 3 are jointly examined, it becomes evident that the ranking of criterion weights produced by the proposed ESVP method closely aligns with those generated by the ENTROPY and SVP methods, and also demonstrates a high degree of similarity with the SD method. Particularly in terms of the upward and downward fluctuations observed across criteria, the trend patterns of the ESVP method exhibit a notable parallelism with those of the ENTROPY approach. Furthermore, the ESVP method shows significant structural proximity to information-theoretic models such as SVP and SD, and when evaluated from a broader perspective, it also displays meaningful overlaps with the MEREC method. From a graphical standpoint, both the ESVP and ENTROPY methods assign nearly identical maximum weights to criteria C4 and C6, suggesting a strong convergence in their discriminative capabilities. Similarly, for low-weighted criteria such as C1 and C5, both methods exhibit nearly identical value assignments. These findings clearly indicate that the ESVP method is highly correlated with ENTROPY, while also maintaining structural consistency with the SVP, SD, and, to a significant extent, the MEREC approaches. Based on these observations, it can be concluded that the ESVP method offers a robust and methodologically consistent alternative to established weighting models. The correlation coefficients (rho values) between the ESVP and other methods are comprehensively presented in Table 7. These results reveal that the ESVP method demonstrates strong and statistically meaningful associations with well-established information-based techniques in the literature, thereby affirming its validity, reliability, and suitability as a sound analytical tool for multi-criteria decision-making applications.

Table 7. rho correlation score (rho korelasyon skorları)

Methods	CRITIC	SVP	LOPCOW	SD	ENTROPY	MEREC
ESVP	0.286	0.964**	-0.071	0.998**	0.964**	0.714**

p**<.01

An analysis of the correlation coefficients presented in Table 7 reveals that the proposed ESVP method demonstrates a strong and statistically significant positive correlation with the SVP, SD, and ENTROPY methods, and to a slightly lesser but still meaningful extent with the MEREC method. In particular, the correlation coefficients with SVP, SD, and ENTROPY exceed 0.96 and are statistically significant at the $p < .01$ level, clearly indicating that the ESVP method exhibits a robust structural alignment with these information-theoretic models. Furthermore, the correlation with MEREC also suggests a substantial degree of concordance, underscoring that the ESVP approach is consistent not only with information-based techniques but also with broader objective weighting strategies. In contrast, the relatively low or even negative correlation coefficients observed with the CRITIC and LOPCOW methods suggest that these techniques are structurally divergent from the ESVP framework, likely due to fundamental differences in their underlying variance and distribution-based paradigms. When these findings are evaluated holistically, it becomes evident that the ESVP method offers both a high level of explanatory power and a statistically robust foundation that meets essential reliability and validity criteria. This demonstrates that ESVP represents a methodologically sound and credible alternative within the context of comparative model evaluation. Therefore, considering the quantitative results obtained through the comparative analysis, it can be confidently asserted that the proposed ESVP method is both credible and reliable, making it a viable and effective tool for multi-criteria decision-making applications.

3.4. Simulation analysis (Simülasyon analizi)

In the simulation examination, diverse scenarios were created by varying the values within the decision matrices. To evaluate the robustness of the proposed method's results, it is hypothesized that its outputs will increasingly deviate from those of other methods as the number of scenarios expands. Additionally, the method's capacity to distinguish criterion weights, based on variance, is expected to demonstrate robustness. Moreover, the consistency of these criterion weight variances across the scenarios will be examined using Analysis of Means for variances based on Levene's test (ADM analysis). For the proposed method to be considered stable, homogeneity of variance across all scenarios is crucial [18]. In this study, an initial set of ten scenarios (decision matrices) was generated and subsequently partitioned into two separate groups. Following this, correlation coefficients between the proposed method and other weighting methods were computed for these generated scenarios. The resulting correlation values are displayed in Table 8 and Figure 4.

Table 8. Correlation scores in scope of scenarios (Senaryolar kapsamında korelasyon skorları)

Group	Scenarios	CRITIC	SVP	LOPCOW	SD	ENTROPY	MEREC
First	**Sce.1**	0.296	0.971**	-0.063	0.998**	0.971**	0.743**
	Sce.2	0.299	0.969**	-0.055	0.999**	0.968**	0.737**
	Sce.3	0.281	0.941**	-0.046	0.999**	0.961**	0.701**
Second	**Sce.4**	0.277	0.933**	-0.059	0.994**	0.955**	0.711**
	Sce5	0.287	0.948**	-0.065	0.995**	0.941**	0.692**
	Sce.6	0.255	0.923**	-0.079	0.973**	0.927**	0.677**
	Sce.7	0.230	0.891**	-0.088	0.951**	0.912**	0.651*
	Sce.8	0.222	0.882**	-0.093	0.934**	0.900**	0.628*
	Sce.9	0.206	0.867**	-0.106	0.911**	0.884**	0.604*
	Sce.10	0.189	0.855**	-0.115	0.892**	0.879**	0.589*

p**<.01. p*<.05

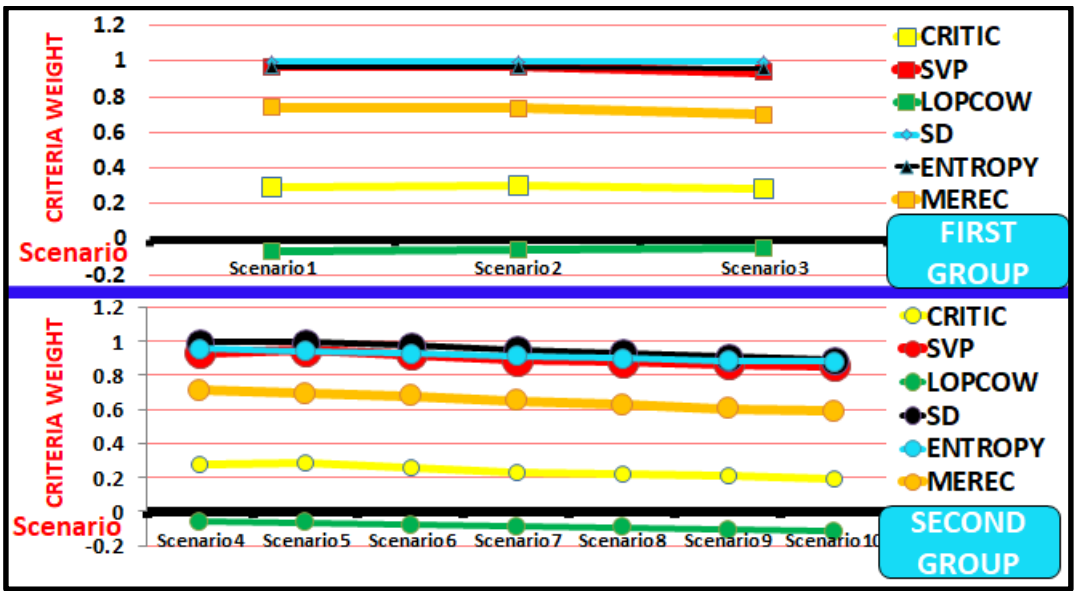


Figure 4. Correlation positions (Korelasyon posizyonları)

In the scope of the simulation analysis, both Table 8 and Figure 4 collectively provide compelling evidence regarding the dynamic behavior and methodological robustness of the proposed ESVP method under varying decision environments. As clearly depicted in Figure 4, the graphical trends across the ten simulated scenarios reveal a noticeable divergence between the ESVP method and several established MCDM weighting techniques. Particularly, in the second group of scenarios (Scenarios 4–10), the relative position of ESVP becomes more distinguishable, indicating an increasing deviation in performance patterns as the diversity and complexity of decision matrices expand. This observation is quantitatively supported by the correlation coefficients presented in Table 8. While the ESVP method maintains strong and statistically significant correlations with ENTROPY, SD and SVP) in the first group of scenarios, these correlations gradually diminish in the second group. For instance, the correlation between ESVP and SVP drops from 0.971 in Scenario 1 to 0.855 in Scenario 10, and the correlation with MEREC decreases from 0.743 to 0.589. This consistent downward trend signifies that the ESVP method exhibits an adaptive sensitivity to structural shifts within the decision matrices, thereby allowing its unique methodological characteristics such as contrast-based differentiation and variance-aware weighting to surface more explicitly as scenario complexity increases. Moreover, the variance-based analytical structure of ESVP appears to provide enhanced discriminative power, especially under diverse simulation conditions where traditional methods tend to converge or exhibit relatively static weighting behavior. The graphical separation observed in Figure 4 reinforces the assertion that the ESVP method maintains a stable internal variance distribution while simultaneously amplifying inter-methodological contrasts. This dual capacity is critical for achieving both robustness and flexibility in real-world multi-criteria decision-making applications. Taken together, these findings confirm that the ESVP method not only aligns with conventional techniques under standard conditions but also surpasses them in terms of interpretability and responsiveness in more challenging and variable contexts. The progressive divergence observed across scenarios further validates the methodological integrity of ESVP, establishing it as a robust and adaptive tool for criterion weighting in complex decision environments. As part of the comparative examination, the variance of the weight values for each method was calculated across the generated scenarios. Accordingly, the variance values of the methods developed for the scenarios, along with the average variance value, are presented in Table 9.

Table 9. Variance Scores in scope of sscenarios (Seneryolar kapsamında varyans skorları)

Methods	ESVP	CRITIC	SVP	LOPCOW	SD	ENTROPY	MEREC
Scenario1	0.147	0.018	0.129	0.037	0.071	0.149	0.066
Scenario2	0.144	0.045	0.134	0.049	0.079	0.151	0.078
Scenario3	0.148	0.063	0.141	0.066	0.088	0.144	0.099
Scenario4	0.139	0.039	0.115	0.041	0.059	0.145	0.045

Scenario5	0.139	0.028	0.128	0.089	0.045	0.155	0.049
Scenario6	0.145	0.071	0.144	0.077	0.099	0.172	0.055
Scenario7	0.141	0.073	0.119	0.069	0.088	0.129	0.066
Scenario8	0.147	0.081	0.125	0.101	0.129	0.131	0.099
Scenario9	0.159	0.028	0.133	0.093	0.131	0.148	0.101
Scenario10	0.161	0.041	0.149	0.111	0.133	0.156	0.093
Mean	0.147	0.049	0.132	0.073	0.092	0.148	0.075

The variance scores presented in Table 9 were evaluated to compare the performance of the proposed ESVP method with six other objective weighting approaches—namely, CRITIC, SVP, LOPCOW, SD, ENTROPY, and MEREC across a series of distinct scenarios. For each of the ten scenarios, variance values were computed to assess the extent to which each method distinguishes between criterion weights, thereby reflecting their discriminative power. In this context, the mean variance value of the ESVP method (0.147) was found to be significantly higher than those of CRITIC (0.049), SVP (0.132), LOPCOW (0.073), SD (0.092), and MEREC (0.075). This finding indicates that the ESVP method produces a more pronounced and differentiated distribution of criterion weights, allowing for sharper discrimination of relative importance levels among the criteria. Such a capability enhances decision-makers' ability to make more accurate choices, particularly in multi-criteria decision-making problems that demand high sensitivity and precision. Moreover, the average variance value of ESVP is found to be almost identical to that of the ENTROPY method (0.148), suggesting that both methods possess comparable levels of discriminative strength. However, ESVP demonstrates a more balanced distribution of variance across the evaluated scenarios, implying a greater degree of consistency and robustness under varying conditions.In conclusion, the ESVP method stands out not only for its high mean variance but also for its consistent performance across multiple scenarios, offering both discriminative accuracy and structural stability. These attributes position ESVP as a more reliable, interpretable, and methodologically sound alternative compared to other objective weighting techniques currently available, thereby reinforcing its practical value as a decision-support tool in complex multi-criteria environments. In the final phase of the simulation analysis, the homogeneity of variance for the criterion weights generated by the proposed method was evaluated using Analysis of Means for variances based on Levene's test (ADM analysis). This technique provides a graphical framework for assessing variance consistency. The graphical output comprises three primary elements: the overall mean ADM, depicted as the center line, along with the upper decision limit (UDL) and the lower decision limit (LDL). If the variance of a given group or cluster fall outside these decision boundaries, it indicates a statistically significant deviation from the overall mean ADM, signifying variance heterogeneity. Conversely, if the variance of all groups remain within the interval defined by the UDL and LDL, it confirms variance homogeneity [18]. Figure 5 illustrates the graphical results of the ADM analysis.

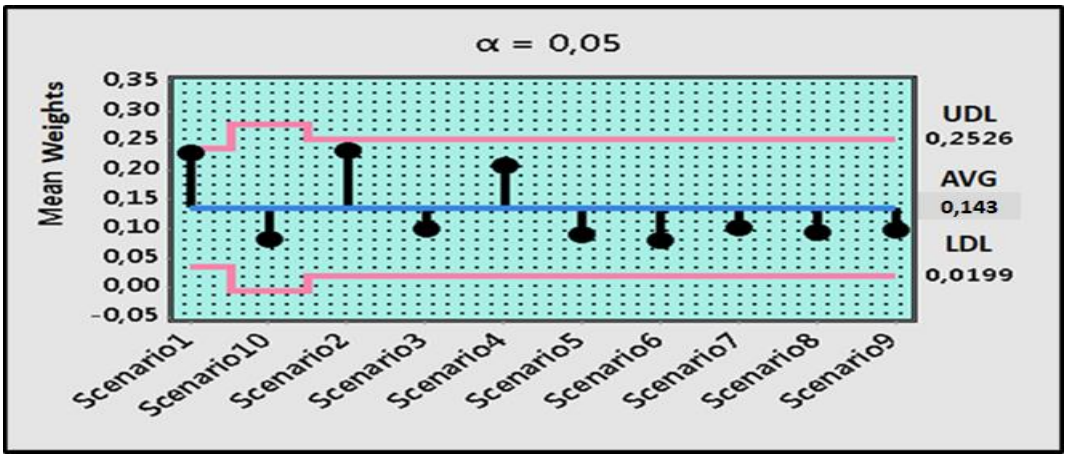


Figure 5. ADM Chart (ADM görseli)

The ADM chart presented in Figure 5 visually illustrates the mean variance scores of criterion weights across ten distinct scenarios. The chart includes three key reference lines: the average value line (AVG = 0.143), displayed as a horizontal blue line; the upper decision limit (UDL = 0.2526); and the lower decision limit (LDL = 0.0199), both indicated with pink lines. Each scenario's ADM value is represented by black dots accompanied by error bars. Upon examination of the graphical analysis, it becomes evident that all ADM values across the scenarios fall strictly within the defined decision interval (UDL–LDL). This finding indicates that the variance scores do not deviate significantly from the overall average and confirms that the weighting process remains structurally stable regardless of scenario-specific changes. These results strongly support the conclusion that the criterion weights exhibit consistency across different scenarios and that the outputs produced by the method adhere to the principle of homogeneity. This visual evidence clearly demonstrates the presence of variance homogeneity, indicating that the weighting mechanism functions reliably and remains unaffected by scenario-based fluctuations. Furthermore, this conclusion was statistically validated by Levene's test, with the detailed results comprehensively presented in Table 10.

Table 10. Levene score (Levene skoru)

Levene Statistic	df1	df2	Sig. (p)
0.130	2	10	0.149

p**<.05

Serving as the statistical complement to the visual assessment provided by the ADM chart, Table 10 presents the results of Levene's test, a widely recognized statistical procedure for evaluating the equality of variances. The test produced a Levene statistic of 0.130, with degrees of freedom (df1 = 2, df2 = 10), and a corresponding p-value of 0.149. As this p-value exceeds the conventional 0.05 threshold of statistical significance, the null hypothesis of equal variances cannot be rejected. This outcome indicates that there is no statistically significant difference in the variances of the criterion weights across the evaluated scenarios, suggesting a homogeneous distribution. This finding statistically substantiates the conclusions previously inferred from Figure 5, providing strong empirical support that the distribution of criterion weights does not exhibit meaningful variation across scenarios. When jointly evaluated with the ADM chart, the outcome of Levene's test confirms that the proposed method possesses a high level of structural robustness and consistency with respect to variance homogeneity. Taken together, these results clearly demonstrate that the proposed approach is capable of maintaining stability under varying conditions, thereby substantially enhancing its reliability and applicability in the context of MCDM problem.

4. DISCUSSION (TARTIŞMA)

It is clear that the proposed method offers a more comprehensive structure compared to the classical SVP method. While the classical SVP method performs weighting by considering the deviations of the criteria (Öztel and Alp, 2020), the proposed method evaluates the overall effects of each criterion. This approach ensures a more accurate identification of the contributions of the criteria to the contrast situations, which is central to the logic of weighting methods, and enables more accurate results in the decision-making process. When compared to other objective weighting methods, the proposed method demonstrates various strengths and weaknesses. One significant advantage over the ENTROPY method is the proposed method's insensitivity to zero and negative values. In the ENTROPY method, zero and negative values can create uncertainty due to logarithmic measurements (Ayçin, 2019). However, the ENTROPY method may be more effective in information-theory-based analyses (Öztel and Alp, 2020). The ENTROPY method determines criterion characteristics solely through entropy, disregarding other criteria's values. Consequently, criterion weights derive exclusively from their inherent entropy distributions (internal distribution) (Bircan, 2020). Conversely, the proposed method evaluates criteria by incorporating both their inherent values and those of other criteria, thus considering both internal and external distributions.

Compared to the CRITIC method, one of the key advantages of the proposed method is its ability to determine the contrasts of the criteria without relying on any distribution assumptions. The CRITIC method uses the Pearson correlation coefficient to evaluate the correlations between criteria (Diakoulaki et al., 1995), which is based on the assumption of a normal distribution. In datasets that do not follow a normal distribution, there could be limitations in this correlation coefficient

(Kalaycı, 2013). Therefore, the proposed method offers more reliable results regardless of the type of distribution. On the other hand, the CRITIC method may perform better in datasets with strong correlation structures (Ecer, 2020). However, from a technical perspective, the CRITIC method's determination of the internal distribution of the criteria by standard deviation (σ) and its external distribution based on the Pearson correlation coefficient between criteria (impact factor-(1-p)) is consistent with the logic of the proposed method within the framework of integrity ($(\sigma.\sum_{i=1}^{m}(1-p))$).

Compared to the SVP method, the proposed method provides a more comprehensive evaluation by considering both internal and external distributions. While the SVP method focuses solely on the variances of the criteria (Öztel and Alp, 2020), the proposed method offers a more detailed analysis of both the internal distribution and the contribution of contrasts within the criteria in a holistic context. However, the SVP method can be applied more quickly to large datasets due to its simpler calculations (Demir et al., 2021).

When compared to the MEREC method, one limitation of the MEREC method is its sensitivity to zero and negative values due to logarithmic calculations. However, such a restriction is not present in the proposed method. Specifically, in the MEREC method, the performance of each criterion corresponding to an alternative's cell is calculated using a nonlinear logarithmic function. Then, after removing the criterion, the performance of the alternatives is recalculated. The effect of each criterion is determined by examining the difference between the performance of the criterion's corresponding cell and the performance of the alternatives after the criterion is excluded (Keshavarz-Ghorabaee et al., 2021). Thus, in the MEREC method, the internal distribution of each criterion (internal distribution) and its effect on the overall dataset (external distribution) are considered, which is in line with the logic of the proposed method. The primary difference between these methods lies in the approach: in the MEREC method, the performance of the decision alternatives is considered after the criteria are removed, whereas in the proposed method, the performance of the criteria themselves is considered after they are excluded.

When compared to the LOPCOW method, the proposed method provides a more comprehensive evaluation by considering not only the internal values of the criteria but also the distributions of other criteria. The LOPCOW method can reduce gaps caused by the data dimensions and can offer advantages in certain decision problems (Ecer and Pamucar, 2021). However, the holistic approach of the proposed method ensures a more robust analysis of the contrasts between the criteria. Nevertheless, the proposed method has some disadvantages. It requires a more complex computation process compared to other objective weighting methods, which increases the computational burden when working with large datasets. Specifically, in decision problems with a high number of criteria and alternatives, the increased computation time may limit the practical applicability of the method. Moreover, excessive skewness and kurtosis in the data may lead to disproportionately large differences between the criterion weights. In this context, to establish a more comprehensive framework regarding the distributional characteristics of the dataset, future studies should consider calculating the skewness and kurtosis coefficients for each criterion and reporting them alongside descriptive statistics. Such a practice would significantly enhance the methodological transparency and overall credibility of the ESVP method. This extension is particularly valuable for evaluating the method's applicability in datasets that deviate from parametric assumptions or exhibit distributional irregularities.

In cases where extreme skewness or kurtosis is observed, it is advisable to apply appropriate preprocessing techniques to mitigate the influence of these distortions. Specifically, data transformations such as logarithmic transformation, Box–Cox transformation, or Winsorization may be employed to normalize the distributions of criterion values and limit the impact of outliers. Additionally, the integration of robust variance estimators or trimmed statistical measures into the ESVP framework could serve as an adaptive enhancement, enabling the method to produce stable and reliable results even in non-parametric environments. These methodological refinements would preserve the ESVP method's distinctive sensitivity to meaningful variance structures, while simultaneously preventing artificial inflation of criterion weights due to distributional anomalies thereby reinforcing the overall trustworthiness and analytical soundness of the method for decision-makers operating in diverse evaluation contexts. In general, The ESVP proposed in this study has been specifically designed to address the methodological shortcomings identified in the classical SVP approach. ESVP offers a more balanced, discriminative, and structurally robust weighting mechanism by considering not only the internal

variance structure of each criterion, but also the degree of contrast and variance potential among all criteria. In doing so, the method enhances the theoretical soundness and practical applicability of the SVP model, effectively mitigating its limited recognition and susceptibility to criticism. In this regard, ESVP strengthens the scientific credibility of SVP and introduces a novel framework that facilitates its integration with other MCDM approaches, thereby expanding its methodological scope and interdisciplinary relevance.

Future research should focus on enhancing the ESVP method's applicability. This includes evaluating its performance with large-scale datasets, improving computational efficiency via AI and optimization integration, and assessing its robustness in uncertain environments through fuzzy logic, grey system theory, or fuzzy number incorporation. Comparative analyses with other MCDM methods are crucial to determine its suitability across diverse problem types. Potential application areas include sustainability, finance, supply chain, and healthcare, where its sectoral integration can be demonstrated. Finally, evaluating ESVP's adaptability to dynamic decision-making, particularly in contexts with evolving criteria, will establish its long-term effectiveness. These future studies aim to solidify ESVP's strengths and advance its contribution to MCDM.

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study introduces an extended SVP (ESVP) method for criterion weighting processes, offering a novel perspective to the existing literature. The primary contribution of this work is the development of a more comprehensive weighting approach that not only considers the internal distributions of individual criteria but also accounts for their contributions to the overall variance with other criteria.

Based on the research findings, the sensitivity level of the proposed method was tested using the rank reversal method. After eliminating certain criteria, only minor changes in the ranking were observed, indicating that the proposed method maintains an optimal level of sensitivity. Secondly, to assess the reliability and validity of the proposed method, a comparative analysis was conducted in line with the approach suggested by Keshavarz-Ghorabaee et al. (2021) [18]. In this analysis, criterion weights were calculated using commonly used objective weighting methods in the literature, such as ENTROPY, CRITIC, SD, SVP, MEREC, and LOPCOW. The results revealed that the proposed method exhibited a high correlation with ENTROPY, SVP, SD, and MEREC, while showing deviations particularly from LOPCOW. The strong correlation between the proposed method and ENTROPY, SVP, SD, and MEREC can be attributed to the fact that these methods evaluate the internal variation of each criterion independently. Specifically, as the differences in variance values between criteria increase, the distinctness of the proposed method becomes more pronounced compared to ENTROPY, SD, and SVP. This is because, according to the findings, as scenarios progress, the correlation values of the proposed method with other methods decrease. On the other hand, while the proposed method accounts for external differentiation by considering the effects of all criteria in the entire dataset, other methods, except for CRITIC and MEREC, focus on the individual internal values of the criteria. In the simulation examination, to assess the stability and robustness of the proposed method, ten different decision matrices (scenarios) were created, and an ANOM analysis suggested by Keshavarz-Ghorabaee et al. (2021) [18] was conducted. The results indicated that the variance remained homogeneous across all ten scenarios, confirming the stability of the proposed method.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***Furkan Fahri ALTINTAŞ*:** He conducted the calculations, analyzed the results and performed the writing process.

Hesaplamaları yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Zardari NH, Ahmed K, Shirazi SM, Yusop ZB. Weighting methods and their effects on multi

criteria decision making model outcomes in water resources management, Springer Nature, Berlin, 2014.
[2] Baş, F. Çok kriterli karar verme yöntemlerinde kriter ağırlıklarının belirlenmesi, Nobel Bilimsel, Ankara, 2021.
[3] Bircan, H. Çok kriterli karar verme problemlerinde kriter ağirliklandirma yöntemleri, Nobel Akademik, Ankara, 2020.
[4] Ecer, F. Çok kriterli karar verme, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2020.
[5] Paksoy, S. Çok kriterli karar vermede güncel yaklaşimlar, Karahan Kitapevi, Ankara, 2017.
[6] Demir G, Özyalçın AT, Bircan H. Çok kriterli karar verme yöntemleri ve çkkv yazılımı ile problem çözümü, Nobel, Ankara, 2021.
[7] Wang CN, Nguyen NAT, Dang TT, Sustainable evaluation of major third-party logistics providers: A framework of an mcdm-based entropy objectiveweighting method. Mathematics. 2023; 11: 1-27.
[8] Liu S, Chen S, Wu P, Wu Q, Zhou L, Deveci M. A. Mardani, An integrated critic edas approach for assessing enterprise crisis management effectiveness based on weibo. Journal of Contingencies and Crisis Management. 2024; 32(2): 1-15.
[9] Odu GO, Weighting methods for multi-criteria decision making technique, J. Appl. Sci. Environ. Manage. 2024; 23(8): 1449-1457.
[10] Irvanizam I, Nasution MK, Tulus T, Nababan EB. A hybrid decision support framework using merec-rafsi with spherical fuzzy numbers for selecting banking financial aid recipients. IEEE. 2017; 20: 1-23.
[11] Öztaş T, Öztaş GZ. Innovation performance analysis of G20 countries: A novel integrated lopcow-mairca mcdm approach including the covid-19 period. Verimlilik Dergisi. 2024; Special Issue: 1-20.
[12] Öztel A, Alp İ. Çok kriterli karar verme seçiminde yeni bir yaklaşım, Kriter Yayıncılık, İstanbul, 2020.
[13] Thakkar JJ. Multi criteria decision making, Springer Singapore, Singapore, 2021.
[14] Kulkarni AJ. Multiple criteria decision making: techniques, analysis and applications, Springer Nature, Singapore, 2022.
[15] Triantaphyllou E. Multi-criteria decision making methods: A comparative study, Springer, New York, 2010.
[16] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method. Computers & Operations Research. 1995; 22(7): 763-770.
[17] Ayçin E. Çok kriterli karar verme, Nobel Yayın, Ankara, 2019.
[18] Keshavarz-Ghorabaee M, Amiri M, Zavadskas EK, Turskis J, Antucheviciene J. Determination of objective weights using a new method based on the removal effects of criteria (merec). Symmetry. 2021; 13: 1-20.
[19] Ecer F, Pamucar D. A novel lopcow-dobi multi-criteria sustainability performance assessment methodology: An application in developing country banking sector. Omega. 2022; 1: 1-35.
[20] Keleş, N. Uygulamalarla klasik ve güncel karar verme yöntemleri, Nobel Bilimsel, Ankara, 2023.
[21] Özarı Ç, Demirkale Ö. Entropy-topsis method approach: A comprehensive quarterly assessment with application in Turkey's cement sector. Fiscaoeconomia. 2024; 8(3): 938-967.
[22] Ulutaş A, Topal A. Bütünleştirilmiş çok kriterli karar verme yöntemlerinin üretim sektörü uygulamaları, Akademisyen Kitapevi, Ankara, 2020.
[23] Gülençer İ, Türkoğlu SP., Gelişmekte olan Asya ve Avrupa ülkelerinin finansal gelişmişlik performansinin istatistiksel varyans prosedürü temelli ocra yöntemiyle analizi. Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi. 2020; 55(2): 1330-1344.
[24] Göktolga ZG. İktisadi ve idari bilimler için istatistik, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2017.
[25] Albayrak, AS. Uygulamalı çok değişkenli istatistik teknikleri, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 2006.
[26] Karagöz Y. Spss ve amos 23 uygulamali istatistiksel analizler, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 2017.
[27] Altun M, Bozkurt I. İstatistik ve İstatistiksel Yorumlama Teknikleri, Alfa Aktüel Yayıncılık, Ankara, 2020.
[28] Kalaycı Ş. Spss uygulamali çok değişkenli istatistik teknikleri, Anı Yayın Dağıtım, Ankara, 2013.
[29] Bursal M. Spss ile temel veri analizi, Anı Yayıncılık, Ankara, 2017.
[30] Tutar H. İşletme & yönetim terimleri ansiklopedik sözlük, Detay Yayıncılık, Ankara, 2013.
[31] Özdamar, K. Paket programlar ile istatistiksel veri analizi, Nisan Kitapevi, Ankara, 2013.
[32] Hayran O, Özbek H. Sağlık bilimlerinde araştirma ve istatistik yöntemler, Nobel Tıp Kitapevi, İstanbul, 2017,
[33] Turanlı M, Güriş S, Cengiz D, Özden ÜH, Kalkan SB. İstatistik El Kitabı, DER Yayınları, İstanbul, 2017.

[34] Taşpınar M. Sosyal bilimlerde spss uygulamalı nicel veri analizi, Detay Yayıncılık, Ankara, 2017.
[35] Erol H. Spss paket programi ile istatistiksel veri analizi, Akademisyen Kitabevi, Ankara, 2013.
[36] Güçlü İ. Sosyal bilimlerde nicel veri anaizi, Gazi Kitapevi, Ankara, 2020.
[37] Kilmen, S. Eğitim araştırmacıları için spss uygulamalı istatistik, Edge Akademi, Ankara, 2015.
[38] Yaratan, H. Sosyal bilimler için temel istatistik, Anı Yayıncılık, Ankara, 2017.
[39] Gürsakal, S. Sosyal bilimlerde spss uygulamali çok değişkenli istatistiksel analiz, Dora Yayıncılık, Bursa, 2019.
[40] Karagöz, Y. SPSS ve amos uygulamali nitel-nicel karma bilimsel araştirma yöntemler ve yayin etiği, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 2016.
[41] Tayalı, HA, Timor M, Ranking with statistical variance procedure based analytic hierarchy process. Acta Infologica. 2017; 1(1): 31-38.
[42] Nasser AA, Alkhulaidi AA, Ali MN, Hankal M, Al-olofe M. A Study on the impact of multiple methods of the data normalization on the result of saw, wed and topsis ordering in healthcare multi-attributte decision making systems based on ew, entropy, critic and svp weighting approaches. Indian Journal of Science and Technology. 2019; 12(4): 1-21.
[43] Nasser AA, Alkhulaidi AA, Ali MN, Hankal M, Al-olofe M. A weighted euclidean distance-statistical variance procedure based approach for improving the healthcare decision making system in Yemen. Indian Journal of Science and Technology. 2019; 12: (3): 1-15.
[44] Regaieg M, Frikha HM. Inferring criteria weight parameters in codas method. Int. J. Multicriteria Decision Making. 2021; 10(20): 1-19.
[45] R. Vavrek, An analysis of usage of a multi-criteria approach in an athlete evaluation: an evidence of nhl attackers, Mathematics, 9 (2021), 1-22.
[46] R. Vavrek, Evaluation of the impact of selected weighting methods on the results of the topsis technique. International Journal of Information Technology & Decision Making. 2019; 18(6): 1821–1843.
[47] T. T. Worku, Formwork material selection and optimization by a comprehensive integrated subjective–objective criteria weighting mcdm model. Discover Materials. 2025; 5(2): 1-23.
[48] A. K. Yadav, K. Singh, P. K. Srivastava, P. S. Pandey, I-MEREC-T: Improved merec-topsis scheme for optimal network selection in 5g heterogeneous network for IoT. Internet of Things. 2023; 22: 1-15.
[49] G. Demir, R. Arslan, Sensitivity analysis in multi-criteria decision-making problems. Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi. 2022; 24(3): 1025-1056.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 955-967 (2025)

Derin Öğrenme Modelleri Kullanarak Endüstriyel Makinelerin Kalan Kullanım Ömrü Tahmini

Mustafa Ozan ÖZKÖK[1], Rüştü AKAY[2*]

[1]*Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye*

[2]*Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/12/2024
Düzeltme: 19/03/2025
Kabul: 10/04/2025

Anahtar Kelimeler

Kestirimci Bakım
Derin Öğrenme
BiLSTM-CNN
Endüstriyel Makineler

Article Info

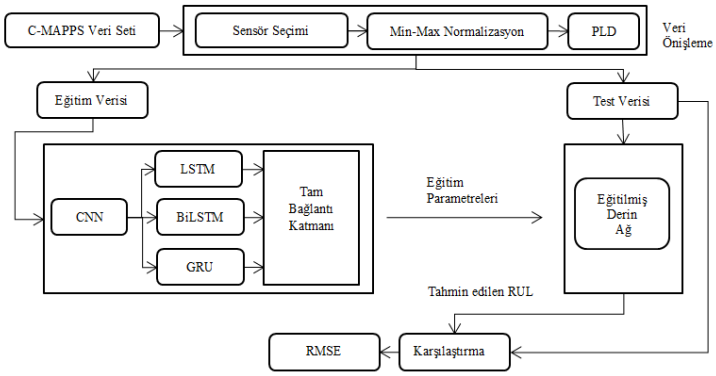
Research article
Received: 09/12/2024
Revision: 19/03/2025
Accepted: 10/04/2025

Keywords

Predictive Maintenance
Deep Learning
BiLSTM-CNN
Industrial Machines

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Endüstriyel makinelerde arıza tahmini için CNN, LSTM, BiLSTM ve GRU tabanlı 36 derin öğrenme modeli karşılaştırılmıştır. CNN-3BiLSTM modeli en başarılı sonuçları vermiştir. Çalışma, doğru model yapılandırmasının bakım maliyetlerini azaltmada ve güvenliği artırmada etkili olduğunu göstermektedir. / A total of 36 deep learning models using CNN, LSTM, BiLSTM, and GRU were evaluated for fault prediction in industrial machines. The CNN-3BiLSTM model achieved the best performance. Results highlight the effectiveness of proper model design in reducing maintenance costs and improving operational safety.



***Şekil A**: Gerçekleştirilen metodolojilerin genel çerçevesi / **Figure A:** The general framework of the applied methodologies*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Uçak motoru sensör verileri kullanılarak arıza tahmini için farklı derin öğrenme mimarileri test edilmiştir. / Fault prediction was performed using sensor data from aircraft engines with various deep learning architectures.*
- *CNN, LSTM, BiLSTM ve GRU mimarilerinden oluşan 36 farklı modelin performansı karşılaştırılmıştır. / A total of 36 models were tested by combining CNN, LSTM, BiLSTM, and GRU architectures with varying numbers of layers.*
- *Zaman serisi verilerinde LSTM ve BiLSTM katmanlarının kullanımı model doğruluğunu artırmıştır. / The use of LSTM and BiLSTM layers significantly improved accuracy in time-series data.*

***Amaç (Aim):** Uçak motoru sensör verileri üzerinde derin öğrenme tabanlı modeller kullanarak arıza tahmini yapmaktır. En uygun mimari kombinasyonu belirlemek hedeflenmiştir. / To perform fault prediction using deep learning-based models on aircraft engine sensor data and to determine the most effective architecture combination.*

***Özgünlük (Originality):** Farklı derin öğrenme mimarilerinin katman sayıları değiştirilerek 36 farklı kombinasyon test edilmiş ve en iyi performans sağlayan model yapılandırması önerilmiştir. / This study evaluates 36 model configurations by varying the number of layers in different deep learning architectures and proposes the optimal structure based on performance.*

***Bulgular (Results):** CNN ve BiLSTM mimarilerinin birleşimiyle oluşturulan CNN-3BiLSTM modeli, en düşük RMSE değeri ile en iyi sonuçları vermiştir. / The hybrid CNN-3BiLSTM model yielded the best results with the lowest RMSE compared to other combinations.*

***Sonuç* (*Conclusion*):** *Uçak motorlarında arıza tahmini derin öğrenme mimarileriyle başarıyla yapılmış, doğru model yapılandırmalarıyla bakım süreçleri optimize edilmiştir. / Fault prediction in aircraft engines was successfully achieved using deep learning architectures, enabling optimized maintenance processes through well-structured models.*

*Corresponding author, e-mail: akay@erciyes.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1598534

GU J Sci, Part C, 13(3): 955-967 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Derin Öğrenme Modelleri Kullanarak Endüstriyel Makinelerin Kalan Kullanım Ömrü Tahmini

Mustafa Ozan ÖZKÖK[1], Rüştü AKAY[2*]

[1]*Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye*

[2]*Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/12/2024
Düzeltme: 19/03/2025
Kabul: 10/04/2025

Anahtar Kelimeler

Kestirimci Bakım
Derin Öğrenme
BiLSTM-CNN
Endüstriyel Makineler

Öz

Bu çalışmada, endüstriyel makinelerde arıza tahmini için derin öğrenme tekniklerinin etkinliği incelenmiştir. Sensör verileri üzerinde Evrişimli Sinir Ağı (Convolutional Neural Network, CNN), Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory, LSTM), Çift Yönlü Uzun Kısa Süreli Bellek (Bidirectional Long Short-Term Memory, BiLSTM) ve Kapalı Döngü Birim (Gated Recurrent Unit, GRU) mimarileri kullanılarak kombinasyonel modeller oluşturulmuş ve 36 farklı model test edilmiştir. Bu modellerde, farklı derin öğrenme mimarilerinin katman sayıları ile performansları detaylıca değerlendirilmiştir. Özellikle, BiLSTM ve LSTM modellerinin zaman serisi verilerinde başarılı olduğu bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, CNN-3BiLSTM modelinin geleneksel ve makine öğrenimi yaklaşımlarına göre daha düşük hata oranlarıyla başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, önerilen modelin, Çok Katmanlı Algılayıcı, Destek Vektör Regresyonu ve CNN gibi yöntemlere göre belirgin bir performans üstünlüğü sergilediği görülmüştür. Bu çalışma, derin öğrenme tabanlı arıza tahmin modellerinin endüstriyel makinelerde güvenliği artırma ve bakım maliyetlerini optimize etme potansiyelini vurgulamaktadır.

Remaining Useful Life Prediction of Industrial Machines using Deep Learning Models

Article Info

Research article
Received: 09/12/2024
Revision: 19/03/2025
Accepted: 10/04/2025

Keywords

Predictive Maintenance
Deep Learning
BiLSTM-CNN
Industrial Machines

Abstract

This study investigates the effectiveness of deep learning techniques for fault prediction in industrial machinery. Combination models were developed using Convolutional Neural Network (CNN), Long Short-Term Memory (LSTM), Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM), and Gated Recurrent Unit (GRU) architectures on sensor data, and 36 different models were tested. The performance of these models, along with the number of layers in different deep learning architectures, was thoroughly evaluated. It was found that BiLSTM and LSTM models were particularly successful in analyzing time series data. The results show that the CNN-3BiLSTM model achieved better performance with lower error rates compared to traditional and machine learning approaches. When compared with similar studies in the literature, the proposed model demonstrated a significant performance advantage over methods such as Multi-Layer Perceptron, Support Vector Regression, and CNN. This study highlights the potential of deep learning-based fault prediction models to enhance safety and optimize maintenance costs in industrial machinery.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstri devrimi, zaman içerisinde üretimde kapasite artışı ve düşük maliyetle birlikte karlılığı arttırmıştır. Böylece ekonomik büyüme ve kalkınma olumlu katkılar sağlayarak yeni iş alanlarının ortaya çıkmasına da zemin hazırlamıştır. Ayrıca teknolojinin ilerlemesi de Endüstri devriminin hızlanmasını sağlayarak yenilikçi çözümlerle üretkenliği arttırmıştır. Endüstrideki gelişmeler her geçen gün artan bir ivmeyle devam etmiştir. Gelişmelerin ortaya çıkışında toplum ihtiyaçları ve teknoloji belirleyici rol oynamıştır. Devrimin başlangıcından günümüze gelene kadar geçen tarihsel gelişimi genel olarak 5 temel zaman dilimiyle ifade edilebilmektedir. Bu süreçler

*Corresponding author, e-mail: akay@erciyes.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1598534

Endüstri 1.0, Endüstri 2.0, Endüstri 3.0, Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0 olarak adlandırılmıştır [1-2].

Endüstri 4.0, 2011 yılında Almanya'da tanıtılan ve günümüzde de devam eden bir süreçtir. Bu süreç, yüksek teknolojinin üretim ve sanayiyle birleştirilmesini temsil etmektedir. İnternetin süreçlere dâhil edilmesi, akıllı ve yapay zekâ destekli sistemler ile veri analizi ve yorumlanması devrim niteliğinde değişikliklere yol açmıştır. Endüstri 4.0'ın oluşumunda etkili olan temel bileşenler arasında nesnelerin interneti, akıllı fabrikalar, büyük veri, robotik teknolojiler, bulut sistemler ve arttırılmış gerçeklik bulunmaktadır. Nesnelerin interneti, sensörler ve yazılımlar kullanılarak cihazların birbiriyle haberleşmesini ve internete bağlanmasını ifade eden bir kavramdır. Böylece nesnelerden veri toplanarak bu verilerin analiz edilmesiyle karar alabilen sistemler oluşturulmuştur. Endüstri 4.0 ile endüstriyel makinelerin daha uzun süre verimli çalışması büyük önem kazanmıştır. Ancak makinelerde ortaya çıkabilecek arızalar üretimin durmasına ve üretim sürecinin aksamasına neden olmaktadır. Makinelerin bakımları yapılarak arızalardan kaynaklanan aksaklıklar ve maliyet kayıpları önlenebilmektedir. Bu nedenle, makinelerin performanslı çalışabilmesi ve plansız duruş sürelerinin minimize edilmesi için bakım uygulamaları düzenli ve planlı olarak yapılmalıdır.

Geleneksel yöntemlerde, makinelerin bakım işlemleri yetişmiş teknisyenler tarafından belirli zaman aralıklarında veya belirli bir çalışma saatine göre planlanmakta ve arıza durumunda onarım faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte, makineler olası arızaları hakkında sürekli bilgi toplayan sensörlerle donatılmıştır. Bu sensörlerden düzenli olarak gelen veriler sayesinde, sorunları doğru bir şekilde tahmin etmek ve bakım yöntemlerini kolaylaştırmak mümkün olmuştur. Bu da bakım faaliyetlerinin daha etkin bir şekilde planlanmasını sağlamıştır. Kestirimci bakım, geleneksel periyodik bakım yöntemlerinin yerini tam olarak alamaz, ancak bakım görevleri için bir zamanlama aracı sağlayarak bu süreçleri daha güvenilir hale getirebilir. Sensör verileri analiz edilerek, cihazların kalan faydalı ömrü (Remaining Useful Life, RUL) tahmin edilebilir ve ne zaman bozulacakları veya arızalanacakları kullanıcılara bildirilebilir.

Aşağıda, farklı makineler için kestirimci bakım amacıyla yapılan mevcut literatür kısaca verilmiştir.

Yaman ve Karadayı, endüstride kullanılan pompalarda arızaları önlemek için kestirimci bakım çalışması yapmış ve pareto analizi ile incelenecek ekipmanları belirlemişlerdir. Titreşim verileri FFT ile analiz edilmiştir [3]. Bektaş, döner sistemlerin arızalarını önceden belirlemek için PRONOSTIA platformu verilerini Welch ve FFT yöntemleriyle incelemiş ve bozulma eğrilerini kullanarak kestirimci bakımda faydalanmıştır [4]. Günindi ve diğerleri, soğutma hava fanlarının rulmanlarından aldıkları titreşim verilerini FFT ile inceleyerek, makine arızalanmadan önce önlem almayı hedeflemişlerdir [5]. Demir ve Müştak, sağlam ve arızalı rulmanları ses ve titreşim verileriyle analiz etmişlerdir. ORS 6208 rulmanlarının verilerini Hilbert dönüşümü ile de incelemişlerdir [6]. Orhan ve diğerleri, motor iç yatak rulmanlarındaki hasarları titreşim verileriyle tespit etmiş ve analiz etmiştir [7]. Özkat, rüzgar türbini jeneratörlerinin titreşim verilerini kullanarak, Welch yöntemi ile frekans alanında öznitelik çıkarımı yapmış ve normalizasyon ile verileri incelemiştir [8]. Calayır ve Kabak, boya makinesinin arıza öncesi bakımında çeşitli regresyon ve destek vektör makineleri yöntemlerini kullanarak polinomal yöntemin daha başarılı olduğunu belirlemiştir [9]. Güler, turbofan motorların kalan ömürlerini çeşitli sınıflandırma algoritmaları kullanarak tahmin etmiş ve doğrusal diskriminant analizinin en başarılı yöntem olduğunu bulmuştur [10]. Görgülü ve diğerleri, peron ayırıcı kapı sistemlerinin kestirimci bakımları için makine öğrenmesi yöntemlerini kullanmış ve doğrusal destek vektör makineleri ile %99,4 başarı elde etmişlerdir [11]. Wasim ve diğerleri, dinamik regresyon modelleriyle rulmanların kalan ömürlerini tahmin etmiş ve PRONOSTIA'dan alınan titreşim verileri ile yöntemin başarısını test etmişlerdir [12]. Costello ve diğerleri, gaz sirkülatörlerinin durumunu makine öğrenmesi yöntemleri ile tahmin ederek perceptron tabanlı modeller kullanmışlardır [13]. Bukhsh ve diğerleri, demiryolu makaslarının bakım planlarını ağaç tabanlı sınıflandırma yöntemleri ile yapmış ve gradyan arttırıcı karar ağacı algoritmasının bakım ihtiyacında en yüksek doğruluğu sağladığını bulmuşlardır [14]. Prytz ve diğerleri, ticari otobüs ve kamyonlardaki hava kompresörlerinin bakım ihtiyaçlarını rastgele orman algoritması kullanarak tahmin etmişlerdir [15]. Saimurugan ve diğerleri, döner makinelerdeki arızaları titreşim sinyalleri ile tespit ederek karar ağaçları ve destek vektör makineleri kullanmışlardır [16]. Hsu ve diğerleri, rüzgar türbinlerindeki arızaları tahmin etmek için istatistik yöntemleri ve makine öğrenmesi algoritmaları kullanmış ve karar ağaçları ile %92,68 doğruluk elde etmişlerdir [17]. Baştürk ve diğerleri, tren sistemlerindeki pantograf boynuzlarının sorunlarını derin öğrenme ve görüntü işleme algoritmaları ile tespit ederek %95 başarım elde

etmişlerdir [18]. Karabacak ve Özmen, rulmanların sağlıklı çalışıp çalışmadığını evrişimli sinir ağları ile analiz etmiş ve farklı arıza türlerini başarıyla sınıflandırmışlardır [19]. Çatak ve diğerleri, derin evrişimsel otokodlayıcı ağı tasarlayarak rulman arızalarını sınıflandırmış ve literatürdeki diğer yöntemlerden daha yüksek performans elde etmişlerdir [20]. Santo ve diğerleri, PAKDD2020 ve NASA veri setleri kullanarak derin öğrenme algoritmalarının kestirimci bakımda etkisini değerlendirmişlerdir [21]. Wang ve diğerleri, yüksek hızlı demiryolu enerji ekipmanlarının bakım zamanlarını LSTM ve RNN derin öğrenme mimarilerinin birleşimi ile tahmin etmişlerdir [22]. Wang ve diğerleri, rulman RUL tahmini için denetimsiz bir adaptif yoğunluk kümeleme filtresi önermişlerdir. Bu yöntemle, önceden bilgi olmaksızın parametre tahmini yapılabilmekte ve yoğunluk parametrelerinin dinamik olarak ayarlandığı belirtilmiştir [23]. Wang ve diğerleri ayrıca, manifold öğrenmesine dayalı bir altuzay kümeleme yöntemi önermiştir. Bu yöntemle, bozulma dağılımını tanımlamak için ikili sınıf modeli kullanılarak, çok aşamalı bir üssel model entegrasyonu ile rulmanların bozulma hızı belirlenmeye çalışılmıştır [24]. Son yıllarda, desen tanıma tabanlı kestirimci bakım, rulman sağlığı izleme ve santrifüj pompaları gibi çeşitli konulara odaklanan kapsamlı literatür taramaları da yapılmıştır [25-28]. Bu çalışmalar, RUL tahmini alanındaki yenilikleri inceleyerek, istatistiksel yöntemler, gelişmiş sinir ağları, makine öğrenimi ve derin öğrenme yaklaşımlarının avantajlarını ve sınırlamalarını detaylı bir şekilde değerlendirmektedir. Derin öğrenme teknolojilerinin, özellikle CNN ve LSTM'nin yüksek boyutlu özellikleri otomatik olarak çıkarabilme yetenekleri sayesinde RUL tahmini alanında büyük bir ilerleme kaydedilmiştir [29]. Derin öğrenme, ham sensör verilerini doğrudan işleyebilir ve verilerden katmanlı ağ yapıları aracılığıyla karmaşık doğrusal olmayan özellikleri müdahale olmaksızın otomatik olarak çıkarabilmektedir. Bu yaklaşım, derin öğrenme teknolojilerini modern endüstriyel RUL tahmini alanında büyük bir uygulama potansiyeline sahip bir konuma yerleştirmektedir [30].

Sunulan mevcut yöntemler, kestirimci bakım çalışmalarında farklı yöntemlerin kullanılabildiğini göstermektedir. Bu çalışmada, derin öğrenme algoritmalarının öğrenme yeteneğini geliştirmek amacıyla doğru kombinasyonu bulmak için uçak motorlarından alınan sensör verileri kullanılarak motorların olası arızaları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan CNN, LSTM, BiLSTM ve GRU yöntemlerinin farklı katman sayıları ile oluşturulan çeşitli kombinasyonları üzerinde deneysel çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar sonucunda elde edilen optimum performans modeli önerilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, kullanılan CNN, LSTM, BiLSTM ve GRU metotları hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, veri seti tanıtılmış, yapılan deneysel sonuçlar sunulmuştur. Dördüncü bölümde, araştırma sonuçları tartışılmış ve gelecek yapılabilecek çalışmalar hakkında bilgi verilerek sonlandırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Bu bölümde, gerçekleştirilen metodoloji, kullanılan derin öğrenme modelleri ve veri ön işleme yöntemleri açıklanmaktadır. İlk olarak, çalışmada uygulanan yöntem ve modelleme süreci sunulmuş, ardından çalışmada kullanılan derin öğrenme modelleri ve veri ön işleme için tercih edilen Parçalı Doğrusal Bozulma (Piecewise Linear Degradation, PLD) yöntemi ele alınmıştır.

2.1. Gerçekleştirilen Metodoloji (Implemented Methodology)

Çalışmada, motor arızalarının tahmini amacıyla kombinasyonel derin öğrenme yöntemleri kullanılmıştır. Bu süreç, hem uzamsal hem de zamansal bağıntıları yakalayarak modelin doğruluğunu artırmayı hedeflemektedir. Çalışmanın ilk aşaması, veri ön işleme aşamasıdır. Bu aşamada, motor verilerinin içeriğindeki sensörlerin değişim değerleri incelenmiştir. Değişim göstermeyen sensörler, veri setinden çıkarılmıştır. Bu sensörler, motorun arızalanmasına etki etmeyen veya çok az etki eden ölçümler olabileceğinden, yalnızca anlamlı özelliklerin veriye eklenmesi hedeflenmiştir.

Veri setindeki seçilen sensörler, min-max normalizasyonu kullanılarak ölçeklendirilmiştir. Bu yöntem, farklı ölçeklerdeki sensör verilerinin aynı aralıkta birleştirilmesini sağlamaktadır, böylece modelin öğrenme süreci hızlanmakta ve daha stabil hale gelmektedir. Bu adımda, Denklem (1) kullanılarak 0 ile 1 arasında bir ölçekleme yapılmış, bu da modelin daha verimli çalışmasına olanak sağlamıştır.

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (1)$$

Burada x normalizasyon öncesinde kullanılan orijinal veri değeri, x_{max} verinin alabileceği maksimum değeri, x_{min} verinin alabileceği minimum değeri ve x_{norm} Min-Max

normalizasyonu sonrası ölçeklenmiş değeri göstermektedir.

Elde edilen veriler, eğitim ve test setlerine ayrılmadan önce RUL değeri hesaplanmıştır. Bu değer, her motorun ne kadar süre daha çalışabileceğini gösteren önemli bir metrik olup, modelin hedef değişkeni olarak kullanılmaktadır.

Modelin ilk aşamasında, CNN katmanı, giriş verisinden anlamlı özellikler çıkarmak için kullanılmaktadır. CNN katmanları, özellikle uzamsal bağıntıları yakalama konusunda güçlüdür, bu sayede sensörlerden elde edilen veriler arasındaki ilişkiler etkin bir şekilde öğrenilmektedir. CNN katmanından sonra, bu özellikler LSTM, BiLSTM ve GRU katmanlarına aktarılmaktadır. Bu katmanlar, verinin zaman bağımlılığını öğrenir ve uzun vadeli ilişkileri modelleyerek verinin dinamik yapısını anlamaya çalışır.

LSTM katmanları, zaman serisi verilerindeki geçmiş bağımlılıkları öğrenerek motor arızalarının karmaşık ilişkilerini modellemeye yardımcı olur. BiLSTM, geçmiş ve gelecekteki verileri dikkate alırken, GRU ise daha hızlı eğitim için tercih edilmiştir. Çalışmada, CNN-LSTM, CNN-BiLSTM, CNN-GRU gibi kombinasyonlarla test edilen modellerin performansları kıyaslanmıştır.

Modelin son aşamasında, elde edilen özellikler bir tam bağlantı katmanı aracılığıyla nihai model çıktısına aktarılmaktadır. Eğitim süreci sırasında, her bir katman, modelin hedefini minimize etmek amacıyla geri yayılım algoritmasıyla optimize edilmiştir. Modelin başarımı, RMSE (Root Mean Squared Error) metriği ile değerlendirilmiş, bu sayede tahmin edilen RUL değerlerinin doğruluğu ölçülmüştür.

Eğitim tamamlandıktan sonra, test seti üzerinde modelin performansı değerlendirilmiş ve tahminler gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu adım, modelin doğruluğunu ölçmede önemli olmuştur. Gerçekleştirilen metodolojilerin genel çerçevesi Şekil 1'de, kullanılan parametreler ise Tablo 1'de sunulmuştur.

2.2. Derin Öğrenme Yöntemleri (Deep Learning Methods)

CNN, derin öğrenme alanında yaygın olarak kullanılan yapay sinir ağı mimarileridir. Ağı oluşturan temel bileşenlerin şematik diyagramı Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Modellerde kullanılan hiperparametreler (Hyperparameters used in the models)

Hiperparametre	Değer
Zaman Adımı (time_steps)	30
Filtre Sayısı	64
Kernel Boyutu	3
Aktivasyon Fonksiyonu	ReLU
Pooling Boyutu	2
Hücre Sayısı, Dense Nöron	100
Dropout Oranı	0.2
Değerlendirme Metriği	RMSE
Optimizasyon Algoritması	Adam
Epoch Sayısı	10
Batch Size	64
Dropout Oranı	0.2

Giriş katmanı (Input), CNN modelinin giriş verisinin alınarak evrişim katmanına aktarıldığı bölümü ifade etmektedir. Giriş verisi genellikle 2 boyutlu matrisle gösterilen verileri içermektedir. Evrişim katmanı (Convolution) CNN mimarisinin en önemli katmanlarından biridir. Giriş verisinden filtreler ile özellik çıkarılmasını sağlamaktadır. Filtreler, giriş matrisinde küçük pencereler üzerinde kayarak, özellik haritaları oluşturmaktadır. Havuzlama katmanı (Pooling), evrişim katmanından alınan verinin boyutunun azaltılarak hesaplama maliyeti ve model hassasiyetinin arttırılmasını sağlamaktadır. Maksimum havuzlama ve ortalama havuzlama olmak üzere 2 türü bulunmaktadır. Maksimum havuzlama da filtre büyüklüğüne göre ilgili matris parçasındaki en büyük değer seçilerek, ortalama havuzlama da ortalama değer seçilerek çıkış matrisi oluşturulmaktadır. Aktivasyon fonksiyonu nöronların çıkışını belirlemek için kullanılan bir fonksiyondur. ReLU (Rectified Linear Unit) en çok kullanılan aktivasyon fonksiyonlarından biridir. Doğrusal olmayan giriş verilerini doğrusal veriye dönüştürmektedir. ReLU, negatif değerleri sıfırlayarak, pozitif değerleri aynı bırakmaktadır. Tam bağlantılı katman (Fully Connected), evrişim ve havuzlama katmanlarından gelen özellik haritalarını düzleştirmektedir. Önceki katmandaki tüm nöronlarla bağlantılıdır. Çıktı katmanında (Output) softmax aktivasyon fonksiyonu ile her sınıfa ait olasılık değerlerinin hesaplanmasını sağlamaktadır.

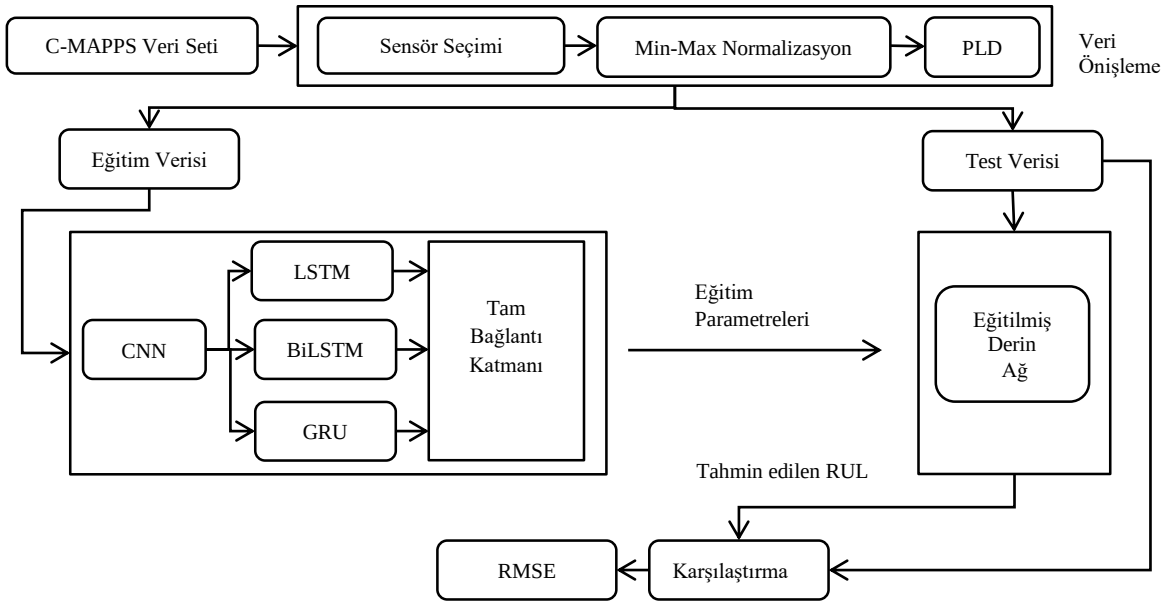
Tekrarlayan Sinir Ağları (Recurrent Neural Networks, RNN), ardışık veriler üzerinde çalışan ve geçmiş bilgiyi kullanarak gelecekteki tahminler yapabilen sinir ağı modelleridir. RNN'ler, özellikle zaman serisi analizi, doğal dil işleme, konuşma tanıma ve benzeri sıralı veri işlemlerinde yaygın

olarak kullanılır. Bu ağlar, bir zaman adımındaki çıktılarını bir sonraki zaman adımına girdi olarak besleyerek ardışık veriler arasında bağıntı kurabilirler. Şekil 3'de RNN mimarisinin genel yapısı verilmiştir.

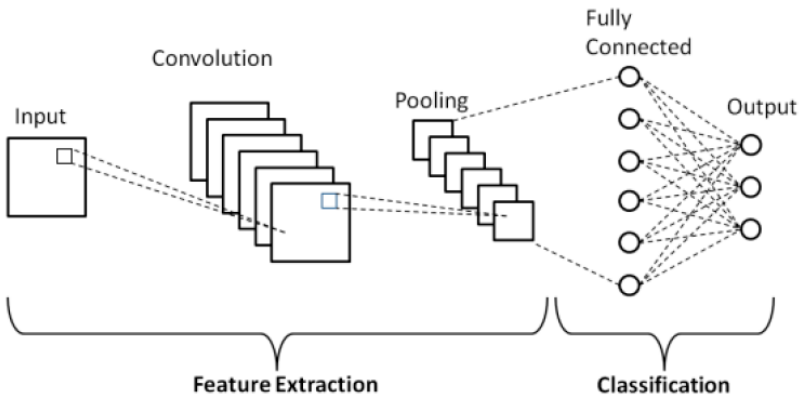
LSTM, tekrarlayan sinir ağlarının bir çeşidi olup, zaman serisi verileri veya sıralı veriler üzerinde etkili bir şekilde çalışmak üzere tasarlanmıştır. Geleneksel RNN'lerin uzun dönemli bağımlılıkları öğrenmedeki zorlukları nedeniyle, LSTM'ler bu problemi çözmek üzere geliştirilmiştir. LSTM hücreleri, geleneksel RNN hücrelerinden daha karmaşıktır. Unutma kapısı (Forget gate), giriş kapısı (Input gate) ve çıkış kapısı (Output gate) olmak üzere 3 kapı içermektedir. Bu kapılar, hücre durumu (Cell) ve gizli durum (Hidden) bilgisini kullanarak bilgilerin ne zaman saklanacağını, güncelleneceğini veya unutulacağını belirlemektedir. Şekil 4'de LSTM mimarisinin genel yapısı verilmiştir.

BiLSTM, sıralı verileri hem ileri hem de geri yönlerde işlemek üzere tasarlanmış gelişmiş bir yinelemeli sinir ağı mimarisidir. Yalnızca geçmiş bağımlılıkları yakalayan standart LSTM'lerin aksine, BiLSTM'ler geçmiş ve gelecekteki bağlamlardan aynı anda öğrenmek için iki ayrı LSTM katmanı kullanır. Bu yapıda, bir katman giriş dizisini orijinal sırayla işlerken, diğeri ters sırayla işler. Bu iki katmanın çıktıları daha sonra birleştirilir (genellikle birleştirme, toplama veya ortalama alma yoluyla) ve giriş verilerinin daha zengin bir temsilini oluşturur. Bu çift yönlü yaklaşım, BiLSTM'leri doğal dil işleme, zaman serisi tahmini ve konuşma tanıma gibi sıralı bağımlılıkların kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını gerektiren görevler için etkili hale getirir. Bir dizinin her iki tarafındaki bilgileri kullanarak BiLSTM'ler duygu analizi, metin sınıflandırması ve makine çevirisi gibi uygulamalarda performansı arttırmaktadır [33].

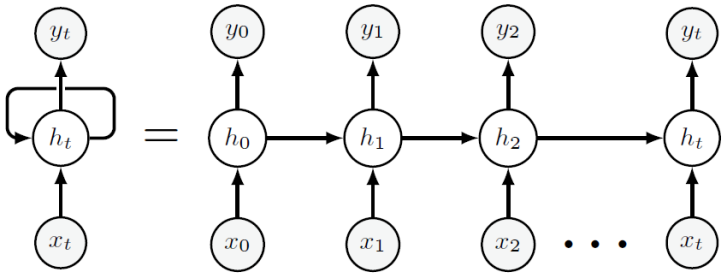
GRU, tekrarlayan sinir ağlarının bir çeşidi olup, uzun dönemli bağımlılıkları etkili bir şekilde öğrenmek için geliştirilmiş bir mimaridir. GRU, LSTM'ye benzer şekilde kapı mekanizmaları kullanır, ancak daha basit bir yapıya sahiptir. Bu basitlik, GRU'nun daha az hesaplama maliyeti ile çalışmasını ve daha hızlı öğrenebilmesini sağlamaktadır [34]. GRU, belleği etkili bir şekilde yönetmek için kapı mekanizmaları kullanmaktadır. Ancak, LSTM'nin aksine, GRU ayrı bir bellek hücresine sahip değildir; bunun yerine bellek işlevlerini doğrudan gizli duruma dâhil etmektedir. GRU güncelleme kapısı (Update gate) ve sıfırlama kapısı (Reset gate) olmak üzere iki temel kapıdan oluşmaktadır. Güncelleme kapısı, modelin geçmiş bilgileri ne ölçüde koruması gerektiğini belirlerken, unutma kapısı, yeni hesaplamalarda geçmiş gizli durumun hangi bölümlerinin göz ardı edileceğini kontrol etmektedir.



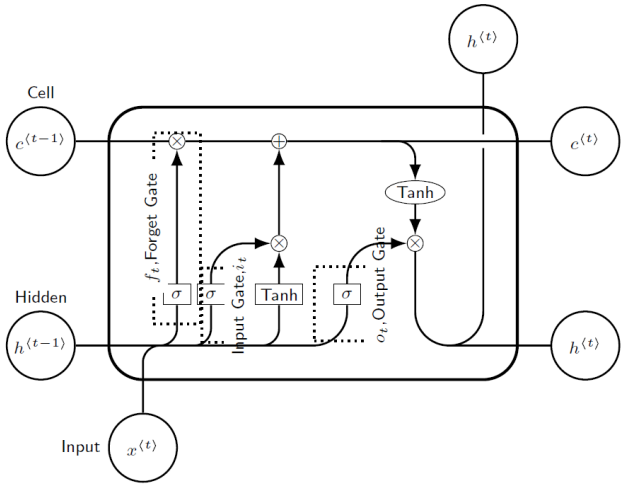
Şekil 1. Gerçekleştirilen metodolojilerin genel çerçevesi (The general framework of the applied methodologies)



Şekil 2. Temel bir evrişimli sinir ağı mimarisinin şematik diyagramı [31] (Diagram of a basic CNN architecture)



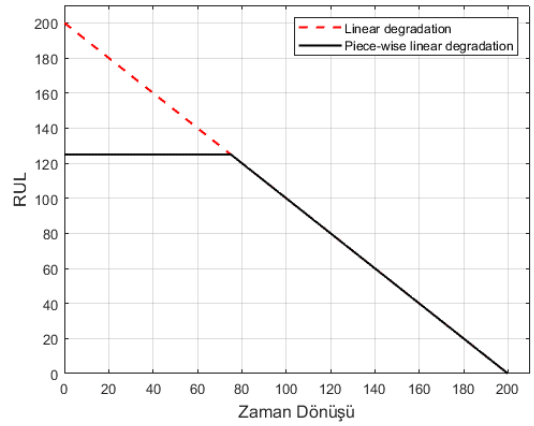
Şekil 3. RNN mimarisi [32] (RNN architecture)



Şekil 4. LSTM mimarisi [32] (LSTM architecture)

2.3. Parçalı Doğrusal Bozulma (Piecewise Linear Degradation)

PLD modeli, bir cihazın veya sistemin bozulma sürecini daha doğru ve esnek bir şekilde modellemek için kullanılan bir yaklaşımdır. Bu model, bozulma sürecini bir dizi doğrusal parçalara ayırarak her bir parçanın belirli bir zaman dilimindeki doğrusal davranışını temsil eder [35]. Bu yaklaşımın arkasındaki amaç, sistemin çalışmasının başlangıç aşamasında sağlıklı olduğunu varsaymaktır. Sistem ömrünün sonuna yaklaştıkça bozulma artar. Bu nedenle, sistem nispeten yeni olduğunda RUL'u sabit bir değer olarak almak ve zaman geçtikçe doğrusal olarak azaltarak modellemek mantıklıdır. Bu çalışmada hedef RUL'u belirlemek için parça-başı doğrusal bozulma modeli kullanmıştır. Şekil 5'te RUL değerinin zamana bağlı değişimi doğrusal bozulma ve parçalı doğrusal bozulma fonksiyonlarıyla verilmiştir.



Şekil 5. Piece-wise linear degredation fonksiyonu (Piecewise linear degradation function)

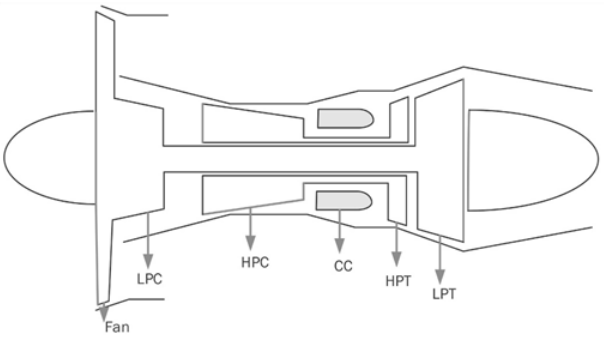
3. BULGULAR (RESULTS)

Bu bölümde, kullanılan veri seti açıklanacak ve yapılan deneylerin sonuçları sunulacaktır. İlk olarak, veri setinin kaynağı, içeriği ve özellikleri hakkında bilgi verilecektir. Daha sonra, veri seti üzerinde gerçekleştirilen ön işleme adımları ve veri setinin analize hazırlanma süreci anlatılacaktır. Son olarak, yapılan deneylerin sonuçları, elde edilen performans metrikleri ve bu sonuçların analizi ayrıntılı bir şekilde tartışılacaktır.

3.1. Veri Seti (Dataset)

Veri Seti, NASA tarafından geliştirilmiş ve yayımlanmış (Commercial Modular Aero-Propulsion System Simulation, C-MAPSS) bir veri setidir. Bu veri seti, uçak motorlarının performansını simüle ederek, motor arızalarının ve bakım ihtiyaçlarının tahmini için kullanılan bir kaynaktır. Şekil 6'te simüle edilen motorun basitleştirilmiş bir görseli verilmiştir. Modeldeki motorun temel bileşenleri kompresör, yanma odası, türbin ve egzozdur [36]. Veri seti, sensörlerin zamana bağlı değerleri uçak motorlarının farklı bileşenlerinin arıza durumu, kalan ömrü ve birbirleriyle etkileşimi hakkında bilgi vermektedir.

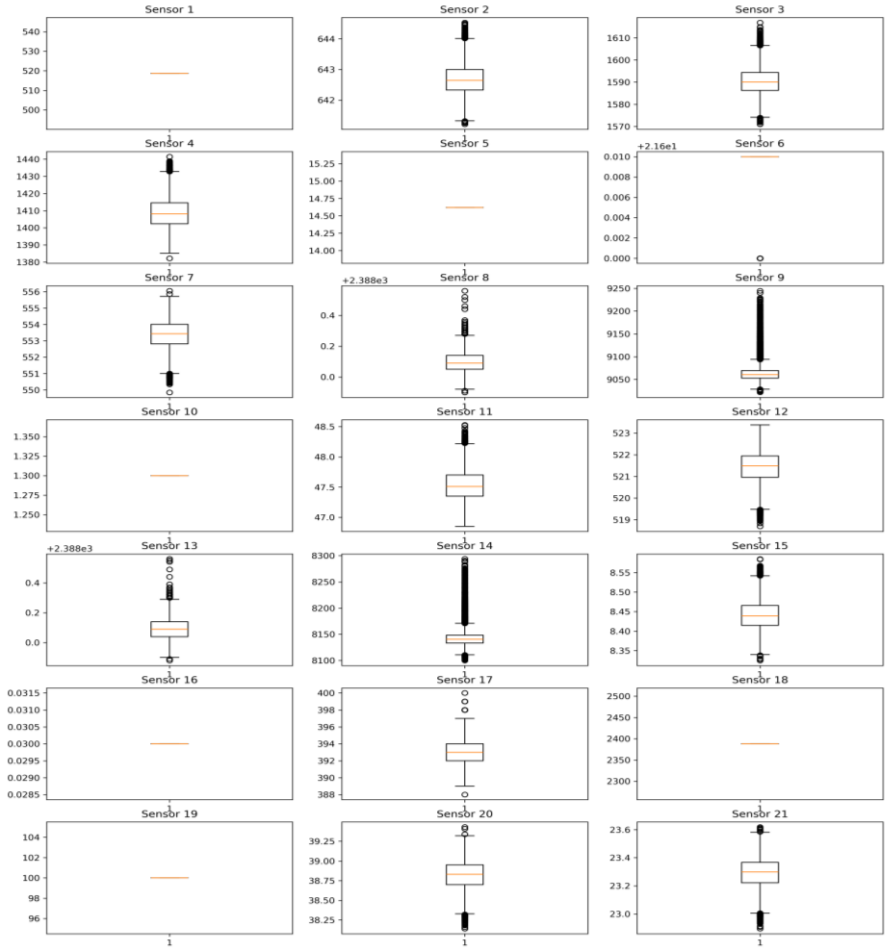
Simüle edilen motorun çalışma prensibi özetle şöyledir: Hava önce düşük basınçlı kompresörde (LPC) sıkıştırılır, ardından yüksek basınçlı kompresöre (HPC) geçerek daha yüksek basınca ulaşır. Bu, yakıtın yanma odasında (CC) verimli yanması için gereklidir. Yanma odasında yakıt ve hava karışarak yanma gerçekleşir ve yüksek sıcaklık ile basınç oluşur. Bu enerji, yüksek basınçlı türbini (HPT) döndürerek mekanik enerjiye dönüştürür. Düşük basınçlı türbin (LPT) ise daha düşük basınçlı gazlardan enerji üretir. HPT, kompresör ve yüksek güç gerektiren bileşenleri çalıştırırken, LPT egzoz çıkışını ve düşük güç gerektiren sistemleri destekler.



Şekil 6. Turbofan motor modelinin şematik gösterimi [37] (Schematic representation of the turbofan engine model)

C-MAPSS veri seti, FD001, FD002, FD003 ve FD004 olmak üzere dört alt kümeden oluşur. Bu alt kümeler, farklı işletim koşulları ve arıza modlarına göre motor performansını simüle eder. Her biri, çeşitli sensörlerden alınan zaman serisi verilerini içerir. Çalışmada FD001 veri seti kullanılmıştır.

Her veri kaydı, motor kimliği (ID), zaman bilgisi, üç farklı işletim koşulu değişkeni ve 21 sensörden alınan ölçümleri içerir. Bu sensörler sırasıyla T2 (fan girişindeki sıcaklık), T24 (LPC çıkışındaki sıcaklık), T30 (HPC çıkışındaki sıcaklık), T50 (LPT çıkışındaki sıcaklık), P2 (fan girişindeki basınç), P15 (bypass kanalındaki basınç), P30 (HPC çıkışındaki basınç), Nf (fiziksel fan hızı), Nc (fiziksel çekirdek hızı), epr (motor basınç oranı, P50/P2), Ps30 (HPC çıkışındaki statik basınç), phi (yakıt akış oranı ile Ps30 oranı), NRf (düzeltme yapılmış fan hızı), NRc (düzeltme yapılmış çekirdek hızı), BPR (bypass oranı), farB (brülör yakıt-hava oranı), htBleed (bleed entalpisi), P50 (yüksek basınçlı türbin çıkışındaki basınç), T15 (bypass kanalındaki sıcaklık), P10 (fan çıkışındaki basınç) ve T40 (yüksek basınçlı kompresör çıkışındaki sıcaklık). Ayrıca, motorun arızalanana kadar geçecek süresini gösteren bir hedef değişken eklenmiştir. Veri seti kullanılmadan önce ön işleme tabi tutulmuştur. Sensör verileri analiz edilerek değişim göstermeyen sensörler çıkarılmıştır. Şekil 7'de gösterildiği üzere, sensör 1, 5, 6, 10, 16, 18 ve 19'un ölçümlerinde değişim olmadığı tespit edilmiş ve bu sensörler veri setinden çıkarılmıştır.



Şekil 7. Sensör değişim değerleri (Sensor variation values)

3.2. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

Çalışmada CNN, LSTM, BiLSTM ve GRU modelleri ile oluşturulan kombinasyonel yapılar incelenmiştir. Çalışmada CNN-LSTM, CNN-BiLSTM ve CNN-GRU modellerinin katman sayılarının etkisini belirlemek ve C-MAPSS veri seti için en uygun modeli seçmek için 36 farklı model oluşturulmuştur. Bu amaçla önce CNN katman sayısı 1 olarak seçildiğinde LSTM katman sayısının etkisinin araştırmak için CNN-LSTM, CNN-2LSTM, CNN-3LSTM, CNN-4LSTM modelleri, CNN katman sayısı 2 olarak seçildiğinde LSTM katman sayısının etkisinin araştırmak için 2CNN-LSTM, 2CNN-2LSTM, 2CNN-3LSTM, 2CNN-4LSTM modelleri, CNN katman sayısı 3 olarak seçildiğinde LSTM katman sayısının etkisinin araştırmak için 3CNN-LSTM, 3CNN-2LSTM, 3CNN-3LSTM, 3CNN-4LSTM modelleri oluşturulmuştur. Benzer mantıkla CNN-BiLSTM ve CNN-GRU modelleri için de farklı katman sayıları ile modeller oluşturulmuştur. CNN-LSTM, CNN-BiLSTM ve CNN-GRU modelleri ile elde edilen sonuçlar ise sırası ile Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 2. CNN-LSTM modelleri RMSE değerleri (RMSE values of the CNN-LSTM models)

	CNN	**2CNN**	**3CNN**
LSTM	17,0108	16,6228	19,1383
2LSTM	16,6907	17,0021	20,3165
3LSTM	**15,7112**	17,8547	20,5627
4LSTM	16,0072	16,8976	21,0241

Tablo 2'deki sonuçlar incelendiğinde modellerin RMSE değerlerine göre, CNN katman sayısı 1 olarak seçilen modellerde, LSTM katman sayısının artması genellikle model performansını iyileştirmiştir. CNN-LSTM modelinin RMSE değeri (17,01) iken, CNN-2LSTM (16,69), CNN-3LSTM (15,71) ve CNN-4LSTM (16,00) RMSE değerleri hesaplanmıştır. Bu da daha fazla LSTM katmanının modelin doğruluğunu artırabileceğini göstermektedir. CNN katman sayısı 2 olan modellerde, 2CNN-LSTM (16,62) modelinin performansı oldukça iyi olmakla birlikte, 2CNN-

2LSTM (17,00) ve 2CNN-3LSTM (17,85) modellerinin performansı ise biraz daha düşmüştür. CNN katman sayısı 3 olan modellerde ise, genel olarak RMSE değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle 3CNN-4LSTM modeli çok daha karmaşık yapıya sahip olmasına rağmen daha yüksek hata değerine sahiptir. Bu sonuçlar, CNN katman sayısın arttıkça modelin daha karmaşık hale geldiğini ve bu durumda LSTM katmanlarının sayısının artmasının performansa büyük bir katkı sağlamadığını göstermektedir.

Tablo 3. CNN-BiLSTM modelleri RMSE değerleri (RMSE values of the CNN-BiLSTM models)

	CNN	2CNN	3CNN
BiLSTM	17,7472	16,4851	18,2852
2BiLSTM	15,7718	16,4062	19,4516
3BiLSTM	**15,6373**	16,6709	18,3586
4BiLSTM	16,0459	15,7286	20,7052

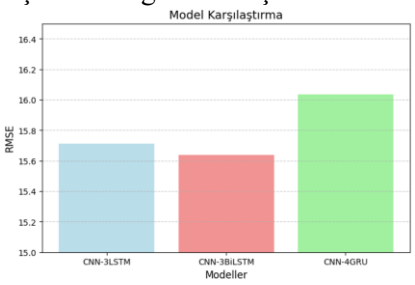
Tablo 3'deki sonuçlar incelendiğinde, her bir grup için en düşük hata oranları farklı modellerde görülmektedir. CNN katman sayısı 1 seçildiğinde, CNN-3BiLSTM modeli (15,64) ile en düşük RMSE değerini elde etmiştir. Bu da modelin bu kombinasyonla en iyi performansı gösterdiğini göstermektedir. CNN katman sayısı 2 olan modellerde ise, 2CNN-4BiLSTM modeli (15,73) ile en düşük hata oranını sağlamış ve en iyi sonuç olarak öne çıkmıştır. CNN katman sayısı 3 seçildiğinde, hata oranı genellikle artmakta, ancak 3CNN-BiLSTM modeli (18,29) ile bu grup içindeki en düşük RMSE'yi elde etmiştir. Bu sonuçlar, CNN katman sayısının artmasının modelin karmaşıklığını artırmasına rağmen, BiLSTM katman sayısının doğru seçilmesiyle daha düşük hata oranlarına ulaşılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, daha fazla CNN katmanının hata oranlarını artırdığı, özellikle 3CNN'li modellerde daha yüksek RMSE değerlerinin gözlemlendiği görülmektedir.

Tablo 4. CNN-GRU modelleri RMSE değerleri (RMSE values of the CNN-GRU models)

	CNN	2CNN	3CNN
GRU	20,7515	16,8512	18,6800
2GRU	17,1510	18,6113	18,0203
3GRU	16,5745	17,1997	19,9228
4GRU	**16,0363**	16,9376	18,6157

Tablo 4'deki sonuçlar incelendiğinde, CNN katman sayısı 1 olan modellerde en düşük RMSE değerini CNN-4GRU modeli (16,04) ile elde etmiştir. Bu, modelin 4 GRU katmanına sahipken en iyi performansı gösterdiğini işaret etmektedir. Diğer modeller, CNN-3GRU (16,57) ve CNN-2GRU (17,15), sırasıyla daha yüksek hata oranları vermektedir, bu da daha fazla GRU katmanının modelin performansını iyileştirdiğini göstermektedir. CNN katman sayısı 2 olan modellerde ise, en düşük RMSE değeri 2CNN-GRU (16,85) modelinde görülmüştür. Son olarak, CNN katman sayısı 3 olan modellerde, 3CNN-2GRU (18,02) modeli en düşük RMSE'yi elde ederken 3CNN-3GRU (19,92) modeli en yüksek RMSE değerlerine sahiptir.

CNN-LSTM, CNN-BiLSTM ve CNN-GRU modellerinin katman sayılarının performans üzerindeki etkisini belirlemek ve en uygun modeli seçmek amacıyla, her bir model grubundan 12'şer farklı model oluşturulmuştur. Toplamda 36 farklı model analiz edilmiştir. Her bir model grubundaki en iyi performans gösteren modeller, diğer gruplardaki en iyi modellerle karşılaştırılmış ve bu karşılaştırmalar sonucunda en optimal değerlerin elde edilebileceği kombinasyon belirlenmiştir. Sonuçlar Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. En iyi modellerin karşılaştırılması (Comparison of the best models)

Şekil 8 incelendiğinde, CNN-3BiLSTM modeli tüm kombinasyonlar arasında en iyi performansı göstermiştir. Bu model, çift yönlü bilgi akışını kullanarak ileri ve geri bağımlılıkları daha iyi yakaladığı için daha üstün bir performans sergilemiştir. İkinci sırada, sadece ileri yönde bağımlılıkları modelleyen CNN-3LSTM modeli yer almış ve BiLSTM'ye oldukça yakın bir sonuç elde etmiştir. CNN-4GRU modeli ise diğer modellere göre biraz daha düşük bir performans göstermiştir. Bu sonuçlar, BiLSTM'nin C-MAPSS verilerinde daha üstün bir tahmin yeteneği sunduğunu göstermektedir.

3.3. Literatür ile Karşılaştırma (Comparison With Literature)

Tablo 5, C-MAPSS verilerini kullanarak turbofan motorunun kalan ömrünün tahmini üzerine yapılan önceki bazı çalışmalarla karşılaştırmayı göstermektedir. Önceki çalışmaların algoritmaları, ağ yapılandırmaları, yayın yılları ve tahmin edilen RMSE sonuçları verilmiştir.

Tablo 5. Literatürdeki diğer metotlarla karşılaştırma (Comparison with existing methods in the literature)

Metot	Tanım	Yıl	RMSE
MLP [38]	Multilayer Perceptron	2016	37,56
SVR [38]	Support Vector Regression	2016	20,96
RVR [38]	Relevance Vector	2016	23,79
CNN [38]	2 CNN	2016	18,45
LSTM [39]	2 LSTM	2017	18,07
BD-RNN [40]	Bi-directional RNN	2018	20,04
BD-LSTM [40]	Bi-directional LSTM	2018	15,42
CNN-GRU [41]	CNN-GRU	2023	16,29
Gerçekleştirilen Metot	CNN-3BiLSTM	2024	15,64

Tablo 5'deki sonuçlar incelendiğinde, çalışma kapsamında gerçekleştirilen CNN-3BiLSTM yöntemi, literatürdeki birçok yöntemden daha iyi performans göstermiş ve BD-LSTM yöntemi ile yakın bir performans sergilemiştir. Özellikle, Çok Katmanlı Algılayıcı, Destek Vektör Regresyonu, Relevans Vektör Regresyonu, CNN, BD-RNN ve CNN-GRU yöntemlerine kıyasla daha düşük bir RMSE değeri elde edilmiştir. Bu başarının, CNN'nin güçlü özellik çıkarma yeteneği ile 3 katmanlı BiLSTM'nin zaman serisi verilerindeki karmaşık bağımlılıkları öğrenme kapasitesinin birleşiminden kaynaklandığı söylenebilir.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Bu çalışmada, endüstriyel makinelerde arıza kestirimi derin öğrenme yöntemleriyle yapılması amaçlanmıştır. Derin öğrenme, büyük veri setlerini işleyebilen ve karmaşık ilişkileri öğrenebilen bir yapay zeka alanı olarak, motorların sağlık durumunu izleyerek arıza risklerini önceden tespit etmede etkili bir yöntem olarak kullanılabilmektedir. Çalışmada, uçak motorlarından alınan sensör verileri kullanılarak, motorların olası arızaları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu yöntem, bakım süreçlerini optimize etmeyi, planlı bakım uygulamalarını devreye sokmayı ve beklenmedik arızaları azaltmayı hedeflemiştir. Bu amaçla CNN, GRU, LSTM ve BiLSTM mimarileri ile oluşturulan farklı katman sayılarına sahip 36 model karşılaştırılmıştır. Sonuçlar genel olarak, daha fazla CNN katmanının modelin karmaşıklığını artırdığı ve hata oranlarını yükselttiğini göstermiştir. Özellikle CNN katman sayısı 3 olan modellerde yüksek RMSE değerleri elde edilmiştir. LSTM, BiLSTM ve GRU katman sayısının artışı ise çoğunlukla modelin doğruluğunu iyileştirmiştir, ancak her modelde bu artışın etkisi farklı olmuştur. LSTM ve BiLSTM katmanları, zaman serisi verilerinde geçmiş ve geleceği daha iyi öğrenerek doğruluğu artırırken, GRU katmanları daha hızlı eğitim ve azalan parametre sayısıyla benzer başarıyı sağlamaktadır. Model yapılandırmaları dikkatli bir şekilde seçildiğinde, doğru katman sayısı ile daha düşük hata oranlarına ulaşmak mümkün olmaktadır. Çalışma, derin öğrenme tabanlı modellerin, endüstriyel makinelerin güvenliğini artırma ve maliyetleri düşürme açısından büyük bir potansiyel sunduğunu göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda, veri ön işleme adımlarının genişletilerek araştırılması, farklı veri kaynaklarından elde edilen verilerin birleştirilerek yeni giriş verisi üzerinde işlenmesi planlanabilir. Ayrıca, farklı veri setlerinin (örneğin, N-CMAPSS veri seti) kullanılması ve model performanslarının bu veriler üzerinde test edilmesi faydalı olabilir. Bunun yanı sıra, değerlendirme metriklerinden RMSE değerine ek olarak farklı puanlama fonksiyonları kullanılarak model performansları daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilir. Bu tür değişiklikler, arıza tahmin modellerinin genel başarımını iyileştirebilir ve daha geniş veri setleriyle modelin esnekliğini artırabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mustafa Ozan ÖZKÖK: Yazılım geliştirme, görselleştirme, saha/araştırma çalışmaları, kaynak sağlama, veri düzenleme ve yazımın ilk taslağını hazırlama süreçlerinde görev almıştır.

He contributed to software development, visualization, field/investigation work, resource provision, data curation, and the preparation of the original draft.

Rüştü AKAY: Danışmanlık, kavramsal çerçevenin oluşturulması, yöntem geliştirme ve yazımın gözden geçirilip düzenlenmesi aşamalarına katkı sağlamıştır.

He provided supervision, contributed to the development of the conceptual framework, methodology design, and participated in the review and editing of the manuscript.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Yong, Y., Stecke, K. E., Li, D., The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0. International Journal of Production Research. 2018; 56: 848-861.

[2] Zizic, M. C., Mladineo, M., Gjeldum, N., Celent, L., From industry 4.0 towards industry 5.0: A review and analysis of paradigm shift for the people, organization and technology. Energies. 2022; 15: 1-20.

[3] Yaman, G., Karadayı, H. M., Titreşim analizi ile pompalarda arıza tespiti ve kestirimci bakım için örnek bir çalışma. Tesisat Mühendisliği. 2014; 140: 37-51.

[4] Bektaş, O., Kestirimci bakım için döner mekanizma bozulma eğrisinin tanımlanması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi. 2020; 19: 420-428.

[5] Günindi, Z. Ö., Kurban, A. O., Danışmaz, M., Soğutma fanının kestirimci bakım yöntemi uygulaması ile titreşim analizi ve yapısal esneklik arızasının giderilmesi. Icontech International Journal. 2022; 6: 33-41.

[6] Demir, H. G., Müştak, O., Rulman hasarlarının titreşim ve gürültü analizi ile tespiti. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi. 2021; 25: 571-581.

[7] Orhan, S., Arslan, H., Aktürk, N., Titreşim analiziyle rulman arızalarının belirlenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2003; 18: 39-48.

[8] Özkat, E. C., Makine öğrenmesi metodolojisi kullanılarak yüksek hızlı rulmanlarda sağlık göstergesinin belirlenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi. 2021; 22: 176-183.

[9] Calayır, G. N., Kabak, M., Bakım için makine öğrenme tekniklerinin analizi ve bir uygulama. Journal of Turkish Operations Management. 2021; 5: 662-675.

[10] Güler, O., Turbofan motorlarının kestirimci bakımında makine öğrenimi algoritmaları performanslarının karşılaştırılması. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2024; 13: 99-106.

[11] Görgülü, Ş., Koç, İ., Kırımça, N., Karaköse, M., vd., Yapay zekâ kullanımıyla peron ayırıcı kapı sisteminin sağlığını izleme ve kestirimci bakım. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi. 2024; 7: 56-70.

[12] Ahmad, W., Khan, S. A., Islam, M. M., Kim, J. M., A reliable technique for remaining useful life estimation of rolling element bearings using dynamic regression models. Reliability Engineering & System Safety. 2019; 184: 67-76.

[13] Costello, J. J. A., West, G. M., McArthur, S. D. J., Machine learning model for event-based prognostics in gas circulator condition monitoring. IEEE Transactions on Reliability. 2017; 66: 1048-1057.

[14] Bukhsh, Z. A., Saeed, A., Stipanovic, I., Doree, A. G., Predictive maintenance using tree-based classification techniques: A case of railway switches. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2019; 101: 35-54.

[15] Prytz, R., Nowaczyk, S., Rögnvaldsson, T., Byttner, S., Predicting the need for vehicle compressor repairs using maintenance records and logged vehicle data. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2015; 41: 139-150.

[16] Saimurugan , M., Ramachandran, K. I., Sugumaran, V., Sakthivel, N. R., Multi component fault diagnosis of rotational mechanical system based on decision tree and support vector machine. Expert Systems with Applications. 2011; 38: 3819-3826.

[17] Hsu, J. Y., Wang, Y. F., Lin, K. C., Chen, M. Y., Hsu, J. H. Y., Wind turbine fault diagnosis and predictive maintenance through statistical process control and

machine learning. IEEE Access. 2020; 8: 23427-23439.

[18] Baştürk, M. Ö., Yüksel, M., Tetik, Y. E., Yılmaz, M., Güner, M., Kaya, T., Pantograf boynuz hatalarının derin öğrenme ve görüntü işleme teknikleri ile tespiti. Demiryolu Mühendisliği. 2022; 16: 102-115.

[19] Emre, Y., Özmen, N. G., Rulmanlarda titreşim verilerinden durum izleme ve arıza teşhisi için derin öğrenme yönteminin uygulanması. Konya Journal of Engineering Sciences. 2022; 10: 346-365.

[20] Çatak, Y., Şahin, K., Güney, O. B., Özkan, H., Deep convolutional autoencoder architecture for predictive maintenance applications. 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). 2022; 1-4.

[21] De Santo, A., Ferraro, A., Galli, A., Moscato, V., Sperlì, G., Evaluating time series encoding techniques for predictive maintenance. Expert Systems with Applications. 2022; 210: 118435.

[22] Wang, Y., Long, M., Wang, J., Gao, Z., Yu, P. S., Predrnn: Recurrent neural networks for predictive learning using spatiotemporal lstms. Advances in Neural Information Processing Systems. 2017; 30.

[23] Wang, W., Zhou, G., He, Z., Zhou, P., Ma, G., Yan, X., Ma, T., A novel unsupervised adaptive density-based clustering filter for remaining useful life prediction of bearings. Measurement Science and Technology. 2024; 35: 126121.

[24] Wang, H., Ding, X., Huang, Z., Zhen, H., Yu, W., Huang, W., Multi-stage exponential model based on subspace clustering distribution for bearing remaining useful life prediction. Measurement Science and Technology. 2024; 35: 076129.

[25] Adnan, A., Faris, E., Amaral, T. J., Fault diagnosis and health management of bearings in rotating equipment based on vibration analysis - a review. Journal Of Vibroengineering. 2022; 24: 46-74.

[26] Jianghong, Z., Jiahong, Y., Quan, Q., Yi, Q., A comprehensive survey of machine remaining useful life prediction approaches based on pattern recognition: taxonomy and challenges. Measurement Scıence And Technology. 2024; 35: 062001.

[27] Xianpeng, Q., Veronica, J., Seong, L., Chin L., Tiyamike, B., Advances and limitations in machine learning approaches applied to remaining useful life predictions: a critical review. Internatıonal Journal Of Advanced Manufacturıng Technology. 2024; 133: 4059-4076.

[28] Salman, K., Soo-Ho, J., Yaseen, S. S., Ha, J. J., Soo, K. H., Artificial Intelligence-Driven Prognostics and Health Management for Centrifugal Pumps: A Comprehensive Review. Actuators. 2024; 13: 514.

[29] Luo, J., Shao, H., Lin, J., Liu, B., Meta-learning with elastic prototypical network for fault transfer diagnosis of bearings under unstable speeds. Reliability Engineering & System Safety. 2024; 245: 110001.

[30] Lei, Z., Su, Y., Feng, K., Wen, G., Interpretable operational condition attention-informed domain adaptation network for remaining useful life prediction under variable operational conditions. Control Engineering Practice. 2024; 153: 106080.

[31] Phung, V. H., Rhee, E. J., A High-Accuracy Model Average Ensemble of Convolutional Neural Networks for Classification of Cloud Image Patches on Small Datasets. Applied Sciences. 2019; 9: 4500.

[32] Akay, B., Karaboga, D., Akay, R., A comprehensive survey on optimizing deep learning models by metaheuristics. Artificial Intelligence Review. 2022; 55: 829-894.

[33] Zhang, X., Shi, J., Zhu, G., Xiao, Y., Chen, H., Study of regional monthly precipitation based on CEEMD-BILSTM coupled model. Water Supply. 2022; 22: 8036-8049.

[34] Dey, R., Salem, F. M., Gate-variants of gated recurrent unit (GRU) neural networks. IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems. 2017; 1597-1600.

[35] Veloso, G. A., Loschi, R. H., Dynamic linear degradation model: Dealing with heterogeneity in degradation paths. Reliability Engineering & System Safety. 2021; 210: 107446.

[36] Frederick, D. K., DeCastro, J. A., Litt, J. S. (2007). User's Guide for the Commercial Modular Aero-Propulsion System Simulation (C MAPSS). NASA/ARL, Technical Manual TM2007-215026.

[37] Aydın, H., Effects of air to fuel ratio on parameters of combustor used for gas turbine engines: Applications of turbojet, turbofan, turboprop and turboshaft. Energy. 2024; 305: 132346.

[38] Babu, G. S., Zhao, P., Li, X. L., Deep convolutional neural network based regression approach for estimation of remaining useful life. International Conference on Database Systems for Advanced Applications. Springer, Cham. 2016; 214-228.

[39] Zheng, S., Ristovski, K., Farahat, A., Gupta, C., Long short-term memory network for remaining useful life estimation. 2017 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM). 2017.

[40] Zhang, J., Wang, P., Yan, R., Gao, R. X., Long short-term memory for machine remaining life prediction. Journal of Manufacturing Systems. 2018; 48: 78-86.

[41] Azyus, A. F., Wijaya, S. K., Naved, M., Prediction of remaining useful life using the CNN-GRU network: A study on maintenance management. Software Impacts. 2023; 17: 100535.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 968-980 (2025)

Tarım ve Hayvancılık Alanında Dijital Dönüşüm: Evrişimsel Sinir Ağları ve Regresyon Modelleri Kullanılarak Sığırlarda Canlı Ağırlık Tahmini

Mustafa Zahid GÜRBÜZ [1*], Oğuzhan KIVRAK [2], Ayşe Berna ALTINEL GİRGİN [3], Ali DEĞİRMENCİOĞLU [4]

[1]*Doğuş Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul Türkiye*

[2]*Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Bilgisayar Programcılığı Pr., 10200, Balıkesir Türkiye*

[3]*Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi., Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 34854, İstanbul Türkiye*

[4]*Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Laborant ve Veteriner Sağlık Pr., 10200, Balıkesir Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 01/09/2024
Revision: 03/12/2024
Accepted: 19/02/2025

Keywords

Cattle Weight Estimation
Cattle Breed Detection
Object Segmentation
Deep Learning
Digital transformation in Livestock farming
Precision Livestock farming

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 01/09/2024
Düzeltme: 03/12/2024
Kabul: 19/02/2025

Anahtar Kelimeler

Sığır Ağırlık Tahmini
Büyükbaş Irk Tespiti
Nesne Segmentasyonu
Derin Öğrenme
Hayvancılıkta Dijital Dönüşüm
Hassas Tarım ve Hayvancılık

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Bu çalışma, sığırların ağırlığını temassız şekilde yan profilden çekilen bir fotoğraf vasıtasıyla birden fazla ırk göz önüne alınarak, görüntü işleme ve makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak yüksek doğrulukla tahmin eden bir model sunar. /This study presents a model that estimates the weight of cattle with high accuracy using a non-contact, side profile photograph, considering multiple breeds, using image processing and machine learning techniques.

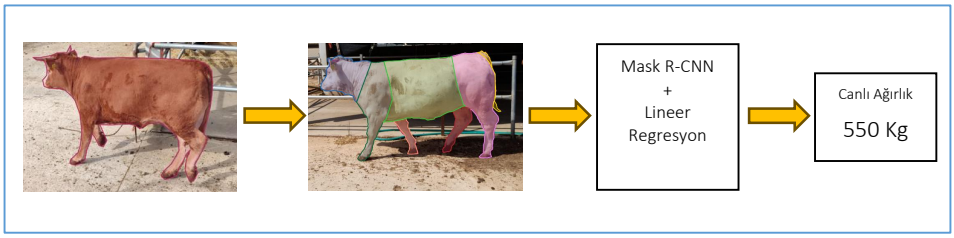


Figure A: *Live weight estimation in cattle using image processing and machine learning techniques /* ***Şekil A:*** *Görüntü işleme ve makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak sığırlarda canlı ağırlık tahmini*

Highlights (Önemli noktalar)

- *Mobil cihaz üzerinden temassız, stressiz ve gerçek zamanlı tahmin modeli oluşturulmuştur / A contactless, stress-free and real-time prediction model has been created via mobile device.*
- *Vücut segmentasyonuna dayalı, çoklu ırk bazında yüksek doğruluk elde edilmiştir. / High accuracy has been achieved on a multi-breed basis based on body segmentation.*
- *Hassas tarım ve hayvancılık alanında dijital dönüşüme katkı sağlamaktadır. /Contributes to digital transformation in the field of precision agriculture and animal husbandry.*

Aim (Amaç): *This study aims to estimate the live weight and breed of cattle using a contactless method based on body segmentation from side-view images captured via mobile devices. /Bu çalışma, mobil cihazlarla yandan çekilen görüntülerden vücut segmentasyonuna dayalı olarak sığırların canlı ağırlık ve ırkını temassız şekilde tahmin etmeyi amaçlamaktadır.*

Originality (Özgünlük): *Unlike previous studies, this research uses a single side-view image and covers multiple cattle breeds. It also prioritizes mobile usability instead of fixed camera systems. / Bu çalışma, tek yandan görüntüyle ve birden fazla sığır ırkı üzerinde yapılmış ilk uygulamadır. Sabit kamera yerine mobil kullanıma odaklanılmıştır.*

Results (Bulgular): *The system achieved 96% accuracy in weight prediction using Mask-RCNN for segmentation and linear regression. The results highlight the importance of body segmentation. /Mask-RCNN ve doğrusal regresyon ile %96 ağırlık tahmin doğruluğu elde edilmiştir. Sonuçlar, vücut segmentasyonunun tahmin sürecindeki önemini ortaya koymaktadır.*

Conclusion (Sonuç): *The study contributes to the digital transformation of precision agriculture by using a user-friendly, real-time mobile application in livestock management. / Çalışma, hayvancılıkta kullanıcı dostu, gerçek zamanlı mobil uygulama kullanarak hassas tarımın dijital dönüşümüne katkı sağlamaktadır.*

*Corresponding author, e-mail: zgurbuz@dogus.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1541362

GU J Sci, Part C, 13(3): 968-980 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Tarım ve Hayvancılık Alanında Dijital Dönüşüm: Evrişimsel Sinir Ağları ve Regresyon Modelleri Kullanılarak Sığırlarda Canlı Ağırlık Tahmini

Mustafa Zahid GÜRBÜZ [1*], Oğuzhan KIVRAK[2], Ayşe Berna ALTINEL GİRGİN[3], Ali DEĞİRMENCİOĞLU[4]

[1]*Doğuş Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul Türkiye*

[2]*Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Bilgisayar Programcılığı Pr., 10200, Balıkesir Türkiye*

[3]*Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi., Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 34854, İstanbul Türkiye*

[4]*Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Laborant ve Veteriner Sağlık Pr., 10200, Balıkesir Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 01/09/2024
Revision: 03/12/2024
Accepted: 19/02/2025

Keywords

Cattle Weight Estimation
Cattle Breed Detection
Object Segmentation
Deep Learning
Digital transformation in Livestock farming
Precision Livestock farming

Öz

Sığırlarda ağırlık ölçüm yöntemlerinden biri olan kantar kullanımı, hayvanların strese girmesine ve yaralanmaların meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu çalışma, hayvana temas etmeden görüntü alınarak ve sığırların vücut bölümlerine dayalı bir model kullanarak canlı ağırlığının tahmin edilmesini sağlayan bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yaklaşımda veri toplamak üzere anlaşmalı çiftlikte geliştirilen mobil uygulama vasıtasıyla görüntüler alınmış ve gerçek ağırlık değerleri kayıt altına alınmıştır. Görüntüler labelme etiketleme aracıyla etiketlenmiş, PyTorch'un detectron2 kütüphanesinde faster Bölge-tabanlı Evrişimsel Sinir Ağları (Eng. transl.: Region-based Convolutional Neural Networks (R-CNN)) algoritması çalıştırılmıştır. Doğrusal regresyon modeli ile ağırlık tahmini Ortalama mutlak yüzde hatası (Eng. transl.: Mean absolute percentage error (MAPE)) ölçeğine göre %96 oranında, Ortalama karesel hata (Eng. transl.:Mean squared error (MSE)) ölçeğine göre ise %94 oranında başarılı olmuştur. Literatürde bu konudaki çalışmalarda genelde tek bir cins üzerine ya da cins belirtilmeden yapılan uygulamalarla karşılaşılmaktadır. Bu çalışma birden fazla ırk üzerinde hayvanın ağırlığını tahmin etmeye çalışan ilk çalışmadır. Veri kümesi çalışma kapsamında teker teker görüntü çekimleri ile oluşturuldu. Yine bildiğimiz ve literatürden görebildiğimiz kadarıyla bu çalışma, aynı hayvan için yandan çekilmiş sadece tek bir görüntü kullanılarak ve vücut parçalarının görüntü üzerinde kapladığı alandan yola çıkarak yapılmış ilk çalışmadır. Gerek yurt içinde gerekse de yurt dışında, özellikle de pandemi sürecinden sonra tarım ve hayvancılığın dijital dönüşüm sürecinin hızlandığı günümüzde, bu çalışmada raporlanan sonuçların bu alanda çalışan diğer araştırmacılar için ve tarım ve hayvancılık sektörü için oldukça anlamlı olduğu değerlendirilebilir.

Digital Transformation in Agriculture and Livestock: Live Weight Estimation in Cattle Using Convolutional Neural Networks and Regression Models

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 01/09/2024
Düzeltme: 03/12/2024
Kabul: 19/02/2025

Anahtar Kelimeler

Sığır Ağırlık Tahmini
Büyükbaş Irk Tespiti
Nesne Segmentasyonu
Derin Öğrenme
Hayvancılıkta Dijital Dönüşüm
Hassas Tarım ve Hayvancılık

Abstract

The use of scales, one of the methods of measuring weight in cattle, causes stress in the animals and causes injuries. In this study, a method is proposed to estimate the live weight of cattle by taking images without touching the animal and using a model based on body parts. In the proposed approach, images were taken and actual weight values were recorded through the mobile application developed on the contracted farm to collect data. Images were tagged with the labelme tagging tool, and the faster r-cnn algorithm was run in the detectron2 library. Weight prediction with the linear regression model was 96% successful according to the Mean absolute percentage error (MAPE) scale and 94% successful according to the Mean squared error (MSE) scale. In the literature, studies on this subject are generally conducted on a single breed or without specifying the breed. This study is the first to attempt to estimate the weight of an animal on more than one breed.The dataset was created by taking images one by one within the scope of the study. Again, as far as we know and can see from the literature, this study is the first study to use only a single image taken from the side of the same animal and based on the area covered by the body parts on the image. It can be evaluated that the results reported in this study are quite meaningful for other researchers working in this field and for the agriculture and livestock sector, especially in today's world where the digital transformation process of agriculture and livestock has accelerated after the pandemic process, both in Turkey and abroad.

*Corresponding author, e-mail: zgurbuz@dogus.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1541362

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hayvancılık, insanoğlunun köklü ekonomik faaliyetlerinden biri olup günümüzde artan dünya nüfusuyla birlikte protein ihtiyacının karşılanması, sanayiye hammadde temini ve istihdam alanlarının oluşturulması gibi kritik işlevleri üstlenmektedir. Sığırların performans takibi, sağlık durumu takibi, beslenme düzeni ve rasyon ayarlama ve etin kalitesi için ağırlık ölçümü elzemdir. Ayrıca, hayvan refahı günümüz işletmelerinin temel standartlarından birini oluştururken tüketicilerin de yakından takip ettiği bir konu haline gelmiştir.

Ağırlık, sığırların genel sağlık durumu, büyüme hızı ve et kalitesi üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Canlı ağırlık, hayvanların beslenme ve genetik performansının değerli bir göstergesidir ve bu nedenle hayvanların belirli dönemlerde ağırlığının ölçülmesi, besicilere besleme etkinliği ve verimliliği hakkında önemli bilgiler sunar [1-2].

Artan dünya nüfusunun beslenme ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla et ve süt ürünleri talebinin artışı, sığır yetiştiriciliği işletmelerinin küresel ölçekte hızla büyümesine yol açmıştır. Bu genişleme ile birlikte hayvancılık endüstrisinin büyümesi, hayvan refahına verilen önemi daha da vurgulamıştır. İnsanlar, hayvanlarla kurdukları ilişkiler ve hayvanların bakımına verdikleri özenle hayvan refahını iyileştirme sorumluluğunu üstlenmektedirler. Günümüzdeki üretim ölçeğinde, geleneksel izleme yöntemlerinin yetersiz kaldığı görüldüğünden, izleme ve takip için yeni dijital teknolojilerin benimsenmesine yönelik bir farkındalık artmaktadır [3]. Ancak, her besi işletmesinin güncel teknolojiye erişimi olmayabilir.

Dijital dönüşümün etkisiyle besi çiftliklerinde canlı ağırlıklarının izlenmesi ve takip edilmesi önemli bir konu haline gelmiştir. Hayvanların canlı ağırlıkları farklı dönemlerde ölçülerek, besi performansının ve yem değerlendirmesinin karlılık açısından nasıl etkilendiği besicilere fikir vermektedir [1]. Sığırların düzenli olarak ağırlığının izlenmesi, diyet düzenlemeleri, sağlık sorunları ve genetik seçim gibi faktörlere zamanında müdahale imkanı sunar. Bu aynı zamanda hayvanların en uygun zamanlarda pazarlanması için kesim ağırlığına ulaşmalarının belirlenmesine de yardımcı olur. Çünkü kesim ağırlığına ulaşan hayvanlar, besi işletmeleri için ekstra maliyet oluşturabilir. Bu nedenle, düzenli periyodik ağırlık ölçümlerinin yapılması önemlidir [4]. Bu bağlamda, ağırlık ölçümünün belirli aralıklarla gerçekleştirilmesi gereklidir.

Her besi işletmesinde kantar bulunmayabilir ve özellikle büyük ölçekli çiftliklerde ölçüm işlemleri sırasında hayvanların strese girebileceği ve bu durumun ölçüm hatalarına neden olabileceği belirtilmiştir [5]. Bu durumda, geleneksel yöntemler olarak mezura veya ölçü bastonu kullanarak hayvanların vücut ölçülerinin belirlenmesi ve bu ölçülerin canlı ağırlıkla ilişkilendirilmesi, besicilere hayvanın ağırlığı hakkında önemli bilgiler sağlar [6]. Yapılan araştırmalar, sığırların otomatik olarak alınan morfolojik ölçümlerinin canlı ağırlıklarını tahmin etme yeteneğine sahip olduğunu doğrulamaktadır [7-9]. Bu bağlamda, hayvanın farklı yönlerinden mümkün olduğunca çok sayıda ölçüm alarak ve bu verilere dayanarak bir regresyon modeli oluşturmak, biyometrik ölçümler ve ağırlık arasındaki ilişkinin daha detaylı bir analizini sağlar [10].

Hayvancılık alanında, hayvanlarla ilgili problemlerin çözümünde görüntülerin özelliklerinin çıkarılması konusunda zengin bir literatür bulunmaktadır. Nasirahmadi vd. [11], sığırlar ve domuzlar gibi hayvanların davranışlarına ilişkin bilgisayarlı görü uygulamaları üzerine bir inceleme yapmışlardır. Ayrıca, Wurtz vd. [12], hayvan görüntülerini otomatik algılama temelli üretim ve refah çalışmalarında kullanımını ele alan bir literatür taraması yapmışlar ve 108 yayının hedeflerini ve metodolojilerini belgelemişlerdir. Qiao vd. [13] ile Xu vd. [14], derin öğrenme teknolojilerini kullanarak çiftlik hayvanlarının otomatik segmentasyonu üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Ağırlık tahmini konusunda ise, Jun vd. [15], domuzların ağırlığını belirlemek amacıyla eğrilik özelliklerinin kullanılmasını önermişlerdir. Bercovich vd. [16], sağrı bölgesinin analizi ve vücut şeklinin imzasıyla hayvan sınıflandırması yaparken, Spoliansky vd. [17] ise 3 boyutlu görüntülerden vücut koşullarını belirlemişlerdir. Song vd. [18], 3D görüntülerde otomatik olarak ölçülen morfolojik özelliklerin sığır ağırlığı tahminindeki hata payını doğrulamışlardır. Cozler vd. [19], emziren Holştayn ineklerinin vücut ağırlığını tahmin etmek amacıyla beş farklı regresyon modeli geliştirmişlerdir.

Üç boyutlu görüntülerle yapılan hayvan kütlesi tahmini çalışmaları olumlu sonuçlar göstermiş olsa da [19-21], çalışmalar hayvanların dorsal alanının 2

boyutlu görüntülerinin ağırlıkları ile daha güçlü bir korelasyon taşıdığını göstermiştir [10].

Bu çalışmada, büyükbaş hayvanların yan perspektifinden alınmış görüntüleri kullanarak bilgisayarlı görü teknikleri ile otomatik ölçümler yapıldı ve regresyon algoritmaları aracılığıyla bu ölçümlere dayalı olarak hayvanların ağırlıkları tahmin edildi. Çalışmanın literatüre katkıları şöyledir:

- Literatürdeki araştırmalarımıza göre; bu çalışma, hayvana temas etmeden görüntü alınarak ve sığırların vücut bölümlerine dayalı makine öğrenmesi yaklaşımlarını kullanarak birden fazla ırk üzerinde hayvanın ağırlığını tahmin etmeye çalışan ilk çalışmadır. Yapılan çalışmaların genellikle tek bir hayvan ırkı üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu çalışma özellikle ülkemiz gibi ırk çeşitliliğinin fazla olduğu lokasyonlar için oldukça değerli analizler barındırmaktadır.

- Gerçek hayata ait veri kümesini oluşturmak için Bandırma Çiftliği'ne gidilip yoğun mesai ve emek harcanarak hayvanların teker teker görüntü çekimleri gerçekleştirildi.

- Yine bildiğimiz ve literatürden görebildiğimiz kadarıyla bu çalışma, aynı hayvan için yandan çekilmiş sadece tek bir görüntü kullanılarak ve vücut parçalarının görüntü üzerinde kapladığı alandan yola çıkarak yapılmış ilk çalışmadır.

- Ayrıca yine literatürdeki araştırmalarımıza göre, hayvanların vücut parçalarının tespiti için detectron2 kütüphanesinin kullanılarak istatistik analizlerin ve tahminlerin yapıldığı ilk ve tek çalışmadır.

Bu makalenin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümde çalışma kapsamında kullanılan veri kümesinin nasıl oluşturulduğu ve veri kümesi üzerinde uygulanan görüntü işleme ve makine öğrenmesi teknikleri anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde , çalışma kapsamında alınan deney sonuçları ve bunlarla ilgili tartışmalara; sonuç bölümünde ise sonuç ve gelecek çalışmalar bulunmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada, canlı hayvanların görüntülerinin işlenmesi ve analiz edilmesi aşamasında YOLO (You Only Look Once) tabanlı bir derin öğrenme modeli olan Mask-RCNN algoritması ve hayvanların ağırlıklarının tahmin edilmesi aşamasında ise 5 farklı makine öğrenmesi algoritması kullanılmaktadır. Veri seti, sahada toplanan, kesime gitmeden önce tartılan sığırların görüntülerinden oluşmaktadır ve bu bakımından çalışmanın sonuçları gerçek dünya senaryolarına uygun bir şekilde test edilmiş ve tahminleme algoritmalarının performansları karşılaştırılmıştır. Deneyler, farklı tahminleme algoritmalarının canlı hayvan ağırlığının tespiti için etkili olup olmadığını belirlemek için tasarlanmıştır. Bu bölümde, kullanılan veri seti, deney tasarımı ve kullanılan makine öğrenmesi algoritmaları ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

2.1. Veri Toplama (Data Collection)

Veri toplama, görüntü işleme uygulamalarının temelini oluşturur ve bu sürecin niteliği, algoritmanın performansına önemli ölçüde etki etmektedir. Elde edilen veriler, 2022 yılında Türkiye'nin Balıkesir şehrinde bulunan büyük ölçekli bir besi çiftliğinde kaydedilmiştir. Çiftlikte yaklaşık 2000 adet sığır arasından farklı ırklardan toplamda 500 adet sığırın görüntüleri toplanmıştır. Bu görüntüler, mobil cihaz kamerası ile 1920 × 1080 piksel çözünürlüğünde çekilmiştir. Kabul kriteri olarak sadece yan cepheden alınmış görüntüler seçilmiş ve uygunsuz olanlar elemine edilerek toplamda 210 adet sığır görüntüsü elde edilmiştir.

Bu çalışmanın amacına uygun, kaliteli ve standart veri toplamak amacıyla Dart programlama dili kullanılarak iki ayrı Android tabanlı mobil uygulama geliştirilmiştir. Birinci uygulama, kamera modunda çalışırken diğer uygulama ise veri toplayan cihazın uzaktan kontrolünü sağlamak amacıyla ara yüz olarak kullanılmıştır.

Birinci uygulamanın kamera modunda çalışan amacı, belirli bir mesafeden ve yükseklikten gelen komutlar aracılığıyla sığırların seri bir şekilde 10 adet görüntüsünü çekmek ve her bir görüntü üzerine meta verileri kaydetmektir. Aynı zamanda elde edilen görüntüleri meta verileriyle birlikte sunucuya yedeklemek de sorumluluğundadır. İkinci uygulama ise kumanda modunda çalışır ve tartılan sığırların küpe numarası, cinsiyeti, ağırlığı gibi bilgilerin girilmesinden sorumludur. Bu uygulama ayrıca kamera modundaki uygulamaya komut göndererek tartım sırasında sığırın kantardan çıkması esnasında görüntü alınmasını sağlar.

Bu çalışmanın veri toplama süreci, Balıkesir'in Susurluk ilçesinde faaliyet gösteren bir besi çiftliğinde gerçekleştirilmiştir. Kantardan çıkan sığırların çevresel etkilerini göz önünde

bulundurarak, kamera modunda çalışan telefon yerden 80 cm yükseklikte ve tartım alanına yaklaşık 250 cm mesafede konumlandırılmıştır. Çekim öncesi, görüntü çözünürlüğü 1920x1080 olarak belirlenmiştir. Elde edilen meta verilerin bir örneği Tablo 1'de sunulmuştur. Bu çalışmanın metodolojisi, yüksek kaliteli veri toplama ve bu verilerin analizi üzerine odaklanmıştır.

Tablo 1. Örnek veri kümesi (Sample dataset)

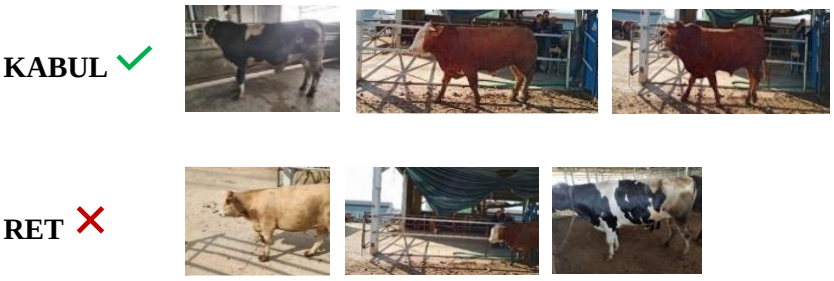
Cins/Irk	Padok No	Küpe No	Cinsiyet	Canlı Ağırlık (kg)
Limuzin / #001	3B-4	0211	Düve	627
Limuzin / #002	3B-4	0436	Düve	678
Limuzin / #003	3B-4	8987	Dana	720
Limuzin / #004	3B-4	0236	Düve	611
Limuzin / #005	3B-4	4117	Dana	744
Holstein / #001	3B-2	2618	Dana	714
Holstein / #002	3B-2	5447	Düve	605
Holstein / #003	3B-2	2599	Dana	696
Holstein / #004	3B-2	9276	Dana	668
Holstein / #005	3B-2	9285	Düve	635

Veri toplama süreci, farklı sığır cinslerine ait (Holstein, Simental, Sarole, Limuzin, Montofon ve RedAngus) ineklerin görüntülerinin alınmasıyla gerçekleştirilmiştir. Ancak, belirli kalite ve standart uygunluğu gereksinimleri göz önüne alındığında, toplanan görüntülerin bazıları manuel olarak veri setinden çıkarılmıştır. Görüntülerin çıkarılma nedenleri arasında, ineğin tam vücudunun görünmediği, yan görünümün eksik olduğu, düşük görüntü netliği ve çekim sırasında hayvanın hareket etmesi nedeniyle görüntünün bulanık olduğu durumlar bulunmaktadır.

Tablo 2. Veri kümesindeki ırk dağılımı (Breed distribution of the dataset)

Limuzin	Holstein	Montofon	RedAngus	Şarole	Simental
76	60	11	6	25	32

Toplamda 210 adet görüntü kullanılarak oluşturulan veri setinde farklı kategorilerde kabul edilen ve reddedilen görsel örnekler mevcuttur. Tablo 2'de görüntülerin kategori bazındaki dağılımları gösterilmektedir. Kabul edilen örnekler, araştırmanın hedefleri doğrultusunda yeterli kalite ve içerik kriterlerini sağlayan görüntüleri içermektedir. Öte yandan, reddedilen örnekler çekilen görüntülerdeki ineklerin tüm vücudu, yan görünümü veya görüntü netliği gibi gereksinimleri taşımadığı durumları yansıtmaktadır. Kabul edilen ve reddedilen örnekler, Şekil 1'de görsel olarak sunulmuştur. Bu dikkatli veri seçimi ve ayıklama işlemi, elde edilen veri setinin kalitesini ve güvenilirliğini artırmayı amaçlamaktadır.



Şekil 1. Kabul / ret edilen görüntülerden örnekler (Examples of accepted / rejected images)

Çalışmamız kapsamında geliştirilmiş olan her iki mobil uygulamanın temel hedefi projenin geliştirilmesi aşamasında verinin daha hızlı, sağlıklı ve gerçekçi biçimde toplanmasıdır. Bununla beraber projemiz kapsamında; son kullanıcının kullanmasını planladığımız gerçek zamanlı olarak müşteriye, alınan görüntünün doğruluk oranı hakkında geri-besleme verebilecek kabiliyette bir mobil uygulamanın geliştirilmesi ve test çalışmaları büyük bir motivasyon ve titizlikle ile devam etmektedir.

2.2. Görüntü İşleme (Image Processing)

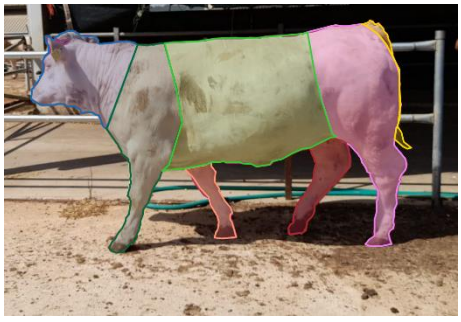
Derin öğrenme yöntemleri, bilgisayarlı görü, nesne tanıma, nesne sınıflandırma gibi bir çok yapay zeka uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır [22]. Evrişimli sinir ağları, birçok evrişim, dense, dropout gibi katmanlardan veriyi geçirerek özellik çıkartmaya yarayan bir derin öğrenme yöntemidir [23]. İleri beslemeli bir mimariye sahip olan bu ağlar, tam ilişkili katmanlarla oluşturulan yapay sinir ağlarına kıyasla daha iyi özellik belirleme yeteneğine sahiptir [24,25]. Günümüzde nesne algılama alanında en etkili ve yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri Evrişimli Sinir Ağları'dır [26].

Evrişimli sinir ağları eğitim aşamasında ağın karmaşık ve veri setinin büyük olması gibi işlemci gücünü zorlayıcı etmenler nedeni ile merkezi işlem birimi (cpu) yerine genellikle grafik işlemci birimi (gpu) kullanılır [27]. Görüntü işleme aşamasında ana hedef, öncelikle hayvanın görüntü üzerindeki konumunu belirlemektir. Bu amaçla, poligon seçim tekniği kullanılarak etiketleme aşamasında Şekil 2'de görüldüğü gibi sığırın vücut hatları genel olarak belirlenmiştir.



Şekil 2. Sığır çevresi etiketleme işlemi (Cattle girth labeling process)

Genel hatları belirlenen sığırın vücut parçaları 7 segmente ayrılmıştır. Bu segmentler baş bölgesi, sağ ön bacak, sağ arka bacak, sol ön bacak, sol arka bacak, gövde ve kuyruktur. Bu segmentler etiketleme yapılırken belirli renklerle temsil edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Sığır vücut segmentasyonlarına göre etiketleme işlemi (Cattle body segmentations labeling process)

Elde edilen etiketli görüntüleri kaydederken dosya ismi olarak hayvanın metadata bilgisi *"[hayvanNo]_[ırkı]_[dana|duve]_ağırlık_[sol|sağ]_[000].jpg"* formatında kaydedilmiştir.

hayvanNo, her hayvan için benzersiz bir kimlik numarasıdır ve sıralı bir numara ya da kulak küpe numarası yazılabilir. *ırkı,* hayvanın ırk bilgisidir. *dana|düve,* hayvanın cinsiyetidir. *ağırlık,* hayvanın canlı ağırlığıdır. *sol|sağ,* hayvanın kafasının bakış yönüdür. 000: aynı hayvanın birden fazla görüntüsü var ise her birinin benzersiz sıra numarasıdır.

Oluşturulan metadatalar, Mask-RCNN algoritması ile işlenmiş ve nesne tespit işlemi gerçekleştirilmiştir. Mask-RCNN, bir nesne tanıma algoritmasıdır ve He vd. [28] tarafından 2018 yılında geliştirilmiştir. Bu algoritma sayesinde her bir görüntüdeki, hayvanın varlığı, varsa konumu ve segmentleri belirlenmiştir. Elde edilen bu veriler piksel yoğunlukları hesaplanarak makine öğrenmesinde girdi olarak kullanılmıştır. *Mask-RCNN* algoritması çalışmamızda mevcut varsayılan parametre değerleri ile kullanıldı, herhangi bir değişiklik yapılmadı. Deney ortamında kullanılan modelin adı "*mask_rcnn_R_50_FPN_3x.yaml"*

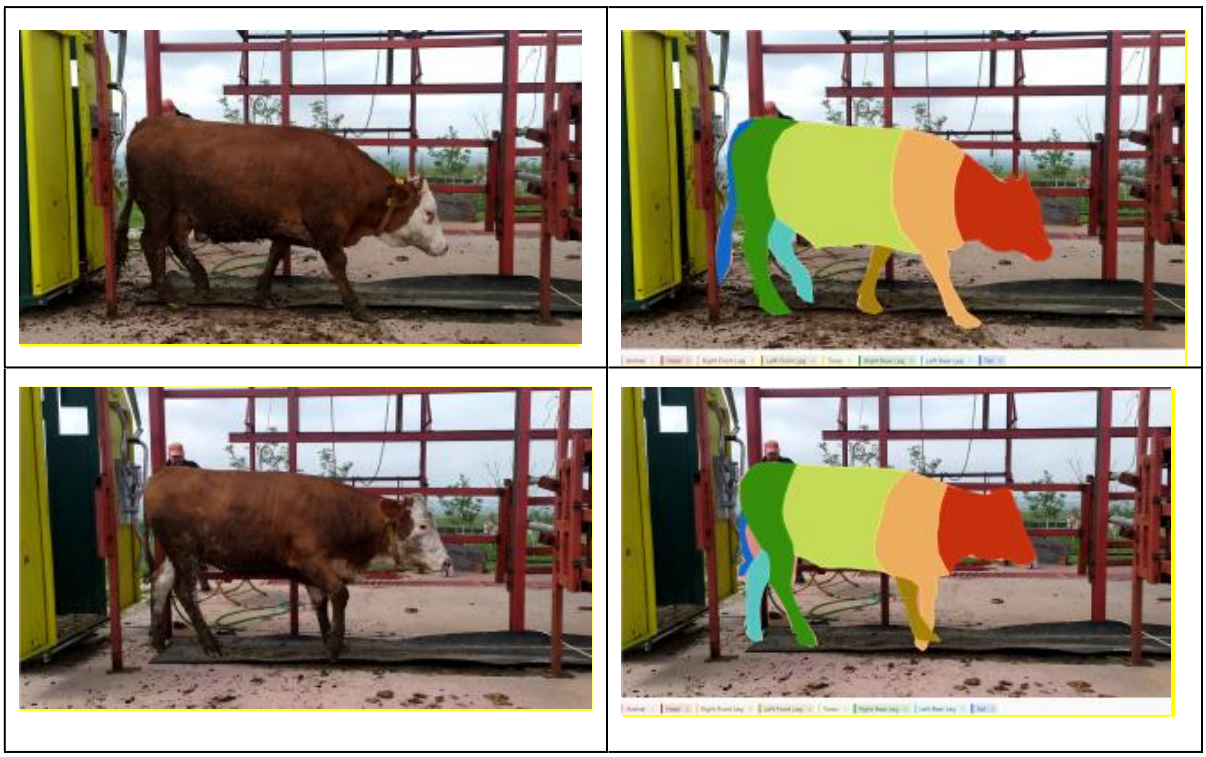
olarak ifade edilmektedir. Deney ortamında kullanılan parametre değerleri Şekil 4'te verilmektedir.

Çalışma kapsamındaki deney ortamında *mask_rcnn* algoritması için bazı input ve output görüntülerinden örnekler Şekil 5'te verilmektedir.

```
MODEL:
  META_ARCHITECTURE: "GeneralizedRCNN"
  BACKBONE:
    NAME: "build_resnet_fpn_backbone"
  RESNETS:
    OUT_FEATURES: ["res2", "res3", "res4", "res5"]
  FPN:
    IN_FEATURES: ["res2", "res3", "res4", "res5"]
  ANCHOR_GENERATOR:
    SIZES: [[32], [64], [128], [256], [512]]  # One size for each in feature map
    ASPECT_RATIOS: [[0.5, 1.0, 2.0]]  # Three aspect ratios (same for all in feature maps)
  RPN:
    IN_FEATURES: ["p2", "p3", "p4", "p5", "p6"]
    PRE_NMS_TOPK_TRAIN: 2000  # Per FPN level
    PRE_NMS_TOPK_TEST: 1000  # Per FPN level
    # Detectron1 uses 2000 proposals per-batch,
    # (See "modeling/rpn/rpn_outputs.py" for details of this legacy issue)
    # which is approximately 1000 proposals per-image since the default batch size for FPN is 2.
    POST_NMS_TOPK_TRAIN: 1000
    POST_NMS_TOPK_TEST: 1000
  ROI_HEADS:
    NAME: "StandardROIHeads"
    IN_FEATURES: ["p2", "p3", "p4", "p5"]
  ROI_BOX_HEAD:
    NAME: "FastRCNNConvFCHead"
    NUM_FC: 2
    POOLER_RESOLUTION: 7
  ROI_MASK_HEAD:
    NAME: "MaskRCNNConvUpsampleHead"
    NUM_CONV: 4
    POOLER_RESOLUTION: 14
DATASETS:
  TRAIN: ("coco_2017_train",)
  TEST: ("coco_2017_val",)
SOLVER:
  IMS_PER_BATCH: 16
  BASE_LR: 0.02
  STEPS: (60000, 80000)
  MAX_ITER: 90000
INPUT:
  MIN_SIZE_TRAIN: (640, 672, 704, 736, 768, 800)
VERSION: 2
```

Şekil 4. Çalışma kapsamında kullanılan *mask_rcnn* algoritmasına ait parametre değerleri[1] (Parameter values of the *mask_rcnn* algorithm used in the study)

[1] https://github.com/facebookresearch/detectron2/blob/main/configs/Base-RCNN-FPN.yaml



Şekil 5. *Mask rcnn* algoritması ile deney ortamındaki input ve output görüntülerinden örnekler (Examples of ınput and output ımages from experimental setup using the *mask r-cnn* algorithm)

2.3. Makine Öğrenmesi (Machine Learning)

Görüntü işleme sonucunda elde edilen piksel yoğunluklarına karşılık gelen canlı ağırlığı içeren veri kümesi titizlikle oluşturulmuştur ve bu veri kümesi, makine öğrenmesi tekniklerinde kullanılmaktadır. Veri kümesi üzerindeki metadata bilgilerinde yer alan canlı ağırlık bilgisi, çıktısı olarak ele alınmışken görüntü işleme adımından elde edilen alanlar ve metadata bilgilerinde yer alan ırk, yön, cinsiyet bilgileri ise girdi olarak kullanılmıştır. Hazırlanan veri kümesi üzerinde "lineer regresyon", "polinomal regresyon", "destek vektör regresyonu", "karar ağacı regresyonu" ve "rassal orman regresyonu" olmak üzere toplamda beş farklı regresyon algoritması denenmiştir. Bu algoritmalar kullanılarak canlı ağırlık tahminlemesi gerçekleştirilmiştir.

Tüm algoritmalarda ortak bir yaklaşım olarak veri seti, test ve eğitim olmak üzere iki ayrı bölüme ayrılmıştır. Eğitim veri seti, modelin öğrenilmesi için kullanılan veri setidir. Test veri seti ise eğitim veri setinde geliştirilen modelin değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Test verisinden elde edilen sonuçlar, "Ortalama Mutlak Yüzde Hata" (Mean Absolute Percentage Error) metriği ile değerlendirilmiştir. Bu metrik kullanılarak hesaplanan hata değeri, 1'den çıkartılarak algoritmanın doğruluk oranı belirlenmiştir.

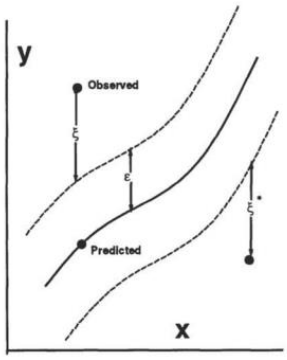
Doğrusal (lineer) regresyon, iki değişken arasındaki ilişkiyi modellemek için gözlemlenen verilere dayalı olarak doğrusal bir denklem oluşturmaya çalışan istatistiksel bir yöntemdir. Bu yöntemde bir değişken bağımsız değişken olarak kabul edilirken diğer değişken bağımlı değişken olarak ele alınır. Bağımsız değişkenlere (X) adı verilirken bağımlı değişkene (Y) adı verilir. Bağımlı ve bağımsız değişken ilişkisi Denklem (1) şeklindeki doğrusal bir denklemle ifade edilir.

$$Y = aX + b \quad (1)$$

Polinomal Regresyon, doğrusal olmayan ilişkilerin incelendiği durumlarda kullanılan bir analiz yöntemidir. Polinom regresyon, istatistik alanında bağımsız değişken x ile bağımlı değişken y arasındaki ilişkinin, x'in n'inci dereceden bir polinomu olarak Denklem (2) formülü ile ifade edilir.

$$Y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \ldots + a_nx^n \quad (2)$$

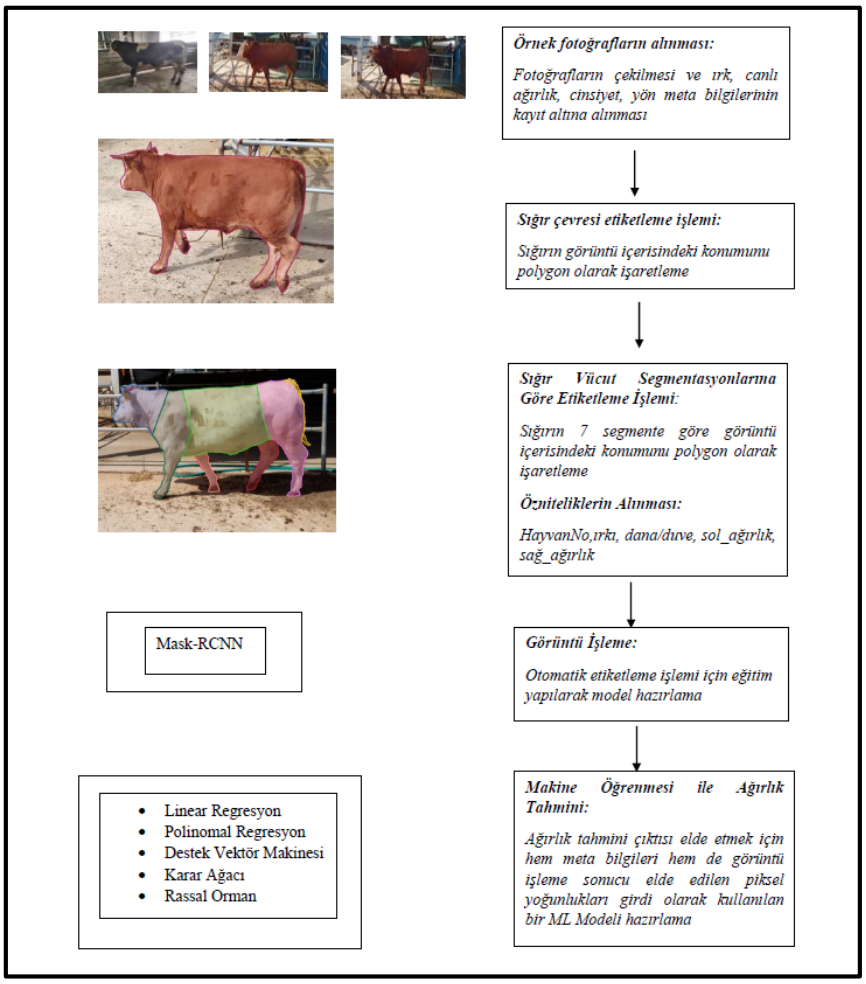
Destek Vektör Regresyonu (DVR), problem uzayının boyutundan bağımsız olarak optimizasyon yaptığı için yüksek boyutlu doğrusal olmayan problemler için daha başarılı olmaktadır [29, 39]. Diğer regresyon modelleri bir eğri uydurma üzerinde çalışırken, DVR hesaplanan eğrinin gerçek veriye yakın olması için ε uzaklıkta paralel iki eğri şeklinde bir çıkartım yapar (Şekil 6) ve hata değerlerini minimize eder.



Şekil 6. Destek vektör regresyonu parametreleri (Support vector regression parameters)

Karar ağacı, regresyon veya sınıflandırma modellerini oluşturmak için ağaç yapısı şeklinde bir yaklaşım sunar. Veri kümesini giderek daha küçük alt kümelere ayırırken ilgili bir karar ağacı aşamalı olarak geliştirilir. Bu ağaç yapısı hem kategorik hem de sayısal verileri işleme yeteneğine sahiptir [41].

Rassal ormanlar (RO), birçok bağımsız ve rastgele oluşturulmuş karar ağacının birleşimidir [40]. Genelleme hatası, ormandaki ağaç sayısı arttıkça belirli bir sınıra kadar düşer. Bu hata oranı, ormandaki bireysel ağaçların doğruluğu (gücü) ve bu ağaçlar arasındaki tahmin benzerliği (korelasyon) ile ilişkilidir. Güçlü ve birbirinden bağımsız (düşük korelasyonlu) ağaçlar, daha düşük genelleme hatası sağlar [30]. RO algoritması, birden fazla karar ağacının çıktılarının oranlanmasıyla aşırı öğrenme ve ezberlemenin önüne geçerken, her bir ağaç için farklı veri setleri kullanarak aykırı veri sorununu da minimuma indirir [31]. Çalışmanın akış diyagramı Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Akış diyagramı (Flowchart)

3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Yapılan çalışmalar, güçlü ekran kartı özelliklerine sahip görüntü işleme sunucusunda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca veri toplama için de mobil cihaz kullanılmış olup, cihazlara ait bilgiler Tablo 3'te yer almaktadır

Tablo 3. Deney için kullanılan donanım özellikleri (Hardware specifications used for the experiment)

İşlemci	Ekran Kartı	Ram	Sabit Disk
Görüntü İşleme Sunucusu (MAGNETAR CONN Workstation) Ubuntu 18.04 Desktop Edition			
INTEL CORE i9 10900X 4.50GHz, 10 Çekirdek	2 Adet Nvidia RTX 3090 24GB 384Bit	16GB 3000MHz DDR4	512GB NVMe
Mobil Cihaz (Xaomi redmi note 7) Android			
SnapDragon 660, 2.20 GHz, 8 Çekirdek	-	4 GB	64 GB

Çalışma için 210 adet görüntüden oluşan bir veri seti kullanılmıştır. Verilerde herhangi bir veri arttırma tekniği kullanılmamıştır. Eldeki veri kümesi uygulanacak tüm algoritmalar için %80'i eğitim kümesi, %20'si ise test kümesi için kullanılmıştır. Makine öğrenmesinde 5 farklı algoritma çalıştırılarak elde edilen sonuçlar tablo olarak paylaşılmıştır.

Tüm algoritmalar 10 farklı kez koşturularak test edilmiş ve en iyi sonuçlar ortalama hesaplanarak "yüzde doğruluk oranı" olarak Tablo 4'te sunulmuştur. Doğruluk oranları hesaplanırken, öncelikle Mean Absolute Percentage Error değeri hesaplanmış ve elde edilen bu değer 1'den çıkartılarak doğruluk oranı hesaplanmıştır. Bu deneyler sonucunda elde edilen sonuçların en küçük, en büyük, ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Çalışmamızın sonuçlarını analiz etmek için hem MAPE hem de MSE değerleri hesaplanmıştır. MAPE modelin ürettiği tahmin değerleri ile gerçek değerler arasındaki mutlak yüzde farklarının ortalamasını hesaplar. Bu nedenle, bu metrik ortalama hatayı gerçek değerin yüzdesi olarak ifade etmektedir. MSE ise orijinal ve tahmin edilen değerler arasındaki karesel farkların ortalamasını temsil eder. MAPE ve MSE denklemleri sırasıyla Denklem (3) ve Denklem (4)'te verilmiştir [42].

$$MAPE = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i - \hat{y_i}}{y_i}\right| \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y_i})^2 \quad (4)$$

n yapılan ölçüm sayısını, y_i gerçek değeri ve $\hat{y_i}$ ise modelin ürettiği tahmin değerini temsil etmektedir.

Tablo 4 üzerinde raporlanan deney sonuçlarına göre, sığırlar üzerindeki en başarılı ağırlık tahmini %96 başarı yüzdesi ile doğrusal regresyon algoritması ile alındı. Doğrusal regresyon algoritmasını, %93 başarı oranı ile destek vektör makinesi ve rassal orman algoritması, %90 başarı oranı ile karar ağacı algoritması ve %47 başarı oranı ile polinomal regresyon algoritması izlemektedir. Doğrusal regresyondna daha yüksek dereceli olan polinomal regresyon modellerinin bağımsız değişkenlerden ötürü bazı tahminleme molellerinde doğrusal regresyone kıyasla başarısız olabileceklerine yönelik literatürde bazı analizler bulunmaktadır [36-38]. Regresyon modellerinden özellikle doğrusal regresyon algoritmasının tahmin sistemleri üzerindeki başarısı bilinmektedir. Sınıflandırma için oldukça iyi sonuçlar alınabilen destek vektör makineleri algoritmasının regresyon versiyonu olan destek vektör regresyon algortimasının literatürdeki başka tarımsal çalışmalarda da [29, 31-32] kullanıldığı ve iyi sonuçlar alındığı görülmektedir. Destek vektör regresyonu uyguladığımızda, destek vektör algoritmasındaki gibi çizeceğimiz aralığın en küçük hata oranı ile maksimum noktayı içerisine alması hedeflenmektedir [29]. Sığırların ağırlıklarını tahmin ettiğimiz çalışmamızda, karar ağaçları algoritmasının literatürdeki pekçok tahminleme çalışmalarında [34-35] iyi sonuçlar verdiği gibi burada da iyi sonuçlar vermesini, bu algoritmanın çalıştığı veri kümesi üzerinde özellik ve hedefe göre karar vermeye çalışan karakteristik yapısından kaynaklandığını yorumlayabiliriz. Yine, rassal orman algoritması da oluşturduğu çok sayıda ağaç yapısından çıkan sonuçlardan en iyi sonuçları oylama yaparak bulmaya çalıştığından dolayı tahiminleme modellerinde [30-31] yüksek başarı verdiği gözlenmektedir. Özetlemek gerekirse Tablo 4'te sunulan deney sonuçlarına göre görüntü işleme

algoritmalarından Mask-RCNN algoritması ve makine öğrenmesi algoritmalarından doğrusal regresyon modeli ile %96'lık bir tahmin başarısı elde edilmiştir. Makine öğrenmesi algoritmalarının başarı yüzdeleri Tablo 5'te gösterilmektedir.

Tablo 4. Makine öğrenmesi algoritmalarının en küçük, en büyük, ortalama ve standart sapma değerleri (Minimum, maximum, mean, and standard deviation values of the machine learning algorithms)

Makine Öğrenmesi Algoritması	En Küçük	En Büyük	Ortalama Değer	Standart Sapma
Gerçek Değer				
Canlı Ağırlık	537	696	634,421	50,816
Tahmini Değer				
Doğrusal Regresyon	544	712	626,816	45.760
Polinomal Regresyon	-50	1285	523,010	376,905
Destek Vektör Regresyonu	626	632	628,867	1,851
Karar Ağacı	565	696	660,895	48,156
Rassal Orman	563	676	638,563	31,419

Tablo 5. Makine öğrenmesi algoritmalarının başarı yüzdeleri (Performance accuracy percentages of the machine learning algorithms)

Doğrusal Regresyon	Polinomal Regresyon	Destek Vektör Regresyonu	Karar Ağacı	Rassal Orman
%96	%47	%93	%90	%93

Aynı veri kümesi üzerinde Tablo 4'te sıralanan algoritmalara ilaveten XGBRegressor ve GradientBoostingRegressor algoritmalarını da çalıştırdık ve MAPE ölçeğine göre sırasıyla %91.77 ve %93.86 oranında, MSE ölçeğine göre sırasıyla %90.95 ve %92.86 oranında başarılı olduklarını gözlemledik.

Çalışma kapsamında özellikle veri toplama aşamasında bazı kısıtlar ve varsayımlar bulunmaktadır. Bu çalışma boyunca hayvanlardan alınan tüm görüntülerin çekimleri, 3 mt uzaklıktan ve 1,5 mt yükseklikten ve yan profilden yani hayvan sağa ya da sola gider iken yapıldı. Modelin eğitimleri "Limuzin, Holstein, Montofon, RedAngus, Şarole ve Simental" isimli 6 ırk için yapıldı. Başka ırklar için model eğitimlerinin yenilenmesi de yine oluşturduğumuzun tasarımın kısıtları arasındadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Hayvanların ağırlık ve ırklarını belirlemek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu çalışmada, sığırların vücut segmentasyonuna göre deneyler yapıldı ve elde edilen sonuçlar, sığırların ırkı ve ağırlığı değerlendirilirken vücut segmentasyonunun önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Ancak, bu sistemin pratik uygulamasında, kamera konumu, arka plan aydınlatması gibi çiftlik koşullarının dikkate alınması gerekmektedir.

Sığırların vücut ağırlığı ölçümü; izleme, verimlilik, hastalık tespiti ve özellikle kesime gönderilecek sığırların hedef alındığı bir süreçtir. Bu çalışma, otomatik bir şekilde ağırlık ve ırk tahminleme sisteminin temelini atmaktadır. Her ne kadar sabit bir noktaya kamera koymak ve görüntüleri o şekilde toplamak güneş ışınları ve aydınlatma koşulları açısından daha verimli gibi görünse bu çalışmanın amacı kullanıcıların sahip olduğu mobil cihaz üzerinden bu işlemleri yapabilmektir. Bu amaçla Görüntü işleme algoritmalarından Mask-RCNN algoritması ve makine öğrenmesi algoritmalarından doğrusal regresyon modeli ile %96'lık bir tahmin başarısı elde edilmiştir.

Gelecek çalışmalara öneri olarak, veri seti genişletilerek ağırlığı daha az ve fazla olan hayvanların da eğitim setine eklenmesi ve deneylerin tekrarlanması tavsiye edilir. Ayrıca daha farklı ırkların da verileri toplanarak deneyler yapılabilir. Her ne kadar son teknoloji algoritmalar kullanılmış olsa da diğer algoritmaların da test edilip sonuçları karşılaştırılabilir.

Bu alanda yeni teknolojilerin ve metodolojilerin kullanılması hayvancılık sektörü için büyük bir potansiyele sahiptir. Tarım ve hayvancılığın dijital dönüşüm sürecine ayak uydurabilmesi için başlatılmış bir çalışmanın bir ürünüdür.

Yeni hayvan ırkları için model eğitimlerimizin yapılması ve modelimizin yeni hayvan ırklarına adaptasyonunun hızlı olması planladığımız gelecek

çalışmalarımız arasındadır. Ayrıca son kullanıcının kullanmasını planladığımız gerçek zamanlı olarak müşteriye, alınan görüntünün doğruluk oranı hakkında geri-besleme verebilecek kabiliyette bir mobil uygulamanın hayata geçirilmesi de yine hedeflerimizin arasındadır

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma 7220768 no'lu proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Ayrıca desteklerinden ötürü Doğuş Üniversitesi ve OGZA Teknoloji Anonim Şirketine teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI
(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The authors of this article declare that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Yazarlar eşit oranda katkı sağlamıştır.

The authors contributed equally.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Koç, A., & Akman, N. (2003). Farklı Ağırlıkta Besiye Alınan Ithal Edilmiş Siyah-Alaca Tosunların Besi Gücü Ve Karkas Özellikleri. Hayvansal Üretim, 44(1), 26-36.

[2] Kumlu, S. (2000). Damızlık Ve Kasaplık Sığır Yetiştirme. Ankara: Türkiye Damızlık Sığır Yetiştiricileri Merkez Birliği Yayınları. Yayın No: 3.

[3] Demir, C., & Aydın, A. (2021). Büyükbaş Hayvancılıkta Görüntü Işleme Ile Sağlık Ve Refah Tespiti. Lapseki Meslek Yüksekokulu Uygulamalı Araştırmalar Dergisi, 2(4), 1-15. Https://Dergipark.Org.Tr/En/Pub/Ljar/Issue/67817/1015944

[4] Gjergji, M., Weber, V. A. M., Silva, L. O. C., Gomes, R. C., Araújo, T. L. A. C., Pistori, H., & Alvarez, M. (2020). Deep Learning Techniques For Beef Cattle Body Weight Prediction. In Ieee Computational Intelligence Society, 2020 International Joint Conference On Neural Networks (Ijcnn 2020). Glasgow, Scotland, United Kingdom, 1–11.

[5] Zehender, G., Cordella, L. P., Chianese, A., Ferrara, L., Del Pozzo, A., Barbera, S., Tonielli, R. (1996). Image Analysis In Morphological Animal Evaluation: A Group For The Development Of New Techniques In Zoometry. Animal Genetic Resources/Resources Génétiques Animales/Recursos Genéticos Animales, 20, 71-79.

[6] Akman, N. (1998). Pratik Sığır Yetiştiriciliği. Ankara: Türkiye Ziraat Mühendisleri Birliği Vakfı Yayını.

[7] Heinrichs, A. J., Rogers, G., & Cooper, J. (1992). Predicting Body Weight And Wither Height In Holstein Heifers Using Body Measurements. J. Dairy Sci., 75, 3576–3581.

[8] Pena, H. C., Machado, F. S., Campos, M. M., Tomich, T. R., Pereira, L. G. R., & Jayme, C. G. (2015). Prediçao Do Peso Vivo A Partir De Medidas Corporais Em Animais Girolando. In Embrapa Gado De Leite-Resumo Em Anais De Congresso (Alice), 15.

[9] Reis, G. L., Albuquerque, F. H. M. A. R., Valente, B. D., Martins, G. A., Teodoro, R. L., Ferreira, M. B. D., ... Madalena, F. E. (2008). Prediçao Do Peso Vivo A Partir De Medidas Corporais Em Animais Mestiços Holandˆes/Gir.

[10] Weber, V. A. M., Weber, F. De L., Oliveira, A. Da S., Astolfi, G., Menezes, G. V., Porto, J. V. De A., Pistori, H. (2020). Cattle Weight Estimation Using Active Contour Models And Regression Trees Bagging.

[11] Nasirahmadi, A., Edwards, S. A., & Sturm, B. (2017). Implementation Of Machine Vision For Detecting Behaviour Of Cattle And Pigs. Livestock Sci.

[12] Wurtz, K., Camerlink, I., D'eath, R. B., Fernandez, A. P., Norton, T., Steibel, J., & Siegford, J. (2019). Recording Behaviour Of Indoor-Housed Farm Animals Automatically Using Machine Vision Technology: A Systematic Review.

[13] Qiao, Y., Truman, M., & Sukkarieh, S. (2019). Cattle Segmentation And Contour Extraction Based On Mask R-Cnn For Precision Livestock Farming. Comput. Electron. Agric.

[14] Xu, B., Wang, W., Falzon, G., Kwan, P., Guo, L., Chen, G., & Schneider, D. (2020). Automated Cattle Counting Using Mask R-Cnn In Quadcopter Vision System. Comput. Electron.

[15] Jun, K., Kim, S. J., & Ji, H. W. (2018). Estimating Pig Weights From Images Without Constraint On Posture And Illumination. Comput. Electron.

[16] Bercovich, A., Edan, Y., Alchanatis, V., Moallem, U., Parmet, Y., Honig, H., ... Halachmi, I. (2013). Development Of An Automatic Cow Body Condition Scoring Using Body Shape Signature And Fourier Descriptors.

[17] Spoliansky, R., Edan, Y., Parmet, Y., & Halachmi, I. (2016). Development Of Automatic Body Condition Scoring Using A Low-Cost 3-Dimensional Kinect Camera.

[18] Song, X., Bokkers, E., Van Der Tol, P., Koerkamp, P. G., Van Mourik, S. (2018). Automated Body Weight Prediction Of Dairy Cows Using 3-Dimensional Vision.

[19] Cozler, Y. L., Allain, C., Xavier, C., Depuille, L., Caillot, A., Delouard, J., ... Faverdin, P. (2019). Volume And Surface Area Of Holstein Dairy Cows Calculated From Complete 3d Shapes Acquired Using A High-Precision Scanning System: Interest For Body Weight Estimation. Comput. Electron.

[20] Nir, O., Parmet, Y., Werner, D., Adin, G., & Halachmi, I. (2018). 3d Computer-Vision System For Automatically Estimating Heifer Height And Body Mass. Biosyst.

[21] Cominotte, A., Fernandes, A., Dorea, J., Rosa, G., Ladeira, M., Vancleef, E., ... Neto, O. M. (2020). Automated Computer Vision System To Predict Body Weight And Average Daily Gain In Beef Cattle During Growing And Finishing Phases. Https://Doi.Org/10.1016/J.Livsci.2019.1039feature04.

[22] Gürkan, H., & Hanilçi, A. (2020). Evrişimsel Sinir Ağı Ve Qrs Imgeleri Kullanarak Ekg Tabanlı Biyometrik Tanıma Yöntemi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26(2), 318-327.

[23] Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2015). Deep Learning. The Mit Press, Cambridge, Massachusetts, United States.

[24] Indolia, S., Goswami, A. K., Mishra, S. P., & Asopa, P. (2018). Conceptual Understanding Of Convolutional Neural Network-A Deep Learning Approach. Procedia Computer Science, 132, 679-688.

[25] Nebauer, C. (1998). Evaluation Of Convolutional Neural Networks For Visual Recognition. Ieee Transactions On Neural Networks, 9(4), 685-696. Doi: 10.1109/72.701181.

[26] Inik, Ö., & Ülker, E. (2017). Derin Öğrenme Ve Görüntü Analizinde Kullanılan Derin Öğrenme Modelleri. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 6(3), 85-104.

[27] Elmas, B. (2021). Türkiye'deki Kelebek Türlerinin Basamakli Evrişimli Sinir Ağlari Ile Siniflandirilmasi. Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(3), 568-587. Doi: 10.36306/Konjes.844847

[28] He, K., Gkioxari, G., Dollár, P., & Girshick, R. (2017). Mask R-Cnn. In Proceedings Of The Ieee International Conference On Computer Vision (Pp. 2961-2969).

[29] Drucker, H., Burges, C.J. C., Kaufman, L., Smola, A., Vapnik, V. 1997. Support vector regression machines, Advances in Neural Information Processing Systems, Cilt. 9, s. 155-161.

[30] Breiman, L. (2001), Random forests. Machine learning, 45(1), 5-32.

[31] Cosgun, C. (2023). İçi Beton Dolu Dairesel Kesitli Çelik Boruların Eksenel Yük Kapasitelerinin Yapay Sinir Ağları ve Rassal Orman Yöntemleri İle Tahmini. Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi, 11(2), 564-574. https://doi.org/10.21923/jesd.1032191

[32] Alonso, J., Castañón, Á. R., & Bahamonde, A. (2013). Support Vector Regression to predict carcass weight in beef cattle in advance of the slaughter. Computers and electronics in agriculture, 91, 116-120.

[33] Tırınk, C., Piwczyński, D., Kolenda, M., & Önder, H. (2023). Estimation of body weight based on biometric measurements by using random forest regression, support vector regression and CART algorithms. Animals, 13(5), 798.

[34] Sarini, N. P., & Dharmawan, K. (2023). Estimation of bali cattle body weight based on morphological measurements by machine learning algorithms: random forest, support vector, K-Neighbors, and extra tree regression. J Adv Zool, 44(3), 1-9.

[35] Grzesiak, W., Rzewucka-Wójcik, E., Zaborski, D., Szatkowska, I., Kotarska, K., & Dybus, A. (2014). Classification of daily body weight gains in beef cattle via neural

Networks and decision trees. Applied Engineering in Agriculture, 30(2), 307-313.
[36] Bakshi, A., & Prasad, A. (2021, June). Robust linear regression: Optimal rates in polynomial time. In Proceedings of the 53rd Annual ACM SIGACT Symposium on Theory of Computing (pp. 102-115).
[37] Kikechi, C. B. (2020). On local polynomial regression estimators in finite populations. Int. J. Stats. Appl. Math, 5, 58-63.
[38] Wei, J., Chen, T., Liu, G., & Yang, J. (2016). Higher-order multivariable polynomial regression to estimate human affective states. Scientific reports, 6(1), 23384.
[39] Gök, M. (2017). Makine öğrenmesi yöntemleri ile akademik başarının tahmin edilmesi. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 5(3), 139-148.
[40] Toğaçar, M. (2021). Measuring the Security Effectiveness of Machine Learning Methods Used Against Cyber Attacks in Web Applications. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 9(4), 608-620. https://doi.org/10.29109/gujsc.950639.
[41] Taşkın, G. G. E. V. Ç. (2005). Veri madenciliğinde karar ağaçları ve bir satış analizi uygulaması. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 6(2), 221-239.
[42] Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. Peerj computer science, 7, e623.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 981-990 (2025)

Implementation of Battery-Integrated Transformerless High-Gain Smart Inverter

Oğuz ALKUL[1*] Şevki DEMİRBAŞ[1]

[1]*Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 09/12/2024
Revision: 10/03/2025
Accepted: 24/04/2025

Keywords

Battery Charger
Smart Invevrter
Power Control
Voltage Regulation
Smart Inverter Design
Transformerless High Gain Converter
DC-DC Converter
Renewable Energy

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/12/2024
Düzeltme: 10/03/2025
Kabul: 24/04/2025

Anahtar Kelimeler

Batarya Şarj Cihazı
Akıllı Evirici
Güç Kontrolü
Gerilim Kontrolü
Akıllı İnvertör Tasarımı
Transformatörsüz Yüksek kazançlı Dönüştürücü
DA-DA Dönüştürücü,
Yenilenebilir Enerji

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study presents a smart inverter model that includes a battery-integrated, transformerless, and high-gain DC-DC converter capable of bidirectional operation. /Bu çalışma, batarya entegreli, transformatörsüz ve yüksek kazançlı DA-DA dönüştürücü içeren ve iki yönlü çalışabilen akıllı bir invertör modeli sunmaktadır.

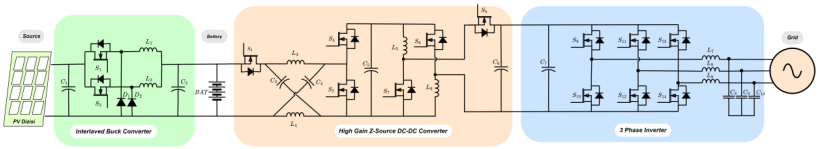


Figure A: *Prepared High gain transformerless PV inverter model /* ***Şekil A:*** *Hazırlanan yüksek kazançlı trafosuz PV invertör modeli*

Highlights (Önemli noktalar)

- *The design, which offers integrated operation between PV panels, battery and grid, supports supply-demand balance with flexible energy storage, transfer and battery charge/discharge control in grid-connected/unconnected modes. / PV paneller, batarya ve şebeke arasında entegre çalışma imkanı sunan tasarım, şebeke bağlantılı/bağlantısız modlarda esnek enerji depolama, aktarım ve batarya şarj/deşarj kontrolü ile arz-talep dengesini destekler.*
- *The design offers a structure that can operate in grid-connected and unconnected modes, facilitating energy management with battery charge/discharge control. / Tasarım, şebeke bağlantılı ve bağlantısız modlarda çalışabilen, batarya şarj/deşarj kontrolü ile enerji yönetimini kolaylaştıran bir yapı sunmaktadır.*
- *With advanced control mechanisms, P&O MPPT algorithm and active/reactive power control, maximum power is drawn from PV panels, energy flow is optimized, harmonic distortions and security risks are reduced and safe energy transfer to the grid is ensured./ Gelişmiş kontrol mekanizmaları, P&O MPPT algoritması ve aktif/reaktif güç kontrolü ile PV panellerden maksimum güç çekilir, enerji akışı optimize edilirken, harmonik bozulmalar ve güvenlik riskleri azaltılarak şebekeye güvenli enerji aktarımı sağlanır.*

Aim (Amaç): *The study aims to increase energy efficiency and provide safe, flexible energy management in grid-connected/unconnected modes by designing a smart inverter with PV panels and battery integrated, transformerless high-gain DC-DC converter. / Çalışma, PV paneller ve batarya entegreli, transformatörsüz yüksek kazançlı DA-DA dönüştürücülü akıllı inverter tasarlayarak enerji verimliliğini artırıp şebeke bağlantılı/bağlantısız modlarda güvenli, esnek enerji yönetimi sağlamayı amaçlar.*

Originality (Özgünlük): *Transformerless high-gain smart inverter design offers a unique energy management solution in a compact, efficient and aesthetic structure with PV panels and battery integration. / Transformerless yüksek kazançlı akıllı inverter tasarımı, PV paneller ve batarya entegrasyonuyla kompakt, verimli ve estetik bir yapıda özgün bir enerji yönetimi çözümü sunar.*

Results (Bulgular): *Effective control at power levels ranging from 1kW to 5kW of the PV inverter, stable DC connection voltage, optimized battery charge/discharge processes and quality grid output verify the performance and reliability of the design. / PV inverterin 1kW'dan 5kW'a kadar değişen güç seviyelerinde etkin kontrol, stabil DC bağlantı gerilimi, optimize edilmiş batarya şarj/deşarj süreçleri ve kaliteli şebeke çıkışı tasarımın performansını ve güvenilirliğini doğrular.*

Conclusion (Sonuç): *The study reveals that the transformerless high-gain smart inverter provides safe and flexible energy management by increasing energy efficiency with the integration of PV panels and batteries, and offers an effective solution for renewable energy systems. / Çalışma, transformerless yüksek kazançlı akıllı inverterin, PV paneller ve batarya entegrasyonuyla enerji verimliliğini artırarak, güvenli ve esnek enerji yönetimi sağladığını ve yenilenebilir enerji sistemleri için etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.*

*Corresponding author, e-mail: oguz.alkul2@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1598756

GU J Sci, Part C, 13(3): 981-990 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Implementation of Battery-Integrated Transformerless High-Gain Smart Inverter

Oğuz ALKUL[1*] Şevki DEMİRBAŞ[1]

[1]*Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 09/12/2024
Revision: 10/03/2025
Accepted: 24/04/2025

Keywords

Battery Charger
Smart Invevrter
Power Control
Voltage Regulation
Smart Inverter Design
Transformerless High Gain Converter
DC-DC Converter
Renewable Energy

Abstract

This study presents a novel battery-integrated, transformerless high-gain smart inverter model designed to enhance the efficiency and reliability of photovoltaic (PV) energy systems. The proposed system integrates an interleaved buck converter for battery charging and a transformerless high-gain DC-DC converter operating in parallel with the battery to supply the inverter source. Additionally, a two-level inverter is employed to ensure stable grid voltage generation.

The model incorporates several required control strategies, including Maximum Power Point Tracking (MPPT) for optimal solar energy utilization, active and reactive power control for grid-connected operation, and voltage regulation for off-grid scenarios. The bidirectional energy flow capability enables seamless power distribution between the PV array, battery storage, and the electrical grid, ensuring enhanced system performance. Simulation results validate the efficiency and stability of the proposed inverter model, demonstrating improved power conversion, reduced energy losses, and enhanced system flexibility. By eliminating the need for a transformer, the design achieves higher efficiency and lower cost while maintaining operational reliability. This research contributes to the development of more sustainable and intelligent PV energy solutions, paving the way for improved energy management in renewable power systems.

Batarya Entegreli Transformatörsüz Yüksek Kazançlı Akıllı Evirici Uygulaması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/12/2024
Düzeltme: 10/03/2025
Kabul: 24/04/2025

Anahtar Kelimeler

Batarya Şarj Cihazı
Akıllı Evirici
Güç Kontrolü
Gerilim Kontrolü
Akıllı Evirici Tasarımı
Transformatörsüz Yüksek kazançlı Dönüştürücü
DA-DA Dönüştürücü,
Yenilenebilir Enerji

Öz

Bu çalışma, fotovoltaik (PV) enerji sistemlerinin verimliliğini ve güvenilirliğini artırmak için tasarlanmış, bataryaya entegre, trafosuz yüksek kazançlı akıllı evirici modelini sunmaktadır. Önerilen sistem, batarya şarjı için iç içe geçmiş bir azaltan tip dönüştürücü ve evirici kaynağını beslemek için bataryayla paralel çalışan trafosuz yüksek kazançlı DC-DC dönüştürücüyü entegre eder. Ek olarak, kararlı şebeke voltajı üretimini sağlamak için iki seviyeli bir evirici kullanılır.

Model, optimum güneş enerjisi kullanımı için Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT), şebekeye bağlı çalışma için aktif ve reaktif güç kontrolü ve şebekeden bağımsız senaryolar için voltaj düzenlemesi dahil olmak üzere çeşitli gerekli kontrol stratejilerini içerir. Çift yönlü enerji akışı yeteneği, PV dizisi, batarya depolaması ve elektrik şebekesi arasında sorunsuz güç dağıtımını sağlayarak gelişmiş sistem performansı sağlar. Simülasyon sonuçları, önerilen evirici modelinin verimliliğini ve kararlılığını doğrulayarak, iyileştirilmiş güç dönüşümü, azaltılmış enerji kayıpları ve gelişmiş sistem esnekliğini göstermektedir. Bir trafoya olan ihtiyacı ortadan kaldırarak, tasarım operasyonel güvenilirliği korurken daha yüksek verimlilik ve daha düşük maliyet elde eder. Bu araştırma, yenilenebilir enerji sistemlerinde enerji yönetiminin iyileştirilmesinin önünü açarak daha sürdürülebilir ve akıllı PV enerji çözümlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Today, growing interest in energy efficiency and sustainable energy sources is driving advancements in energy conversion systems. The significance of inverter technologies is increasingly recognized for ensuring the efficient utilization of renewable energy sources, particularly solar energy. In this context, battery integrated, transformerless, high-gain smart inverter models are gaining attention due to their advantages in energy storage and conversion processes [1].

*Corresponding author, e-mail: oguz.alkul2@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1598756

Smart inverters, battery chargers, and power control technologies play a crucial role in energy management [2]. These systems offer advanced features for voltage regulation and power optimization [3-4]. Smart inverter designs integrate transformerless high-gain converters alongside high-efficiency reliable converters [5]. They operate in conjunction with DC-DC converters to optimize energy flow. These technologies enhance the efficiency, flexibility, and sustainability of energy systems [4-5].

Transformerless inverters are widely used in the energy sector due to their high efficiency and low cost. These inverters enable more compact and lightweight designs, reducing both space and cost compared to transformer-based inverters [6-7]. However, transformerless inverters face challenges such as harmonic distortions and safety risks during grid connection [8]. To mitigate these issues and enhance system efficiency, the smart control systems play a crucial role.

Battery integration helps balance energy supply and demand by providing flexibility in energy storage and utilization. Energy storage systems are particularly critical for integrating intermittent renewable energy sources. Since solar energy reaches peak efficiency during daylight hours but ceases production at night, battery systems become essential. The large-scale integration of intermittent renewables significantly impacts traditional generation technologies and the electrical grid. Such energy sources require flexible generation capacities capable of rapid response to maintain supply-demand balance [9].

Previous studies in the literature have extensively examined transformerless inverter technologies, energy storage integration, and smart control mechanisms to enhance system efficiency and reliability [1-9]. Research has highlighted the role of high-gain DC-DC converters in improving energy conversion, while interleaved buck converters have been widely explored for their benefits in reducing power loss and increasing efficiency in PV systems. Additionally, LC filters have been commonly utilized to mitigate harmonic distortions and optimize inverter performance [10-12].

Building upon these studies, this article examines a battery-integrated transformerless high-gain smart inverter model, its operating principles, and its advantages. Specifically, the study focuses on a traditional six-switch inverter model, a transformerless high-gain DC-DC converter, and a two-cell interleaved converter. The inverter design was selected considering power, efficiency, and cost performance. Furthermore, an LC filter was implemented at the output to minimize harmonic distortions and improve system performance. The research also evaluates the application of interleaved buck converters in PV systems, emphasizing their role in enhancing efficiency and reliability.

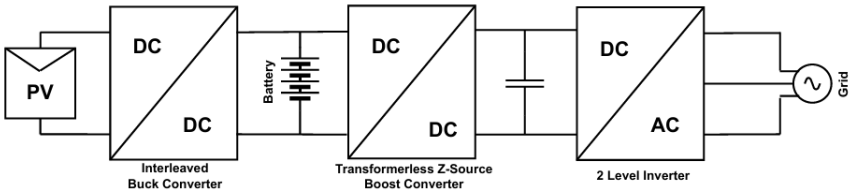


Figure 1. General block diagram of PV inverter (PV invertörünün genel blok şeması)

In this study as illustrated in the general block diagram in Figure 1, a group of PV panels is connected to a battery via an MPPT-controlled buck converter. The high voltage required for the inverter, which significantly exceeds the battery voltage and supports bidirectional operation, is achieved through a boost converter. This high voltage is then integrated into the grid via a two-level inverter.

The introduction section presents the preferred converter block diagram, providing readers with a general structural framework of the work. The second section discusses the transformerless PV inverter topology, and the modeling approach based on this topology. The third section examines the components of the smart inverter and their respective functions in detail. The fourth section focuses on control mechanisms and their operating principles. Finally, the fifth section presents the simulation results, evaluating the outcomes and findings of the study.

2. TRANSFORMERLESS SMART PV INVERTER DESIGN (TRANSFORMATÖRÜSÜZ AKILLI PV EVİRİCİ TASARIMI)

Within the scope of this research, six series-connected PV panels were used to supply a battery

through a single interleaved buck converter employing a maximum power point tracking (MPPT) algorithm. The system, modeled in Figure 2, is designed to maximize the efficient utilization of energy generated by the solar panels. A bidirectional, transformerless Z-Source converter, connected in parallel with the battery, supplies the DC link. This converter optimizes energy flow within the system by enabling bidirectional energy transfer both from the battery to the PV panels and from the rectified grid voltage back to the battery. The transformerless design provides significant advantages, including reduced energy losses, simplified control mechanisms, and lower production costs. The DC link is then integrated into the grid through a two-level full-bridge inverter designed for power regulation. This inverter is controlled to manage power flow within the DC link while ensuring that the voltage and frequency are appropriately synchronized with the grid. As a result, energy balance within the system is maintained, and electricity is reliably transmitted to the grid. This integrated structure enhances the efficiency of energy storage, conversion, and integration, ultimately enabling a more effective and sustainable use of solar energy.

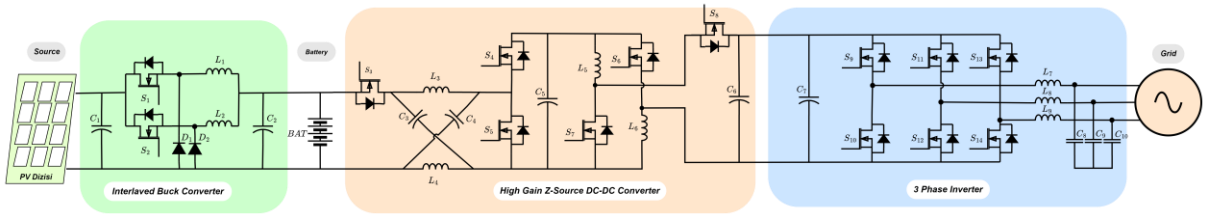


Figure 2. Prepared high gain transformerless PV inverter model
(Hazırlanan yüksek kazançlı transformatörsüz PV evirici modeli)

In the MPPT section of the developed smart PV converter, advanced monitoring applications, including P&O (Perturb and Observe) method were implemented. This approach ensures high efficiency by continuously tracking and adjusting to the maximum power fluctuations of the PV panel. Additionally, a PI (Proportional-Integral) controller was employed to regulate the charging process and optimize the converter's current and voltage expansion, ensuring the most suitable operating conditions. This control mechanism not only stabilizes the battery voltage but also maintains a consistent voltage level on the DC link connected to the converter.

In the inverter section, direct power control is applied during grid-connected operation. The converter monitors its voltage and frequency to ensure proper power delivery to the grid. Moreover, Moreover, the inverter voltage control parameters dynamically adjust in response to system conditions, guaranteeing a stable energy supply. This design allows the converter to maintain continuous and uninterrupted power delivery in both grid-connected and stand-alone modes. Additionally, when the PV panel voltage and battery charge levels are sufficient, the system operates with Uninterruptible Power Supply (UPS) functionality, ensuring a constant power supply and reliable energy consumption management.

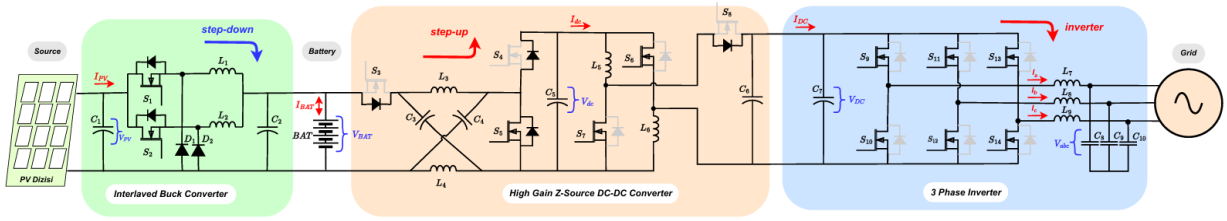


Figure 3. Feeding the grid with battery-backed PV panels (Şebekenin batarya destekli PV panelleriyle beslenmesi)

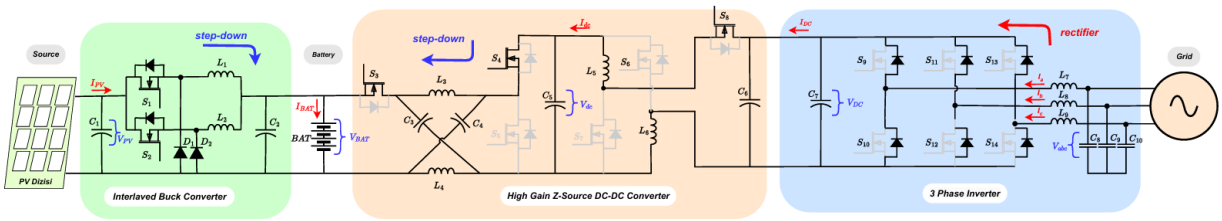


Figure 4. Battery charging with PV panels and grid (PV panelleri ve şebeke ile batarya şarjı)

When PV panels and batteries supply energy to the grid, the PV converter tracks the maximum power point and transfers the highest possible energy to the battery (Figure 3). During this process, the battery can be charged by controlling the PV panels. However, when PV energy is insufficient or unavailable, the grid voltage is directly rectified into DC voltage and transferred to the battery through a step-down converter operating as a transformerless Z-source converter. The working principle of this method is illustrated in Figure 4.

A carefully selected configuration was implemented for PV panel connections, prioritizing system efficiency and safety. In this context, a 2-series and 3-parallel connection scheme was chosen for the model. This configuration was selected to effectively increase voltage while ensuring balanced current distribution. The solar panel connection layout is illustrated in Figure 5.

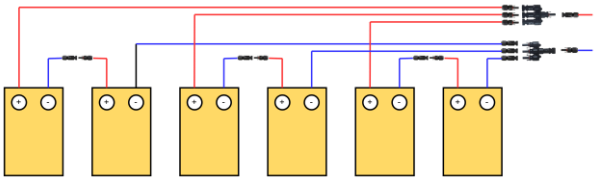


Figure 5. Connection diagram of solar panels
(Güneş panellerinin bağlantı şeması)

3. DESIGN (TASARIM)

2.1. Interleaved Buck Converter (İki Hücreli Azaltan Tip Dönüştürücü)

Interleaved buck converter input and output filter parameters are determined according to the desired power values. The parameters used in the study are given in Table I.

Table 1. Interleaved Buck Converter Parameters
(İki hücreli azaltan tip dönüştürücü Parametreleri)

Circuit Elements	Values
Input Voltage (V_{IN})	90 V
Output Voltage (V_{OUT})	55 V
Input Surge Voltage (ΔV_{IN})	1Vpp
Output Surge Voltage (ΔV_{OUT})	100mVpp
Converter Power (W_{MAX})	3 kVA
Switching Frequency (f_{SW})	5 kHz
Switching Rating (V_{GES})(	200 V
Switching Rating (I_C)	25A @ 100^o C
Input Capacitor (C_{IN})	6 * 470 μF
Output Capacitor (C_{OUT})	1 * 470 μF
Inductor Value (L)	4 mH

a) Inductor Selection: In determining the value of the buck-type converter parameters, the inductor L was calculated using the Equation 1 [13].

$$L = \frac{V_{OUT}\times(1-D)}{f_{SW}\times I_{PP}} = \frac{55\times(1-{}^{55V}/_{90V})}{5kHz\times 1A} = 4.27mH \quad (1)$$

Here, V_{OUT} is the output voltage, D is the switching duty ratio, f_{SW} is the switching frequency, and I_{PP} is the ripple amount of the output current.

b) Capacitor Selection: The input capacitor value was calculated using Equation 2 and the output capacitor values were calculated using Equation 4 [13].

$$C_{INphase} = \frac{I_{PHASEmax}\times D\times n(1-D)}{f_{SW}\times \Delta V_{IN}} \quad (2)$$

$$C_{INphase} = \frac{3kW/(2\times 55V)\times 0.61\times 2(1-0.61)}{5kHz\times 1V_{PP}} = 2595\mu F \quad (3)$$

Here, $C_{INphase}$ is the capacitor value calculated for each phase, $C_{PHASEmax}$ is the maximum phase current, D is the maximum switching duty ratio, n is the phase number, f_{SW} is the switching frequency, and ΔV_{IN} is the ripple voltage amountof the input voltage value.

$$C_{OUT} = \frac{I_{PP}}{8\times f_{SW}\times \Delta V_{OUT}} \quad (4)$$

$$C_{OUT} = \frac{I_{PP}}{8\times 5kHz\times 100mV_{PP}} = 250\mu F \quad (5)$$

2.2. Z-source Transformerless High Gain Converter(Z-kaynaklı Trafosuz Yüksek Kazançlı Dönüştürücü)

The converter model presented in [14], which has an efficiency of over 96 percent, which is a high rate among DC-DC converters, was preferred.

The input voltage in the converter used is V_{IN}, output voltage is V_{OUT} and switching duty ratio is D, input and output factor are given in Equation 6 [14].

$$V_{OUT} = \frac{1+D}{(1-D)^2} V_{IN} \quad (6)$$

The input and output factors of the Z-source converter according to the switching duty ratio are given in Equation 7 [15].

$$V_{OUT} = \frac{1}{(1-2D)} V_{IN} \quad (7)$$

The output ratio obtained as a result of switching from the formulas in Equation 6 and Equation 7 is given in Equation 8.

$$V_{OUT} = \frac{(1+D)}{(1-D)^2(1-2D)} V_{IN} \quad (8)$$

a) Inductor Selection: The Z source is directly connected to the boost converter and used at the inverter input. The coil calculation of the Z source is given in Equation 9.

$$L_{ZSource} = \frac{2\times D\times V_{OUT}\times(1-D)}{3\times\Delta I_{OUT}\times m\times I_L\times cos\theta\times f_{SW}} \quad (9)$$

$$L_{ZSource} = \frac{2\times 0.5\times 450V\times(1-0.5)}{3\times 2.5A\times 0.5\times 11.1A\times 1\times 1kHz} = 2.7mH \quad (10)$$

Here, assuming that the inverter operates under normal conditions, the duty ratio (D) and the inverter modulation index (m) are both set to 0.5. Additionally, the output inverter current, which depends on the power drawn from the specified source, as denoted I_L, while the inverter power factor is represented as $cos\theta$. The inductor current ripple value is expressed as a percentage and denoted as ΔI_{OUT}, whereas the the switching frequency used in the Z-source converter is represented as f_{SW}.

b) Capacitor Selection: The capacity calculation of the Z-source is given in Equation 11.

$$C_{ZSource} = \frac{3\times D\times m\times I_L\times cos\theta}{8\times\Delta V_C\times V_{OUT}\times(1-D)\times f_{SW}} \quad (11)$$

$$C_{ZSource} = \frac{3\times 0.5\times 0.5\times 11.1A\times 1}{8\times 0.5V\times 450V\times(1-0.5)\times 1kHz} = 4630\mu F \quad (12)$$

Here, $\Delta\hat{V}_C$, which is not expressed in the formula, represents the capacitor voltage ripple value as a percentage

2.3. Traditional 2-Stage Inverter (Geleneksel 2 Seviyeli Evirici)

The peak voltage $\hat{v}_{ac}$ in a 2-level inverter, where D represents the switching duty ratio, can be calculated with the formula below [16].

$$\hat{v}_{ac} = m\frac{V_{DC}}{2} \quad (13)$$

Here, $\hat{v}_{ac}$ represents the peak phase voltage value and m represents the modulation index value of the inverter. Using this equation, the gain ratio can be expressed with the following equation [16].

$$G = \frac{\hat{v}_{ac}}{V_{DC}/2} = \frac{m}{1-D} \quad (14)$$

a) Inductor Selection: The equality in Equation 15 was used in the selection of the coil used in the inverter [12].

$$L = \frac{1}{8}\frac{V_{DC}}{\Delta\hat{I}_L\times f_{SW}} = \frac{1}{8}\frac{450V}{1.1A\times 5kHz} = 10mH \quad (15)$$

Here, L represents the inductor value, V_{DC} represents the inverter input voltage, $\Delta\hat{I}_L$ represents the current ripple value, and f_{SW} represents the inverter switching frequency value.

b) Capacitor Selection: The selected capacitance value should be higher than the resonance frequency of the LC filter. Accordingly, the resonance capacitance value can be determined using Equation 16 [12]. Based on the appropriate circuit configuration, the capacitance value was selected using the equation given in Equation 17 [17].

$$C > \left(\frac{1}{f_{SW}2\pi}\right)^2\frac{1}{L} = \left(\frac{1}{5kHz\times 2\pi}\right)^2\frac{1}{10mH} = 0.1\mu F \quad (16)$$

$$C = \frac{2\times P}{f_{SW}\times V_{DC}\times\Delta V_{ac}} = \frac{2\times 5kW}{5kHz\times 450V\times 30V} = 14\mu F \quad (17)$$

Accordingly, the filter capacitance value was selected as 22uF for availability and widespread use. Here, f_{SW} represents the switching frequency, L represents the inductance value calculated from Equation 15, and ΔV_{ac} represents the maximum deviation voltage allowed at the output voltage. The ΔV_{ac} value expressed here was selected according to the power quality standards given by IEEE-1547, IEEE-519 standards.

The parameters used in the simulation are given in Table 2.

Table 1. Simulation parameters (Benzetim parametreleri)

System Parameters	Values
Simulation Step Time (T_S)	50x10−6 s
PV Panel Power (P_{pv})	6x545W
Grid Voltage (V_{grid})	115VAC
Utility Grid Frequency (f)	50Hz
DC Line Voltage (V_{out})	450VDC
Nominal Power (P)	5kW
Battery Voltage (V_{bat})	48V
Battery Capacity (Ah)	100Ah
Inverter Inductor Value (L_1, L_2, L_3)	10mH
Inverter Filter Capacitor (C_7, C_8, C_9)	$22\mu F$
Switching Frequency (f_{SW})	5kHz
Capacitances of $C_1, C_2, C_3 \dots C_6$	$470\mu F$

3. CONTROL (KONTROL)

In the study, the voltage generated by the PV panels was optimized using the Maximum Power Point Tracking (MPPT) technique and integrated into the battery through an interleaved buck converter. The battery supplied via a transformerless Z-Source DC-DC converter and a controlled inverter connected to the grid.

3.1. MPPT Control (MPPT Kontrolü)

P&O (Perturb and Observe) is an MPPT method that enables solar panels to operate at maximum efficiency. The P&O method utilizes a simple yet effective algorithm. This algorithm incrementally increases or decreases the output voltage of the solar panel at regular intervals and monitors the resulting change in power output. If the power output increases, the adjustments continue in the same direction; however, if the power output decreases, the direction of adjustment is reserved. This process continues until the maximum power point is reached. The control algorithm used in the control section is illustrated in Figure 6.

```
function Vref = RefGen(V, I,  Vrefmax,  Vrefmin,
    Vrefinit)

deltaVref = 1;
persistent Vold Pold Vrefold;

dataType = 'double';

if isempty(Vold)
    Vold = 0;
    Pold = 0;
    Vrefold = Vrefinit;
end

P = V * I;
dV = V - Vold;
dP = P - Pold;

if dP ~=0
    if dP<0
        if dV<0
            Vref = Vrefold + deltaVref;
        else
            Vref = Vrefold - deltaVref;
        end
    else
        if dV<0
            Vref = Vrefold - deltaVref;
        else
            Vref = Vrefold + deltaVref;
        end
    end
else Vref = Vrefold;
end

if Vref >= Vrefmax | Vref <= Vrefmin
    Vref = Vrefold;
end

Vrefold = Vref;
Vold = V;
Pold = P;
```

Figure 6. P&O MPPT algorithm (P&O MPPT algoritması)

3.2. Active Reactive Power Control (Aktif Reaktif Güç Kontrolü)

In the inverter developed for PV systems, a controller model capable of active and reactive power control was implemented to optimize grid compatibility and ensure efficient power management. With the help of this controller, the energy obtained from the battery and PV panels is supplied directly to the grid in a controlled manner based on demand. Additionally, setting the reference values in this controller unit to negative enables the inverter to function as a rectifier. This feature allows the battery to be act as an energy storage unit rather than a power source. The Matlab/Simulink model, which demonstrates the inverter's ability to control active and reactive power based on reference values is shown in Figure 7 [18].

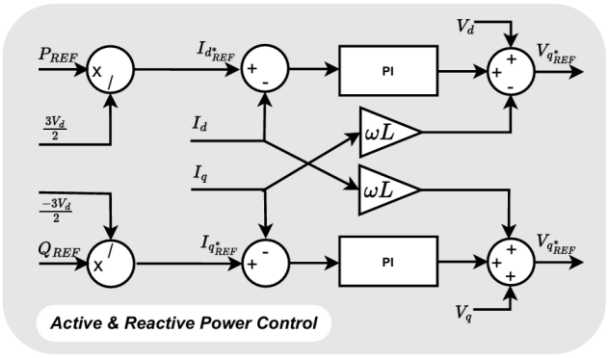


Figure 7. Active reactive power control model [18] (Aktif reaktif güç kontrol modeli [18])

3.3. Voltage Control (Gerilim Kontrolü)

When the grid is disconnected, the smart converter switches to voltage control to enable off-grid operation. This allows the system to regulate voltage independently of the grid. The Matlab/Simulink control model used for this process is shown in Figure 8. [19].

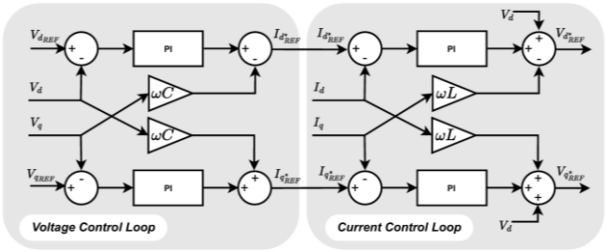


Figure 8. Voltage current control model [19] (Gerilim akım kontrol modeli [19])

3.4. Battery Charge & Discharge Control (Batarya Şarj & Deşarj Kontrolü)

Numerous studies have been conducted on charge and discharge control for 100Ah 48V battery. These studies primarily focus on aspects such as the electrical properties of batteries, charge/discharge algorithms, energy management strategies and

safety measures. The findings contribute to the more efficient and safer utilization of battery technologies [20-21].

In battery charging and discharging applications, direct PI control is employed. Since the system operates as a grid-interactive solution, it remains under continuous control. Charge and discharge current limits are maintained according to predefined battery specifications. The control structure is illustrated in Figure 9.

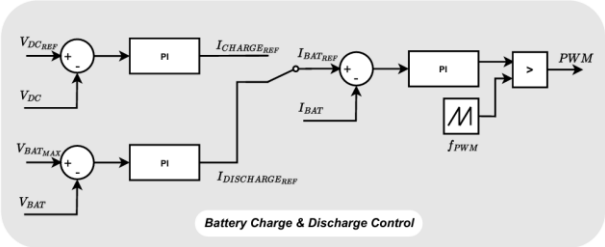


Figure 9. Battery charge and discharge control
(Akü şarj ve deşarj kontrolü)

The control structure consists of 3 parts. In the first working method, when there is sufficient power in PV, ($P_{PV} > P_{BAT_{CHARGE}}$) the device controls the power and charges the battery as much as the grid production amount and sends the remaining energy to the grid. In the second working method, when the power produced in PV is insufficient to feed the grid, ($P_{PV} < P_{GRID_{NEED}}$) the required energy is met by the batteries ($P_{GRID_{NEED}} = P_{PV} + P_{BAT}$). In the last working method, the energy produced from PV systems and the excess energy needed by the grid are stored in the batteries ($P_{BAT_{CHARGE}} = P_{PV} + P_{GRID}$). The operating states of the system are given in Figure 3 and Figure 4.

$$P_{PV} \geq P_{BAT_{CHARGE}} + P_{GRID_{NEED}} \quad (18)$$

$$P_{GRID} \geq P_{BAT_{CHARGE}} + P_{GRID_{NEED}} \quad (19)$$

$$P_{BAT_{CHARGE}} => P_{PV} + P_{GRID} \quad (20)$$

4. EXPERIMENTS (DENEYLER)

The research results include simulation data obtained during the operation of solar inverters. Figure 11 presents detailed MPPT control results of the PV inverter, while Figure 10 illustrates the energy transfer from the inverter to the grid. Figure 12 depicts the voltage, current and charge status of the battery during charging and discharging processes, whereas Figure 13 analyzes the DC link voltage control and current. The voltage and current variations at the inverter output are shown in Figure 14a. Finally, Figure 14b displays the dynamic response of the inverter, including output voltage and current. These results are used to evaluate the design and performance of the solar inverter system and demonstrate its operational capability.

In the simulation study, the inverter was operated with the control method given in Figure 7. The control response of the inverter was examined at 1kW, 4kW, 2kW, 5kW and finally 1kW again, at 2-second intervals. The simulation result obtained is given in Figure 10. Here, P_{REF} is the reference power value and P is the output power of the inverter.

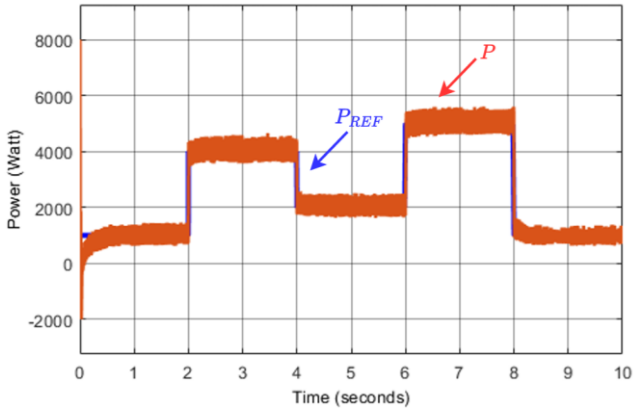


Figure 10. Power time graph of energy transmitted to the grid (Şebekeye iletilen enerjinin güç-zaman grafiği)

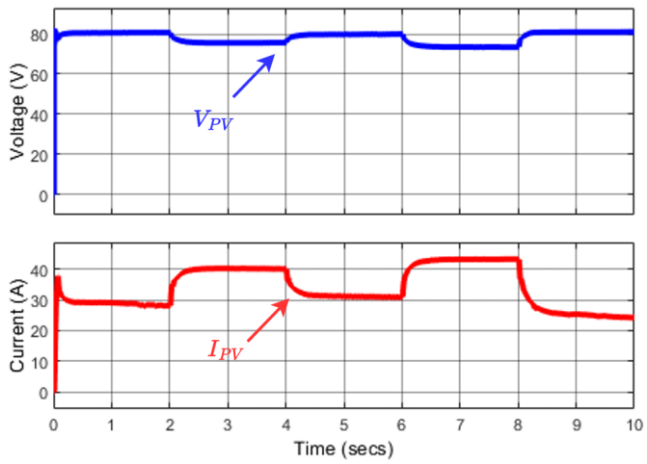


Figure 11. Voltage and current graph of solar panels as a result of MPPT applied (MPPT uygulaması sonucu güneş panellerinin gerilim ve akım grafiği)

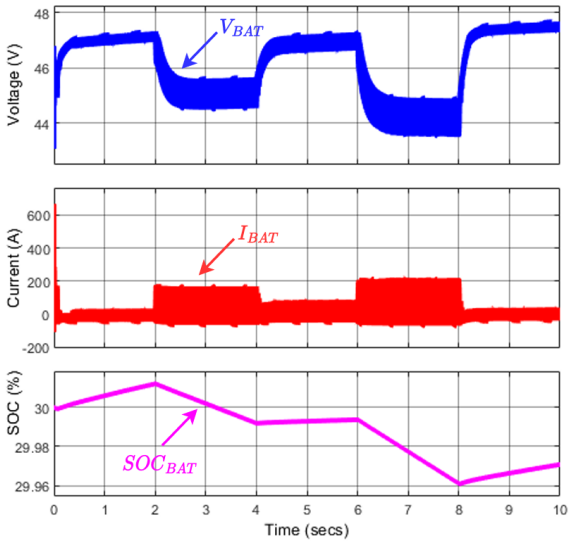


Figure 12. Battery voltage, current and SOC (Batarya voltajı, akımı ve SOC)

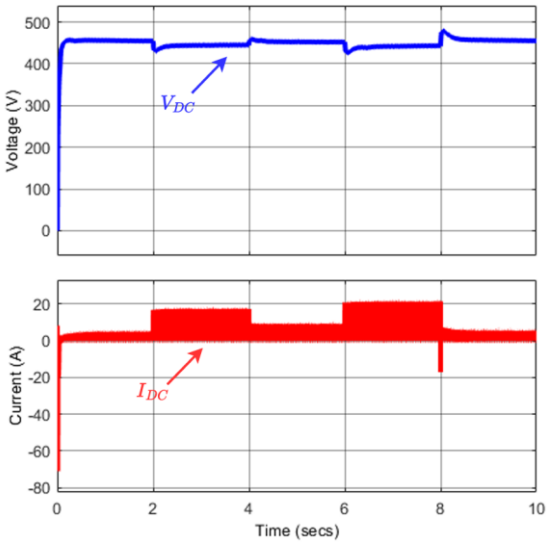
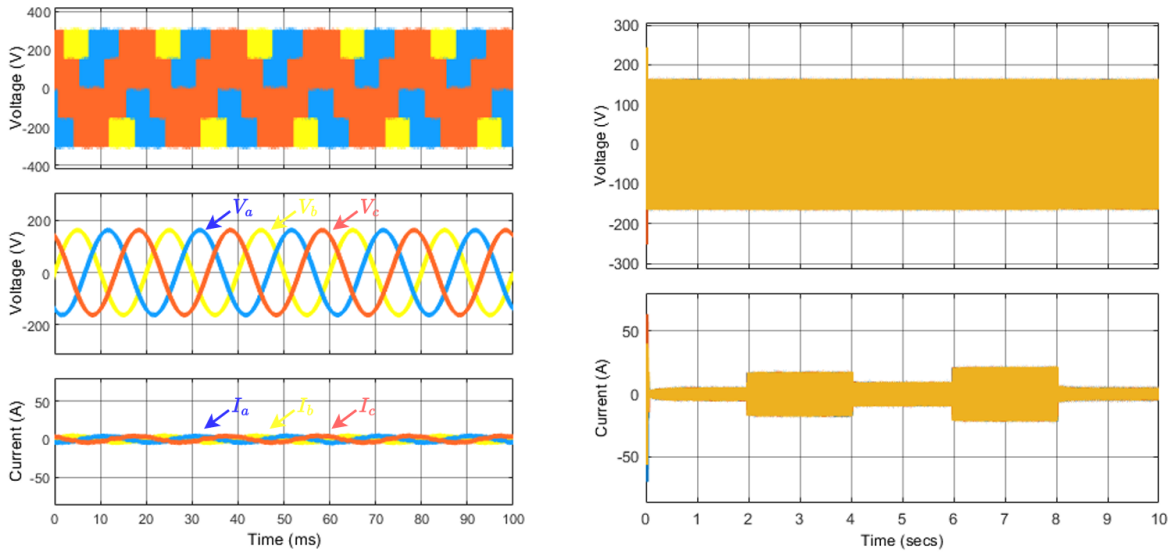


Figure 13. DC link voltage and current result (DC bağlantı voltajı ve akım sonucu)



(a) (b)

Figure 14. (a) Inverter voltage and current output, (b) Inverter dynamic response output voltage and current
((a) Evirici voltajı ve akım çıkışı, (b) Evirici dinamik tepki çıkış voltajı ve akımı)

The proposed battery-integrated, transformerless high-gain smart inverter model demonstrates significant improvements in efficiency, reliability, and energy management for PV systems. Through advanced control strategies such as MPPT, voltage regulation, and bidirectional power flow, the system ensures optimal utilization of solar energy while supporting grid stability. The incorporation of a high-gain DC-DC converter and an interleaved buck converter further enhances power conversion efficiency, reducing losses and improving energy storage capabilities.

Simulation results validate the effectiveness of the proposed design, showcasing its potential for real-world applications in both grid-connected and off-grid scenarios. While this study highlights the advantages of transformerless inverter technology, further research is needed to address potential challenges such as safety considerations and grid compatibility enhancements. Future work will focus on refining the control algorithms and optimizing the hardware implementation to facilitate wider adoption of this technology in renewable energy systems.

5. CONCLUTIONS (SONUÇLAR)

The proposed battery-integrated, transformerless high-gain smart inverter model demonstrates significant improvements in efficiency, reliability, and energy management for PV systems. Through advanced control strategies such as MPPT, voltage regulation, and bidirectional power flow, the system ensures optimal utilization of solar energy while supporting grid stability. The incorporation of a high-gain DC-DC converter and an interleaved buck converter further enhances power conversion efficiency, reducing losses and improving energy storage capabilities.

Simulation results validate the effectiveness of the proposed design, showcasing its potential for real-world applications in both grid-connected and off-grid scenarios. While this study highlights the advantages of transformerless inverter technology, further research is needed to address potential challenges such as safety considerations and grid compatibility enhancements. Future work will focus on refining the control algorithms and optimizing the hardware implementation to facilitate wider adoption of this technology in renewable energy systems.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

The research article was supported by Gazi University under project code FBA-2023-8164. The authors extend their gratitude for this support.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***Oğuz ALKUL*:** He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

***Şevki DEMİRBAŞ*:** He evaluated the results and participated in the preparation and improvement of the draft of the article.

Sonuçları değerlendirdi ve makale taslağının hazırlanmasında ve geliştirilmesinde görev aldı.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] D. Parra, M. K. Patel, Effect of tariffs on the performance and economic benefits of PV-coupled battery systems. Applied Energy, 164 (2016) 175-187.

[2] A. M. Mahfuz-Ur-Rahman, et al., An effective energy management with advanced converter and control for a PV-battery storage based microgrid to improve energy resiliency. IEEE Transactions on Industry Applications, 57:6 (2021) 6659-6668.

[3] S. Y. Mousazadeh Mousavi, et al., Power quality enhancement and power management of a multifunctional interfacing inverter for PV and battery energy storage system. International Transactions on Electrical Energy Systems, 28:12 (2018) e2643.

[4] D. Barater, et al., Recent advances in single-phase transformerless photovoltaic inverters. IET Renewable Power Generation, 10:2 (2016) 260-273.

[5] S. Saridakis, E. Koutroulis, F. Blaabjerg, Optimal design of modern transformerless PV inverter topologies. IEEE Transactions on Energy Conversion, 28:2 (2013) 394-404.

[6] M. F. Kibria, et al., A comparative review on single-phase transformerless inverter topologies for grid-connected photovoltaic systems. Energies, 16:3 (2023) 1363.

[7] O. Alkul, Ş. Demirbaş, Review of the solid-state transformers and an application of full bridge DC/DC converter. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 7:2 (2019) 450-471.

[8] M. Shayestegan, et al., An overview on prospects of new generation single-phase transformerless inverters for grid-connected photovoltaic (PV) systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82 (2018) 515-530.

[9] MIT Energy Initiative, Managing Large-Scale Penetration of Intermittent Renewables, (2012).

[10] S. Adak, Harmonics mitigation of stand-alone photovoltaic system using LC passive filter. Journal of Electrical Engineering & Technology, 16:5 (2021) 2389–2396.

[11] S. Dlamini, I. E. Davidson, A. A. Adebiyi, Design and application of the passive filters for improved power quality in stand-alone PV systems. 2023 31st Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC), IEEE, (2023) 1–6.

[12] K. H. Ahmed, S. J. Finney, B. W. Williams, Passive filter design for three-phase inverter interfacing in distributed generation. 2007 Compatibility in Power Electronics, IEEE, (2007).

[13] C. Parisi, Multiphase buck design from start to finish (Part 1). Texas Instruments, Application Report SLVA882, 55 (2017).

[14] H. Y. Ahmed, O. Abdel-Rahim, Z. M. Ali, New high-gain transformerless DC-DC boost converter system. Electronics, 11:5 (2022) 734.

[15] M. Zhu, K. Yu, F. L. Luo, Switched inductor Z-source inverter. IEEE Transactions on Power Electronics, 25:8 (2010) 2150-2158.

[16] A. Ayad, S. Hanafiah, R. Kennel, A comparison of quasi-Z-source inverter and traditional two-stage inverter for photovoltaic application. Proceedings of PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, VDE, (2015).

[17] Y. V. Pavan Kumar, R. Bhimasingu, Design of voltage and current controller parameters using small signal model-based pole-zero cancellation method for improved transient response in microgrids. SN Applied Sciences, 3 (2021) 1-17.

[18] M. M. B. Tappeh, J. S. Moghani, A. Khorsandi, Active and reactive power control strategy of the modular multilevel converter for grid-connected large-scale photovoltaic conversion plants. 2019 10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), IEEE, (2019).

[19] E. Choque Pillco, L. F. C. Alberto, R. V. de Oliveira, Time scale stability analysis of a Hopf bifurcation in a wind–diesel hybrid microgrid. IET Renewable Power Generation, 14:9 (2020) 1491-1501.

[20] P. K. Atri, P. S. Modi, N. S. Gujar, Design and development of solar charge controller by implementing two different MPPT algorithm. 2021 International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT), IEEE, (2021).

[21] A. Maliat, M. A. Mahmud, M. A. Razzak, Design and analysis of a 48V on-board fast charging system for electric vehicles. 2021 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), IEEE, (2021).

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 991-1001 (2025)

Speed-Sensorless Direct Torque Controlled Brushless Direct Current Motor Drive Using OC-LMS Based MRAS Estimator for Light Electric Vehicles

Mehmet ÜNAL[1,2] Rıdvan DEMİR[1*] Engin Cemal MENGÜÇ[1] Remzi İNAN[3]

[1]*Kayseri University, Faculty of Engineering Architecture and Design, Department of Electrical and Electronics Engineering, 38280, Kayseri/TÜRKİYE*

[2]*Aspilsan Enerji Sanayi ve Ticaret A.Ş, Mimarsinan OSB Mahallesi 1. Cadde No:43, 38165, Kayseri/TÜRKİYE*

[3]*Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Electrical and Electronics Engineering, 32260, Isparta/TÜRKİYE*

Article Info

Research article
Received: 30/04/2025
Revision: 17/06/2025
Accepted: 29/06/2025

Keywords

BLDC Motor
Light Electric Vehicles
Direct Torque Control
OC-LMS Algorithm
Model Reference Adaptive System

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/04/202
Düzeltme: 17/06/2025
Kabul: 29/06/2025

Anahtar Kelimeler

FDAM
Hafif Elektrikli Araçlar
Doğrudan Moment Kontrol
OC-LMS Algoritması
Modele Uyarlamalı Sistem

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, a low-computational-burden least mean square-based MRAS with an online censoring strategy for speed estimation of brushless direct current motor is proposed. / Bu çalışmada, fırçasız doğru akım motorların hız kestirimi için düşük işlem yüküne sahip çevrimiçi sansürlemeli en küçük ortalama kare temelli MUS önerilmiştir.

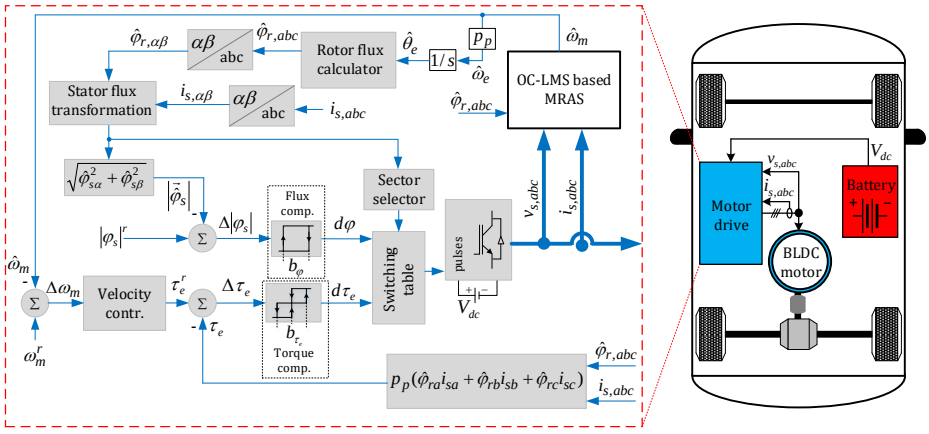


***Figure A**: Speed-sensorless DTC-based BLDC motor drive /**Şekil A:** Hız-algılayıcısız DMK tabanlı FDAM sürücüsü*

Highlights (Önemli noktalar)

- *Direct torque control based BLDC motor drives. / Doğrudan moment control tabanlı FDAM sürücüsü.*
- *OC-LMS based MRAS speed estimator. / OC-LMS tabanlı MUS hız kestiricisi.*
- *educed execution time. / Azaltılmış işlem süresi.*

***Aim (Amaç):** This study aims to design an OC-LMS-based MRAS speed estimator that reduces the computation burden of the traditional LMS-based MRAS used for speed estimation in BLDC motors. / Bu çalışma, FDAM'lerin hız kestirimi için kullanılan geleneksel LMS tabanlı MUS'un işlem yükünü azaltan, OC-LMS tabanlı bir MRAS hız kestiricisi tasarlamayı amaçlamaktadır.*

***Originality (Özgünlük):** The originality of this study is that the OC-LMS-based MUS speed estimator, which reduces the computational load compared to the traditional LMS-based MUS, is presented for the first time to the literature. / Bu çalışmanın özgünlüğü, geleneksel LMS tabanlı MUS'a kıyasla hesaplama yükünü azaltan OC-LMS tabanlı MUS hız kestiricisinin literatüre ilk kez sunulmasıdır.*

***Results (Bulgular):** The proposed estimator reduces the execution time by 16.53% for a 30% censoring rate and by 36.89% for an 85% / Önerilen kestirici %30 sansürleme oranı için %16.53 oranında, %85 için ise %36.89 oranında çalışma süresini düşürmüştür.*

***Conclusion (Sonuç):** The results obtained from the simulation studies, including the performance tests realized in a wide speed range, including zero speed cases, verify the performance of both the OC-LMS-based MRAS estimator and the DTC-based BLDC motor drive. / Sıfır hız durumlarını da içeren geniş hız aralığı için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar, hem OC-LMS temelli MUS kestiricisinin hem de bu kestiriciyi kullanan DMK tabanlı FDAM sürücüsünün başarımını doğrulamaktadır.*

*Corresponding author, e-mail: ridvandemir@kayseri.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1687368

GU J Sci, Part C, 13(3): 991-1001 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Hafif Elektrikli Araçlar için OC-LMS Tabanlı MUS Kestiricisi Kullanan Hız-Algılayıcısız Doğrudan Moment Kontrollü Fırçasız Doğru Akım Motor Sürücüsü

Mehmet ÜNAL[1,2] Rıdvan DEMİR[1*] Engin Cemal MENGÜÇ[1] Remzi İNAN[3]

[1]*Kayseri Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 38280, Kayseri/TÜRKİYE*

[2]*Aspilsan Enerji Sanayi ve Ticaret A.Ş, Mimarsinan OSB Mahallesi 1. Cadde No:43, 38165, Kayseri/TÜRKİYE*

[3]*Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 32260, Isparta/TÜRKİYE*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/04/202
Düzeltme: 17/06/2025
Kabul: 29/06/2025

Anahtar Kelimeler

FDAM
Hafif Elektrikli Araçlar
Doğrudan Moment Kontrol
OC-LMS Algoritması
Modele Uyarlamalı Sistem

Öz

Bu çalışmada, fırçasız doğru akım motorların (FDAM'lerin) hız kestirimi için düşük işlem yüküne sahip çevrimiçi sansürlemeli (online censoring-OC) en küçük ortalama kare (least mean square-LMS) temelli modele uyarlamalı sistem (MUS) önerilmiştir. Önerilen OC-LMS temelli MUS hız kestiricisi farklı sansürleme oranları için hız-algılayıcısız doğrudan moment kontrol (DMK) tabanlı FDAM sürücüsü ile doğrulanmıştır. Tasarlanan yeni kestiricinin başarımı kentsel dinamometre sürüş programı (Urban Dynamometer Driving Schedule-UDDS) sürüş profilinin DMK tabanlı sürücüye referans hız bilgisi olarak verildiği zorlayıcı senaryo ile test edilmiştir. Ek olarak, elektrikli araç (EA) modelinden elde edilen toplam çekiş kuvvetinin dönüştürülmesi ile elde edilen yük momenti değişimleri FDAM'ye yük olarak uygulanmıştır. Sıfır hız durumlarını da içeren geniş hız aralığı için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar, hem OC-LMS temelli MUS kestiricisinin hem de bu kestiriciyi kullanan DMK tabanlı FDAM sürücüsünün başarımını doğrulamaktadır. Ek olarak, önerilen OC-LMS temelli MUS'un çalışma süreleri geleneksel LMS temelli MUS kestirici ile karşılaştırılmıştır. Önerilen kestirici %30 sansürleme oranı için %16.53 oranında, %85 için ise %36.89 oranında çalışma süresini düşürmüştür.

Speed-Sensorless Direct Torque Controlled Brushless Direct Current Motor Drive Using OC-LMS Based MRAS Estimator for Light Electric Vehicles

Article Info

Research article
Received: 30/04/2025
Revision: 17/06/2025
Accepted: 29/06/2025

Keywords

BLDC Motor
Light Electric Vehicles
Direct Torque Control
OC-LMS Algorithm
Model Reference Adaptive System

Abstract

In this study, a low-computational-burden least mean square (LMS)- based model reference adaptive system (MRAS) with an online censoring (OC) strategy for speed estimation of brushless direct current (BLDC) motor is proposed. The proposed OC-LMS-based MRAS speed estimator is validated on a speed-sensorless direct torque controlled (DTC) BLDC motor drive for different censoring ratios. The performance of the designed estimator is tested with a challenging scenario, in which the Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) driving profile is applied to the DTC-based driver as reference speed information. Additionally, the load moment changes obtained by converting the total traction force obtained from the electric vehicle (EV) model are applied as a mechanical load to the BLDC motor. The results obtained from the simulation studies, including the performance tests realized in a wide speed range, including zero speed cases, verify the performance of both the OC-LMS-based MRAS estimator and the DTC-based BLDC motor drive. Additionally, the execution times of the proposed OC-LMS-based MRAS are compared with the traditional LMS-based MRAS estimator. The proposed estimator reduces the execution time by 16.53% for a 30% censoring rate and by 36.89% for an 85% censoring rate.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, ulaşım ve taşıma nedeniyle ortaya çıkan karbondioksit emisyonları için artan farkındalık ve hassasiyet, elektrikli araçlara (EA'lara) olan ilgiyi artırmıştır. Elektrikli araç pazarında üreticilerin, rekabetin ve kullanıcı taleplerinin artması üretici firmaları daha düşük

*Corresponding author, e-mail: ridvandemir@kayseri.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1687368

maliyetli, daha az bakım gerektiren, daha verimli ve daha kullanışlı araçların geliştirilmesi konusunda zorlamaktadır. EA'lardan beklenen performans kriterleri; sağlamlık, batarya şarj hızları, güç yönetimi, güvenilirlik ve motor sürücü sistemleri olarak sıralanabilir [1]. EA'ları tahrik etmek için sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM), asenkron motorlar (ASM) ve fırçasız doğru akım motorları (FDAM) tercih edilmektedir.

FDAM'ler yüksek verimleri, az bakım gereksinimleri, uzun ömürleri, sabit moment sağlamaları, sessiz çalışmaları gibi üstünlüklerinden dolayı birçok endüstriyel alanda ve elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılır hale gelmişlerdir. FDAM'lerin yüksek başarımlı kontrolü ile ilgili araştırmalar ve iyileştirmeler hem endüstride hem de literatürde devam etmektedir. FDAM sürücülerin yüksek başarımlı kontrolü için vektör kontrol [2,3], model öngörülü kontrol [4,5] ve doğrudan moment kontrol (DMK) [6-9] gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu kontrol yöntemleri FDAM'nin konum ve hız bilgisini gerektirmektedir. Hız-algılayıcısız yöntemlerde bu bilgiler kestiriciler/gözlemleyiciler tarafından kontrol sistemine sağlanır. FDAM'lerin hız ve/veya konum bilgisi kestirimleri için kayma kipli gözlemleyici [6], yapay sinir ağları tabanlı kestirici [10], adaptif gözlemleyici [9], doğrusal olmayan Kalman filtresi [5,7] ve modele uyarlamalı sistem (MUS) tabanlı kestirici [8,11] algoritmaları literatüre önerilmiştir.

Elektrik motorlarının hız ve/veya konum kestirimi için adaptif filtre temelli MUS algoritmaları geliştirilmiştir [8,12-14]. Bu çalışmalardan [12]'de SMSM'lerin hız kestirimi için en küçük ortalama kurtosis (Least mean kurtosis, LMK) ve en küçük ortalama kare (least mean square, LMS) tabanlı MUS, [13,14]'te ASM'ler için sırasıyla LMS ve LMK tabanlı MUS kestirici yapıları önerilmiştir. Bu çalışmalar adaptif filtre tabanlı MUS yapılarının geleneksel PI kontrolör kullanan MUS yapılarından daha iyi kestirim başarımına sahip olduklarını göstermiştir. Ek olarak [8]'de ise FDAM'lerin hız kestirimi için LMS, LMK ve en küçük ortalama dördüncü (Least mean fourth, LMF) temelli MUS yapıları önerilmiştir. Bununla birlikte bu tür hız kestiricileri büyük miktarda gereksiz bilgiyi işlemek zorunda kalmaktadır. Bu da DSP'lere ciddi bir işlem yükünü getirmektedir. İşlem yükünü azaltmak için aralık sansürleme yöntemi kullanan ve daha az bilgilendirici verileri ayıklayan çevrimiçi sansürleme (online censoring-OC) stratejisi Berberidis vd. tarafından 2016 yılında [15]'de yer alan çalışmada geliştirilmiştir. Bu strateji önemli verileri belirleyip artık/gereksiz verileri sansürleyerek, başarımı düşürmeden işlem yükünün azaltılmasını amaçlamaktadır. Literatürde, OC stratejisini dahil eden adaptif filtre algoritmalarından OC tabanlı LMS (OC-LMS) algoritması [15-17] ile farklı sinyal işleme uygulamaları için yüksek başarımlı sonuçlar elde edilmiştir. OC stratejisinin sunduğu işlem verimliliğinden faydalanılarak, adaptif filtre tabanlı MUS algoritmalarının işlem yükünün azaltılması mümkün hale getirebilir. Böylelikle, düşük işlem yüküne sahip tasarlanan kestiriciler, elektrikli araçlar ve endüstriyel uygulamalarda hız kestirimi amacıyla kullanılabilir ve motor sürücü sistemlerinin genel verimliliğini artırmada etkili bir çözüm sunabilir.

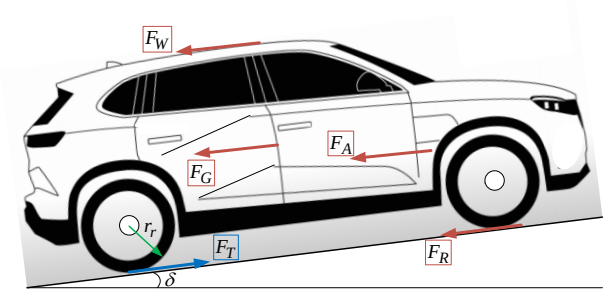
Bu çalışmanın temel katkısı, FDAM'nin hız kestirimi için önerilen geleneksel LMS temelli MUS'un işlem yükünü azaltan OC-LMS temelli MUS hız kestiricisinin tasarımın gerçekleştirilmesi ve benzetim temelli olarak test edilmesidir. Bu çalışmada tasarlanan OC-LMS temelli MUS hız kestiricisi farklı sansürleme oranları için hız-algılayıcısız DMK tabanlı FDAM sürücüsü ile doğrulanmıştır. Yeni tasarlanan OC-LMS temelli MUS kestiricisi, referans model olarak da isimlendirilen FADM'nin ölçülen üç faz stator akımları ile uyarlanabilir model çıkışı arasındaki hatayı kullanarak FADM'nin rotor hızını doğrudan kestirmektedir. Tasarlanan yeni kestiricinin başarımı kentsel dinamometre sürüş programı (Urban Dynamometer Driving Schedule-UDDS) hız döngüsünün DMK tabanlı sürücüye referans hız bilgisi olarak verilen zorlayıcı senaryo ile test edilmiştir. Ek olarak, EA'nın UDDS hız profili ile doğal olarak oluşan ve EA modelinden elde edilen toplam çekiş kuvvetinin dönüştürülmesi ile elde edilen yük momenti değişimleri FDAM'ye yük olarak uygulanmıştır. Sıfır hız durumlarını da içeren geniş hız aralığı için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar hem OC-LMS temelli MUS kestiricisinin hem de bu kestiriciyi kullanan DMK tabanlı FDAM sürücüsünün başarımını doğrulamaktadır. Ayrıca önerilen OC-LMS temelli MUS'un çalışma süreleri [8]'de sunulan geleneksel LMS temelli MUS kestirici ile karşılaştırılmış ve önerilen yaklaşımın çalışma süresini önemli ölçüde düşürdüğü gösterilmiştir. Örneğin önerilen kestirici %30 sansürleme oranı için %16.53 oranında, %85 için ise %36.89 oranında çalışma süresini düşürmüştür.

Bu çalışma toplamda dört bölümden oluşmaktadır. FDAM sürücüleri, EA'lar, hız/konum kestirici algoritmalar ve OC-LMS algoritmaları ile ilgili genel bir literatür Bölüm 1'de verilmiştir. Bölüm 2'de EA ve FDAM modellerini ve OC-LMS tabanlı MUS kestiricinin tasarımını içeren materyal ve

metot sunulmuştur. EA'ların başarım testlerinde de kullanılan uluslararası geçerliliği olan UDDS hız profili için FDAM sürücüsünün kontrol başarımı ve önerilen kestiricinin kestirim başarımının gösterilmesi amacıyla yapılan benzetim çalışmaları Bölüm 3'te verilmiştir. Son olarak Bölüm 4'te ise Tartışma ve Sonuçlar ifade edilmiştir.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇ MODELİ (ELECTRIC VEHICLE MODEL)

Hareketli bir araca etkiyen kuvvetler rüzgar kuvveti (F_W), yuvarlanma kuvveti (F_R), yerçekimi kuvveti (F_G) ve aracı hızlandıran ivme kuvveti (F_A) olarak sırlanabilir. Şekil 1'de gösterildiği gibi bir araca etkiyen kuvvetlerin toplamı (F_T) toplam çekiş kuvveti olarak isimlendirilir ve aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir [18-19].



Şekil 1. Elektrikli araç modeli (Electric vehicle model)

$$F_T = F_R + F_W + F_G + F_A \tag{1a}$$

$$F_T = K_R M_v g \cos\delta + K_W A V^2 + M_v g \sin\delta + M_v a \tag{1b}$$

Denklem (1b) ile verilen EA modelinde M_v aracın kütlesi, g yerçekimi katsayısı, K_R yuvarlanma direnci katsayısı, K_W rüzgar direnci katsayısı, a aracın ivmesi, A aracın ön yüzey alanı ve δ yolun eğimidir. EA'yı tahrik edecek elektrik motorunun hızı (ω_m) ve bu motora etkiyen yük momenti (τ_l) ifadeleri aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır [19]:

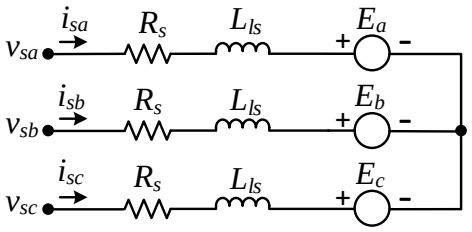
$$\omega_m = \frac{r_f}{r_r} V \tag{2}$$

$$\tau_l = \frac{r_r}{r_f} F_T \tag{3}$$

burada r_r ve r_f sırasıyla tekerleğin yuvarlanma yarıçapı ve dişli oranıdır.

3. FDAM MODEL (BLDC MOTOR MODEL)

Şekil 2'de verilen FDAM eşdeğer devresi kullanılarak elde edilen stator akım denklemleri ile indüklenen moment denklemi ve mekanik hareket denklemi aşağıdaki gibi verilebilir.



Şekil 2. FDAM üç faz eşdeğer devresi (BLDC motor three phase equivalent circuit)

$$\frac{di_{sa}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{ls}} i_{sa} + \frac{1}{L_{ls}} v_{sa} - \frac{1}{L_{ls}} E_a \tag{4}$$

$$\frac{di_{sb}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{ls}} i_{sb} + \frac{1}{L_{ls}} v_{sb} - \frac{1}{L_{ls}} E_b \tag{5}$$

$$\frac{di_{sc}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{ls}} i_{sc} + \frac{1}{L_{ls}} v_{sc} - \frac{1}{L_{ls}} E_c \tag{6}$$

$$\tau_e = (\varphi_{ra} i_{sa} + \varphi_{rb} i_{sb} + \varphi_{rc} i_{sc}) p_p \tag{7}$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{\tau_e}{J_t} - \frac{B_t}{J_t} \omega_m - \frac{\tau_l}{J_t} \tag{8}$$

burada; i_{sa}, i_{sb} ve i_{sc} 3-faz stator akımlarını, R_s ve L_{ls} stator direncini ve stator kaçak indüktansını, E_a, E_b ve E_c 3-faz stator zıt-elektromotor kuvvet (EMK) değerlerini, v_{sa}, v_{sb} ve v_{sc} 3-faz stator gerilimlerini, τ_e indüklenen momenti, φ_{ra}, φ_{rb} ve φ_{rc} rotor akılarını, B_t ve J_t eylemsizliği ve viskoz sürtünme terimini ve p_p kutup çifti sayısını temsil etmektedir. 3-faz stator zıt-EMK değerleri rotordaki manyetik akıya (λ_m'ye), rotor elektriksel konum bilgisine (θ_e'ye) ve motorun hızına bağlıdır. Üç-faz trapezoidal zıt-EMK'lar aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

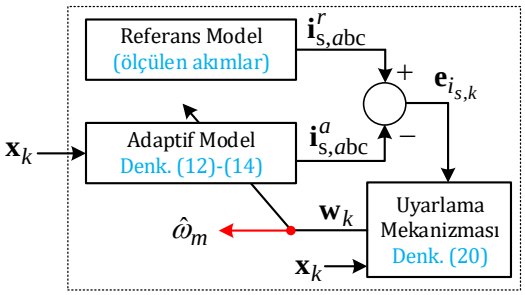
$$E_a = p_p \omega_m \lambda_m f(\theta_e) = p_p \omega_m \varphi_{ra} \tag{9}$$

$$E_b = p_p \omega_m \lambda_m f\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) = p_p \omega_m \varphi_{rb} \tag{10}$$

$$E_c = p_p \omega_m \lambda_m f\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) = p_p \omega_m \varphi_{rc} \tag{11}$$

4. OC-LMS TABANLI MUS HIZ KESTİRİCİSİ (OC-LMS based MRAS SPEED ESTİMATOR)

FDAM rotor hızını kestiren stator akım tabanlı OC-LMS temelli MUS sistemi Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3'te gösterilen kestirici yapısında, ölçülen stator akımları referans modelinin çıktıları iken, uyarlanabilir model çıktıları denklem (4)-(6)'nın ileri Euler yöntemi ile ayrıştırılmasıyla elde edilir ve aşağıdaki denklemler ile verilmiştir.



Şekil 3. OC-LMS kullanan stator akım temelli MUS (Stator current based MRAS using OC-LMS)

$$i^a_{sa,k+1} = \left(1 - \frac{TR_s}{L_{ls}}\right) i_{sa,k} - \omega_{m,k} \frac{p_p T \varphi_{ra,k}}{L_{ls}} + \frac{T v_{sa}}{L_{ls}} \tag{12}$$

$$i^a_{sb,k+1} = \left(1 - \frac{TR_s}{L_{ls}}\right) i_{sb,k} - \omega_{m,k} \frac{p_p T \varphi_{rb,k}}{L_{ls}} + \frac{T v_{sb}}{L_{ls}} \tag{13}$$

$$i^a_{sc,k+1} = \left(1 - \frac{TR_s}{L_{ls}}\right) i_{sc,k} - \omega_{m,k} \frac{p_p T \varphi_{rc,k}}{L_{ls}} + \frac{T v_{sc}}{L_{ls}} \tag{14}$$

Denklem (12), (13) ve (14), OC-LMS tabanlı MUS hız kestirici için kompakt formda aşağıdaki gibi yeniden yazılır:

$$\mathbf{i}^a_{s,k+1} = \mathbf{x}^T_k \mathbf{w}_k \tag{15}$$

burada $\mathbf{w}_k$ ve $\mathbf{x}_k$ sırasıyla uyarlanabilir modelin ağırlık vektörünü ve giriş matrisini temsil eder ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\mathbf{w}_k = \begin{bmatrix} 1 - \frac{TR_s}{L_s} \\ \omega_{m,k} \\ \frac{T}{L_s} \end{bmatrix} \tag{16}$$

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} i_{sa,k} & i_{sb,k} & i_{sc,k} \\ \frac{-p_p T \varphi_{ra,k}}{L_s} & \frac{-p_p T \varphi_{rb,k}}{L_s} & \frac{-p_p T \varphi_{rc,k}}{L_s} \\ v_{sa,k} & v_{sb,k} & v_{sc,k} \end{bmatrix} \tag{17}$$

Böylece, referans ve uyarlanabilir model çıkışları arasındaki hata ifadesi ise aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}} = \mathbf{i}^r_{s,k} - \mathbf{i}^a_{s,k} \tag{18}$$

Hata ifadesinin tanımının ardında, OC-LMS algoritmasını [15] türetmek için kesilmiş (truncated) maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$J_k = \begin{cases} \frac{1}{2}\mathbf{e}^2_{\mathbf{i}_{s,k}}, \text{eğer } \left|\max(\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}})\right| \geq \tau\sigma \\ 0, \text{ eğer } \left|\max(\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}})\right| < \tau\sigma \end{cases} \tag{19}$$

burada σ hata işareti vektörü $\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}$'nın aldığı maksimum değerin standart sapmasını; τ ise eşik seviyesini temsil etmektedir. OC-LMS algoritmasına ait ağırlık vektörü güncelleme kuralı ise aşağıdaki gibi verilir:

$$\mathbf{w}_{k+1} = \begin{cases} \mathbf{w}_k + \mu \mathbf{X}_k \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}, \text{eğer } \left|\max(\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}})\right| \geq \tau\sigma \\ \mathbf{w}_k, \qquad \text{eğer } \left|\max(\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}})\right| < \tau\sigma \end{cases} \tag{20}$$

burada σ ifadesi gerçek-zamanlı uygulamalar için özyinelemeli bir şekilde aşağıdaki gibi hesaplanır [20]:

$$\sigma_{k+1} = \beta\sigma_k + (1-\beta)\left|\max(\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}})\right|^2 \tag{21}$$

burada β unutma faktörünü temsil etmektedir ve değeri $0 < \beta < 1$ şeklindedir. Bunula birlikte, denklem (20)'de diğer bir kritik parametre τ'dur. Bu parametre $\mathbf{w}_k$'nın güncelleme oranıyla, bir başka ifade ile ne kadar artık verinin sansürleneceğiyle alakalıdır. Bu yüzden, OC-LMS koşturulurken τ'nun değeri aşağıda verilen denkleme göre anlık olarak kestirilmelidir [21]:

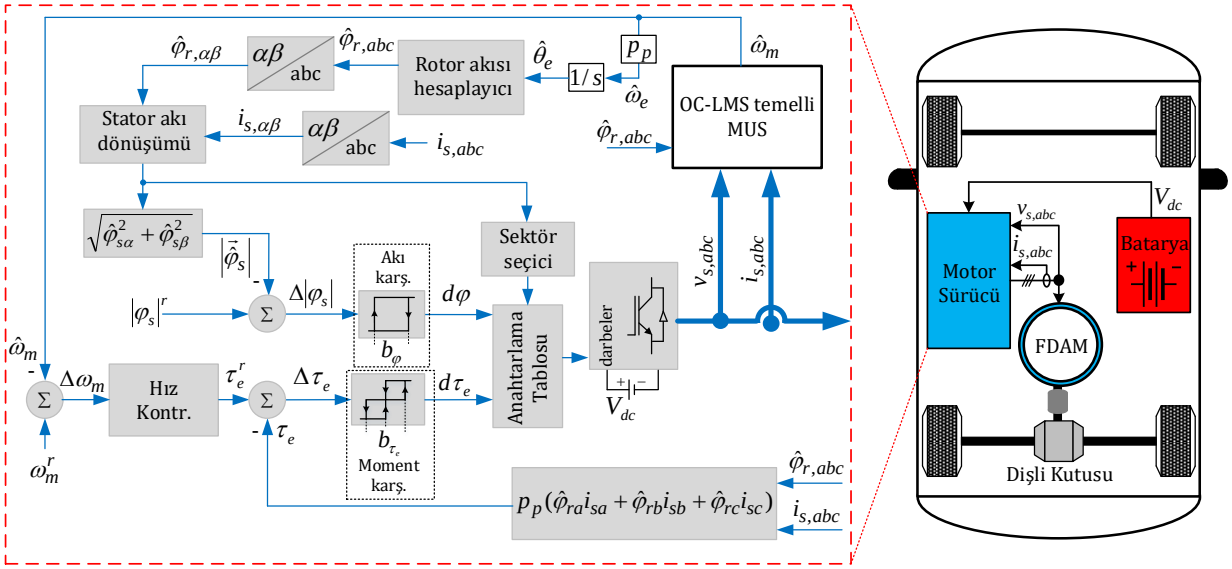
$$\tau_{k+1} = \begin{cases} \tau_k + \mu_\tau P_{ce}, \qquad \text{eğer } \left|\max(\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}})\right| \geq \tau\sigma \\ \tau_k + \mu_\tau (1 - P_{ce}), \text{eğer } \left|\max(\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}})\right| < \tau\sigma \end{cases} \tag{22}$$

burada μ_τ adım büyüklüğü, $P_{ce} = \frac{K-p}{K}$ istenilen sansürleme oranı K toplam veri sayısı, p ise bilgilendirici veri sayısıdır.

4. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESUTS)

Hafif elektrikli bir aracın tahrik edilmesi için önerilen OC-LMS temelli MUS kestiricisini kullanan hız-algılayıcısız DMK tabanlı FDAM motor sürücüsü Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'te verilen sürücü MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur. DMK sisteminde τ^r_e referans değeri geleneksel PI tipi hız kontrolörü kullanılarak üretilmiştir. Ek olarak DMK'nın moment ve akı tepkisini belirlemek için sırasıyla üç ve iki seviyeli histerezis karşılaştırıcılar kullanılmıştır. Stator akısının $\alpha\beta-$ bileşenleri ($\varphi_{s\alpha}$ ve $\varphi_{s\beta}$), $\alpha\beta-$ eksenindeki stator akımı ve rotor akısı ile birlikte stator kaçak endüktans kullanılarak [7]'deki gibi hesaplanmıştır.

Benzetim çalışmalarında kullanılan EA ve FDAM'ye ait parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Benzetim çalışmaları $20\mu s$ örnekleme zamanı için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, EA'yı tahrik eden DMK tabanlı sürücü sisteminden yüksek başarımlı kontrol sonucu almak için DMK'daki geleneksel PI kontrolörün katsayıları $K_p = 8$ ve $K_i = 10$ olarak seçilmiştir. Ek olarak, FDAM'nin rotor hızı kestirimi için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait parametreler $\mu = 0.9$, $\mu_\tau = 0.2$ ve $\beta = 0.9$ olarak ayarlanmıştır.

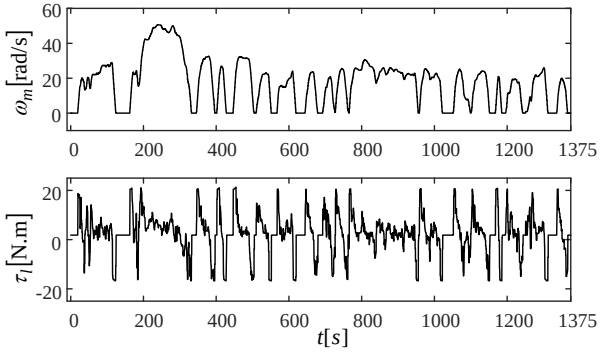


Şekil 4. Hafif elektrikli aracın tahrik edilmesi için tasarlanan hız-algılayıcısız DMK tabanlı FDAM sürücüsü (Speed-sensorless DTC-based BLDC motor drive designed for the propulsion of the light electric vehicle)

Tablo 1. EA ve FDAM parametreleri

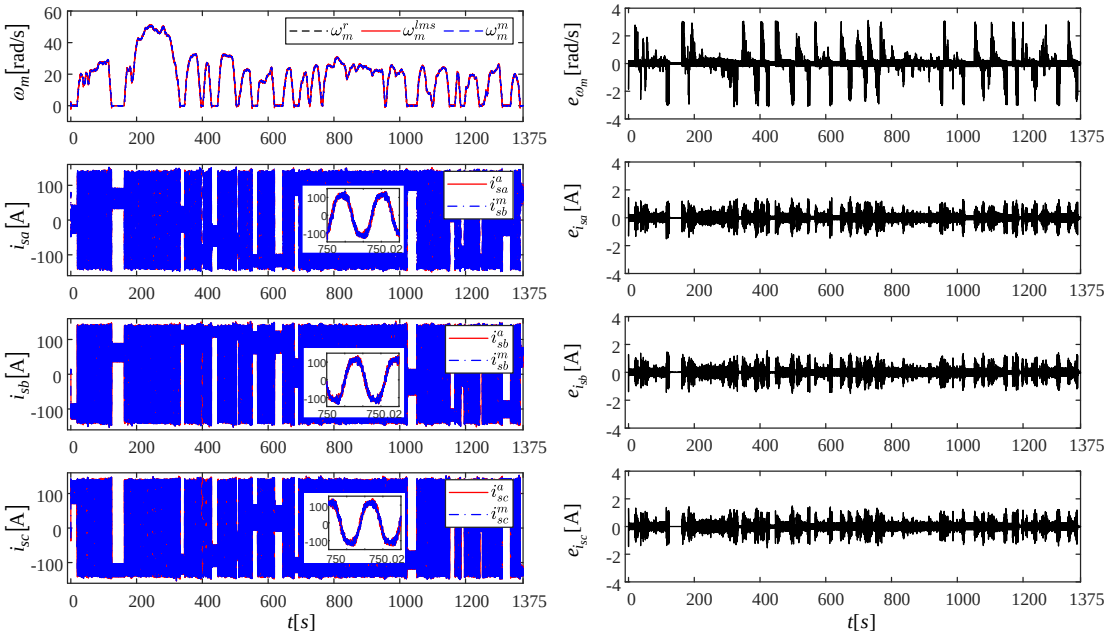
EA Parametreleri [22]	Değeri	FDAM Parametreleri [7]	Değeri
Aracın Kütlesi (Kg)	$M_v = 678$	Stator Gerilimi (V)	$V = 72$
Aracın Ön Alanı (m^2)	$A = 2.09$	Stator Direnci (Ω)	$R = 0.33$
Yuvarlanma Direnci Katsayısı	$K_R = 0.015$	Stator Kaçak Endüktansı (mH)	L_{ls}=0.1345
Binek Otomobiller İçin Rüzgar Direnci	$K_W = 0.3$	Kutup Çifti Sayısı	$p_p = 23$
Dişli Oranı	$r_f = 2$	Anma Hızı (dev/dk)	$n_m = 750$
Tekerleğin Yuvarlanma Yarıçapı (m)	$r_r = 0.2$	Anma Momenti ($N.m$)	$\tau_l = 21$

EA için DMK tabanlı FDAM sürücüsüne ait kontrol başarımı ve OC-LMS temelli MUS'un kestirim başarımı UDDS sürüş döngüsü ve Denklem (3) kullanılarak üretilen hız ve yük momenti değişimleri (Şekil 5) için test edilmiştir. UDDS sürüş profili ortalama 8.89 m/s'lik (32 km/h) hız ve maksimum 25.56 m/s'lik (92 km/h) hızı içeren toplam 12 km'lik bir uzunlukta şehir içi güzergahıdır. Bu sürüş profili yaklaşık 1370 s'lik bir senaryoyu içermektedir [23].



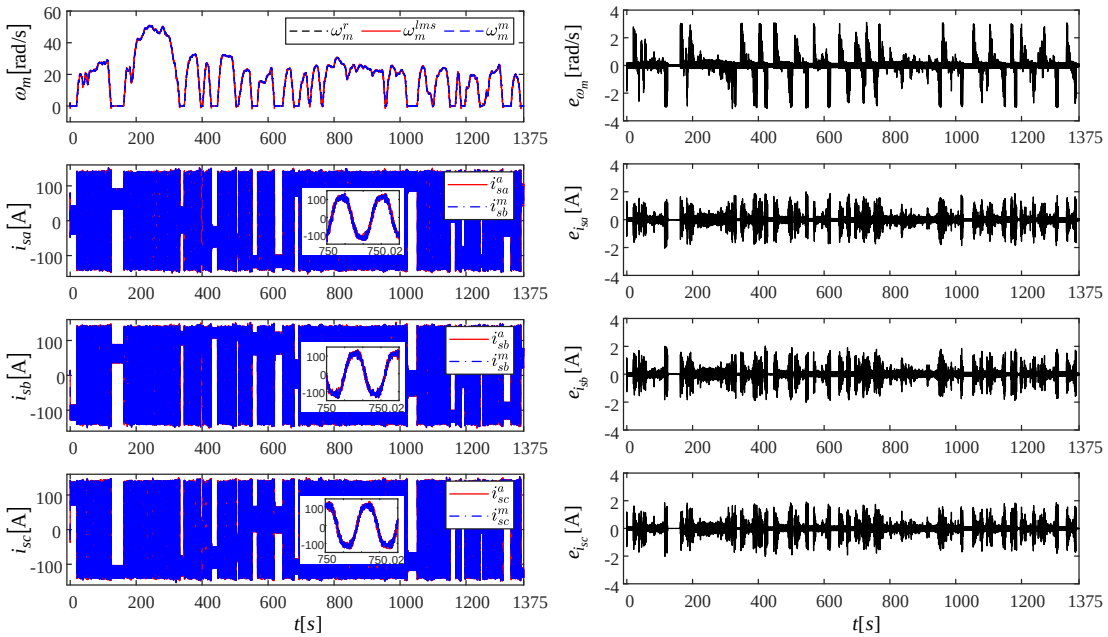
Şekil 5. Sürücü sistemine verilen hız referansı ve motora uygulanan yük momenti değişimleri (Speed reference given to the drive system, and load torque variations applied to the motor)

Önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestiricide sansürleme oranı %30, %50, %70 ve %85 olarak seçilmiştir. Şekil 5'te verilen sıfır hız ile anma hız aralığında geçici ve sürekli hal durumlarını içeren hız referansı ve yük momenti değişimleri için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da geleneksel LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları verilirken Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da OC-LMS temelli MUS'tan elde edilen kestirim sonuçları ve hatalar verilmiştir. Sonuçların veriliği bu şekillerde ω_m^r sürücü sitemine verilen hız referansını, $\hat{\omega}_m$ kestirilen hızı, ω_m^m ölçülen hızı, $i_{(\cdot)}^m$ ölçülen stator akımlarını, $i_{(\cdot)}^a$ uyarlanabilir model çıkışlarını ve $e_{(\cdot)}$ ise hataları ifade etmektedir. Ek olarak Tablo 2'de geleneksel LMS tabanlı MUS (sansürleme içermeyen) ile %30, %50, %70 ve %85 sansürleme oranı için OC-LMS temelli MUS'a ilişkin ortalama çalışma süreleri ve kök ortalama kare hata (root mean square error, RMSE) değerleri verilmiştir.



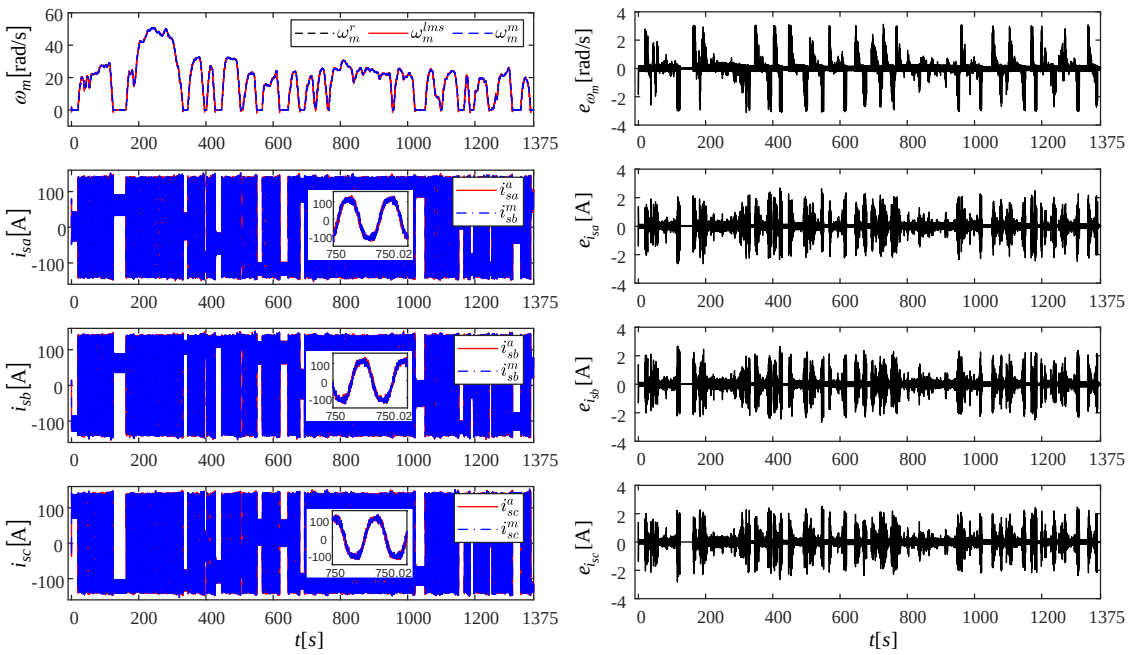
(a) (b)

Şekil 6. Geleneksel LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları (a) Kestirim sonuçları (b) Hatalar
(Simulation results of traditional LMS-based MRAS (a) Estimation results (b) Errors)

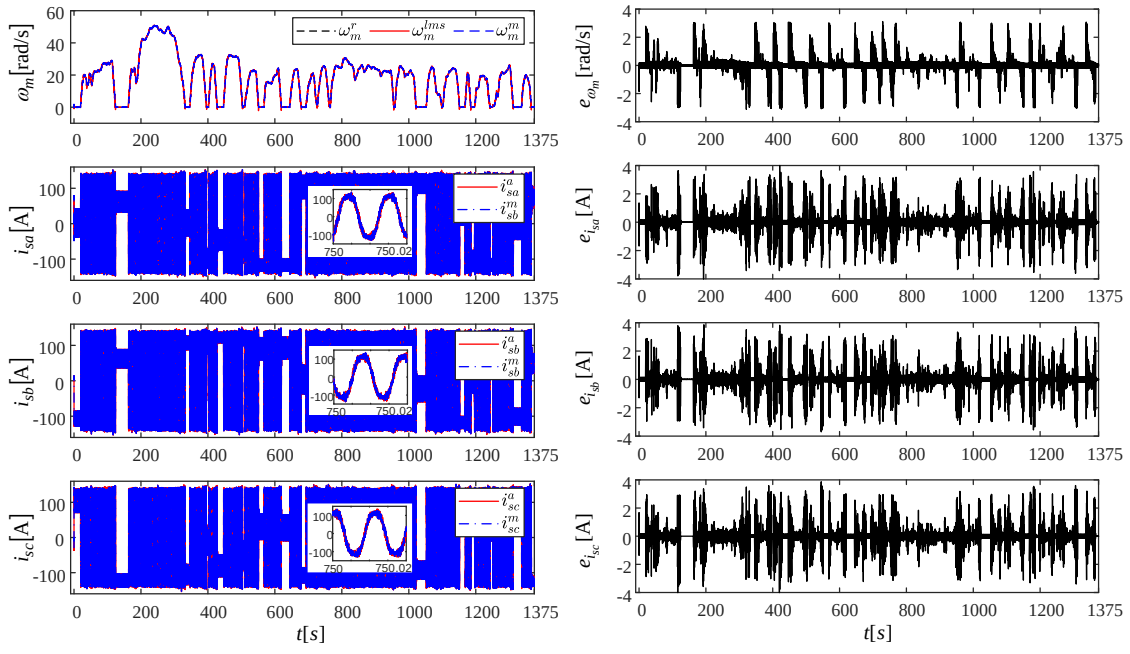


(a) (b)

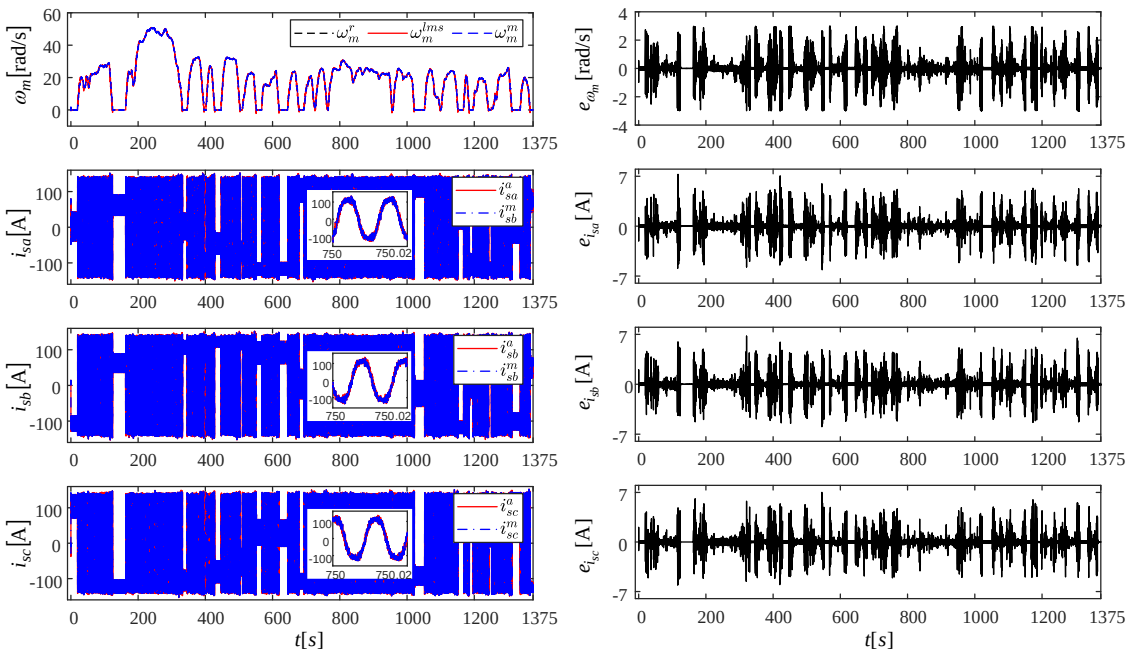
Şekil 7. %30 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları (a) Kestirim sonuçları (b) Hatalar (Simulation results of the proposed OC-LMS based MRAS for 30% censoring rate (a) Estimation results (b) Errors)



Şekil 8. %50 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları (a) Kestirim sonuçları (b) Hatalar (Simulation results of the proposed OC-LMS based MRAS for 50% censoring rate (a) Estimation results (b) Errors)



Şekil 9. %70 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları (a) Kestirim sonuçları (b) Hatalar (Simulation results of the proposed OC-LMS based MRAS for 70% censoring rate (a) Estimation results (b) Errors)



(a) (b)

Şekil 10. %85 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları (a) Kestirim sonuçları (b) Hatalar (Simulation results of the proposed OC-LMS based MRAS for 85% censoring rate (a) Estimation results (b) Errors)

Tablo 2. Farklı sansürleme oranları için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestiricinin ortalama çalışma süreleri ve RMSE değerleri (Average running times and RMSE values of the proposed OC-LMS-based MRAS estimator for different censoring rates)

MUS kestiricileri	Çalışma süreleri [s]	$e_{\omega_m}^{RMSE}$	$e_{i_{sa}}^{RMSE}$	$e_{i_{sb}}^{RMSE}$	$e_{i_{sc}}^{RMSE}$
LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%0$)	16.3834	0.0723	0.0535	0.0537	0.0540
OC-LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%30$)	13.6748	0.0673	0.0590	0.0590	0.0591
OC-LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%50$)	11.8541	0.0635	0.0735	0.0737	0.0736
OC-LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%70$)	11.0924	0.0626	0.0728	0.0744	0.0745
OC-LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%85$)	10.3382	0.1186	0.1055	0.1059	0.1057

Şekil 6-Şekil 10 ve Tablo 2'de sunulan sonuçlar incelendiğinde aşağıda verilen çıkarımlar yapılabilir;

- Şekil 5'te verilen sıfır hızı da içeren UDDS hız referansı ve elektrikli araca etkiyen toplam çekiş kuvveti kullanılarak üretilen yük momenti değişimleri için üretilen zorlayıcı senaryoya karşı önerilen kestiricinin başarımı tatmin edici seviyededir.

- EA'yı tahrik etmek için önerilen OC-LMS temelli MUS kestiriciyi kullanan DMK tabanlı FDAM sürücüsü yüksek kontrol başarımına sahiptir.

- Kestirim sonuçlarına ilişkin RMSE değerleri önerilen yöntemin etkinliğini göstermektedir. %30, %50 ve %70 sansürleme oranları için önerilen hız kestiricisine ait RMSE değerleri geleneksel LMS temelli MUS [8] ile karşılaştırıldığında, önerilen yöntemin başarımının kabul edilebilir seviyede olduğu açıktır.

- Beklenildiği üzere sansürleme oranının çok yüksek seçilmesi (Örneğin %85) önerilen

yöntemin RMSE değerinde yüksek artışa sebep olmaktadır. Bununla birlikte DMK tabanlı sürücünün kontrol başarımı bu artıştan negatif yönde ciddi manada etkilenmemektedir.

- Farklı sansürleme oranları için hesaplanan çalışma süreleri, önerilen yaklaşımın çalışma süresini geleneksel LMS temelli MUS'a göre önemli ölçüde düşürdüğünü açıkça göstermektedir. Örneğin önerilen kestirici %30 sansürleme oranı için %16.53 oranında, %85 için ise %36.89 oranında çalışma süresini düşürmüştür.

Özetle Şekil 6-Şekil 10 ve Tablo 2'de verilen sonuçlar önerilen OC-LMS temelli MUS rotor hızı kestiricisinin başarımını onaylamaktadır. Ayrıca OC-LMS MUS kestiricisini kullanan DMK tabanlı EA sürücüsünün kontrol başarımı da oldukça yüksektir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, FDAM'lerin rotor hız kestirimi için düşük işlem yüküne sahip üç faz stator akımlarını kullanan OC-LMS temelli MUS önerilmiştir. Önerilen OC-LMS temelli MUS hız kestiricisi farklı sansürleme oranları için hız-algılayıcısız DMK tabanlı FDAM sürücüsü ile doğrulanmıştır. Tasarlanan yeni kestiricinin başarımı UDDS sürüş profilinin DMK tabanlı sürücüye referans hız bilgisi olarak verildiği zorlayıcı senaryo ile test edilmiştir. Ek olarak, EA modelinden elde edilen toplam çekiş kuvvetinin dönüştürülmesi ile elde edilen yük momenti değişimleri FDAM'ye yük olarak uygulanmıştır. Sıfır hız durumlarını da içeren geniş hız aralığı için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar, hem OC-LMS temelli MUS kestiricisinin hem de bu kestiriciyi kullanan DMK tabanlı FDAM sürücüsünün başarımını onaylamaktadır. Ek olarak, önerilen OC-LMS temelli MUS'un çalışma süreleri geleneksel LMS temelli MUS kestirici ile karşılaştırılmıştır. Önerilen kestirici çalışma süresini %30 sansürleme oranı için %16.53 oranında düşürürken, %85 sansürleme oranı için %36.89 oranında düşürmüştür. Gelecek çalışmalarda önerilen OC-LMS temelli MUS algoritmasının gerçek zamanlı olarak test edilmesine odaklanılacaktır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI
(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

***Mehmet ÜNAL*:** Önerilen kestiriciyi tasarlamış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He designed the proposed estimator, analyzed the results, and performed the writing process of the article.

***Rıdvan DEMİR*:** Kestirim algoritmasının fikrini ortaya atmış, güncel literatürü incelemiş, önerilen kestiriciyi tasarlamış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir. 6

He proposed the idea of the estimation algorithm, reviewed the current literature, designed the proposed estimator, analyzed the results, and performed the writing process of the article.

***Engin Cemal MENGÜÇ*:** Güncel literatürü incelemiş, sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım sürecini gerçekleştirmiştir.

He reviewed the current literature, analyzed the results, and performed the writing process of the article.

***Remzi İNAN*:** Güncel literatürü incelemiş, sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım sürecini gerçekleştirmiştir.

He reviewed the current literature, analyzed the results, and performed the writing process of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Bouguenna IF, Tahour A, Kennel R, Abdelrahem M. Multiple-Vector Model Predictive Control with Fuzzy Logic for PMSM Electric Drive Systems. Energies. 2021; 14: 1-23.

[2] Irimia ND, Lazar FI, Luchian M. Comparison Between Sinusoidal and Space Vector Modulation Techniques on the Resulting Electromagnetic Torque Ripple Produced by a Three-Phase BLDC Motor under Field-Oriented Control. 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). 2019; 640–645.

[3] Kokundu S, Aydemir MT. UVDGM Tabanlı AYK Yöntemiyle Fırçasız Doğru Akım Motorunun Konum Kontrolü. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji. 2020; 8:1, 1-14.

[4] Inan R. An Improved Model Predictive Current Control of BLDC Motor With a Novel Adaptive Extended Kalman Filter–Based Back EMF Estimator and a New Commutation Duration Approach for Electrical Vehicle. International Journal of Circuit Theory and Applications. 2025; 53: 2, 1135–1150.

[5] Ubare P, Ingole D, Sonawane DN. Nonlinear Model Predictive Control of BLDC Motor with State Estimation. IFAC-PapersOnLine. 2021; 54:6, 107–112.

[6] Kaf AA, Cheng X, Zhang C, Almadwami A, Abdullah A, Almadwami H. Sensorless Direct Torque Control in Brushless DC Motor Using Sliding Mode Observer. 2024 4th International Conference on Emerging Smart Technologies and Applications (eSmarTA), 2024; 1–8.

[7] İnan, R, Aksoy B, Salman OKM. Estimation performance of the novel hybrid estimator based on machine learning and extended Kalman filter proposed for speed-sensorless direct torque control of brushless direct current motor. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2023; 126: 1-13.

[8] Tuzcu C, Mengüç EC, Demir R. İnan R, Fırçasız doğru akım motorların adaptif filtre tabanlı MRAS ile hız algılayıcısız doğrudan moment kontrolü. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2025; 14: 2, 680-687.

[9] Saha B, Singh B. Torque Ripple Mitigation in Sensorless PMBLDC Motor Drive With Adaptive Observer for LEV. IEEE Transactions on Power Electronics. 2505; 40: 1, 1739–1747.

[10] Gamazo-Real JC. Martínez-Martínez V, Gomez-Gil J. ANN-based position and speed sensorless estimation for BLDC motors. Measurement. 2022; 188:110602.

[11] Joshi D, Deb D, Giri AK. MRAS disturbance observer-based sensorless field-oriented backstepping control of BLDC motor drive. Electrical Engineering. 2024; 106: 5, 6681–6701.

[12] Demir R. Speed-sensorless Predictive Current Controlled PMSM Drive With Adaptive Filtering-based MRAS Speed Estimators. International Journal of Control, Automation and Systems. 2023; 21: 8, 2577–2586.

[13] Demir R, Yıldız R, Barut M, Speed-sensorless predictive torque control of the IM based on MRAS. Nigde Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences. 2023; 12:1, 126–133.

[14] Yıldız R, Demir R, Zerdali E, Barut M. Least mean Kurtosis algorithm-based MRAS estimator for speed-sensorless model predictive control of induction motor. V. International Turkic World Congress on Science and Engineering, Bishkek, Kırgızistan. 2023; 80–92.

[15] Berberidis D, Kekatos V, Giannakis GB. Online Censoring for Large-Scale Regressions with Application to Streaming Big Data. IEEE Transactions on Signal Processing 2016; 64:15, 3854–3867.

[16] Mengüç EC, Acır N, Mandic DP. A Class of Online Censoring Based Quaternion-Valued Least Mean Square Algorithms. IEEE Signal Processing Letters. 2023; 30: 244–248.

[17] Mengüç EC, Xiang M, Mandic DP. Online censoring based complex-valued adaptive filters. Signal Processing. 2022; 200: 108638.

[18] Alzayed M, Chaoui H. Efficient Simplified Current Sensorless Dynamic Direct Voltage MTPA of Interior PMSM for Electric Vehicles Operation. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2022; 71:12, 12701–12710.

[19] Krasopoulos CT, Beniakar ME, Kladas AG. Velocity and Torque Limit Profile Optimization of Electric Vehicle Including Limited Overload. IEEE Transactions on Industry Applications. 2017; 53:4, 3907–3916.

[20] Mengüç EC, Mandic DP. Online censoring-based learning algorithms for fully complex-valued neural networks. Neurocomputing. 2025; 623: p129412.

[21] Romero D, Berberidis D, Giannakis GB. Quickest convergence of online algorithms via data selection. 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2016; 6185–6189.

[22] Vidhya SD, Balaji M. Modelling, design and control of a light electric vehicle with hybrid energy storage system for Indian driving cycle. Measurement and Control. 2019; 52: 1420–1433.

[23] Demir R. Elektrikli araçlar için farklı hız profilleri altında model öngörülü akım kontrollü İSMSM sürücüsünün başarımı. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2024; 13:4, 1478-1484.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1002-1018 (2025)

Yapay Zeka ile Tarihi Çevrede Mekan Dizimi: Uşak Geleneksel Konutlarının Tipolojik Sınıflandırılması

Gizem GÜVLÜ ERHAN[1*] Seda ŞİMŞEK[2]

[1]*100/2000 YÖK Doktora Öğrencisi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Planlama ve Tasarım Anabilim Dalı, Isparta*

[2]*Süleyman Demirel Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Isparta*

Article Info

Research article
Received: 22/04/2025
Revision: 04/06/2025
Accepted: 09/07/2025

Keywords

Space Syntax
Artificial Intelligence
Machine Learning
Usak Traditional Houses

Makale Bilgisi

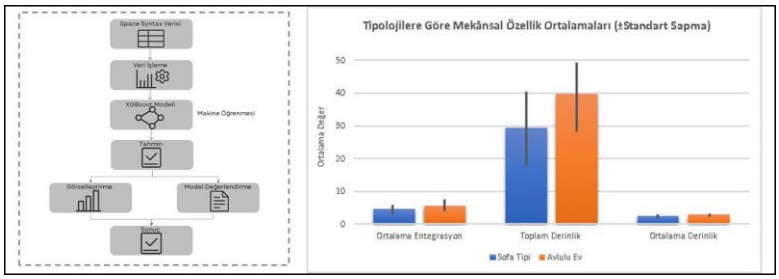
Araştırma makalesi
Başvuru: 22/04/2025
Düzeltme: 04/06/2025
Kabul: 09/07/2025

Anahtar Kelimeler

Mekan Dizim
Yapay Zeka
Makine Öğrenmesi
Uşak Geleneksel Konutları

Grafik Özet (Gphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, geleneksel Uşak evleri arasından seçilen on iki yapının mekan dizim yöntemi ile mekansal sayısallaştırılması ve mekânsal organizasyon özelliklerinin yapay zeka temelli makine öğrenmesi yöntemi ile tipolojik olarak sınıflandırılması yapılmıştır. / In this study, twelve buildings selected from among traditional Uşak houses were spatially digitised using a spatial arrangement method, and their spatial organisation characteristics were classified typologically using an artificial intelligence-based machine learning method.



***Şekil A**: Çalışmanın yöntem akış şeması ve tipolojilere göre mekansal özellik ortalamaları **Figure A:**. Methodological flow chart of the study and spatial feature averages according to typologies*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Mekan dizim metrikleri tipolojik ayrımı sağlayan güçlü parametrelerdir. / Spatial arrangement metrics are powerful parameters that enable typological differentiation.*
- *Pyhton programlama dili aracılığı ile mekansal konfigürasyon verilerinin analizi gerçekleştirilmiştir. / Spatial configuration data was analysed using the Python programming language.*
- *Tipoloji tahminleri, denetimli öğrenme temelli XGBoost algoritması ile gerçekleştirilmiştir. / Typology predictions were made using the supervised learning-based XGBoost algorithm.*

***Amaç (Aim):** Bu çalışmada mekansal kurgunun sayısal karşılığını ortaya koyan 'mekan dizimi' yöntemi ile elde edilen mekansal metriklerin 'yapay zeka algoritmaları' ile bütünleştirilerek incelenmesi amaçlanmıştır. / This study aims to examine spatial metrics obtained using the "spatial composition" method, which reveals the numerical equivalent of spatial composition, by integrating them with "artificial intelligence algorithms".*

***Özgünlük (Originality):** Çalışmanın özgünlüğünü kültürel mirasın dijital analizine yönelik yeni bir metodolojik yaklaşım sunması ve mekansal verilerin yapay zeka algoritmaları ile bütünleştirilerek incelenmesi oluşturmaktadır. / The originality of the study lies in its presentation of a new methodological approach to the digital analysis of cultural heritage and its examination of spatial data integrated with artificial intelligence algorithms.*

***Bulgular (Results):** Mekân sentaksı yöntemiyle elde edilen mekânsal veriler, XGBoost algoritması kullanılarak analiz edilmiştir ve bu veriler kullanılarak konut tipolojileri yüksek doğruluk oranıyla tahmin edilmiştir. / Spatial data obtained using the spatial syntax method was analysed using the XGBoost algorithm, and housing typologies were predicted with a high degree of accuracy using this data.*

***Sonuç (Conclusion):** Elde edilen sonuçlar, tipoloji sınıflandırmasında mekan sentaksı göstergelerinin anlamlı etkileri olduğunu ve tipolojinin mekânsal performans içerisinde nicel olarak ayrıştırılabilir olduğunu ortaya koymuştur. / The results obtained reveal that spatial syntax indicators have a significant effect on typological classification and that typology can be quantitatively distinguished within spatial performance.*

*Corresponding author, e-mail: gizemguvlu07@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1681672

GU J Sci, Part C, 10(3): 1002-1018 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Yapay Zeka ile Tarihi Çevrede Mekan Dizimi: Uşak Geleneksel Konutlarının Tipolojik Sınıflandırılması

Gizem GÜVLÜ ERHAN[1*] Seda ŞİMŞEK[2]

[1]*100/2000 YÖK Doktora Öğrencisi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Planlama ve Tasarım Anabilim Dalı, Isparta*

[2]*Süleyman Demirel Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Isparta*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/04/2025
Düzeltme: 04/06/2025
Kabul: 09/07/2025

Anahtar Kelimeler

Mekan Dizim
Yapay Zeka
Makine Öğrenmesi
Uşak Geleneksel Konutları

Öz

Kültürel miras niteliği taşıyan geleneksel konutlar, yalnızca fiziksel yapıları değil barındırdıkları mekan-insan ilişkileri bakımından korunması gereken, kültürel normların yansıtıcısı görevini üstlenen ögelerdir. Bu ilişkilerin bilimsel biçimde ortaya konulabilmesi için mekânsal örgütlenme mantığının modern yöntemler ile detaylı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada mekansal kurgunun sayısal karşılığını ortaya koyan ve mekandaki sosyal mantığı nicel olarak analiz etmemizi sağlayan 'mekan dizimi' yöntemi ile topluluklar arasındaki kültürel farklılıklara göre şekillenen mekânsal kurgular 'yapay zeka algoritmaları' ile bütünleştirilerek incelenmiştir. Geleneksel Türk konutlarındaki kültürün mekânsal yansımasının ortaya koyulabilmesi için mekan dizim teorisi ile yapay zekanın sınıflandırma gücünü birleştirmek amaçlanmıştır. Çalışmada geleneksel Uşak evlerinden seçilen on iki konutun morfolojik analizleri yapılarak mekânsal ilişkileri ortaya konulmuştur. Elde edilen derinlik, entegrasyon, bağlanırlık gibi metrikler Python diliyle işlenerek yapay zekâ destekli sınıflandırma modeli oluşturulmuştur. Denetimli öğrenme yaklaşımına dayalı XGBoost algoritması kullanılarak tipoloji tahminleri gerçekleştirilmiştir. Bulgular, geleneksel konutların mekânsal yapısının yapay zeka sistemleri tarafından başarılı şekilde ayrıştırılabildiğini göstermektedir. Bu yöntem, kültürel mirasın dijital analizine yönelik yeni bir metodolojik yaklaşım sunmaktadır.

Space Syntax in Historical Environment with Artificial Intelligence: Typological Classification of Usak Traditional Houses

Article Info

Research article
Received: 22/04/2025
Revision: 04/06/2025
Accepted: 09/07/2025

Keywords

Space Syntax
Artificial Intelligence
Machine Learning
Usak Traditional Houses

Abstract

Traditional dwellings, which have the characteristics of cultural heritage, are elements that should be preserved not only in terms of their physical structures but also in terms of the space-human relations they harbour, and that serve as reflectors of cultural norms. In order to reveal these relations in a scientific way, the logic of spatial organisation should be analysed in detail with modern methods. In this study, spatial constructs shaped according to cultural differences between communities are examined by integrating "artificial intelligence algorithms" with the "spatial syntax" method, which reveals the numerical equivalent of spatial fiction and allows us to quantitatively analyse the social logic in space. In order to reveal the spatial reflection of the culture in traditional Turkish houses, it is aimed to combine the spatial sequence theory with the classification power of artificial intelligence. In the study, twelve houses selected from traditional Uşak houses were morphologically analysed and their spatial relationships were revealed. The obtained metrics such as depth, integration and connectivity were processed with Python language and an artificial intelligence supported classification model was created. Typology predictions were made using the XGBoost algorithm based on the supervised learning approach. The findings show that the spatial structure of traditional houses can be successfully decomposed by artificial intelligence systems. This method offers a new methodological approach to the digital analysis of cultural heritage.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsanoğlunun tarih öncesinden bu yana en temel gereksinimlerinden biri olan barınma ihtiyacının karşılanması amacıyla ortaya çıkan konut kavramının zaman içerisinde geçirdiği değişim disiplinler arası bir araştırma konusudur. Coğrafik, kültürel, sosyolojik pek çok faktörden etkilenerek

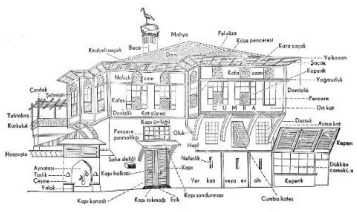
*Corresponding author, e-mail: gizemguvlu07@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1681672

yüzyıllar boyu gelen tarihsel birikim sonucunda oluşan geleneksel konutlar ne yazık ki yok olmakla karşı karşıyadır. Bu noktada mekan ve insan arasındaki ilişkinin nasıl farklılaştığını araştırmak, mekân kuramları ile bilişimsel teknolojilerin entegre edildiği çağdaş yaklaşımların kullanılabilirliğini sorgulamak tüm bu kültürel oluşumların sürdürülebilirliğini sağlayacaktır.

Birden çok medeniyete ev sahipliği yapan Anadolu, üzerinde yaşayan toplumların sosyo-kültürel ve sosyo-ekonomik pek çok özelliğine göre şekillenen geleneksel konutları barındırmaktadır (Şekil 1). Geçmişin yaşam biçimi, aile yapısı, kültürel özelliklerini gelenek ve göreneklerini yansıtan bu ögeler Anadolu'nun kültürel kodlarını oluşturmaktadır. Türklerin tarih boyunca inşa ettikleri ve yaşadıkları ev tipi olarak tanımlanabilen Türk evi de çok sayıda farklı kültür ögesinden etkilenerek şekillenmiş bir oluşumdur [16]. Türk evi, Eldem'e göre Osmanlı'nın işgal ettiği sınırlar içerisinde bu bölgelere yerleşmiş, gelişmiş ve uzun yıllar tutunmuş kendi özellikleriyle oluşmuş bir ev tipidir [7]. Kuban'a göre ise Türk evi; geleneksel Türk ailesinin kültürel özelliklerine ve törelerine uygun olarak şekillenen plan özellikleri ile Türk insanının ihtiyaçlarına cevap vermiş bir konut tipidir [17].

Geleneksel Türk konutlarındaki plan tiplerini sofa ve odaların yerleşim şekilleri belirlemektedir. Eldem'e göre sofa tüm işlevlerin toplandığı ve aynı zamanda dağıldığı ortak bir mekandır ve Türk evlerini sofa tiplerine göre 4'e ayırmıştır [7]. Bunlar; sofasız, dış sofalı, iç sofalı, orta sofalıdır. Sofasız plan tipine sahip konutlar, Türk evlerinin en basit hali olarak kabul edilmektedir. Odalar yan yana dizilerek evi oluşturmaktadır [3]. İklimin sıcak olduğu bölgelerde tercih edilen sofasız plan tipindeki evlere giriş bahçe ya da avludan sağlanmaktadır [3]. Ilık ya da sıcak iklimlerde daha çok tercih edilen dış sofalı plan tipinde sofanın önü açık bırakılarak yaz aylarında serinleme ihtiyacını karşılaması amaçlanmıştır. Sıra odalı, köşe sofalı, üç tarafı odalı plan çeşitleri vardır. İç sofalı plan tipine sahip konutların en belirgin özelliği yapının kare planlı olması ve pahlı ya da oval bir sofaya sahip olmasıdır (Şekil 2). Bu plan tipolojisi karnıyarık tipi olarak da isimlendirilmektedir. Odalar evin köşelerine yerleştirilmiştir ve odaların aralarında merdiven, kiler ya da mutfak gibi servis mekanları konumlandırılmıştır [7]. Türk evlerinin en gelişmiş plan tipi olan orta sofalı plan tipinde ise sofa evin merkezi noktasında yer almaktadır ve dört tarafı da odalar ile çevrilidir. Sofa odaların arasında yer alan eyvanlardan aydınlatılmaktadır. Odalar arasında kiler, depo, mutfak gibi servis mekanları da bulunabilmektedir. Sofanın köşeleri pahlı ya da oval biçimlidir, sofa korunaklı olduğu için soğuk iklimlerde daha çok tercih edilmiştir [2].

Ait oldukları dönemlere ayna tutan geleneksel konutlar kentlerin oluşumunda ve kimliklerinin devamlılığının sağlamasında önemli yer tutmaktadır. Konut cepheleri de içinde bulundukları toplumun kültürünü sokağa, kente aktaran somut ögelerdir. Genel anlamda sade bir tasarıma sahip olan geleneksel Türk evleri cephelerinde bulunan farklı ögeler ile; cumbalar, çıkmalar, pencereler, kapılar, saçaklar ve süslemeler ile sokak cephesinden daha zengin unsurlardır. En önemli karakteristik öge olan cumba, oda ya da sofanın yapının üst katlarından dışa taşan, üstü ve yanları örtülü biçimdir [6;10]. Çoğunlukla iki ya da tek katlı olan Türk evlerinin temel noktasında zeminden 1,5-2 m yükseltilerek oluşturulmuş yaşam katı yer almaktadır. Daha fazla ışık, güneş ve manzara gibi etmenlerden yararlanılmak için ahşap direkler üzerine yaşam katı yükseltilmiştir. Zemin kat doğrudan yaşama mekanı olarak kullanılmayıp daha çok doğal çevre ile ilişkilerin kurulmasını sağlayan bir geçiş mekanı olarak kurgulanmıştır. Zamanla zemin katı depo ahır samanlık taşlık gibi mekanlara dönüşmüştür. Geleneksel Türk evinin temel yapı malzemeleri ahşap, taş ve kerpiçtir. Dolgu malzemesi olarak ise çoğunlukla kerpiç kullanılmıştır. Yörenin iklimine ve coğrafyasına göre değişen yapı malzemelerinde esas nokta ulaşılabilirliktir [18]. Çoğunlukla ahşap yığma veya ahşap karkas sistem kullanılarak inşa edilen Türk evlerinde taşıyıcı sistemin araları kerpiç ya da tuğla ile doldurulmuştur.



Şekil 1. Geleneksel Türk Evi (Traditional Turkish Houses) [1]



Şekil 2. Geleneksel Türk evinde sofa (sofa in a Traditional Turkish house) [2]

1.1. Geleneksel Uşak Evleri (Traditional Usak Houses)

Bir kentin kimliğini üzerinde yaşayan halkın sosyal, ekonomik, kültürel ve dini birçok özelliği belirlemektedir. Toplumların inanç, kültür ve gelenekleri doğrultusunda şekillenen mimari de ait olduğu bölgeye kazandırdığı özgün karakterler ile kentin kimliğini yansıtmakta önemli bir yere sahiptir [22]. Tarih boyunca önemli yerleşmelere ev sahipliği yapmış olan Uşak ili, kültürel ve coğrafi anlamda pek çok farklı değeri içerisinde barındırmaktadır. Estetik ve tarihi yönüyle ön plana çıkan; geleneksel konutlar, camiler, hanlar, hamamlar ile Uşak kent merkezinde tarihi doku yaşamakta ve hissedilmektedir [24]. Geleneksel konutlar ise kentte en sık karşılaşılan yapı türü olarak, malzemesi, yapım tekniği ve tasarımı gibi özellikleri ile bulunduğu coğrafyayı en iyi şekilde yansıtan önemli sivil mimarlık ürünleridir. Bu anlamda özellikle Uşak kentsel sit alanı içerisinde bulunan geleneksel Uşak evleri, kente özgü bir karakter kazandıran ögelerinin başında gelmektedir.

Anadolu Türk konut mimarisinde olduğu gibi planın belirleyicisi ve merkezi Uşak geleneksel konutlarında da sofadır ve yapılar genellikle tek ya da iki kattan oluşmaktadır [11]. Plan şemalarında zemin katın genellikle depo, taşlık, kışlık ihtiyaçlar için düzenlenmiş olduğu birinci katta ise yaşama mekanının bulunduğu görülmektedir [26]. Konutun asıl planın tipini birinci kat oluşturmaktadır. İki kat arası bağlantı ahşap tek kollu bir merdiven ile sağlanır. Konutlar sofanın bulunduğu yere bağlı olarak dış sofalı ve iç sofalı plan tipi olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Dış sofaya sahip konutlarda avludan ulaşılan ahşap bir merdiven ile sofa mekanına ulaşılır. Dış sofa çatı ile örtülü olup önü açık avluya bakan yarı kapalı bir mekandır. Odalar ise sofanın arkasında yer alıp hem sokak cephesinden hem de sofadan ışık alarak aydınlanmaktadır. İç sofalı tiplerde ise zemin kattan çıkılan ahşap merdiven ile sofaya ulaşılır. Odalar sofanın etrafına dizilmiş durumdadır. Yaşama ve yatma mekanlarının hepsi sofadan dağılmaktadır [12].

Uşak kentsel sit alanı içerisinde bulunan geleneksel Uşak evlerinin planları incelendiğinde çoğunda zemin kat yüksekliğinin birinci kattan daha az olduğu görülmüştür. Zemin katlar genellikle depo taşlık olarak kullanılması dolaysıyla üst kattaki yaşama ve yatma mekanlarında daha fazla net yükseklik bırakılmıştır. Kentsel dokudaki konut gabarisi ortalama olarak 7 metre civarındadır [27]. Konutların cepheleri ise genellikle sade olup yapıların çoğunlukla bitişik nizam olduğu görülmektedir. Simetrinin ön planda tutulduğu cephelerde çıkma, silme, giriş açıklığı ve pencere sıraları ile giriş cephesine hareket kazandırılmıştır (Şekil 3). Özellikle cephede yer alan çıkmaların yapılara özgünlük katan önemli unsurlar arasında yer aldığı görülmektedir. Ahşap kirişleme sistemiyle oluşturulan cumba altında ise daha çok demir, ahşap ve taş malzemeden yapılmış payandalar ile desteklenmiştir [12].



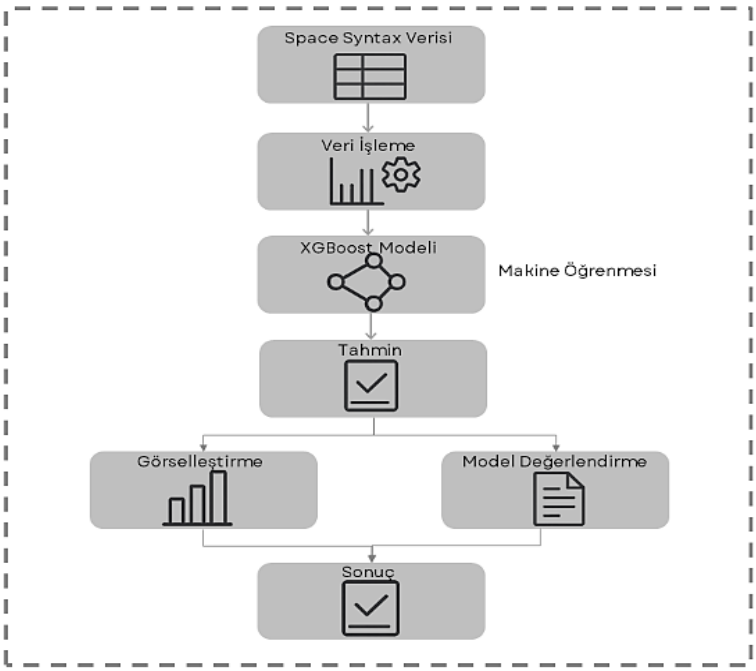
Şekil 3. Geleneksel Uşak Evleri (Traditional Usak Houses) [13]

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Mekânsal modelleri düzenleyimsel yapılar yardımıyla tanımlamayı, sayısal ve grafik bir dilde ifade ederek bu modelleri bilimsel bir temelde yorumlamayı amaç edinen "mekânsal dizim" Hillier ve Hanson tarafından ortaya konmuştur [15]. Mekânsal düzenleyim basit şekilde mekânda insanların nerede yürüyebileceğinin plan üzerindeki temsilidir ve konut içindeki geçiş kurgusunu "düzenlenmiş geçiş grafikleri" (Justified Access Graph) ile ortaya koymaktadır [4]. Hanson'a göre mekânsal ilişkiler, iki mekân arasındaki bağlantı ile oluşmakta ve bu iki mekânın bir üçüncü mekânla

ilişkisinden "mekân düzeni" meydana gelmektedir [9]. Morfolojik analiz yöntemi olan "mekân dizimi", mekân düzeni özelliklerinin ve anlamlarının açıklamalarından öte matematik ve grafik analizlerle ifade ederek bilimsel bir temele oturtmaya çalışmaktadır [25]. Analiz, bina özelliklerini sayısallaştırma sürecinde onların biçim, ölçek, doku, gibi iç özelliklerindense onların elemanları arasındaki bağlantıları, bütün içindeki konumları, sistem içindeki tüm mekânlarla ilişkileri gibi dış özelliklere odaklanmaktadır [15]. Sistemin bir bütün olarak nasıl işlediği ancak sentatik özellikleri ile ortaya koyulabilmektedir [23]. Mekan sentaksı kullanılarak toplumlar arasındaki kültürel ve sosyal farklılıklara bağlı kalarak mekânsal düzenleme analizleri gerçekleştirilmektedir. Nicel olarak elde edilen sentatik veriler, fiziksel çevrenin koşulları ve toplumun sahip olduğu kültürel özellikler ile desteklenmelidir [20]. Sonucunda ortaya çıkan mekânsal parametreler ile mekânsal biçimlenmeyi farklılaştıran konut tipolojilerini belirlemek mümkün olmaktadır [23].

Bu çalışmada, geleneksel Uşak evlerinden çoğu 19.yy'a ait on iki farklı yapıda Hillier'e göre mevcut 'genotipler' üzerinden mekan sentaksı kullanılarak entegrasyon grafikleri aracılığı ile mekânsal sayısallaştırması ve mekânsal organizasyon özelliklerinin makine öğrenmesi yöntemi ile sınıflandırılması yapılmıştır [15]. Elde edilen sonuçlara göre sayısal değerlerce konutların plan tipolojileri ve mekânlar arası ilişkileri analiz edilerek yorumlanmıştır. Öncelikle on iki geleneksel konuta ait bodrum, zemin, birinci kat ve varsa ikinci kat planları üzerinden katlar arasındaki bağlantıyı sağlayan sirkülasyon elemanı ele alınarak, manuel ve yazılımsal analizler yapılmıştır. DepthmapX yazılımı ile planların mekânsal yapıları çıkarılmıştır. Her ev için mekan sayısı, ortalama/minimum/maksimum entegrasyon değerleri, toplam derinlik (TDn), ortalama derinlik (MDn), Göreli asimetri (RA) ve bağlanırlık (CV) değerleri elde edilmiştir. Elde edilen metriklerin sahip olduğu farklı büyüklüklerdeki dağılım aralıklarından, makine öğrenme algoritmalarının etkilenmemesi için, Z-skor normalizasyonu uygulanmıştır. Ölçek farklılıklarını ortadan kaldırmak amacıyla yapılan Z-skor normalizasyonu sayesinde her bir metriğin sıfır ortalama ve bir standart sapma olacak şekilde yeniden ölçeklendirilmesi yapılmıştır. Bu işlem modelin daha dengeli çalışmasını sağlayarak daha güvenli sınıflandırma sonuçları elde edilmesine ve değişkenler arası karşılaştırılabilirliğin arttırılmasına yardımcı olmuştur [14]. Ölçeklendirme işlemi Python ortamında sckit-learn modülü kullanılarak yapılmıştır. İstatistiksel analizler ve grafikler Python programlama dili ve yardımcı kütüphaneler (pandas, seaborn, matplotlib) kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmanın son aşamasında ise konutların tipoloji sınıflandırmasını gerçekleştirmek amacıyla, denetimli öğrenme prensiplerine dayanan ve yapay zeka alt alanı olarak kullanılan XGBoost algoritması temelinde bir makine öğrenmesi modeli geliştirilmiştir. Çalışmada uygulanan analiz adımları, mekânsal veri toplama, ön işleme, grafiksel analiz ve sınıflandırma modellemesini içerecek şekilde Şekil 4'te verilmiştir. Yöntem akış şeması araştırmanın kavramsal ve uygulamalı yapısını bütüncül bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Yöntem akış şeması (Method flowchart)

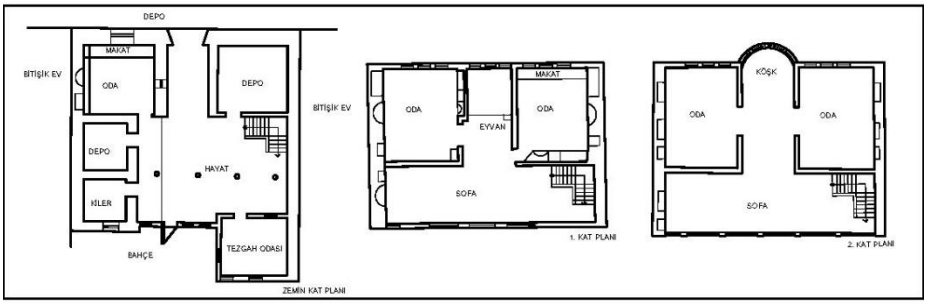
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Çalışmada Geleneksel Uşak Evleri'nden 18. yy sonları ve 19. yy'a tarihlenen Uşak ili ile ilgili yapılan literatür taraması sonucunda ulaşılan on iki konut ele alınmıştır. Ağırlıklı olarak Aybey, Küme ve Işık mahallelerinde yer alan konutların belirlenmesinde, hem sofa tipi hem de avlulu ev tipindeki farklı tipolojik özellikleri barındırması ve aynı kültürel bağlamı yansıtması göz önünde bulundurulmuştur. Yapıların aynı tarihsel dönemde (geç Osmanlı – erken Cumhuriyet dönemi) inşa edilmiş olmaları önemsenerek benzer sosyo-kültürel yansımaları içeren bir veri seti elde edilmiştir. Morfolojik incelemeleri yapılacak olan konut planlarının space syntax analizlerinde kullanılabilecek yeterlikte ve açıklıkta olması da örneklem seçiminde önemsenen bir özellik olarak göz önünde bulundurulmuştur. Tüm bu özellikler doğrultusunda belirlenen on iki geleneksel konuta ait plan şemaları, çalışmada belirlenen hedefler doğrultusunda DepthmapX ve Agraph programlarında analiz edilerek mekanlar arası konfigürasyon grafikleri oluşturulmuştur. Aşağıda her bir konut detaylı bir şekilde ele alınmıştır ve ardından elde edilen mekansal metriklerin analizlerine yer verilmiştir.

3.1. Konutlar ve Özellikleri (Houses and Their Characteristics)

3.1.1. Ali Osman Tosun Evi (Ali Osman Tosun House)

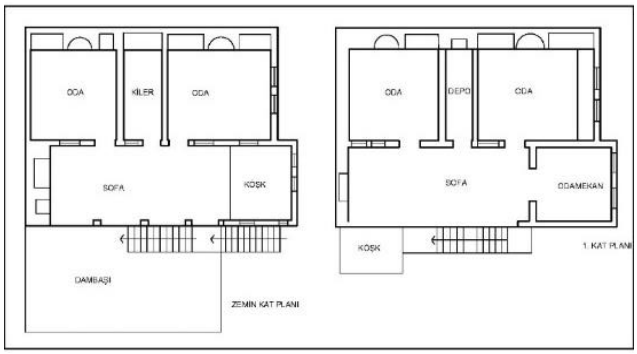
Aybey Mahallesi Yurt Sokak üzerinde bulunan yapı, üç kattan oluşmaktadır. En üst katının dışa yarım daire şeklinde çıkma yapan ahşap kafesli köşk cumbası ile dikkat çeken yapıda alt katın kuzey duvarında taş, diğer kısımlarında ahşap çatkılı ve kerpiç dolgulu karkas kullanılmıştır. Evin arkada küçük bir bahçesi mevcuttur ve buraya hayat mekanından bir kapıyla geçilmektedir. Zemin katın hayatından L şeklinde ahşap bir merdivenle üst katın sofasına ulaşılmaktadır (Şekil 5). Oldukça büyük olan sofayı ortadan dikine bir eyvan kesmektedir. Yanlarda kapıları eyvana bakan iki oda ile evin dış sofalı-eyvanlı planı tamamlanmaktadır [21].



Şekil 5. Ali Osman Tosun Evi kat planları (Sayan, 1995 çizimlerinden güncellenmiştir) (Ali Osman Tosun House floor plans (updated from Sayan, 1995 drawings))

3.1.2. Bağbeller Evi (Bagbeller House)

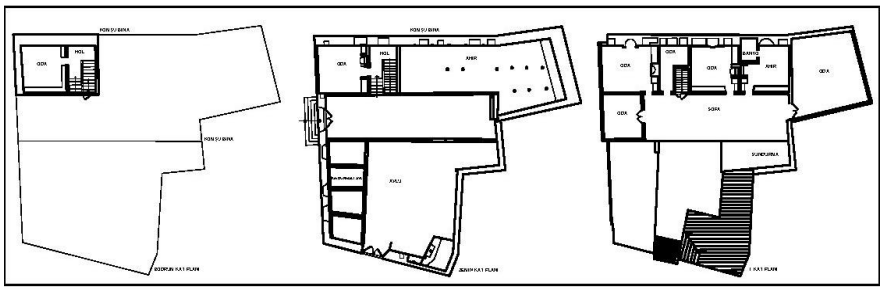
Aybey Mahallesi Güre Sokak üzerinde yer alan yapı, üç katlı, açık dış sofalı tipik bir Uşak evidir. Yüksek ve eğimli bir arazi üzerine kurulmuş olan konut, önde avlulu iken üzerine yeni ev inşa edildiği için avlusu yok olmuştur. Yapıya daha önceleri dar bir avluya açılan kapıdan girilirken günümüzde zemin kata açılan kanatlı ahşap bir kapı ile girilmektedir (Şekil 6) [21].



Şekil 6. Bağbeller Evi kat planları (Sayan, 1995 çizimlerinden güncellenmiştir) (Bagbeller House floor plans (updated from Sayan, 1995 drawings))

3.1.3. Dokur Evi (Dokur House)

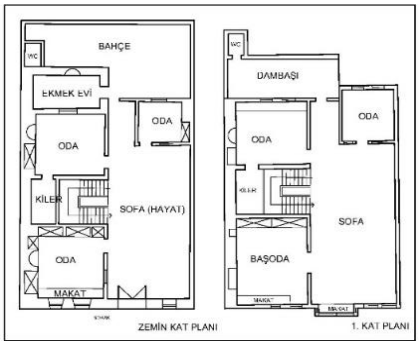
Aybey mahallesi, Köme sokak üzerinde 1125 Ada 5 Parselde yer alan yapı, geleneksel detaylarından 19. yy'ın ilk yarıyılına tarihlendirilmektedir. Bodrum, zemin ve birinci kat olmak üzere üç kattan oluşan yapı, dış sofalı plan tipi özellikleri göstermektedir (Şekil 7). Yapı, dar cephesi sokağa, giriş cephesi avluya bakacak şekilde düzenlenmiştir. Günümüzde restore edilerek, yapıya Geleneksel El Sanatları Halıcılık Merkezi olarak işlev verilmiştir [27].



Şekil 7. Dokur Evi kat planları (Yerlikaya, 2013 çizimlerinden güncellenmiştir) (Dokur House floor plans (updated from Yerlikaya, 2013 drawings))

3.1.4. Gani Kabaklar Evi (Gani Kabaks House)

Işık Mahallesi Seçkin Sokak üzerinde yer alan binanın iki yanı komşu evlerle bitişiktir ve iki katlıdır. Arka kısmında küçük bir bahçesi içinde, evin ihtiyacı olan çeşitli yapı elemanlarına yer verilmiştir. Eve sokak yönünden açıla çift kanatlı ahşap bir cümle kapı ile girilmektedir. İç sofalı plan tipine sahiptir (Şekil 8). Koridordan açılan bir kapıyla dambaşına geçilmektedir ve en uzak ucunda hela yer almaktadır [21].

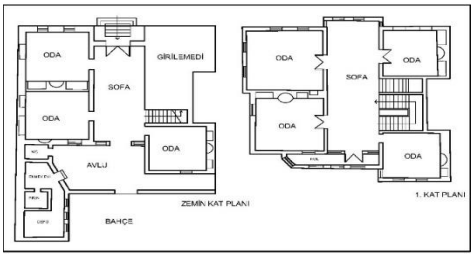


Şekil 8. Gani Kabaklar Evi kat planları (Sayan,1995 çizimlerinden güncellenmiştir) (Gani Kabaklar House floor plans (updated from Sayan, 1995 drawings))

3.1.5. Hafız Mehmet Altuğ Evi (Hafiz Mehmet Altug House)

Küme Mahallesi Taslak Sokak'ta bulunan bina, kitabesine göre H.1322 (M.1904/5) tarihinde inşa edilmiştir. Uşak'ta günümüze ulaşabilmiş tek

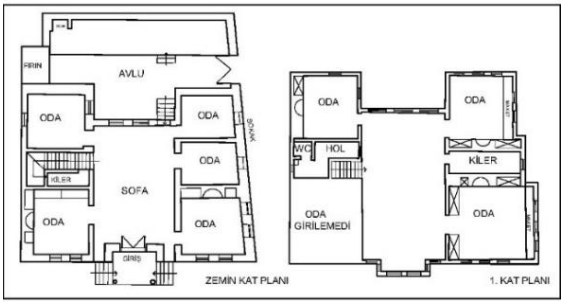
kitabeli örnektir. İki katlı, iç sofalı planda inşa edilen evin ön kısmı sokağa, arka kısmı, havuzlu geniş bir bahçeye bakmaktadır (Şekil 9). Evin alt katı ile üst katı arasındaki bağlantı, hayat ile sofa arasında içten çift kollu bir merdivenle olmaktadır [21].



Şekil 9. Hafız Mehmet Altuğ Evi kat planları (Sayan, 1995 çizimlerinden güncellenmiştir) (Hafiz Mehmet Altug House floor plans (updated from Sayan, 1995 drawings))

3.1.6. Hasan Okan Evi (Hasan Okan House)

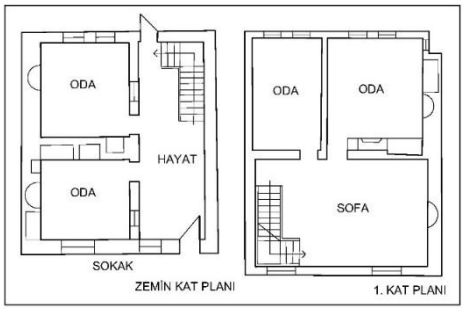
Karaağaç Mahallesi Gediz Uluyolu üzerinde olan bina, genişçe iki sokağın kavşak noktasında bulunur ve iki katlıdır. En alt katta yarım kat yüksekliğinde bir bodrum mevcuttur. Evin arka tarafında fırın ve ocak elemanlarını bulunduran küçük bir avlusu vardı. Buraya sokaktan açılan çift kanatlı bir kapıyla girilmektedir. Evle bağlantısı ise, alt katın hayatına açılan bir kapı ile sağlanmıştır (Şekil 10). Evin iç mekanlarında en a göze çarpan yanı, üst katın duvarları süsleyen alçı tezyinatlardır. Yapının 20. yy başlarında inşa edildiği bilinmektedir [21].



Şekil 10. Hasan Okan Evi kat planları (Sayan, 1995 çizimlerinden güncellenmiştir) (Hasan Okan House floor plans (updated from Sayan, 1995 drawings))

3.1.7. İsmail Göker Evi (Ismail Goker House)

Işık Mahallesi Tirit Sokak'ta bulunan yapı, komşu evlerle bitişik iki katlı küçük bir binadır. Arkada çeşitli ihtiyaç birimlerinin bulunduğu avlusu ile Uşak evlerinin tipik özelliklerini yansıtır. Hayatın bir ucundan açılan kapı, evin avlu ile bağlantısını sağlamaktadır. Bir yanı hayatın dışa sağır duvarına dayanan, diğer yanı korkuluklu çift ahşap merdivenle üst katın sofasına çıkılmaktadır (Şekil 11). Yapının 19. yy sonları ya da 20. yy başlarında inşa edildiği düşünülmektedir [21].

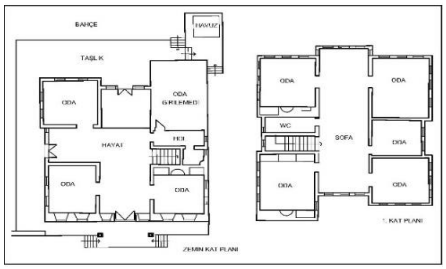


Şekil 11. İsmail Göker Evi kat planları (Sayan, 1995 çizimlerinden güncellenmiştir) (Ismail Goker House floor plans (updated from Sayan, 1995 drawings))

3.1.8. Kaftancılar Evi (Kaftancilar House)

Bozkurt Mahallesi Hisarkapı Uluyolu Sokak üzerinde bulunan bina iki katlı büyük bir yapıdır (Şekil 12). Dört yönde çıkmaları ile dikkat çeken ev,

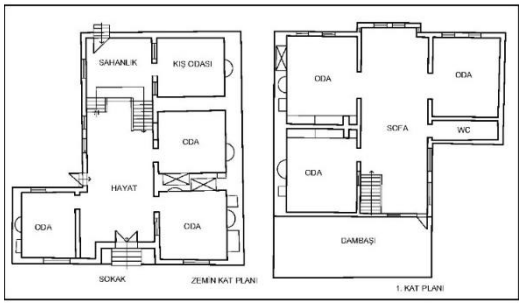
restore edilerek Etnografya Müzesi haline getirilmiştir. Geleneksel malzemeyle inşa edilen bina, küçük bir bahçeye sahiptir. Arka bahçede 2x2 m. Boyutlarında küçük bir havuz vardır. Hayatın iki tarafında buraya açılan odaların olmasından iç sofalı plan belirmekle beraber, burada karşımıza serbest bir plan anlayışı çıkmaktadır [21].



Şekil 12. Kaftancılar Evi kat planları (Sayan, 1995 çizimlerinden güncellenmiştir) (Kaftancilar House floor plans (updated from Sayan, 1995 drawings))

3.1.9. Kerim Nacan Evi (Kerim Nacan House)

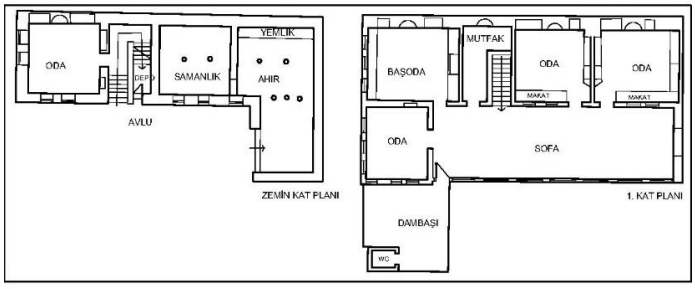
Işık Mahallesi Seçkin Sokak üzerinde bulunan yapı, iki kattan oluşmaktadır (Şekil 13). Arkada küçük bir bahçesi bulunmaktadır. Dışardan sokak yönünde bulunan taş merdivenlerden üzeri basık kemerli bir girişe, odan çift kanatlı bir kapıyla evin hayatına girilmektedir [21].



Şekil 13. Kerim Nacan Evi kat planları (Sayan, 1995 çizimlerinden güncellenmiştir) (Kerim Nacan House floor plans (updated from Sayan, 1995 drawings))

3.1.10. Murat Dokur Evi (Murat Dokur House)

Aybey Mahallesi Küme Sokak üzerinde yer alan yapı, dar yüzüyle sokağa geniş cephesiyle de avluya bakan iki katlı büyük bir evdir (Şekil 14). Evin önünde iki ayrı kapıdan girilen geniş bir avlu bulunmaktadır. Bunlardan esas giriş kapısı, batıdaki ahşap çift kanatlı olanıdır. Diğer kapı, avluya ehli hayvanların girebilmesi içindir. Avlu dört yönden yapı birimleri ve duvarlarla çevrilmiştir. Ocak, fırın, ekmek evi, depo, ahır, samanlık gibi mekanlar bulunmaktadır [21].

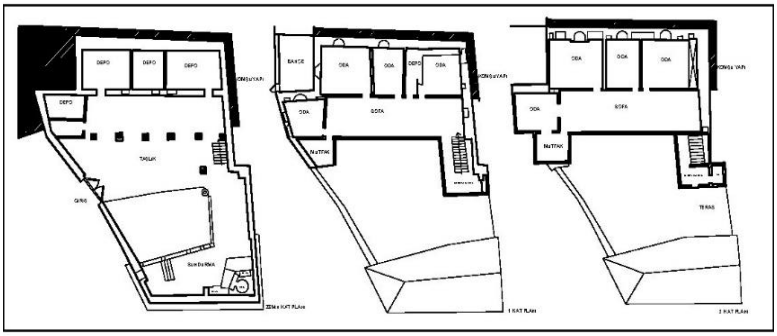


Şekil 14. Murat Dokur Evi kat planları (Sayan, 1995 çizimlerinden güncellenmiştir) (Murat Dokur House floor plans (updated from Sayan, 1995 drawings))

3.1.11. Pakize Soysuna Konağı (Pakize Soysuna Mansion)

Aybey mahallesi, HasalÇapa sokak üzerinde 1123 Ada 11 Parselde yer alan yapı, Uşak geleneksel kent dokusu içinde günümüze az sayıda ulaşmış dış sofalı örneklerden biridir. Üç katlı inşa edilen bu yapı plan tipi ve yapım sistemi ile 19. y.y. yapısı özellikleri taşımaktadır (Şekil 15).Köşe parselde yer alan bina, eğimli bir alan üzerinde konumlanmıştır. Uzun zamandır boş durumda olan konak,

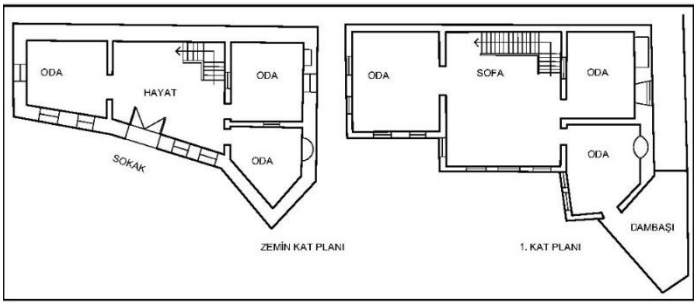
kullanılmadığı için bakımsız kalmış ve oldukça yıpranmıştır. Özgünlüğünü büyük oranda korumuş konak, kullanıcı ihtiyaçlarının değişmesine bağlı olarak müdahaleler görmüştür [27].



Şekil 15. Pakize Soysuna Konağı kat planları (Yerlikaya, 2013 çizimlerinden güncellenmiştir) (Pakize Soysuna Mansion floor plans (updated from Yerlikaya, 2013 drawings))

3.1.12. Tarhan Özsezer Evi (Tarhan Ozsezer House)

Küme Mahallesi Çatak Sokak üzerinde bulunan yapı dar bir arsa üzerinde sokak tarafına üst katın gönyeli çıkmaları ile dikkat çekmektedir. Sokağa bakan ahşap çift kanatlı cümle kapısından evin hayatına girilmektedir. Batı köşedeki odanın ocağı, basit işlemeli ahşap bir davlumbaza sahiptir. Diğer odalar depo olarak kullanılmaktadır. Girişin karşısında yükselen çift kollu ahşap merdiven üst katın sofasına ulaşmaktadır. Bu kısım esas oturma alanıdır ve arka duvarı dışa sağırdır. İç sofalı plan tipolojisine sahiptir (Şekil 16). Ev sahiplerinin ifadesine dayanarak evin 20.yy'ın başlarında inşa edildiği anlaşılmaktadır [21].



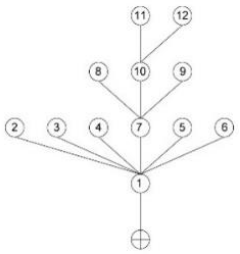
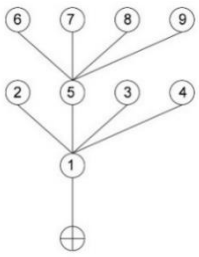
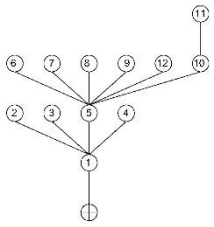
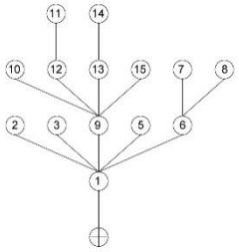
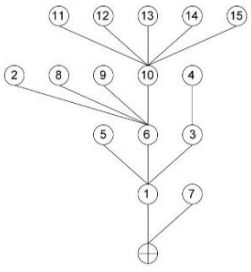
Şekil 16. Tarhan Özsezer Evi kat planları (Sayan, 1995 çizimlerinden güncellenmiştir) (Tarhan Ozsezer House floor plans (updated from Sayan, 1995 drawings))

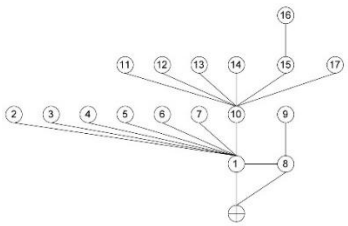
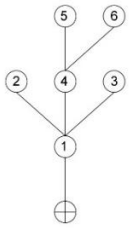
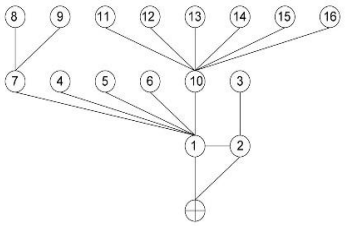
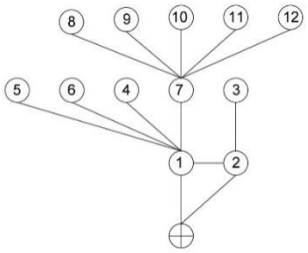
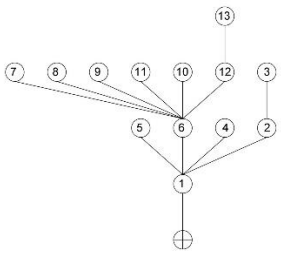
3.2. Analizler (Analyses)

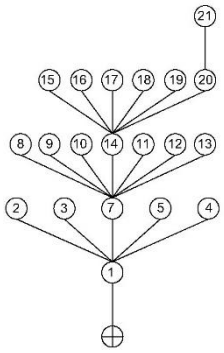
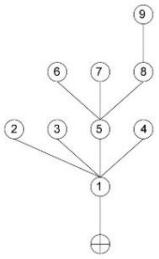
Belirlenen alanda seçilen her bir konut planı, Axial Map yöntemi kullanılarak dijital ortama aktarılmış ve DepthmapX yazılımı aracılığıyla analiz edilmiştir. Plan şemaları Agraph (Access Graph) programına aktarılarak mekanlar arasındaki ilişkileri görselleştiren "düzenlenmiş geçiş grafikleri" (Justified Access Graph) manuel olarak oluşturulmuştur (Tablo 1).

Tablo 1. Konutların düzenlenmiş geçiş grafiklerinin ve entegrasyon değerleri sıralaması (Ranking of regulated transition graphs and integration values of dwellings)

Ev	Düzenlenmiş Geçiş Grafikleri (Justified Access Graph)	Entegrasyon Değerleri Sıralaması

Ali Osman Tosun Evi		1>7>10>0=2=3=4=5=6>8=9>11=12 0=6>9>1=2=3=4=5=7=8>10=11 (dış mekan dahil değil)
Bağbeller Evi		1=5>0=2=3=4=6=7=8=9 4>0>5=6=7=8>1=2=3 (dış mekan dahil değil)
Dokur Evi		5>1>6=7=8=9=10=12>0=2=3=4>11 4>0>5=6=7=8=9=11>1=2=3>10 (dış mekan dahil değil)
Gani Kabaklar Evi		1>9>6>3>0=2=5=12=13>10=15>7=8>4>11 0>8>5>2>11=12>1=4>9=14>6=7>10=13 (dış mekan dahil değil)
Hafız Mehmet Altuğ Evi		6>1=10>2=8=9>0=3>5=11=12=13=14=15>4=7 5>9>0>1=7=8>10=11=12=13=14>2>4>3>6 (dış mekan dahil değil)

Hasan Okan Evi		1>10>8>0>2=3=4=5=6=7=15>11=12=13=14=17>9>16 0>9>7>14>1=2=3=4=5=6>10=11=12=13=16>8>15 (dış mekan dahil değil)
İsmail Göker Evi		1>4>0=2=3>5=6 0=3>1=2=4=5 (dış mekan dahil değil)
Kaftancılar Evi		1>10>7>2>0=4=5=6>11=12=13=14=15=16>8=9>3 0>9>6>1>3=4=5>10=11=12=13=14=15>7=8>2 (dış mekan dahil değil)
Kerim Nacan Evi		1>7>2>0>4=5=6>8=9=10=11=12>3 0=6>1>3=4=5=6=7=8=9=10=11>2 (dış mekan dahil değil)
Murat Dokur Evi		6>1>12>2=7=8=9=10=11>0=4=5>13>3 5>0>11>6=7=8=9=10>1>3=4>12>2 (dış mekan dahil değil)

Pakize Soysuna Konağı		7> 14 > 1 > 8 = 9 = 10 = 11 = 12 = 13 > 20 > 15 = 16 = 17 = 18 = 19 > 0 = 2 = 3 = 4 = 5 > 21 6>13>0>7=8=9=10=11=12>19>14=15=16=17=18>1=2=3=4>20 (dış mekan dahil değil)
Tarhan Özsezer Evi		1=5>8>0=2=3=4=6=7>9 4>0>7>5=6>1=2=3>8 (dış mekan dahil değil)

Yapılan morfolojik analiz sonuçlarına göre, konutların düzenlenmiş geçiş grafiklerinin ve entegrasyon değerlerinin verildiği Tablo 1'de en bütünleşik mekanın tüm örneklerde sofa veya hayat olduğu anlaşılmaktadır. Geleneksel Türk evlerindeki ana yaşam mekanı, toplanma yeri ve aynı zamanda sirkülasyon alanı olan sofa, mekanlar arasındaki korelasyonun en yüksek olduğu noktadır. Bunun tam tersine entegrasyon değeri en düşük çıkan yani en derinde olan mekanlar ise genellikle hela, kiler ya da mutfak gibi servis mekanlarıdır. Mahremiyet olgusu nedeni ile bu mekanların en geride konumlandırılması dolayısıyla mekanlar arası etkileşiminin düşük olduğu görülmektedir.

Evlerin dışarıyı dahil ettiğimiz ve etmediğimiz entegrasyon değerlerine bakıldığında en bütünleşik mekanın değişmediği görülmektedir çünkü dış mekan hariç tutulsa da tutulmasa da konutlarda en yüksek entegrasyon değeri sofa mekanına ait çıkmaktadır. Konutların düzenlenmiş geçiş grafikleri incelendiğinde hepsinin dallı grafik formuna sahip olduğu görülmektedir. Entegrasyon değerinin en büyük olduğu mekanın da incelenen tüm örneklerde sofa veya hayat mekanı çıktığı düşünüldüğünde Uşak geleneksel konutları arasında bir genotip olduğunu söylemek mümkün olmaktadır.

Her ev için TDn (Toplam derinlik), MDn (Ortalama Derinlik), RA (Relativized Aymmetry-Asimetrik yapı ölçütü), CV (Connetcivitiy Value-Bağlantısallık değeri), Mekan sayısı ve Entegrasyon (min/ort/max) göstergeleri çıkarılmıştır. Elde edilen veriler nicel-nitel veri setleri olarak her konutun literatürdeki tanımlar esas alınarak tipolojk sınıfının da (Sofa Tipi/Avlulu Ev) eklenmesi ile tablo haline getirilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Konutların mekan sayıları, TDn (toplam derinlik), MDn (ortalama derinlik), RA (relativized asymmetry-asimetrik yapı ölçütü), CV (connetcivitiy value-bağlantısallık değeri) ve entegrasyon değerleri (Number of dwelling spaces, TDn (total depth), MDn (mean depth), RA (relativized asymmetry-asymmetric structure measure), CV (connetcivitiy value) and integration values)

Ev	**Mekan Sayısı**	**Entegrasyon Değeri**			**TDn**	**MDn**	**RA**	**CV**	**Tipoloji**
		min	ort.	max					
Ali Osman Tosun Evi	12	2,53	4,31	9,42	29.53	2.46	0.26	1.0	Sofa Tipi
Bağbeller Evi	9	3,00	4,20	9,00	19.4	2.15	0.28	1.0	Sofa Tipi
Dokur Evi	13	2,87	4,31	6,65	29.62	2.46	0.26	1.0	Avlulu Ev

Gani Kabaklar Evi	15	2,69	4,38	9,54	42.0	2.8	0.25	1.0	Sofa Tipi
Hafız Mehmet Altuğ Evi	15	2,50	4,21	8,75	42.62	2.84	0.26	1.0	Avlulu Ev
Hasan Okan Evi	17	3,31	6,09	15,11	42.22	2.48	0.18	1.0	Sofa Tipi
İsmail Göker Evi	6	1,87	3,23	7,50	12.0	2.0	0.4	1.0	Sofa Tipi
Kaftancılar Evi	16	3,24	5,38	13,33	41.17	2.57	0.2	1.0	Sofa Tipi
Kerim Nacan Evi	12	2,64	4,78	11,00	28.0	2.33	0.24	1.0	Sofa Tipi
Murat Dokur Evi	13	2,51	4,66	11,14	32.28	2.48	0.24	1.0	Avlulu Ev
Pakize Soysuna Konağı	22	5,41	7,57	12,12	54.48	2.72	0.18	1.0	Avlulu Ev
Tarhan Özsezer Evi	9	1,89	3,61	1,00	20.8	2.31	0.32	1.0	Sofa Tipi

Araştırmanın ikinci bölümünde, verilerin analiz süreci Python programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal verilerin işlenmesi için pandas, görselleştirme işlemleri için ise matplotlib ve seaborn kütüphanelerinden yararlanılmıştır. Yapılan analizlerin amacı geleneksel konut tipolojilerinin mekânsal göstergeler üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Aşağıda mekânsal verilerin tipolojilere göre ortalama değerlerini gösteren analiz değerleri verilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Tipolojilere göre ortalama değerler (Average values by typologies)

Tipoloji	**Entegrasyon Ort**	**TDn**	**MDn**	**RA**	**CV**	**Mekan Sayısı**
Avlulu Ev	5.19	39.75	2.62	0.24	1.00	16.25
Sofa Tipi	4.50	29.39	2.39	0.27	1.00	12.75

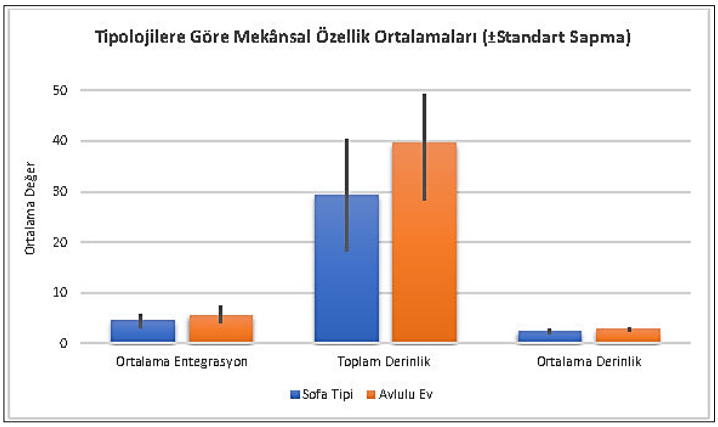
- **Ortalama Entegrasyon Değeri (Mean Integration):** Avlulu ev tipine sahip olan evlerin entegrasyon değerlerinin genel olarak daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, avlulu ev tipolojisine sahip olan konutların daha merkezi ve bütünleşik mekânsal yapılara sahip olduğunu göstermektedir. İç mekanlar arası güçlü bağlantılar kurulmuştur.

- **TDn (Toplam Derinlik):** Avlu tipine sahip olan konutların ortalama TDn değerlerinin sofa tipine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu bulgu, mekânsal erişimden dolayı avlulu evlerin daha katmanlı ve hiyerarşik bir mekânsal yapılanmaya sahip olduğunu göstermektedir.

- **MDn (Ortalama Derinlik):** MDn değeri avlulu ev tipolojisine sahip olan konutlarda 2.62 iken, sofa tipi konutlarda 2.39 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgu, sofa tipi konutlardaki erişilebilirliğin daha yüzeysel ve doğrudan olduğunu gösterirken avlulu evlerin mekânsal derinliğinin fazla olduğunu ortaya koymaktadır.

- **Asimetrik Yapı Ölçütü / RA (Relativized Aymmetry) ve Bağlantısallık / CV (Connetcivitiy Value):** Bu değerlerde iki tipoloji arasında büyük farklılar göstermediği görülmüştür. Ancak RA değerinin sofa tipi konutlarda daha yüksek olması mekânsal organizasyonun daha simetrik olduğunu göstermektedir.

Görsel karşılaştırmalar istatistiksel bulgular ile birlikte yorumlanmıştır (Şekil 17). Standart sapmalar incelendiğinde sofa tipi konutların daha tutarlı bir yapılanma gösterirken avlulu evlerin daha heterojen olduğunu ortaya koymaktadır. Sonucunda, tipoloji sınıflandırmasının mekan sentaksı göstergelerine anlamlı etkileri olduğu ve tipolojinin mekânsal performans içerisinde nicel olarak ayrıştırılabilir olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 17. Tipolojilere göre mekânsal özellik ortalamaları (Spatial feature averages according to typologies)

Araştırmanın son bölümünde ise istatistiksel analizlerin ardından makine öğrenmesi destekli tipoloji tahmini yapılmıştır. Space Syntax verilerinin konut tipolojilerini tahmin etme konusunda kullanılabilirliğini incelemek amacıyla bir sınıflandırma modeli geliştirilmiştir. Karar ağaçlarını temel alan güçlü bir makine öğrenmesi modeli olan XGBoost (Extreme Gradient Boosting) algoritması kullanılmıştır. Modelin performansını maksimize etmek için doğru hiperparametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda küçük veri seti üzerindeki genelleme başarısını artıracak şekilde hiperparametreler optimize edilmiştir. Özellikle öğrenme oranı, ağaç derinliği ve ağaç sayısı gibi ana parametreler küçük veri setlerine yönelik literatürde önerilen aralıklar göz önünde bulundurularak belirlenmiştir [5]. Bu nedenle öğrenme oranı düşük (learning_rate=0.1), ağaçlar ise daha sığ (n_estimators=50) yapılandırılmıştır. Değerler modelin aşırı öğrenme (overfitting) riskinin önüne geçilelecek şekilde belirlenmiştir. Modelde bağımlı değişken olarak "Tipoloji" (0: Sofa Tipi, 1: Avlulu Ev), bağımsız değişkenler olarak "Mekan Sayısı, Entegrasyon Min/Ort/Max, TDn, MDn, RA, CV" gibi tüm Space Syntax metrikleri kullanılmıştır. Veri seti %70 eğitim ve %30 test olacak şekilde ikiye ayrılmış; model eğitim seti üzerinde öğrenmiş, ardından test seti üzerinde doğruluk analizi yapılmıştır. Modelin güvenilirliğini ve sağlamlığını test etmek amacıyla ek olarak 5-katlı çapraz doğrulama (5-fold cross-validation) yöntemi uygulanarak küçük veri seti etkisini azaltılmış ve modelin genellenebilirliği değerlendirilmiştir. Bu yöntem ile model, içerisindeki birbirinden farklı alt kümeler üzerinde test edilmiş ve aşırı öğrenme (overfitting) riski azaltılmıştır. Elde edilen sınıflandırma sonuçları sonucunda, test veri setindeki geleneksel evlerin tipolojik sınıfı %100 doğrulukla tahmin edilmiştir. Modelin elde ettiği performans ölçütleri aşağıdaki tabloda sunulmaktadır (Tablo 4):

Tablo 4. XGBoost sınıflandırma raporu (XGBoost classification report)

Sınıf	Kesinlik (Precision)	Duyarlılık (Recall)	F1-Skoru (F1-Score)
Avlulu Ev	1.00	1.00	1.00
Sofa Tipi	1.00	1.00	1.00
Genel Doğruluk	-	-	1.00
Makro Ortalama	1.00	1.00	1.00
Ağırlıklı Ortalama	1.00	1.00	1.00

Elde edilen sonuçlar, space syntax temelli mekânsal verilerinin tipoloji tahmini için güçlü belirleyiciler içerdiğini ortaya koymaktadır. İleri düzey yapay öğrenme modelleri ile anlamlı sınıflandırmalar

yapılabileceğini göstermektedir. Özellikle TDn, MDn ve Entegrasyon değerleri yapay zeka sistemleri tarafından sayısal olarak işlenerek ayırt edici hale getirilebilmiştir. Mekan sentaksı ile mekânsal örüntüler analiz edilerek makine öğrenmesi algoritması (XGBoost) kullanılarak bu örüntüler konut tipolojilerini yüksek oranda doğruluk seviyesi ile tahmin edebilmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Kültürel mirasın insan-mekan ilişkilerini doğrudan yansıtan geleneksel konutların çözümlenmesine yönelik geliştirilen mekan dizim yöntemi, yapıların iç mekan organizasyonunu anlamlandırmada güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır. Mekan dizim aracılığı ile elde edilen verilerin yapay zeka destekli algoritmalar ile işlenerek analiz edilmesi, miras ögelerinin sayısal ortamda yeniden yapılandırılmasına imkan sağlamaktadır. Bu bağlamda mekânsal konfigürasyon temelli verilerin günümüz modern teknolojilerinden makine öğrenmesi teknikleri ile birleşimi insan-mekan ilişkisinin daha derinlemesine anlaşılmasına olanak tanımaktadır [8]. Fuhrmann ve Gostman (2016) çalışmalarında, mimari tasarımların bilgisayar destekli yöntemlerle nasıl üretilebileceğini incelemiş, mekansal konfigürasyonların algoritmik modellemesi üzerinde durmuşlardır [9]. Yine Mohamed ve van der Laag Yamu (2004) yaptıkları bibliyometrik analizlerinde mekan dizim kuramının yapay zeka ve hesaplamaları tasarım gibi çağdaş yöntemler ile giderek daha fazla entegre edildiğini açıkca ortaya koymaktadır [19]. Mimari tasarım süreçlerinin yapay zeka temelli algoritmalar ile mekansal metrikler kullanılarak bütünleştirimesi bakımından yapılan bu makale güncel yaklaşımlar ile büyük ölçüde örtüşmektedir.

Çalışmada bulunduğu coğrafyanın tarihini ve kültürünü yansıtan 12 geleneksel konut, mekan dizim yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Konutların mekânsal örüntülerinin nicel veriler ile ifade edilmesini amacıyla mekan dizim verileri makine öğrenmesi yöntemi ile Python programlama dili aracılığı ile işlenerek otomatik tipolojik sınıflandırması yapılmıştır. Sınıflandırma karar ağaçları temelli ve yüksek performans gösteren XGBoost (Extreme Gradient Boosting) modeli ile gerçekleştirilmiştir. Chen ve Guestrin'e (2016) göre XGBoost algoritması, yapılandırılmış veri kümeleri üzerinde yüksek doğruluk performansı gösteren, hızlı ve esnek bir makine öğrenmesi yöntemidir [5]. Çalışma sonucunda elde edilen veriler, veri seti içerisinde yer alan mekânsal örüntülerin yapay zeka tarafından başarılı bir şekilde tanımlanabilir olduğunu göstermiştir. Sezgisel yorumlamaların yerine nesnel bir analiz modeli ile elde edilen sonuçlar mekânsal konfigürasyon verilerinin makine öğrenmesi kullanılarak mimari tipolojileri sınıflandırmada kullanılmasında başarı gösterdiğini ortaya koymuştur.

Öncelikle geleneksel konutlar üzerinde yapılan mekan dizim analizi sonucunda elde edilen veriler ile mekânsal ilişkilerinin yorumlaması yapılmıştır. Plan şemaları üzerinden uygulanan mekan dizim yönteminin parametreleri sonucunda;

- Mahremiyet anlayışının yüksek olması nedeniyle en mahrem alanların en derinlerde yer alıyor olması,
- Derinlik ile mekanın entegrasyon değerleri arasında ters orantı olduğu,
- Benzer plan tipolojilerinde birbirine yakın entegre mekanların ortak olduğu,
- Zemin katlarda hayat mekânının, üst katlarda ise sofanın entegrasyon değerinin en yüksek mekânlar olduğu,
- Hayat ve sofadan odalara geçildikçe derinlik değerinin yükseldiği,
- Mekan kullanımını arttıran hareket olgusunun yüksek olduğu mekanlarda entegrasyon değerinin yüksek olduğu,
- En yüksek entegrasyon değerlerinin sofanın odalarla çevrelendiği örneklerde elde edildiği,
- Sirkülasyon alanlarında entegrasyon değerinin yüksek olduğu,
- Hareket ve sosyal hayatın gerçekleştiği mekânların işlevlerine bakıldığında daha çok kullanılan mekanların en entegre mekanlar olduğu yargılarına ulaşılmıştır.

Yapay zeka ve mekânsal dizim kuramı bilimi kesişiminde ise,

- Mekan dizim yöntemi ile elde edilen verilerin yapay zeka destekli ileri teknolojiler ile başarılı bir şekilde sınıflandırılabileceğini,
- Mekan dizim metrikleri arasından, TDn (Toplam derinlik), MDn (Ortalama Derinlik), Entegrasyon gibi değerlerin tipolojik ayrımı sağlayan güçlü parametreler olduğu,
- Mimari tipoloji analizlerine makine öğrenmesi algoritmalarının entegre edilebilir olduğu ve bu yaklaşımın disiplinler arası özgün bir metedoloji sunacağı,

- Mimarlık alanında veri temelli karar destek sistemlerinin geliştirilebilir olduğu,
- Benimsenen bu yenilikçi yaklaşımın, geleneksel yapı analizlerine farklı bir perspektif kazandırdığı,
- Mimarlık, şehircilik gibi alanlarda yapay zeka teknolojisinin ve mekan dizim birlikteliğinin geçerliliği ve gelecek potansiyelini güçlü bir şekilde desteklediği yargılarına ulaşılmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma kapsamında, geleneksel Uşak konutlarına ilişkin veri setinin oluşturulmasında faydalanılan bilgi birikimi ve kaynaklara dolaylı katkı sağlayan tüm kişi ve kurumlara teşekkür ederiz. Araştırma nın veri analizi ve değerlendirme süreçleri, yazarlar tarafından bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir.

Within the scope of this study, we would like to thank all persons and institutions that indirectly contributed to the knowledge and resources utilized in the creation of the data set on traditional Uşak houses. The data analysis and evaluation processes of the research were carried out independently by the authors.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI
(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

***Gizem GÜVLÜ ERHAN*:** Araştırmanın kavramsal çerçevesini oluşturmuş, deneysel uygulamaları gerçekleştirmiş, veri toplama ve analiz süreçlerini yürütmüş, makalenin yazımını da bütüncül biçimde gerçekleştirmiştir.

She established the conceptual framework of the research, carried out the experimental applications, conducted the data collection and analysis processes, and wrote the article in a comprehensive manner.

***Seda ŞİMŞEK*:** Araştırmanın metodolojik tasarımına önemli katkılar sunmuş, bulguların yorumlanması ve tartışılması süreçlerine destek vermiş, ayrıca makalenin yazımının gözden geçirilmesi ve düzenlenmesi aşamalarına katkıda bulunmuştur.

She made significant contributions to the methodological design of the study, supported the interpretation and discussion of the findings, and contributed to the review and editing of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Arseven, C. E. (1955). Celal Esad Arseven Sanat Ansiklopedisi (Cilt 1).

[2] Binay, İ. (2021). Geçmişten günümüze Türk mimarisinin değişimi. Akademya Dergisi. https://akademyadergisi.com/gecmisten-gunumuze-turk-mimarisinin-degisimi/

[3] Bozkurt, S. G. (2013). 19. yy'da Osmanlı konut mimarisinde iç mekan kurgusunun Safranbolu evleri örneğinde irdelenmesi. Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University, 62(2), 37-70.

[4] Cansu, S. (2008). Eski Ankara bağ evleri ile günümüz villalarının mekan konfigürasyonu karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[5] Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 785–794. https://doi.org/10.1145/2939672.2939785

[6] Çetin, Y. (2006). Geleneksel Türk evinde cumba. Sanat Tarihi Dergisi, 15(2), 18-27.

[7] Eldem, H. S. (1968). Türk evi plan tipleri (2. baskı). İstanbul: İTÜ Mimarlık Fakültesi Yayınları.

[8] Ferrando, C. (2018). Towards a Machine Learning Framework in Space Syntax (Doctoral dissertation, Carnegie Mellon University).

[9] Fuhrmann, O., & Gotsman, C. (2006). On the algorithmic design of architectural configurations. Environment and Planning B: Planning and Design, 33(1), 131–140. https://doi.org/10.1068/b32050

[10] Göğebakan, Y. (2015). Karakteristik bir değer olan geleneksel Türk evi'nin oluşumunu belirleyen unsurlar ve bu evlerin genel özellikleri. İnönü Üniversitesi Kültür ve Sanat

Dergisi, 1(1), 41-55. https://doi.org/10.22252/ijca.105015

[11] Gürsoy, E. (2015). Uşak'taki tarihi evlerde giriş düzenlemeleri. Journal of Turkish Studies, 10(6), 499–499. https://doi.org/10.7827/TurkishStudies.8189

[12] Gürsoy, E. (2016). Uşak'taki tarihi evlerde çıkmalar. Journal of Humanities and Tourism Research, 6(6–2), 341–353. https://doi.org/10.14230/joiss249

[13] Güvlü Erhan, G. (2025). Fotoğraf Arşivi.

[14] Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2011). Data mining: concepts and techniques (3rd ed.). Morgan Kaufmann Publishers.

[15] Hillier, B., & Hanson, J. (1984). The social logic of space. Cambridge University Press.

[16] Karakök, Ç., & Elif, M. (2017). Bir geleneksel Türk evini geleceğe aktarmak: Erdoğan Kalay Evi ve koruma önerileri. Osmanlı Mirası Araştırmaları Dergisi, 4(10), 85–110. https://doi.org/10.17822/omad.2017.73

[17] Kuban, D. (1976). Sanat tarihimizin sorunları. İstanbul: Çağdaş Yayınları.

[18] Küçükerman, Ö. (1995). Anadolu mirasında Türk evleri. İstanbul: T.C. Kültür Bakanlığı Yayınları.

[19] Mohamed, A. A., & van der Laag Yamu, C. (2024). Space syntax has come of age: A bibliometric review from 1976 to 2023. Journal of Planning Literature, 39(2), 203-217.

[20] Özyılmaz, H. (2007). Diyarbakır geleneksel konut mimarisinde morfolojik analiz: Geleneksel konutların güncel kullanımda değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[21] Sayan, Y. (1995). Uşak'taki tarihi Türk evleri, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Arkeoloji ve Sanat Tarihi Anabilim Dalı, Van.

[22] Sayan, Y. (1997). Uşak evleri. Kültür Bakanlığı.

[23] Şimşek Tolacı, S. (2015). Burdur kent yapısının kültürel ve mekansal dinamikleri: Tarihsel süreçte konut yapılarının mekansal değişim ve dönüşümlerinin saptanmasına yönelik tipolojik bir araştırma, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

[24] T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı. (2025.). Uşak mimarisi. Uşak İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü. https://usak.ktb.gov.tr/TR-75327/mimari.html

[25] Turner, A., & Penn, A. (1999). Making isovists syntactic: Isovist integration analysis. In Proceedings of the Second Space Syntax Symposium.

[26] Uşak Valiliği. (2025). https://www.usak.gov.tr/

[27] Yerlikaya, E. (2013). Geleneksel Uşak kent dokusunun incelenerek örnek konutların analizi bağlamında korunmalarına yönelik bir araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1021-1030 (2025)

Alüminyum Matrisli Silisyum Nitrür Takviyeli Metalik Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu

İbrahim DOĞAN[1*], Elif IŞIK[1], Mehmet TÜRKER[1]

[1]*Gazi University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 05/07/2025
Revision: 07/07/2025
Accepted: 25/07/2025

Keywords

Powder Metallurgy
Al-Based Metallic Foam
Silicon Nitride Reinforced
Macrostructure and Microstructure
Compressive Strength

Makale Bilgisi

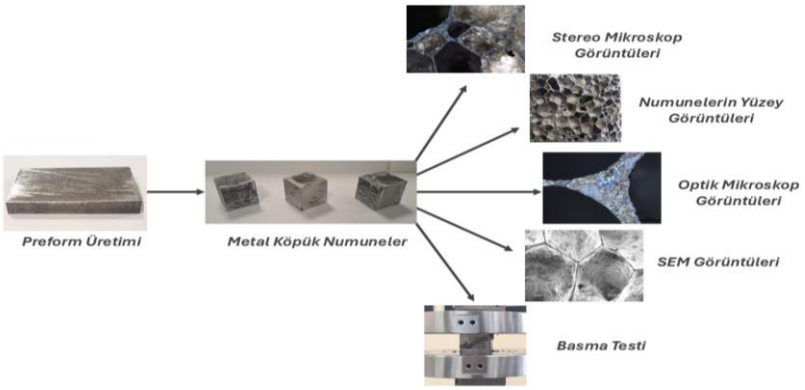
Araştırma makalesi
Başvuru: 05/07/2025
Düzeltme: 07/07/2025
Kabul: 25/07/2025

Anahtar Kelimeler

Toz Metalurjisi
Al Esaslı Metalik Köpük
Silisyum Nitrür Takviyeli
Makro ve Mikroyapı
Basma Dayanımı

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, alüminyum matrisli silisyum nitrür takviyeli metalik köpükler üretilmiş ve gözenek yapısı ile mekanik özellikleri karakterize edilmiştir. / In this study, aluminum matrix metal foams reinforced with silicon nitride were produced, and their pore structure and mechanical properties were characterized.



Şekil A: *Metal Köpük Numunelerinin Üretim ve Karakterizasyon Süreci. /* ***Figure A****: Production and Characterization Process of Metal Foam Samples.*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Bu çalışmada, alüminyum matrisli silisyum nitrür takviyeli metalik köpüklerin üretimi ve karakterizasyonu yapılmıştır. / In this study, aluminum matrix metal foams reinforced with silicon nitride were fabricated and characterized.*
- *%1 TiH_2 ilavesi optimum genleşme sağlamıştır. / 1% TiH_2 addition ensured optimal expansion.*
- *%2 Si_3N_4 takviyesi, daha homojen gözenek yapısı oluşturmuştur. / 2% Si_3N_4 reinforcement produced a more uniform pore structure.*
- *Basma dayanımı testlerinde, takviyesiz numuneler en yüksek dayanımı göstermiş; %4 takviyede kısmi artış gözlenmiştir. / Compressive strength tests showed highest strength in unreinforced samples, with partial increase at 4% reinforcement.*

Amaç (Aim): *Bu çalışmanın amacı, silisyum nitrür (Si_3N_4) takviyesinin Al esaslı metalik köpüklerin makro ve mikroyapısı ile mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektir. / The aim of this study is to investigate the effects of silicon nitride (Si_3N_4) reinforcement on the macro and microstructure and mechanical properties of Al-based metallic foams.*

Özgünlük (Originality): *Literatürde Al esaslı metalik köpüklerde Si_3N_4 takviyesinin etkilerini inceleyen az sayıda çalışma vardır. Bu çalışma, farklı takviye oranlarının yapısal ve mekanik özelliklere etkisini detaylı inceleyerek özgün katkı sunmaktadır. / There are few studies on Si_3N_4 reinforcement effects in Al-based metallic foams. This study provides an original contribution by thoroughly examining the impact of different reinforcement ratios on structural and mechanical properties.*

Bulgular (Results): *Al-Si_3N_4 kompozit metal köpüklerde %1 TiH_2 ilavesi optimum köpük oluşumunu sağlarken, %2 Si_3N_4 takviyesi gözenek yapısının homojenliğini artırmıştır. En yüksek basma dayanımı takviyesiz numunelerde gözlenmiş, %4 takviyede kısmi artış tespit edilmiştir. / In Al-Si_3N_4 composite metal foams, 1% TiH_2 addition facilitated optimal foam formation, while 2% Si_3N_4 reinforcement enhanced pore homogeneity. The highest compressive strength was observed in unreinforced samples, with a partial increase at 4% reinforcement.*

Sonuç (Conclusion): *Çalışma, Al matrisli köpüklerde Si_3N_4 takviyesinin yapı özellikleri ve basma dayanımı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. / The study revealed the effects of Si_3N_4 reinforcement on structural properties and compressive strength in Al matrix foams.*

*Corresponding author, e-mail: ibrhmdgn16@hotmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1734891

GU J Sci, Part C, 13(3): 1021-1030 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Alüminyum Matrisli Silisyum Nitrür Takviyeli Metalik Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu

İbrahim DOĞAN[1*], Elif IŞIK[1], Mehmet TÜRKER[1]

[1]*Gazi University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Ankara, Turkey*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/07/2025
Düzeltme: 07/07/2025
Kabul: 25/07/2025

Anahtar Kelimeler

Toz Metalurjisi
Al Esaslı Metalik Köpük
Silisyum Nitrür Takviyeli
Makro ve Mikroyapı
Basma Dayanımı

Öz

Metalik köpükler, yapılarında %90'a kadar gözenek ihtiva eden hafif malzemelerdir. Düşük yoğunlukları ve yüksek enerji absorbe etme kapasiteleri sayesinde başta otomotiv, uzay ve savunma sanayii olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmada %0, %2 ve %4 oranlarında silisyum nitrür (Si_3N_4) takviyesinin Al esaslı metalik köpüklerin makroyapı, mikroyapı, yoğunluk ve basma dayanımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada ön alaşımlı Alumix 231 tozu, Si_3N_4 tozu ve köpürtücü ajan olarak kullanılan titanyum hidrür (TiH_2) tozları kullanılmıştır. Tozlar karıştırmanın ardından sırasıyla soğuk ve sıcak olarak preslenerek preformlar elde edilmiştir. Elde edilen preformlar sınırlayıcı bir kalıbın içerisinde köpürtülerek 30x30x30 mm ebatlarında küp şeklinde metalik köpük numuneler elde edilmiştir. Köpük numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla uygulanan basma testi sonucunda farklı oranlarda silisyum nitrür takviyeli numunelerin basma dayanımında belirgin bir fark gözlemlenmemiştir.

Production And Characterization of Aluminum Based Silicon Nitride Reinforced Metallic Foam

Article Info

Research article
Received: 05/07/2025
Revision: 07/07/2025
Accepted: 25/07/2025

Keywords

Powder Metallurgy
Al-Based Metallic Foam
Silicon Nitride Reinforced
Macrostructure and Microstructure
Compressive Strength

Abstract

Metallic foams are lightweight materials that contain up to 90% porosity in their structure. Due to their low density and high energy absorption capacity, they are used in various fields, particularly in the automotive, aerospace, and defense industries. In this study, the effects of silicon nitride (Si_3N_4) reinforcement at 0%, 2%, and 4% ratios on the macrostructure, microstructure, density, and compressive strength of Al-based metallic foams were investigated. Pre-alloyed Alumix 231 powder, Si_3N_4 powder, and titanium hydride (TiH_2) powder, used as a foaming agent, were utilized in the study. Following the mixing process, the powders were compacted through cold and hot pressing to produce preforms. These preforms were foamed within a constrained mold to obtain cube-shaped metallic foam samples with dimensions of 30x30x30 mm. Compression tests were conducted to evaluate the mechanical properties of the foam samples. The results indicated that there was no significant difference in the compressive strength of the samples reinforced with varying amounts of silicon nitride.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılan alüminyumun, yüksek geri dönüşüm oranı, kolay şekillendirilebilirliği, hafifliği, iyi elektriksel ve ısıl iletkenliği gibi özellikler sayesinde geniş bir kullanım alanı vardır. Alüminyum ve alaşımları günümüzde, inşaat, havacılık, uzay ve otomotiv gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Alüminyumun tercih edilmesinin sebebi hafifliği, oksidasyon direnci ve özgül ağırlığına oranla yüksek mukavemete sahip olmasıdır. Fakat yüksek sıcaklığa ve aşınmaya karşı düşük olan direnci, Al matrisli seramik parçacık takviyeli kompozit malzeme üretimi üzerine yapılan çalışmaları artırmıştır. Bu tür kompozitler genellikle ergiyik veya katı hal yöntemleriyle üretilmektedir [2,6]. Ergiyik yöntemle kompozit üretiminde, ergiyik metal içerisine SiC, Al_4C_3, B4C, Al_2O_3 ve Si_3N_4 gibi karbür, oksit veya nitrür tipi

*Corresponding author, e-mail: ibrhmdgn16@hotmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1734891

seramik parçacıkların belirli oranlarda ilavesiyle üretim gerçekleştirilmektedir. Katı hal yöntemleri arasında ise toz metalurjisi (TM) metodu öne çıkmakta ve bu yöntemle TM kompozit parça üretimi gerçekleştirilmektedir [7,12]. Alüminyum alaşımlarının, daha yüksek korozyon direncine, elektriksel iletkenliğe ve düşük yoğunluğa sahip olmaları nedeniyle farklı endüstriyel alanlarda sıklıkla kullanılmaktadırlar. Ayrıca, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin artırılması, takviye malzemesi ile matris arasındaki etkileşime ve takviye fazının matris fazı içinde homojen dağılımına bağlıdır. SiC, B_4C, TiC ve Al_2O_3 gibi seramik takviyeler, çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [13].

Takviye elemanı olarak tercih edilen Si_3N_4, oksit dışı nitrür seramikler arasında üstün özelliklere sahip bir malzemedir. Yüksek sertlik, iyi aşınma direnci, düşük ısıl genleşme katsayısı, üstün ısıl şok direnci ve yüksek korozyon dayanımı gibi özellikleri sayesinde, Si_3N_4 yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir [14]. Literatürde, Si_3N_4 takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri ve aşınma dayanımı üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Karıştırma döküm yöntemiyle ağırlıkça %0, 2, 4, 6 ve 8 oranlarında Si_3N_4, AlN ve ZrB_2 katkılı Al2618 matrisli kompozitler üretilmiştir. Elde edilen bulgular, kompozitlerin sertlik, çekme ve basma dayanımı gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra korozyon direncinin, takviye oranının artışıyla birlikte iyileştiğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, takviye oranının artmasıyla kompozitlerin performansının belirgin şekilde arttığını göstermektedir [15].

Si_3N_4 takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerde üretim yönteminin (mekanik alaşımlama ve bilyalı değirmen ile öğütme) mekanik özelliklere olan etkisinin incelendiği bir çalışmada, mekanik alaşımlama tekniği ile Al matris içerisinde Si_3N_4 tozlarının daha homojen dağıldığı ve bu homojen dağılımın sertlik ve eğme dayanımını artırdığı görülmüştür. Ayrıca, ağırlıkça %10 Si_3N_4 takviyesi ve 660°C sinterleme sıcaklığında yapılan üretimlerin, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır [16].

Karıştırma döküm yöntemiyle ağırlıkça %0, 2, 4, 6 ve 8 oranlarında Si_3N_4, AlN ve ZrB_2 katkılı Al2618 matrisli kompozitlerin tribolojik ve mekanik özellikleri incelendiği başka bir çalışmada yapılan testlerde, ağırlıkça %8 takviye oranında, 10 N yük altında ve 5 m/s hızda yapılan testlerde en düşük aşınma oranı (0,00030 mm^3/m) elde edilmiştir. Ayrıca, takviye oranının artışıyla birlikte kompozitlerin sertlik, çekme ve basma dayanımı gibi mekanik özelliklerinde de iyileşme gözlemlenmiştir [17].

Karıştırma döküm prosesi ile Si_3N_4 takviye edilmiş alüminyum alaşım kompozitlerinin mekanik özellikleri araştırıldığı çalışmada ise, alüminyum matristeki Si_3N_4 takviye oranının %0'dan %12'ye kadar artırılmasının, kompozitin maksimum çekme dayanımını, sertliğini ve yoğunluğunu artırdığı belirlenmiştir [18].

Metal köpükler basma yükü altında yüksek deformasyona uğrayabilen malzemelerdendir. Bu da enerji absorpsiyon kapasitelerinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu özellikler sayesinde metal köpükler hafiflik kadar rijitliğin de önemli olduğu yapısal uygulamalarda ve yüksek enerji absorpsiyon özelliği aranan uygulamalarda kullanılmaktadır. Hücresel yapılı malzemeler içerdikleri boşlukların yapısına göre kapalı ya da açık gözenekli olarak ikiye ayrılmaktadır. Açık gözenekli malzemeler sünger olarak da adlandırılmaktadır. Köpükler ise kapalı gözenekli malzemelerdir. Basma yükleri altında köpüklerde akma gerilmesinden sonra süngerlerden farklı olarak birim uzama ile yavaşça artan gerilmeler dikkat çekmektedir. Bu artışın sebebi köpüklerde hücre duvarlarını birleştiren yüzeylerin de ezilme sırasında yük taşımasıdır [19]. Süngerlerde olmayan bu yüzeyler sayesinde kapalı gözenekli köpük malzemelerin basma yükü altındaki dayanımları daha yüksektir [20]. Al köpükler ise yoğunluklarının düşük olması, yüksek enerji absorpsiyon kapasiteleri, ses ve alev sönümleme gibi özellikler sebebiyle endüstride yaygın bir kullanıma sahiptir. Bu malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi ve daha ekonomik üretim yöntemlerinin geliştirilmesi için yapılan çalışmalarda artış gözlenmektedir [21].

Metal malzemeler arasında, alüminyum, kolay işlenebilirliği ve düşük sıcaklıkları nedeniyle çok önemli bir yer tutmaktadır. Alüminyumun özelliklerine ek olarak, düşük ergime sıcaklığı ve mekanik dayanımı gibi önemli dezavantajları da bulunmaktadır. Alüminyumun dezavantajlarını ortadan kaldırmak ve onu daha yüksek mekanik özelliklere sahip bir malzeme haline getirmek için, farklı elementlerle alaşımlama yoluyla çeşitli alüminyum alaşım serileri üretilmektedir. Üretilen alaşım serilerinden biri de Alumix serisidir. Alumix serisinin ana bileşeni alüminyumdur. İçerdiği alaşım elementlerine göre farklı adlarla anılmaktadır. Alumix serisinde en yaygın kullanılan alüminyum alaşımları Alumix-123 (Al, Cu, Mg ve Si), Alumix-321 (Al, Mg ve Cu), Alumix-231 (Al,

Si, Mg ve Cu) ve Alumix-431 (Al, Zn, Mg ve Cu) alaşımlarıdır [13].

Yüksek kaliteli köpükler üretmek için, ısı etkisiyle gaz salınımı yaparak ayrışan köpürtme ajanının, alüminyum alaşımına zarar vermemesi gerekmektedir. Ayrıca, gaz salınımının alaşımın sıvılaşmış bölgesine mümkün olduğunca yakın bir şekilde gerçekleşmesi sağlanmalıdır. Uygulamada, köpürtme ajanının çok önce ayrışmasının, gözenek birliği eksikliği ve köpüklerin tekrarlanabilir olmayan özelliklerinin nedenlerinden biri olduğu düşünülmektedir. Bugüne kadar, TiH_2, ZrH_2 ve MgH_2 gibi bazı metalik hidrürler, $MgCO_3$ ve $CaCO_3$ gibi karbonatlar, metalik köpüklerin üretiminde kullanılmıştır. Ancak, TiH_2, alüminyum köpürtme için en yaygın kullanılan köpürtme ajanıdır çünkü dehidrojenasyon reaksiyonu, alüminyumun erime noktasına çok yakındır ve çok düşük miktarlarda (yaklaşık %1 ağırlık) gaz salınımı yaparak yüksek gözenekli yapı oluşturmak için yeterlidir. Ayrıca, bu hidrürün tersinir dehidrojenasyon reaksiyonu, hidrojen depolama araştırmaları açısından da ilgi çekicidir. TiH_2 ayrışma reaksiyonu, partikül boyutu, başlangıç yüzey oksidasyonu miktarı, hidrürlerin ısıtıldığı atmosfer ve ısıtma hızı gibi birçok faktöre bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir [22].

2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Malzeme (Material)

2.1.1. Alumix 231 Alaşımı (Alumix 231 Alloy)

Al–Si ötektik alaşımları, özellikle otomotiv endüstrisinde, iyi aşınma direnci, yüksek sıcaklıklarda yüksek çekme dayanımı ve iyi dökülebilirlik özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu alaşımlar, Al esaslı matriste ötektik Si ikincil fazlarından oluşan mikroyapıları nedeniyle düşük kırılma tokluğuna sahiptir. Ayrıca, Al esaslı metal matristeki Si fazlarının boyutu, morfolojisi [23,24] ve dağılımının, Al-Si alaşımlarının mekanik dayanımına [24,25], sertliğine [25] ve sünekliğine [24] güçlü etkileri olduğu bildirilmiştir. Yapılan çalışmalarda %12 Si ile takviye edilmiş Al'den üretilen köpüklerde, daha homojen köpük yapısı ve yüksek köpürebilirlik gözlenmiştir. Aynı zamanda köpürme işleminin daha hızlı gerçekleştiği ve belirtilen katkı oranının lineer genleşmeye de olumlu yansıdığı görülmüştür [26].

Yapılan deneysel çalışmada metal köpük matris malzemesi olarak ECKA Granules firması tarafından üretilen ve kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilen ön alaşımlı Alumix 231 tozu, köpürtücü ajan olarak Atlantic Equipment Engineers firması tarafından üretilen %99,7 saflıktaki TiH_2 tozu ve parçacık takviyeli kompozit köpük üretimi için ise American Elements tarafından üretilen %99,9 saflıkta Si_3N_4 tozu kullanılmıştır. Tablo 2'de köpük üretiminde kullanılan tozların fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Alumix-231 alaşımının belirtilen kimyasal bileşimleri (ağırlıkça %) [27]. (The specified chemical compositions (in wt.%) of the Alumix-231 alloy are given in [27].

Element	Al	Si	Cu	Mg	Fe
Bileşim	Bal.	14-16	2,4-2,8	0,5-0,8	Yok

2.1.2. Silisyum Nitrür (Silicon Nitride)

Silisyum nitrür, yüksek sıcaklık ve aşınma dayanımı, termal şok direnci, yüksek ısıl iletkenlik özelliklerinin yanı sıra hafif bir malzeme olması nedeniyle pek çok alanda tercih edilen bir seramik olmuştur. Günümüzde, Si_3N_4 ve kompozitleri endüstride yüksek performanslı rulmanlar, türbin bıçakları ve ateşleme bujileri gibi alanlarda (yüksek kırılma tokluğu, yüksek mukavemet ve yüksek aşınma özelliklerine sahip bir malzeme gerektiren uygulamalar) kullanılmaktadır [28].

2.1.3. Titanyum Hidrür (Titanium Hydride)

Al ve alaşımları için köpürtücü ajan olarak kullanılan ve yapıda homojen olarak dağılmış bulunan TiH_2'ün ergime derecesi civarında ısıtılması neticesinde titanyum ile hidrojenin ayrışması ile ortaya çıkan gaz salınımı ile (hidrojen gaz çıkışı olur) malzemede genleşme görülür ve kapalı gözenekli köpük meydana gelir [29,32]. TiH_2'deki hidrojen salınımı yaklaşık 450°C'de başlar ve daha yüksek sıcaklıklarda devam eder [33,34]. Bu sıcaklık ticari Al alaşımlarının ergime derecesinin çok altındadır. Köpürme sıcaklığında malzemenin uzun süre bekletilmesi köpük yapının tekrar çökmesine ve ana yapının deforme olmasına sebep olur [32,35]. Köpürme aşamasında birçok parametre etkili olmakla birlikte, Al köpükler %80-90 gözeneklilik ve preform kalınlığının yaklaşık %400 genleşmesiyle elde edilir [36].

Tablo 2. Metal köpük üretiminde kullanılan tozların fiziksel özellikleri. (The physical properties of the powders used in metal foam production.)

Malzeme	Malzemelerin Fiziksel Özellikleri		
	Yoğunluk (g/cm^3)	Ergime Sıcaklığı (^oC)	Toz Boyutu (μm)
Alumix 231	2,67	577	<160
TiH_2	3,91	450	<75
Si_3N_4	2,2-3,5	1900	-

2.2. Metot (Method)

2.2.1. Toz Karışımının Hazırlanması (Preparation of the Powder Mixture)

Bu çalışmada, preformun metal köpük üretiminde kullanılacak kalıbı doldurabilmesi adına uygun preform kalınlığı 10 mm olarak belirlenmiştir. Al, TiH_2 ve Si_3N_4'den Tablo 3'te belirtilen oranlarda hazırlanan toz karışımı önce üç boyutlu karıştırıcı olan Turbula cihazı içerisine yerleştirilerek 45 dakika boyunca karıştırılmıştır ve homojen bir toz karışımı elde edilmiştir. Toplamda 3 adet preform malzeme üretilmiştir. Preformların her birinde TiH_2 köpürtücü ajanı %1 oranında bulunurken, Si_3N_4 katkı malzemesi oranı %0, %2 ve %4 olarak değişmektedir.

Tablo 3. Her bir preform üretimi için kullanılan tozların ağırlığı. (The weight of the powders used for the production of each preform.)

Numune	Alumix 231 (g)	TiH_2 (g)	Si_3N_4 (g)
%0 Si_3N_4	71,64	0,72	0
%2 Si_3N_4	70,19	0,72	1,45
%4 Si_3N_4	68,74	0,72	2,90

2.2.3. Preformların Hidrolik Presleme ile Şekillendirilmesi (Shaping of the Preforms by Hydraulic Pressing)

Karıştırılan tozlar HeriTechnics marka eksenel tek yönlü hidrolik pres yardımıyla önce soğuk, ardından da sıcak olarak preslenerek preform üretimi sağlanmıştır. 250 MPa yük altında soğuk olarak preslenen tozlar sonrasında 130 MPa yük altında 1 saat boyunca 420^{o}C sıcaklıkta preslenmiştir.

2.2.4. Metal Köpük Üretimi (Metal Foam Production)

Çalışmada gerçekleştirilen basma testine uygun kapalı hücreli metal köpük numuneler üretmek amacıyla 30x30x30 mm boyutlarında, köpürtme kalıbı tasarlanmıştır. Bu kalıp tasarımı ile preformun köpürmesi sınırlandırılmış ve istenilen boyutlara uygun metal köpük numuneler üretilmiştir. Metal köpük üretimi sırasında özel olarak köpük malzeme üretimi için tasarlanmış ön kapağında pencere bulunan ve köpürme işlemi gözlenebilen PROTHERM marka alt tablası hareket edebilen kızaklı fırın kullanılmıştır. Fırın içerisinde numuneler 700^{o}C'de köpürtme işlemine tabi tutulmuştur. Kalıp içerisindeki preformun köpürme süresini belirlemek için fırın içerisine kalıbın yanı sıra aynı preformdan hazırlanmış bir parça daha konulmuştur. Açıkta duran preformda yeterli köpürme gözlendiğinde fırın kapağı açılarak kalıp fırından çıkartılmıştır ve oda sıcaklığında soğutulmuştur. Her bir katkı oranındaki numuneden basma deneyi ve mikroyapı ve makroyapı analizinde kullanılmak üzere numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin köpürme sürelerinde farklılıklar gözlenmiştir.

Numunelerde köpürme esnasında farklı oranda hacimsel genleşme gözlenmiştir. Köpük numunelerin son hacmi Arşimet prensibiyle ölçülmüştür. Ağırlığı da ölçülen numunelerin hacimsel büyümeleri, yoğunlukları ve dikey büyümeleri (lineer genleşme) hesaplanmıştır. Kullanılan kalıpla birlikte köpük numune yüksekliği 30 mm ile sınırlandırıldığından ve 10 mm yüksekliğinde preform kullanıldığından tüm numunelerde dikey büyüme %300 olarak gözlemlenmiştir.

2.2.5. Uygulanan Test ve Analizler (Applied Tests and Analyses)

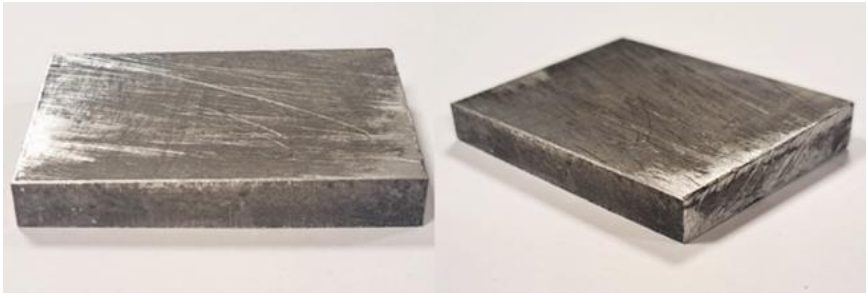
Metal köpük numunelerin basma dayanımının belirlenmesi için hazırlanan numuneler Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan INSTRON marka 3369 Universal model basma testi cihazıyla yapılmıştır. 50 kN kapasiteli olan cihazda basma hızı dakikada 5 mm olarak seçilmişitir.

Metal köpüklerin makroskobik analizi ve makroyapı görüntüleri Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan LEICA marka M205 C model stereo mikroskop cihazıyla çekilmiştir. Metal köpüklerin mikroskobik görüntüleri yine aynı bölümde bulunan LEICA marka DMI5000 M model optik mikroskopta, SEM görüntüleri ise JEOL marka JSM-6060 LV model SEM cihazı kullanılarak alınmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

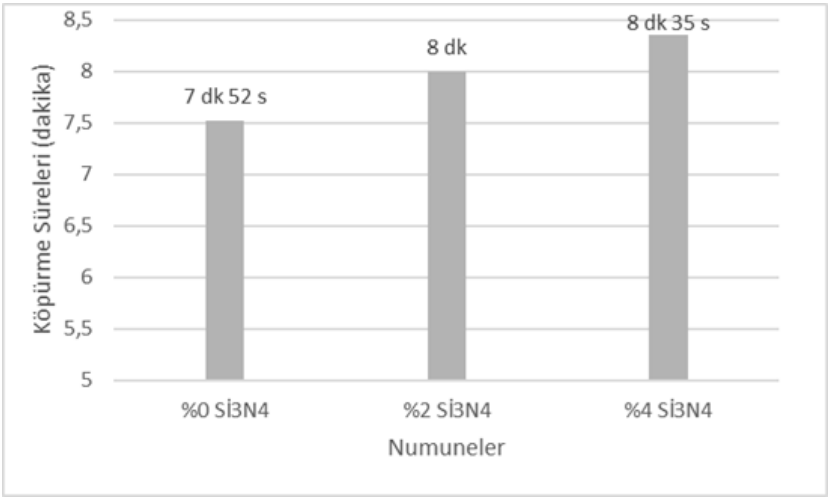
3.1. Üretilen Numuneler ve Köpürme Verileri (Produced Specimens and Foaming Data)

Çalışmada kullanılan metal köpük üretim sürecinin ilk aşaması olan preform malzeme hazırlığı, belirlenen üretim parametreleri ve şartlar doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, Resim 1'de görüldüğü üzere 67x40x10 mm boyutlarında üç farklı preform malzeme sıcak preste üretilmiş olup, bunlardan biri katkısız olarak hazırlanırken, diğer ikisine sırasıyla %2 ve %4 oranlarında Si_3N_4 ilave edilmiştir. Elde edilen preform malzemeler, belirlenen boyutlarda kesilerek kalıp içerisine yerleştirilmiş ve köpürtme aşamasına hazır hale getirilmiştir.



Resim 1. Deney kapsamında üretilen köpürmeye hazır preform malzemeler. (Foamable preform materials produced within the scope of the experiment.)

Kalıp içerisine yerleştirilen preformlar, belirlenen üretim süreci doğrultusunda 700°C sıcaklığa ayarlanmış fırında köpürtme işlemine tabi tutulmuştur. Kalıp içerisinde bulunan preformların yeterli hacimsel genleşmeye ulaşması beklenirken, aynı koşullara maruz bırakılan ancak kalıp dışında tutulan preformda gözlenen hacimsel genleşme referans alınarak işlem süresi belirlenmiştir. Yapılan gözlemler sonucunda, kalıp dışındaki preformun yeterli hacimsel genleşmeye ulaştığı anlaşıldığında, kalıpta bulunan preform fırından çıkartılarak havada soğutulmuştur. Şekil 1'de detaylı olarak görüldüğü üzere, Si_3N_4 katkı oranındaki artış, numunelerin köpürme sürelerinde küçük de olsa bir artışa sebep olmuştur.



Şekil 1. Numunelerin katkı oranlarına göre köpürme süreleri. (Foaming durations of the samples based on their additive ratios.)

Her bir katkı oranı için üretilen metal köpük numuneleri çeşitli fiziksel ve yapısal özellikler açısından analiz edilmiştir. Üretilen metal köpük numuneler herhangi bir işleme tabi tutulmadan Resim 2'de gösterilmiştir. Tablo 4'te görüldüğü üzere numuneler, ağırlık, yoğunluk, % hacimsel büyüme ve % gözeneklilik oranı gibi parametreler açısından farklılık göstermektedir. Ancak numune hacmi ve % dikey büyüme parametreleri, köpürtme işleminin sınırlayıcı bir kalıp içerisinde gerçekleştirilmesi nedeniyle tüm numuneler için sabit kalmıştır. Deneysel veriler incelendiğinde, %0, %2 ve %4 Si_3N_4 takviyeli numuneler için ortalama köpük numune yoğunluğunun sırasıyla 0,5 g/cm³, 0,44 g/cm³ ve 0,52 g/cm³ olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde, ortalama hacimsel büyüme oranları sırasıyla %440, %511 ve %420 olarak hesaplanmış, ortalama gözeneklilik oranları ise %82, %84,2 ve %81,5 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, metal köpüklerin yoğunluk ve gözeneklilik özelliklerinin katkı maddesi içeriğine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Özellikle %2 Si_3N_4 katkılı numunelerde gözlenen hacimsel büyüme oranındaki artış, katkı malzemesinin köpükleşme mekanizmasına olan etkisini göstermektedir. Bununla birlikte, %4 oranında katkı içeren numunelerde hacimsel büyüme oranında bir düşüş yaşandığı tespit edilmiştir. Bu durum, katkı maddesinin belirli bir oranın üzerine çıkıldığında, köpükleşme sürecini sınırlayabileceğini ve gözenek oluşumunu etkileyebileceğini göstermektedir.

Tablo 4. Numunelerin köpürme verileri. (Foaming data of the samples.)

Numune	Ağırlık (g)	Preform Hacmi (cm^3)	Numune Hacmi (cm^3)	Numune Yoğunluğu (g/cm^3)	Hacimsel Büyüme (%)	Dikey Büyüme (%)	Gözenek Oranı (%)
%0 Si_3N_4	13,5	4,99	25	0,54	402	300	80,7
	11,7	4,33	25	0,47	477	300	83,2
%2 Si_3N_4	11,8	4,37	25	0,47	472	300	83,1
	10,4	3,85	25	0,42	550	300	85,2
%4 Si_3N_4	12,7	4,7	25	0,51	432	300	81,9
	13,3	4,93	25	0,53	407	300	81



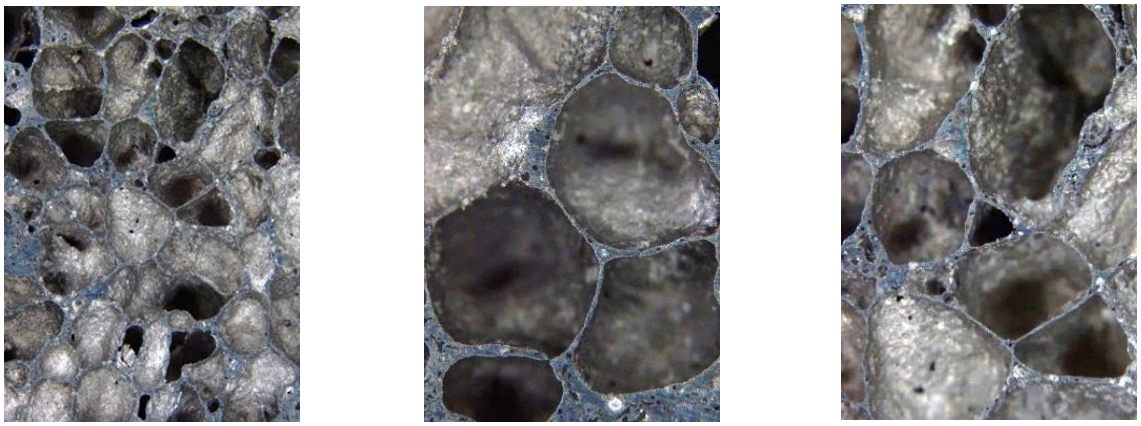
Resim 2. Deney sonucunda üretilen ve herhangi bir işleme tabi tutulmayan kübik metal köpük numunelerin görünümü. (The appearance of the cubic metal foam samples produced in the experiment without any post-processing.)

3.1. Makroyapı Analizi Sonuçları (Macrostructure Analysis Results)

Makroyapı analizlerinden elde edilen verilere göre, %0 ve %2 Si_3N_4 takviyeli numunelerde ince duvarlı ve daha homojen boyut dağılımına sahip gözenek yapısı gözlemlenmiştir. Bu durum, katkı oranının düşük olması durumunda gözenek oluşum mekanizmalarının daha düzenli bir şekilde gerçekleştiğini ve gözenek duvarlarının daha ince yapıda oluştuğunu göstermektedir. (Resim 3 ve Resim 4)

%4 Si_3N_4 takviyeli numunede ise daha kalın duvarlı ve heterojen boyut dağılımına sahip gözenek yapısı elde edilmiştir. (Resim 5) Katkı oranındaki artışın gözenek oluşum mekanizmasını etkileyerek, duvar kalınlığında artışa ve gözenek boyutlarının daha düzensiz bir şekilde dağılmasına neden olduğu ve daha ince gözenekli bir yapıda oluştuğu görülmektedir. Bu durum, %4 takviyeli numunede malzeme içyapısının daha heterojen olduğunu ve gözenek boyutlarının birbirinden belirgin şekilde farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

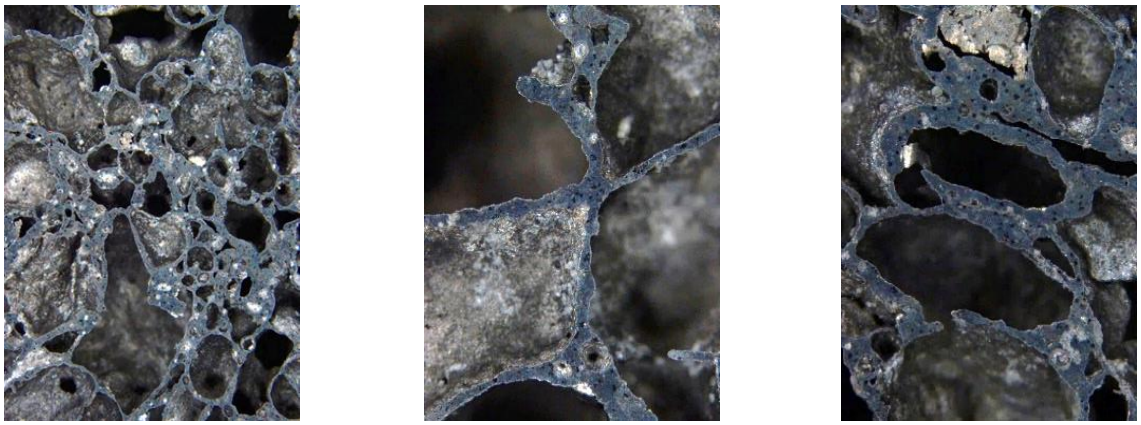
Köpük numunelerin kesit yüzeyleri daha geniş bir perspektiften incelendiğinde, %4 takviyeli numunede ince hücre duvarlarından ziyade, çok daha kalın hücre duvarlarına sahip, dağılım ve boyut açısından düzensiz bir hücre yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. %0 takviyeli numunede benzer bir durum kısmen görülürken, %2 takviyeli numunede bu düzensizlikler yer yer numunenin dış yüzeyine yakın bölgelerde gözlemlenmiştir. Ancak yapının genelinde hücre yapılarının ve duvar kalınlıklarının daha homojen ve düzenli olduğu belirlenmiştir. (Resim 6)



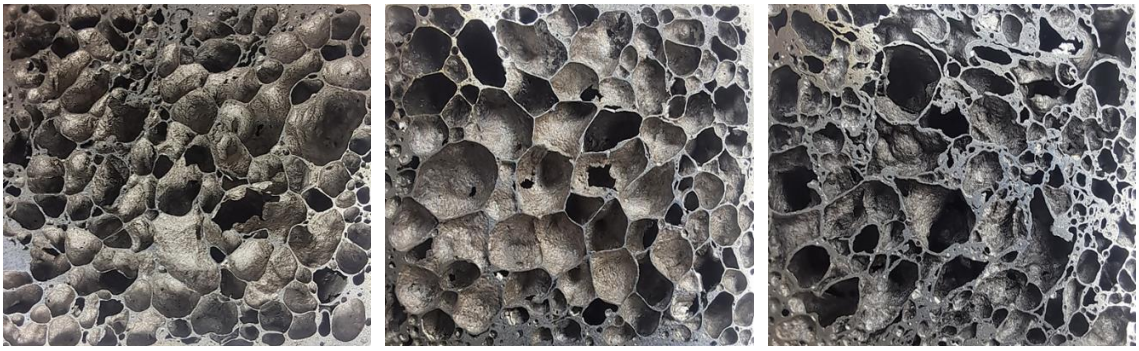
Resim 3. %0 Si_3N_4 takviyeli numunelerin stereo mikroskop görüntüleri. (Stereo microscope images of the samples reinforced with 0% Si_3N_4.)



Resim 4. %2 Si_3N_4 takviyeli numunelerin stereo mikroskop görüntüleri. (Stereo microscope images of the samples reinforced with 2% Si_3N_4.)



Resim 5. %4 Si_3N_4 takviyeli numunelerin stereo mikroskop görüntüleri. (Stereo microscope images of the samples reinforced with 4% Si_3N_4.)



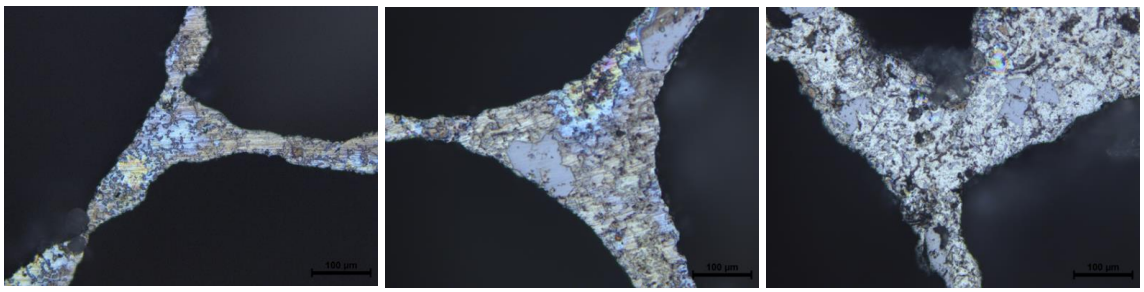
Resim 6. Soldan sağa doğru sırasıyla %0, %2 ve %4 Si_3N_4 takviyeli numunelerin yüzey görüntüleri. (Surface images of the samples reinforced with 0%, 2%, and 4% Si_3N_4, respectively, from left to right.)

3.2. Mikroyapı Analizi Sonuçları (Microstructure Analysis Results)

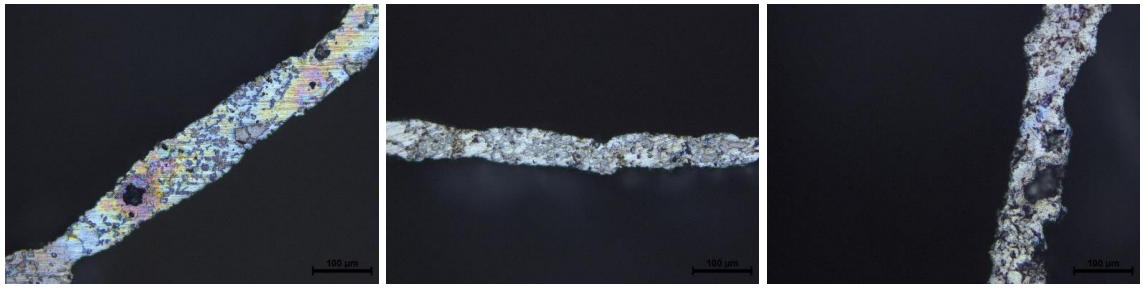
Mikroyapı analizinden elde edilen verilere göre, gözeneklerin oluşturduğu üçlü birleşim noktalarında takviye oranına bağlı olarak farklı duvar yapıları oluşmuştur. %0 ve %4 takviyeli numunelerde, üçlü birleşim noktalarında düzensiz bir duvar yapısı gözlemlenmiştir. (Resim 7) Bu durum, takviyesiz numunede yapısal düzenin yetersizliğini gösterirken, %4 takviyeli numunede ise yüksek takviye oranının gözenek duvarlarının oluşum mekanizmasını olumsuz etkilediğini göstermektedir.

%4 takviyeli numunede, gözenek duvarlarının çok kalın olduğu ve bu kalınlığın düzensiz bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir. (Resim 8) Bu durum, yüksek katkı oranının malzeme mikroyapısında drenaj etkisini azaltarak homojenliği bozduğunu ve duvar kalınlıklarının farklı olmasına sebep olduğunu düşündürmektedir. Gözenek duvarlarındaki bu düzensizlik, üçlü birleşim noktalarının açılarında da düzensizliğe yol açmıştır. (Resim 9)

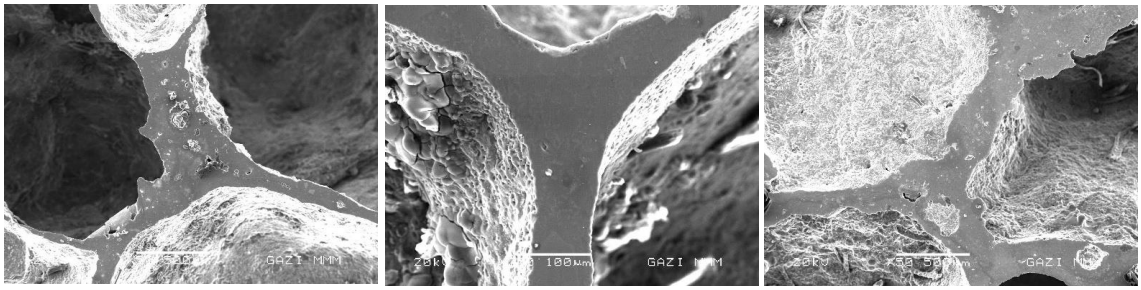
%2 takviyeli numunede ise gözenek yapısının daha düzenli bir şekilde oluştuğu görülmüştür. Üçlü birleşim noktalarında hem duvar kalınlığının hem de birleşim açılarının oldukça düzenli olduğu gözlemlenmiştir. (Resim 9) Bu durum, %2 katkı oranının numunenin içyapısında homojenliği sağladığını, her bölgede benzer drenaj etkisi gösterdiğini ve gözenek oluşum mekanizmasının daha dengeli bir şekilde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.



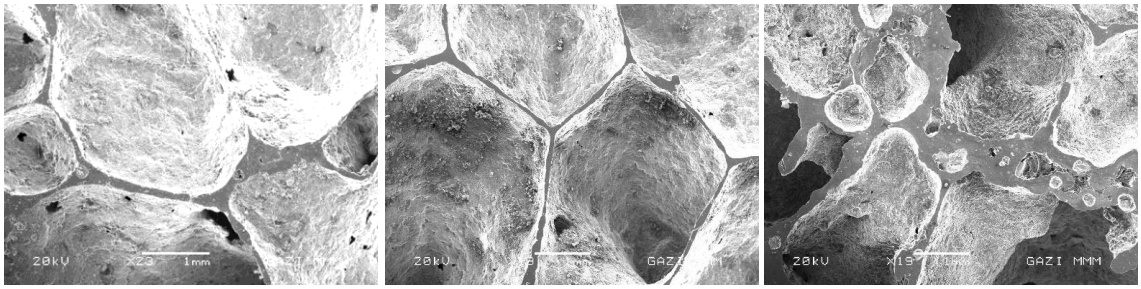
Resim 7. Soldan sağa doğru sırasıyla %0, %2 ve %4 Si_3N_4 takviyeli numunelerin 200x büyütme ile çekilen optik mikroskop görüntüleri. (Optical microscope images of the samples reinforced with 0%, 2%, and 4% Si_3N_4 at 200× magnification, shown from left to right, respectively.)



Resim 8. Soldan sağa doğru sırasıyla %0, %2 ve %4 Si_3N_4 takviyeli numunelerin 200 X büyütme ile çekilen optik mikroskop görüntüleri. (Optical microscope images of the samples reinforced with 0%, 2%, and 4% Si_3N_4, respectively, taken at 200× magnification and arranged from left to right.)



Resim 9. Soldan sağa doğru sırasıyla %0, %2 ve %4 Si_3N_4 takviyeli numunelerin SEM görüntüleri. (SEM images of the samples reinforced with 0%, 2%, and 4% Si_3N_4, respectively, arranged from left to right.)

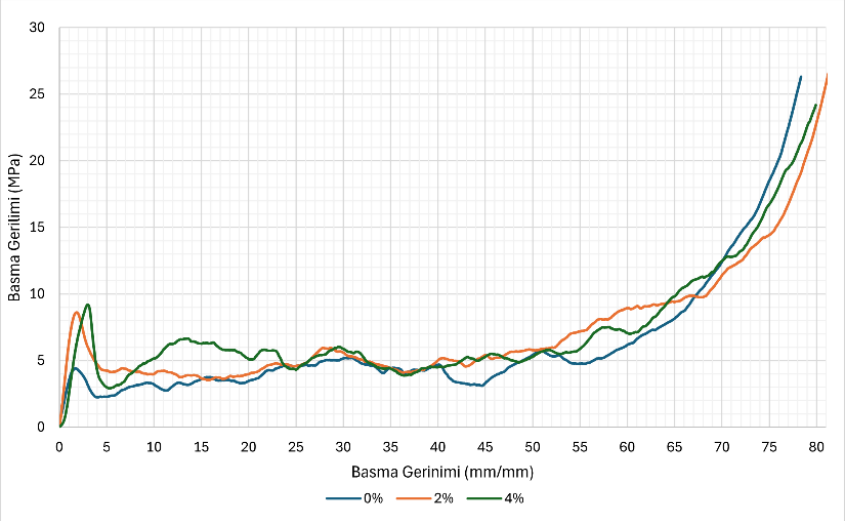


Resim 10. Soldan sağa doğru sırasıyla %0, %2 ve %4 Si_3N_4 takviyeli numunelerin SEM görüntüleri. (SEM images of the samples containing 0%, 2%, and 4% Si_3N_4 reinforcement, respectively, from left to right.)

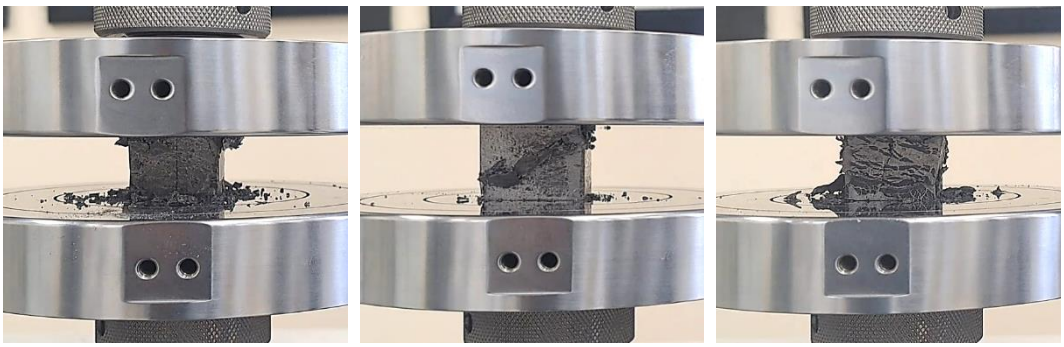
3.3. Basma Testi Verilerinin Analizi (Analysis of Compression Test Data)

Gerçekleştirilen basma testleri sonucunda, Si_3N_4 içermeyen numunenin en yüksek basma gerilimi değerine (25,25 MPa) ulaştığı gözlemlenmiştir. %2 Si_3N_4 takviyeli numunede basma gerilimi 18,56 MPa'ya düşmüş, %4 Si_3N_4 takviyeli numunede ise basma geriliminin 20,75 MPa seviyesine bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, Si_3N_4 takviyesinin Al matrisli metalik köpüklerin basma dayanımı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu görülmektedir. %2 oranında yapılan takviyenin, basma dayanımında önemli bir azalmaya sebep olduğu, ancak takviye oranının %4'e çıkarılmasıyla mekanik özelliklerde kısmi bir iyileşme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, Si_3N_4 partiküllerinin köpük içerisindeki dağılımı, matris-faz ara yüzey etkileşimleri ve gözenek yapısının homojenliği gibi mikro yapısal faktörlerin basma davranışını önemli ölçüde etkilediğini düşündürmektedir.



Şekil 2. %0, %2 ve %4 Si_3N_4 takviyeli numunelerin basma gerilim-gerinim grafikleri. (Compressive stress–strain curves of the samples reinforced with 0%, 2%, and 4% Si_3N_4.)



Resim 11. Soldan sağa doğru sırasıyla %0, %2 ve %4 Si_3N_4 takviyeli numunelerin basma testi sırasındaki davranışları. (Compression behavior of the samples reinforced with 0%, 2%, and 4% Si_3N_4, respectively, from left to right.)

Tablo 5. %0, %2 ve %4 Si_3N_4 takviyeli numunelerin basma testindeki gerilim ve gerinim değerleri.

Numune	Basma Gerilimi (MPa)	Basma Gerinimi (%)
%0 Si_3N_4	25,25	78
%2 Si_3N_4	18,56	78
%4 Si_3N_4	20,75	78

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Alüminyum matrisli ve silisyum nitrür takviyeli kompozit metal köpük üretimi ve basma dayanımları üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen genel çıkarımlar şu şekildedir:

1. %1 oranında TiH_2 ilavesinin üretilen metal köpüklerde yeterli genleşmeyi ve uygun köpük oluşumunu sağladığı gözlemlenmiştir.

2. %0, %2 ve %4 takviyeli numuneler için ortalama köpük numune yoğunluğu sırasıyla 0,5 g/cm^3, 0,44 g/cm^3 ve 0,52 g/cm^3, ortalama hacimsel büyüme sırasıyla %440, %511 ve %420, ortalama gözenek oranı ise sırasıyla %82, %84,2 ve %81,5 olarak gözlemlenmiştir.

3. Makroyapı görüntülerinden yola çıkarak %0 ve %2 takviyeli numunelerde ince duvarlı ve nispeten daha homojen boyut dağılımlı gözenek oluşumu gözlenirken, %4 takviyeli numunede kalın duvarlı ve heterojen boyut dağılımlı bir gözenek yapısı gözlemlenmiştir.

4. Mikroyapı görüntülerinden yola çıkarak gözeneklerin oluşturduğu üçlü birleşim noktalarında, %0 ve %4 takviyeli numunede düzensiz bir duvar yapısı gözlenirken, %2 takviyeli numunede üçlü noktada daha düzenli duvar yapısı gözlemlenmiştir.

5. %0 katkı oranına sahip numune, %2 ve %4 takviyeli numunelere kıyasla daha iyi basma dayanımı sergilemiştir. %4 Si_3N_4 takviyeli numunenin basma dayanımında ise %2 takviyeli numuneye kıyasla kısmi bir artış görülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

"2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı" kapsamında 1919B012318446 numaralı proje ile çalışmamıza katkı sunan ve destek veren TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Çalışmamızın temellerini birlikte attığımız, hasta yatağında dahi bizlere yol gösterici olan, yakın zamanda kaybettiğimiz çok değerli hocamız Prof. Dr. Adem KURT'a bu çalışmamızı atfediyoruz.

We would like to express our gratitude to TÜBİTAK for supporting and contributing to our study through the project numbered 1919B012318446 within the scope of the "2209-A Research Projects Support Programme for Undergraduate Students."

We dedicate this study to our esteemed professor, Prof. Dr. Adem KURT, with whom we laid the foundations of this work. Even from his hospital bed, he continued to guide us, and we recently lost him with great sorrow.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

***İbrahim DOĞAN*:** Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

***Elif IŞIK*:** Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

***Mehmet TÜRKER*:** Sonuçları analiz etmiştir.

He conducted analyzed the results.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Şenel, C. M., Gürbüz, M., Koç, E. 2015. "Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler," Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 669, s. 36-47.

[2] Rosso M. 2006, Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties. Journal of Materials Processing Technology, 175 (364-375), (2006).

[3] Mahajan G.V., Aher V.S. Composite material: A review over current development and automotive application, International Journal of Scientific and Research Publications, 2 (1-5), (2012).

[4] Babalola P.O., Bolu C.A., et all. Development of aluminium matrix composites: A review, Journal of Engineering and Technology Research, l(1-11), (2014).

[5] Sahu P.S., Banchhor R. Effect of different reinforcement on mechanical properties of aluminium metal matrix composites, Res. J. Engineering Sci., 6 (39-45), (2017).

[6] Mattli M.R., Matli R.R et all. Structural and mechanical properties of amorphous Si3N4 nanoparticles reinforced Al matrix composites prepared by microwave sintering. Ceramics, 2 (126-134), (2019).

[7] Bedir F. Characteristic properties of Al-Cu-SiCp and Al-Cu-B4Cp composites produced by hot pressing method under nitrogen atmosphere, Materials and Design, 28(1238-1244), (2007).

[8] Ramnath B.V., Elanchezhian C. Alumınıum metal matrıx composıtes - A revıew, Advanced Materials Science, 38(55-60), (2014).

[9] Attar S., Nagaral M., et all. A review on particulate reinforced aluminum metal matrix composites, Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, 2(225-229), (2015).

[10] Ervina Efzan M.N., Siti Syazwani N., and Abdullah M.M.A.B. Fabrication method of aluminum matrix composite (Amcs): A review, Key Engineering Materials, 700(02-110), (2016).

[11] Thirumoorthy A, Arjunan T.V., Senthil Kumar K.L. Latest research development in aluminum matrix with particulate reinforcement composites – A review, Materials Today: Proceedings 5(1657–1665), (2018).

[12] Manohar G., Dey A., Pandey K.M. and Maity S.R. Fabrication of metal matrix composites by powder metallurgy: A review, International Conference on Electrical, Electronics, Materials and Applied Science, 020041(1-8), (2019).

[13] Gökmen, U. Et Al. 2023. Microstructural and Radioactive Shielding Analyses of Alumix-231 and Alumix-231 Reinforced with B4C/SiC/Al2O3 Particles Produced through Hot Pressing. ACS OMEGA, vol.8, no.39 , 35755-35767.

[14] Akbulut, A., Tatlı, Z., Çalışkan, F. 2009. "Si3N4 Seramiklerinin Al2O3, MgO Katkıları Kullanılarak Basınçsız Sinterlenmesi", 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Türkiye.

[15] Kumar, N. M., Kumaran, S.S., Kumaraswamidhas, L. A. 2015. "An Investigation of Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Al2618 Alloy Reinforced with Si3N4, AlN and ZrB2 Composites", Journal of Alloys and Compounds, vol. 652, p. 244-249.

[16] H. Arik, H., "Effect of Mechanical Alloying Process on Mechanical Properties of a-Si3N4 Reinforced Aluminum-Based Composite Materials", Materials and Design, vol.29, pp.1856-1861, 2008.

[17] Kumar, N. M., Kumaran, S. S., Kumaraswamidhas, L. A. 2016. "Aerospace Application on Al2618 with Reinforced-Si3N4, AlN and ZrB2 in-situ Composites", Journal of Alloys and Compounds, vol. 672, p. 238-250.

[18] P. Sharma, S. Sharma, D. Khanduja, "Production and Some Properties of Si3N4 Reinforced Aluminium Alloy Composites", Journal of Asian Ceramic Societies, vol.3, pp.352-359, 2015.

[19] Ashby, M.F., A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley, Metal Foams: A Design Guide, Butterworth Heineman, 2000.

[20] Altenpohl, D. G. 1980. Present Structure and Future Trends in Key Materials Industries.Materials in World Perspective: Assessment of Resources, Technologies and Trends forKey Materials Industries, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Heidelberg p.21–126.

[21] Özen, M., Taşkın, N. Ü. (2021). Alüminyum Kompozit Köpük Malzemelerde Takviye Oranına Bağlı Olarak Darbe Davranışının İncelenmesi, Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(2), 87-95.

[22] Proa, Paula & Mendoza-Suarez, Guillermo & Drew, Robin. (2012). Effect of TiH 2 particle size distribution on aluminum foaming using the powder metallurgy method. Journal of Materials Science - J MATER SCI. 47. 10.1007/s10853-011-5820-1.

[23] A. Ma, N. Saito, M. Takagi, Y. Nishida, H. Iwata, Mater. Sci. Eng. A 395 (2005) 70–76.

[24] A. Ma, K. Suzuki, Y. Nishida, N. Saito, I. Shigematsu, M. Takagi, H. Iwata, A. Watazu, T. Imura, Acta Mater. 53 (2005) 211–220.

[25] C.M. Cepeda-Jimenez, J.M. Garcia-Infanta, A.P. Zhilyaev, O.A. Ruano, F. Carreno, J. Alloys Compd. 509 (2011) 636–643.

[26] TÜRKER, M., (2009). Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilen Alüminyum Esasli Metalik Köpükte Si İlavesinin Köpürmeye Etkisi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye (ss.1-6). Karabük, Türkiye

[27] Ismail Ozdemir, Ceren Gode, Hakan Yilmazer, Hasan Callioglu, The effect of extrusion and high-pressure torsion on the properties of Alumix-231, Materials Science and Engineering: A, Volume 532, 2012, Pages 573-578.

[28] Brook, R.J. (1991). Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials. Pergamon Press: Oxford.

[29] Yu, C.-J., H.H. Eifert, J. Banhart and J. Baumeister, "Metal foaming by a powder metallurgy method: Production, properties and applications". Materials Research Innovations, 181-188, (1998).

[30] Banhart, J., "Metallic foams: challenges and opportunities". Eurofoam, 13-20, (2000).

[31] Schaeffler, P., W. Rajner, D. Claar, T. Trendelenburg and H. Nishimura, "Production, properties, and applications of Alulight® closed-cell aluminum foams", Proceedings of the Fifth International Workshop on Advanced Manufacturing Technologies, 151-156, (2005).

[32] Babcsán, N., F.G. Moreno and J. Banhart, "Metal foams high temperature colloids: part II: in situ analysis of metal foams". Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 254-263, (2007).

[33] Uzun, A. and M. Turker, "The investigation of mechanical properties of B4C-reinforced AlSi7 foams". International Journal of Materials Research, 970-977, (2015).

[34] Yang, D., et al., "Effect of decomposition kinetics of titanium hydride on the Al alloy melt foaming process". Journal of Materials Science & Technology, 361-368, (2015).

[35] Turker, M., "Production of Ceramics Reinforced Al Foams by Powder Metallurgy Techniques", Materials Science Forum, 39-46, (2011).

[36] Sharma, S.S., S. Yadav, A. Joshi, A. Goyal and R. Khatri, "Application of metallic foam in vehicle structure: A review". Materials Today: Proceedings, 347-353, (2022).

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1031-1045 (2025)

Yüzey Dalgası Kaynaklı Bozucu Etkiler Altında Otonom Sualtı Araçlarının (AUVs) Hız Kararlılığının Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) Tabanlı Model Öngörülü Kontrol (MPC) ile Sağlanması

Ahmetcan ÖNAL[1, 2, *], Andaç Töre ŞAMİLOĞLU[2]

[1] *Roketsan A.Ş., 06780, Elmadağ/ANKARA*

[2] *Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, 06790, Etimesgut/ANKARA*

Article Info

Research article
Received: 30/06/2025
Revision: 14/07/2025
Accepted: 05/08/2025

Keywords

Autonomous Underwater Vehicle (AUV)
Wave Induced Disturbance
Long Short-Term Memory (LSTM)
Model Predictive Control (MPC)
Dynamic System Modeling
Learning-Based Control

Makale Bilgisi

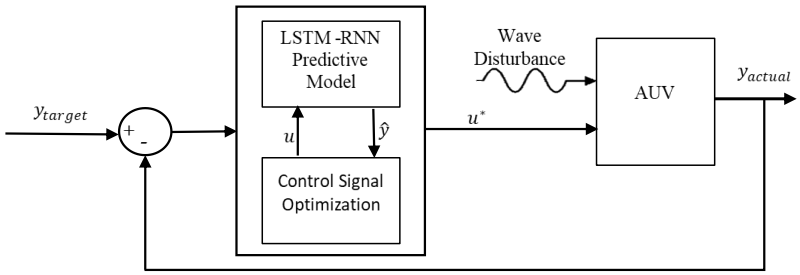
Araştırma makalesi
Başvuru: 30/06/2025
Düzeltme: 14/07/2025
Kabul: 05/08/2025

Anahtar Kelimeler

Otonom Sualtı Aracı (AUV)
Dalga Kaynaklı Bozucu Etkiler
Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM)
Model Öngörülü Kontrol (MPC)
Dinamik Sistem Modellenmesi
Öğrenme Tabanlı Kontrol

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, yüzey dalga bozucu etkileri altında çalışan Otonom Su Altı Araçlarının (AUV) hız stabilizasyonunu iyileştirmek amacıyla LSTM tabanlı bir Model Öngörülü Kontrol (LSTM-MPC) çerçevesi geliştirilmiştir. Önerilen denetleyici, öğrenilmiş deniz koşulları altında sağlam bir performans elde etmek için veriye dayalı kısa vadeli hız tahminini model tabanlı optimizasyon ile birleştirmektedir. / In this study, an LSTM-based Model Predictive Control (LSTM-MPC) framework has been developed to improve the velocity stabilization of Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) operating under surface wave disturbances. The proposed controller combines data-driven short-term velocity prediction with model-based optimization to achieve robust performance under learned marine conditions.



Şekil A: *Dalga bozucu etkileri altında AUV hız stabilizasyonu için önerilen LSTM-MPC çerçevesinin blok diyagramı. /* ***Figure A****: Block diagram of the proposed LSTM-MPC framework for AUV velocity stabilization under wave disturbances.*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Dalga bozucu etkileri altında AUV'ler için LSTM tabanlı hız tahmini. / LSTM-based velocity prediction for AUVs under wave disturbances.*
- *Hız stabilizasyonu için LSTM tabanlı MPC. / LSTM-integrated MPC for velocity stabilization.*
- *MATLAB benzetimleri ile doğrulanmıştır. / Validated through MATLAB simulations.*

Amaç (Aim): *Temel hedef, hız izleme hatalarını azaltırken hızla değişen hidrodinamik koşullara karşı sağlamlığı korumaktır. / The primary objective is reducing velocity tracking errors while maintaining robustness against rapidly changing hydrodynamic conditions.*

Özgünlük (Originality): *Geçmiş kontrol girişi ve hız verileri kullanılarak kısa vadeli hız tepkilerini tahmin etmek amacıyla bir LSTM sinir ağı eğitilmiş ve tahminler, MATLAB simülasyon ortamında gerçek zamanlı kontrol optimizasyonu için MPC çerçevesine entegre edilmiştir. / An LSTM neural network is trained on historical control input and velocity data to predict short-term velocity responses, and its predictions are integrated into an MPC framework for real-time control optimization in a MATLAB simulation environment.*

Bulgular (Results): *LSTM-MPC denetleyicisi, 0,5 m genlik ve 0,1 Hz frekanslı dalga koşullarında, x ekseninde Ortalama Mutlak Hata (MAE) %85'e, yunuslama ekseninde ise %65'e varan oranda azaltılmıştır. / The LSTM-MPC controller significantly outperformed the uncontrolled case, reducing the Mean Absolute Error (MAE) by up to 85% in the surge axis and 65% in the pitch axis under a wave condition of 0.5 m amplitude and 0.1 Hz frequency.*

Sonuç (Conclusion): *Önerilen LSTM-MPC çerçevesi, hidrodinamik parametrelere ihtiyaç duymadan, eğitilmiş deniz koşullarında yüzeye yakın operasyonlar için sağlam bir kontrol stratejisi sunmaktadır. / The proposed LSTM-MPC framework provides a robust control strategy for near-surface operations in trained marine environments without the need for hydrodynamic parameters.*

*Corresponding author, e-mail: ahmetcanonal@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1726037

GU J Sci, Part C, 13(3): 1031-1045 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Yüzey Dalgası Kaynaklı Bozucu Etkiler Altında Otonom Sualtı Araçlarının (AUVs) Hız Kararlılığının Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) Tabanlı Model Öngörülü Kontrol (MPC) ile Sağlanması

Ahmetcan ÖNAL[1, 2, *], Andaç Töre ŞAMİLOĞLU[2]

[1] *Roketsan Inc., 06780, Elmadağ/ANKARA*

[2]*Başkent University, Institute of Science, Department of Mechanical Engineering, 06790, Etimesgut/ANKARA*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/06/2025
Düzeltme: 14/07/2025
Kabul: 05/08/2025

Anahtar Kelimeler

Otonom Sualtı Aracı (AUV)
Dalga Kaynaklı Bozucu Etkiler
Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM)
Model Öngörülü Kontrol (MPC)
Dinamik Sistem Modellenmesi
Öğrenme Tabanlı Kontrol

Öz

Otonom Sualtı Araçları (AUV'ler), sualtı keşfi, bilimsel araştırmalar ve açık deniz operasyonlarında hayati bir rol oynamaktadır. Ancak, yüzeye yakın sığ derinliklerde dalga kaynaklı bozucu etkiler nedeniyle hız kararlılığı bozulabilmektedir. Bu çalışma, karmaşık hidrodinamik modelleme veya sistem tanımlamasına ihtiyaç duymayan veri odaklı bir kontrol çerçevesi önermektedir. Dalga etkilerini içeren simülasyon verileriyle eğitilen Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) tabanlı Tekrarlayan Sinir Ağı (RNN), AUV'nin hız tepkilerini tahmin etmektedir. Bu tahminler, harici bozucuları telafi eden optimal kontrol sinyalleri üretmek amacıyla Model Öngörülü Kontrol (MPC) yapısı içinde kullanılmaktadır. Yöntem, giriş–çıkış verilerinden sistemin doğrusal olmayan dinamiklerini ve çevresel etkileşimleri öğrenerek kontrol tasarımını sadeleştirirken öğrenilmiş deniz koşulları altında kararlılık sağlamaktadır. Simülasyonlar, LSTM-MPC çerçevesinin düşük izleme hataları sağladığını göstermektedir. Kontrol çerçevesi öğrenilmiş dalga koşullarında başarılı performans sergilerken, LSTM-MPC daha dinamik deniz durumlarına karşı da uyum yeteneği göstermektedir. Özellikle öğrenilmiş dalga koşulunda, x eksenindeki ortalama mutlak hata (MAE) %84, yunuslama eksenindeki MAE ise %65 oranında azaltılmıştır. Bu bulgular, yüzeye yakın AUV operasyonları için öğrenmeye dayalı öngörülü kontrol stratejilerinin potansiyelini vurgulamaktadır. Gelecek çalışmalarda, gerçek zamanlı uyum sağlamak için çevrimiçi öğrenmenin entegrasyonu ve önerilen yöntem performansının kontrollü bir dalga havuzunda deneysel olarak doğrulanması hedeflenmektedir.

Velocity Stabilization of Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) under Surface Wave Induced Disturbances Using Long Short-Term Memory (LSTM) Based Model Predictive Control (MPC)

Article Info

Research article
Received: 30/06/2025
Revision: 14/07/2025
Accepted: 05/08/2025

Keywords

Autonomous Underwater Vehicle (AUV)
Wave Induced Disturbance
Long Short-Term Memory (LSTM)
Model Predictive Control (MPC)
Dynamic System Modeling
Learning-Based Control

Abstract

Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) play a vital role in underwater exploration, scientific research, and offshore operations. However, at shallow depths near the surface, wave-induced disturbances can impair velocity stabilization. This study proposes a data-driven control framework that eliminates the need for complex hydrodynamic modeling or system identification. A Long Short-Term Memory (LSTM)-based Recurrent Neural Network (RNN), trained on simulation data incorporating wave effects, is used to predict the AUV's velocity responses. These predictions are then utilized within a Model Predictive Control (MPC) framework to generate optimal control signals that compensate for external disturbances. By learning the nonlinear dynamics of the system and environmental interactions directly from input–output data, the proposed method simplifies controller design while ensuring stability under the wave conditions represented in the training data. Simulation results demonstrate that the LSTM-MPC framework yields low tracking errors. While the control scheme performs well under learned wave conditions, it also shows adaptability to more dynamic marine environments. Specifically, under the learned wave condition, the mean absolute error (MAE) in the x-axis was reduced by %84, while the MAE in the pitch axis decreased by %65. These findings highlight the potential of learning-based predictive control strategies for near-surface AUV operations. Future work will focus on integrating online learning for real-time adaptation and experimentally validating the proposed method in a controlled wave basin.

*Corresponding author, e-mail: ahmetcanonal@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1726037

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Otonom Sualtı Araçları (AUV'ler), deniz araştırmaları, açık deniz operasyonları ve askeri görevler gibi çeşitli kritik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, AUV'ler deniz yüzeyine yakın konumda çalıştığında, dalga kaynaklı bozucu etkiler hareket kararlılığını — özellikle hız kontrolünü — önemli ölçüde etkileyerek görev performansını düşürebilmektedir [1–4]. Bu nedenle, bu tür dinamik çevresel etkilere karşı dayanıklı kontrol stratejilerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Dalga kuvvetleri, AUV'lerde doğrusal olmayan ve zamana bağlı değişken dinamik davranışlar oluşturmaktadır. Dalga etkileşimlerini modellemek için Morison denklemi gibi ampirik formüllerden, potansiyel akış teorisi ve spektral yöntemlere kadar çeşitli yaklaşımlar önerilmiş olup, bunlar genellikle altı serbestlik derecesine (6-DOF) sahip dinamik modellere entegre edilmektedir [1,5]. Örneğin, Park ve arkadaşları değişken okyanus koşulları altında kararlılığı koruyabilen uyarlamalı bir derinlik kontrolörü önermiştir [6].

Son yıllarda, çevresel bozucu etkilerin modellenmesinde veri odaklı yaklaşımlar ilgi görmeye başlamıştır. Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN) sınıfına ait olan Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) ağları, zaman serisi tahmin görevlerinde dikkate değer sonuçlar ortaya koymuştur [7,8]. Örneğin, Wang ve arkadaşları AUV dinamiklerini öğrenmek amacıyla LSTM kullanmış ve Q-learning ile hiperparametre optimizasyonu kullanarak tahmin doğruluğunu artırmıştır [9]. Bu tür kestirim modelleri, sistem davranışını öngörerek kontrol eylemlerini optimize eden Model Öngörülü Kontrol (MPC) gibi stratejilere entegre edilebilmektedir [10].

Veri odaklı kontrol çerçeveleri, İnsansız Hava Araçları (UAV'ler) ve kara araçları da dahil olmak üzere birçok otonom sistemde başarıyla uygulanmıştır. Örneğin, Zimmerman ve Nagamune, çok rotorlu UAV'lerde rüzgâr kestirimi için makine öğrenmesine dayalı bir yaklaşım geliştirerek veri odaklı yöntemlerin çevresel etkileri yakalamadaki etkinliğini ortaya koymuştur [11]. Mendez ve arkadaşları ise, LiDAR tabanlı rüzgâr kestirim bilgilerini kontrol çerçevesine entegre ederek MPC performansında önemli bir iyileşme sağlamıştır [12]. Ayrıca, Kim ve arkadaşları, otonom kara araçlarında yanal hareket regülasyonu için tamamen LSTM tabanlı bir öngörülü kontrol çerçevesi önererek, LSTM-MPC yaklaşımının araç kontrol sistemlerindeki potansiyelini göstermiştir [13].

Öğrenmeye dayalı modelleme alanında ilerlemeler kaydedilmiş olmasına rağmen, AUV'lerin dalga kaynaklı bozucu etkiler altındaki hız kararlılığına yönelik sinir ağı uygulamaları literatürde sınırlı ölçüde ele alınmıştır [8,14]. Pekiştirmeli öğrenme (reinforcement learning) teknikleri uyarlanabilirlik sağlasa da, bu yöntemler yüksek hesaplama maliyeti ve güvenilirlik gibi zorluklar da barındırmaktadır [15].

Doğrusal-Kare Regülatör (LQR) gibi klasik kontrol yöntemleri, sadelikleri ve analitik uygulanabilirlikleri nedeniyle denizaltı aracı uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [1,16,17]. Öte yandan, çevresel bozucu etkiler karşısında dayanıklılığı artırmak amacıyla Sliding Mode Control (SMC) ve H-infinity (H∞) gibi daha gelişmiş kontrol teknikleri de literatürde araştırılmıştır. Ancak bu yöntemler genellikle hassas dinamik modellemeye ihtiyaç duymaktadır ve parametre belirsizliklerine ya da algılayıcı kaynaklı gürültülere karşı hassas olabilmektedir. Buna karşılık, bu çalışmada önerilen yöntem, ayrıntılı hidrodinamik modelleme veya sistem tanımlama tekniklerine dayalı geleneksel yaklaşımlar yerine tamamen veri tabanlı bir yapı benimsemektedir. Fiziksel modellemeye duyulan ihtiyacı ortadan kaldırarak, geleneksel yöntemlerin beraberinde getirdiği hesaplama yükü ve parametre belirsizliklerine olan duyarlılığı azaltmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda LSTM-MPC yapıları farklı otonom sistemlerde kullanılmış olsa da, bu çalışma, yapının yüzeye yakın AUV operasyonlarında dalga kaynaklı hız kararsızlığına karşı uygulanmasıyla literatürdeki boşluğu doldurmaktadır. Önerilen yaklaşımda, dalga bozucuları altında giriş–çıkış dinamiklerini yakalayacak şekilde önceden eğitilmiş bir LSTM ağı kullanmakta ve özellikle yüzeye yakın operasyonlar için eğitilmiş koşullarda güvenilir performans sağlanmaktadır. Bu çalışmada analiz, dalgaların AUV'ye tam karşıdan (baş omuzdan) geldiği varsayılmış olup, bu koşullar altında en çok etkilenecek eksenler olan doğrusal x ve z eksenleri (surge, heave) ile y ekseni etrafındaki açısal yunuslama (pitch) eksenlerine odaklanmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Bu bölümde, AUV dinamiklerinin matematiksel modellenmesi ile yüzey dalgalarının AUV üzerine uyguladığı kuvvet ve momentler detaylandırılmakta; ayrıca LSTM tabanlı Tekrarlayan Sinir Ağı'nın (RNN) tasarımı ve bu ağın Model Öngörülü Kontrol (MPC) yapısına entegrasyonu açıklanmaktadır. Buna ek olarak,

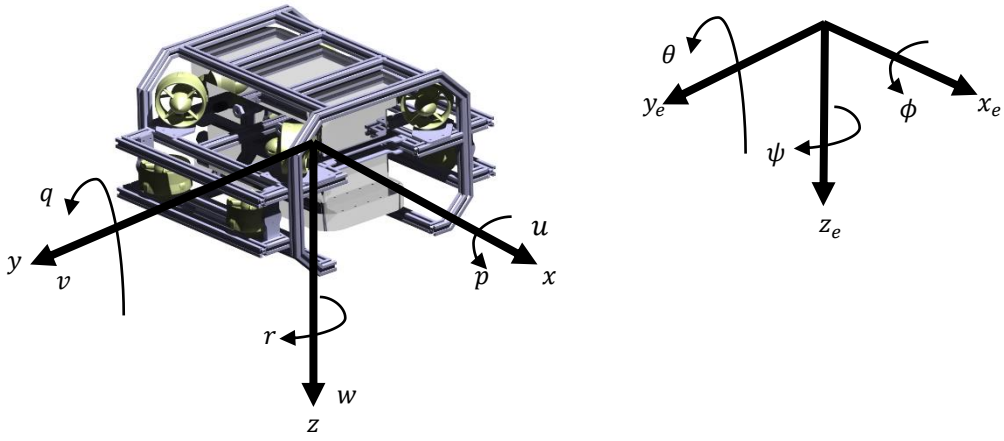
simülasyon ortamının hazırlanması, LSTM ağı için veri toplama ve ön işleme adımları ile eğitim süreci de sunulmaktadır. AUV modellemesinde kullanılan semboller ve tanımlar Tablo 1'de verilmiştir.

2.1. AUV MATEMATİKSEL MODELİ (AUV MATHEMATICAL MODEL)

AUV'nin dinamik modeli, klasik Newton–Euler denklemlerine dayanmaktadır. Bu denklemler, katı gövde ve akışkan etkileşimlerinin birleşiminden türetilmiştir. Bu çalışmada Kuzey-Doğu-Aşağı (North-East-Down, NED) koordinat sistemi kullanılmıştır. AUV dinamikleri, araçla birlikte hareket eden (gövde sabit) eksen takımında modellenmiş, pozisyonu ise dünya sabit (ataletsel) eksen takımında izlenmiştir (Şekil 1).

Tablo 1. AUV gösteriminde kullanılan semboller ve tanımlamalar (Symbols and definitions used in AUV representation)

Serbestlik Derecesi	*Doğrusal/Açısal Hareket*	*Konum/ Oryantasyon*	*Doğrusal/Açısal Hız*	*Kuvvet/ Moment*
1	*X ekseni (surge)*	x	u	X
2	*Z ekseni (heave)*	z	w	Z
3	*Yunuslama (pitch)*	θ	q	M



Şekil 1. Gövde sabit ve dünya sabit eksen takımları gösterimi (Representation of body-fixed and earth-fixed reference frames)

Önerilen LSTM tabanlı kestirim ağının eğitimi ve kontrol simülasyonlarının uygulanabilmesi adına, Otonom Sualtı Aracı (AUV) için kapsamlı bir matematiksel model gerekmektedir. Bu konuda literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Matematiksel model, katı kütle atalet kuvvet/momentleri (M_{RB}), ek kütle (added mass) (M_A, C_A), Coriolis ve merkezcil kuvvet/momentleri (C_{RB}), hidrodinamik sürüklenme kuvvet/momentleri (D_l, D_q), hidrostatik geri çağırıcı kuvvet/momentleri ($g(\eta)$) ve eyleyicilerden üretilen itme kuvvet/momentleri (τ_m) gibi temel fiziksel etkileri içermektedir (Eşitlik 1).

Bu çalışmada model, yalnızca x, z ve yunuslama eksenlerine odaklanmaktadır. Bu tercih, dalga bozucu etkilerinin araca önden (head-on) geldiği varsayımına dayanmaktadır. Bu nedenle, yalnızca bu üç serbestlik derecesinde anlamlı dinamik tepkilerin oluşması beklenmektedir. Araç düşük hızlarda ve düşük ivmelerle çalıştığı varsayıldığından, modeli sadeleştirmek amacıyla ek kütle (added mass) terimleri ihmal edilmiştir [1]. Bundan dolayı kütle ve atalet matrisi Eşitlik 2'deki gibidir.

$$(M_{RB} + M_A)\dot{v} + (C_{RB}(v) + C_A(v))v + (D_l(v) + D_q(v))v + g(\eta) = \tau_{Toplam} \quad (1)$$

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_y \end{bmatrix}, (M_A = 0) \quad (2)$$

Burada, m katı gövdenin kütlesini, I ise ataletini (moment of inertia) temsil etmektedir. Sınırlı hareket aralığı ve az sayıda serbestlik derecesi göz önünde bulundurularak, Coriolis ve merkezkaç kuvvetlerinin etkileri ihmal edilmiştir ($C_{RB}=0, C_A=0$). Benzer şekilde hızın karesi ile orantılı olan kuadratik sürüklenme (quadratic drag, D_q) de düşük hız rejimi nedeniyle dikkate alınmamıştır. Doğrusal sürüklenme matrisi Eşitlik 3'teki gibidir.

$$D_l = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Z_w & 0 \\ 0 & 0 & M_q \end{bmatrix}, (D_q = 0) \quad (3)$$

Bu çalışmada $x_{cg}=x_{cb}$ ve $y_{cg}=y_{cb}$ varsayılmıştır. Ancak z_{cg} ve z_{cb} düşey eksen boyunca gövde sabit eksen takımında farklı konumlarda yer almaktadır. z_{cg}, gövde sabit eksen takımının merkezinde bulunduğu için, ağırlık merkezi (CG) etrafında herhangi bir moment yaratmamaktadır. Buna karşılık, tam batık durumda kaldırma merkezi (CB) üzerinde etki eden kaldırma kuvveti F_b ile araç üzerine etki eden bozucu kuvvet F_d, bir moment çifti oluşturmaktadır. Bu moment etkileşimi Şekil 2'de gösterilmiş, ilgili hidrostatik kuvvet/momentler ise Eşitlik 4-8 aralığında verilmiştir.

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} F_b + F_g \\ r_{cb} x F_b + r_{cg} x F_g \end{bmatrix} \quad (4)$$

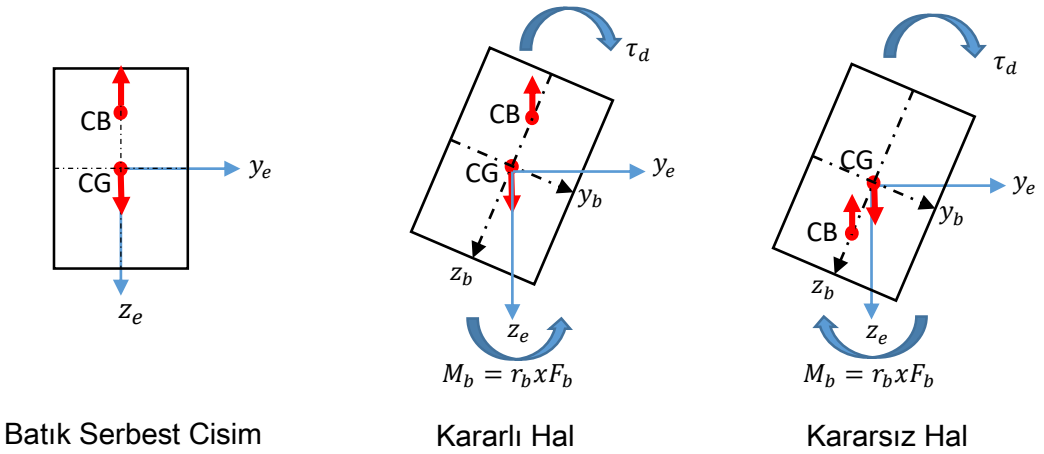
$$F_g = R_b^{e^{-1}} [0\ 0\ W]^T, W = mg \quad (5)$$

$$F_b = R_b^e [0\ 0\ B]^T, B = \rho g \nabla \quad (6)$$

$$R_b^e(\phi,\theta,\psi) = R_z(\psi) R_y(\theta) R_x(\phi)$$

$$= \begin{bmatrix} cos\psi cos\theta & -sin\psi cos\phi + cos\psi sin\theta sin\phi & sin\psi sin\phi + cos\psi cos\phi sin\theta \\ sin\psi cos\theta & cos\psi cos\phi + sin\phi sin\theta sin\psi & -cos\psi sin\phi + sin\theta sin\psi cos\phi \\ -sin\theta & cos\theta sin\phi & cos\theta cos\phi \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (z_{cg} W - z_{cb} B) sin\theta \end{bmatrix} \quad (8)$$



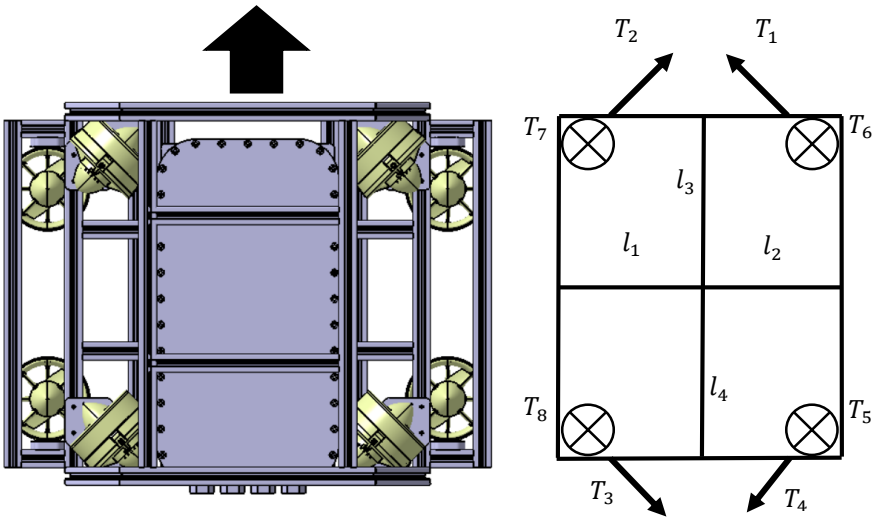
Şekil 2. Batık cisme etki eden kuvvetlere karşı verilen sistem cevabı (System response to forces acting on a submerged body)

Eşitliklerdeki R_b^e, gövdeden dünya rotasyon matrisidir. Araca etki eden toplam kuvvet ve moment vektörlerini, her bir eyleyicinin oluşturduğu itki kuvvetleriyle ilişkilendiren eşleme matrisi L, eyleyicilerin araç üzerindeki konumları ve yönelimleri dikkate alınarak türetilmiştir (Şekil 3). Bu matris, sistemde kullanılan kontrol tahsis (control allocation) yapısının temelini oluşturmaktadır. İtki ekseni boyunca oluşan kuvvetler ve momentler Eşitlik 9-11'de verilmiştir.

$$T = [T_1\ T_2\ T_3\ T_4\ T_5\ T_6\ T_7\ T_8]^T \quad (9)$$

$$L = \begin{bmatrix} cos(45) & cos(45) & -cos(45) & -cos(45) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -cos(45) & cos(45) & cos(45) & -cos(45) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -l_2 & -l_2 & l_1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -l_4 & l_3 & l_3 & -l_4 \\ -cos(45)l_3 & cos(45)l_3 & -cos(45)l_4 & cos(45)l_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\tau_{m_{toplam}} = LT \quad (11)$$



Şekil 3. Eyleyici konumları ve itki vektörleri (Actuator positions and thrust vectors)

Burada, $\tau_{m_{toplam}}$ AUV'ye etki eden kuvvet ve momentleri, T ise eyleyiciler tarafından üretilen itki kuvvetlerini temsil etmektedir. AUV tasarımında, altı serbestlik derecesindeki hareketi sağlamak amacıyla sekiz adet itki üreten eyleyici konumlandırılmıştır. Her eyleyici motoru, aynı elektromekanik özelliklere sahiptir. DA motorlar matematiksel olarak aşağıdaki şekilde modellenebilir.

$$T_m = K_t i \quad (12)$$

$$e_b = K_e \dot{\theta}_m \quad (13)$$

Burada, T_m DC motorun elektromekanik torkunu, K_t motor tork sabitini, i motor akımını, e_b geri elektromotor kuvvetini (EMF), K_e motor gerilim sabitini ve $\dot{\theta}_m$ motor milinin açısal hızını ifade etmektedir. $K_t = K_e = K$ varsayımı yapıldığında ve Newton-Kirchhoff yasaları uygulandığında elde edilen eşitlikler Eşitlik 14 ve 15'teki gibidir.

$$J\ddot{\theta_m} + b\dot{\theta_m} = Ki \quad (14)$$

$$L_m\dot{i} + R_m i = V_m - K\dot{\theta_m} \quad (15)$$

Burada, J rotor atalet momentini, b viskoz sönüm katsayısını, L_m motor endüktansını, R_m motor direncini ve V_m uygulanan motor gerilimini temsil etmektedir. Bu denklemler aracılığıyla motor gerilimi ile motor milinin açısal hızı arasındaki ilişki elde edilebilir. Ancak, itki üretimi için motor milinin açısal hareketi, bir pervane aracılığıyla doğrusal kuvvete dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm, motorun açısal hızının bir pervane itki katsayısı ($K_{pervane}$) ile çarpılmasıyla gerçekleştirilebilir [19]. Eyleyici tarafından üretilen itki kuvveti Eşitlik 16'daki gibi ifade edilebilir.

$$\tau_m = K_{pervane}\omega^2 \quad (16)$$

Burada, τ_m eyleyici tarafından üretilen itki kuvvetini, ω ise pervanenin açısal hızını temsil etmektedir.

AUV'nin gerçekçi deniz koşulları altındaki dinamiklerini simüle edebilmek amacıyla, yüzey dalgalarından kaynaklanan harici bozucu etkiler modele entegre edilmiştir (Bölüm 2.2). Bu çalışmada deniz akıntılarının etkisi dikkate alınmamıştır. Araç üzerine etki eden dalga kaynaklı toplam kuvvet ve momentler, τ_{dalga} vektörü ile temsil edilmektedir. Modelde tüm sadeleştirmeler ile fiziksel kuvvet ve momentlerin dikkate alınmasıyla birlikte, sistemin genel dinamik denklemi Eşitlik 17'de verilen biçimde ifade edilebilir.

$$M_{RB}\dot{\nu} + \mathrm{D_l}(\nu)\nu + \mathrm{g}(\eta) = \tau_{m_{toplam}} - \tau_{dalga} \quad (17)$$

2.2. DALGA KAYNAKLI BOZUCU ETKİ MATEMATİKSEL MODELİ (WAVE INDUCED DISTURBANCE MATHEMATICAL MODEL)

Otonom Sualtı Araçları (AUV'ler) ve diğer deniz taşıtları üzerinde dalga kaynaklı kuvvetleri modellemek için literatürde çok çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [1, 20]. Bu yöntemler, doğrusal potansiyel teoriye dayalı analitik modellerden, yarı ampirik formülasyonlara ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) tabanlı sayısal simülasyonlara kadar geniş bir yelpazeye yayılmaktadır [18, 20-22]. Öte yandan, ince ve küçük çaplı cisimler için dalga kuvvetleri genellikle Morison denklemi gibi yarı ampirik yaklaşımlar kullanılarak modellenmektedir [5].

Düzensiz deniz koşullarında dalga etkilerinin modellenmesinde ise dalga spektrumu kavramı kullanılmaktadır [4, 23]. Bu modelleme yaklaşımları sonucunda aracın altı serbestlik dereceli (6-DOF) hareket denklemlerine dış kuvvet ve momentler olarak entegre edilmektedir. Bu bağlamda, dalga, rüzgâr ve okyanus akıntılarının etkilerinin entegre edilmesine yönelik kapsamlı yöntemler literatürde önerilmiştir [24–26].

Yüzeye yakın çalışan bir AUV için geliştirilen uyarlamalı derinlik kontrolü çalışmasında, dalga kaynaklı kuvvetler hem teorik hem de sayısal olarak modele entegre edilmiştir [6]. Bu tür çalışmalar, dalga etkisinin baskın olduğu ortamlarda deniz araçlarının davranışını fiziksel temellere dayanan modelleme teknikleriyle açıklamaktadır. Çalışmada ele alınan sualtı aracının uzunluğu dalga boyuna göre oldukça küçük olduğundan, yayılma ve difraksiyon bileşenleri ihmal edilmiştir. Bunun yerine, Newman [4] tarafından önerilen formülasyona uygun olarak birinci mertebe Froude–Krylov kuvvetleri kullanılmıştır.

Bu çalışmada Park ve arkadaşlarının çalışmasındaki dalga modeli daha da sadeleştirilerek, sabit genlik ve frekansa sahip düzenli (periyodik) dalga uyarımı varsayılmıştır. Sadeleştirilmiş dalga kuvveti ifadeleri Eşitlik 18 ve 19'da verilmiştir.

$$X_{dalga} = \rho\omega^2\eta\nabla e^{-kz_{cb}}\sin(kx_{cb} - \omega t) \quad (18)$$

$$Z_{dalga} = \rho\omega^2\eta\nabla e^{-kz_{cb}}cos(kx_{cb} - \omega t) \quad (19)$$

Burada, ρ suyun yoğunluğunu, ω dalga frekansını, η dalga genliğini, ∇ batık cismin hacmini ve k karşılaşılan dalga sayısını ifade etmektedir (sabit $k=\omega^2/g$, burada g yerçekimi ivmesidir). Kuvvetler dünya (ataletsel) eksen takımında verilmiştir. Bu kuvvetlerin gövde sabit eksen takımına dönüştürülmesi için gövdeden dünyaya rotasyon matrisinin (R_b^e, Eşitlik 7) transpozu kullanılmaktadır ($F_{dalga}^b = R_b^e F_{dalga}^e$). Kuvvetlerin etkisi ile oluşan momentler ise Eşitlik 20'de verilmiştir.

$$M_{dalga} = r_{cb} \times F_{dalga}^b \quad (20)$$

Burada, $r_{cb} = \left[(x_{cb} - x_{cg})\ (y_{cb} - y_{cg})\ (z_{cb} - z_{cg})\right]^T$ vektörü, kaldırma kuvvetinin etki ettiği kaldırma merkezi vektörünü temsil etmekte olup, bu ifade gövde sabit eksen takımında tanımlanmıştır [1].

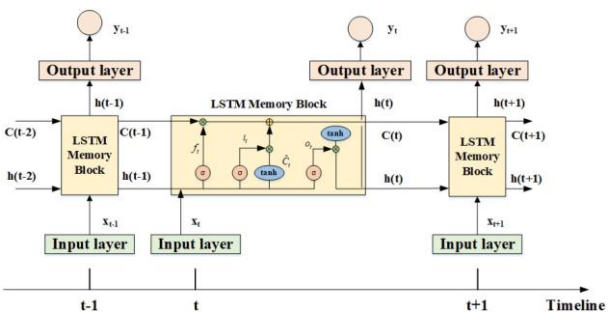
2.3. LSTM TABANLI TEKRARLAYAN SİNİR AĞI (LSTM BASED RECURRENT NEURAL NETWORK)

Bu çalışmada, AUV'nin dalga bozucuları altındaki dinamik tepkilerini kestirmek amacıyla Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory, LSTM) birimlerine dayalı bir Tekrarlayan Sinir Ağı (RNN) mimarisi kullanılmıştır. Ağ, zaman serisi verileri işleyen bir ardışık giriş katmanı (sequential input), LSTM katmanı ve tam bağlantılı (fully connected) bir çıkış katmanından oluşmaktadır. Zaman serisi verilerinin normalizasyonunda orijinal verinin istatistiksel dağılımını koruduğu ve gradyan tabanlı öğrenme algoritmalarının performansını arttırdığından dolayı Z-skor yöntemi kullanılmıştır (Eşitlik 21) [27].

$$x' = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (21)$$

Burada x, x', μ, σ sırasıyla ham veriyi, normalize edilmiş veriyi, ortalamayı ve standart sapmayı temsil etmektedir.

LSTM ağı, zaman bağımlı sistemlerdeki uzun süreli bağımlılıkları öğrenebilme yeteneği sayesinde klasik RNN'lere kıyasla daha yüksek başarı sağlar. Bu yapı, bilgi akışını kontrol eden dört ana bileşenden oluşur: unutma kapısı, giriş kapısı, hücre durumu ve çıkış kapısı. Bu kapılar, ağın geçmiş bilgileri ne ölçüde hatırlayacağı veya unutacağına karar verir (Şekil 4). Böylece, yalnızca gerekli bilgilerin öğrenilmesi sağlanarak modelin öğrenme verimliliği artırılmaktadır [28].



Şekil 4. LSTM mimarisi [28] (LSTM architecture)

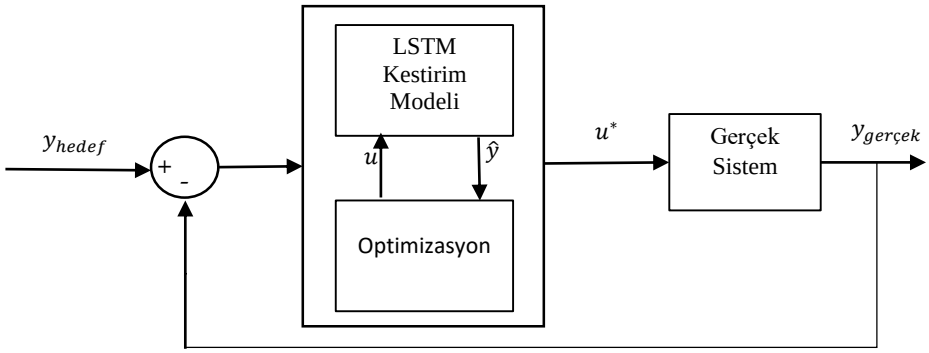
Son katman olan tam bağlantılı katman, LSTM çıktısını ağırlık matrisi ve bias vektörü ile doğrusal olarak dönüştürerek nihai kestirim sonucunu üretmektedir.

2.4. LSTM TABANLI KESTİRİM MODELİ ENTEGRE EDİLMİŞ MPC (MPC WITH INTEGRATED LSTM BASED PREDICTIVE MODEL)

Bu çalışmada ana kontrol stratejisi olarak Model Öngörülü Kontrol (MPC) kullanılmıştır. MPC, AUV'nin gelecekteki davranışını bir dinamik modele dayanarak öngörmekte ve buna göre optimal kontrol girdilerini hesaplamaktadır [29–31]. Kontrol eylemleri, sistem kararlılığını sağlamak ve istenen davranıştan sapmaları en aza indirmek amacıyla seçilmektedir. MPC'nin genel çalışma prensibi şu şekilde özetlenebilir:

- Model: Aday kontrol girdilerine karşılık gelecekteki sistem çıktıları tahmin edilir.
- Ufuk (Horizon): Gelecek çıktılar için tahminlerin yapıldığı sonlu bir öngörü ufku tanımlanır.
- Optimizasyon: Ufuk boyunca optimal kontrol eylemlerini belirlemek için bir maliyet fonksiyonu minimize edilir.
- Kontrol Uygulaması: Yalnızca ilk kontrol girdisi uygulanır, ardından süreç bir sonraki zaman adımında tekrarlanır.

MPC yapısı, sistemin dinamik modeli yerine LSTM tabanlı kestirim modeli ve optimizasyon döngüsünü içerecek şekilde Şekil 5'te şematik olarak verilmiştir.



Şekil 5. LSTM-MPC çerçevesinin şematik gösterimi (Schematic representation of the LSTM-MPC framework)

Bu çalışmada MPC, eğitilmiş LSTM-RNN ağı kestirim modeli olarak kullanılarak MATLAB 2024a ortamında uygulanmıştır. Optimizasyon, fmincon çözücüsü kullanılarak Sıralı Kuadratik Programlama (SQP) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Amaç, ufuk, N, boyunca hız izleme hatalarını minimize ederken, kontrol girdisi u'daki büyük değişimleri cezalandırmaktır.

$$\Delta u_{t+i} = u_{t+i-1} - u_{t+i-2} \tag{22}$$

$$maliyet = \sum_{i=1}^{N} [\gamma \left(\hat{y}_{t+i} - y_{hedef}{}_{t+i}\right)^2 + \lambda(\Delta u_{t+i})^2] \tag{23}$$

Burada, γ hız hatasının ağırlığını, λ ise kontrol girdisindeki değişimin ağırlığını temsil etmektedir.

2.5. SİMÜLASYON MODELİ KURULUMU (SIMULATION MODEL SETUP)

Bu çalışmada, LSTM-RNN ağının eğitimi ve simülasyon testlerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla, MATLAB 2024 ortamında bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Hız kontrolünün hedeflenmesi nedeniyle, sistemin dinamik modeli Eşitlik 17'den Eşitlik 24'e dönüştürülmüş ve sistemin çıktısı ivme olarak alınmıştır. Bu bağlamda, sistemin hız yanıtı, ivmenin zamana göre integrali olarak elde edilmiştir. Ayrıca, eksenel hızlar gövde sabit eksen takımında tanımlı olmakla birlikte, sistemin oryantasyonu dünya sabit eksen takımına göre izlendiğinden, bu iki eksen takımı arasında dönüşüm yapılması gereklidir. Bu dönüşüm Eşitlik 25 ve 26 kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$\dot{v} = \mathrm{M}^{-1}\left(\tau_{\mathrm{m_{total}}} - \tau_{\mathrm{wave}} - \left(\mathrm{D(v)v} + \mathrm{g(\eta)}\right)\right) \tag{24}$$

$$T(\phi,\theta) = \begin{bmatrix} 1 & sin\phi tan\theta & cos\phi tan\theta \\ 0 & cos\phi & -sin\phi \\ 0 & sin\phi/cos\theta & cos\phi/cos\theta \end{bmatrix} \tag{25}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = T(\phi,\theta)\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \tag{26}$$

Bu çalışmada kullanılan fiziksel ve hidrodinamik parametreler, literatürde sunulan RRC ROV II aracından uyarlanmıştır [32] ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. RRC ROV II parametreleri (RRC ROV II parameters)

Parametre	Değer	Birim
Kütle, m	*113.2*	*kg*
Atalet , I_y	5.980	$kg \cdot m^2$
Hidrodinamik katsayılar	$X_u = -252.98$ $Z_w = -1029.51$ $M_q = -142..22$	$N \cdot m^{-2} \cdot s^{-2}$
$CB - CG$	$x_{cb} - x_{cg} = 0$ $y_{cb} - y_{cg} = 0$ $z_{cb} - z_{cg} = 0.048$	*m*
Batık gövde hacmi, ∇	*0.1*	*m^3*

Eyleyici modeli için, literatürde mevcut bir referans eyleyiciye ait parametreler kullanılmıştır [33]. Bu parametreler, AUV simülasyon ortamı içinde eyleyicilerin dinamik davranışını modellemek için kullanılmıştır. İlgili parametreler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Eyleyici parametreleri [33] (Actuator parameters)

Parametre	***Değer***
Atalet, J	*2.14 g.cm^2*
Sürtünme, b	0.003
Direnç, R_m	*5.88 Ω*
İndüktans, L_m	*0.22 mH*
Geri EMK, e_b	*13.8 mN·m/A*
Tork sabiti, K_t	*13.8 mN·m/A*

Seçilen dalga periyodu, literatürde daha önce raporlanmış deneysel verilere dayalı olarak 10 saniye olarak belirlenmiş ve bu da sığ sularda karşılaşılan tipik düzenli dalga koşullarını yansıtmaktadır [34]. Buna göre dalga frekansı 0.1 Hz olarak alınmıştır. Kullanılan çevresel parametreler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Çevresel parametreler (Environmental parameters)

Parametre	***Değer***
Dalga genliği, η	*0.5 m*
Dalga frekansı, ω	*0.1 Hz*
Su yoğunluğu, ρ	*997 kg/m^3*
Yerçekimi ivmesi, g	*9.81 m/s^2*
Dalga yönü, ψ_w	*0°*

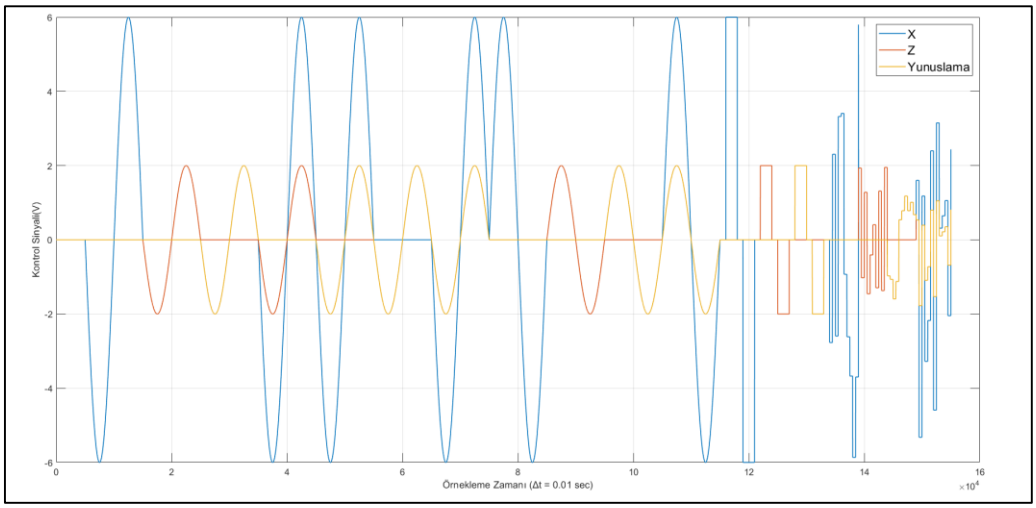
2.6. LSTM EĞİTİMİ İÇİN VERİ TOPLAMA VE VERİ DÜZENLEME PROSEDÜRÜ (DATA COLLECTION PROCEDURE AND DATASET PREPARATION FOR LSTM)

LSTM tabanlı kestirim modelinin eğitilebilmesi için, simüle edilmiş dalga koşulları altında AUV modeline çeşitli kontrol sinyalleri uygulanarak kapsamlı bir veri seti oluşturulmuştur. X, y ve yunuslama eksenlerinde kontrol sinyalleri uygulanmış ve buna karşılık gelen hız tepkileri kaydedilmiştir (Şekil 6). Eğitim işlemleri bu verilerle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6. Simülasyon tabanlı veri toplama şeması (Simulation-based data collection scheme)

Farklı çalışma koşullarını temsil edebilmek amacıyla kontrol girişleri sinüzoidal, kare ve rastgele dalga formunda uygulanmıştır (Şekil 7). Bu sinyaller, sistemin gerçekçi dalga bozucularına karşı tepkisini temsil edebilmesi için seçilmiştir. Başlangıçta her eksene ayrı ayrı uygulanmış, ardından çoklu eksen kombinasyonları ve farklı dalga formları denenerek veri çeşitliliği artırılmıştır. Böylece ağın genelleme kabiliyeti güçlendirilmiştir.



Şekil 7. Eğitim verisi için uygulanan eksenel kontrol sinyalleri (Axial control signals applied for training data)

Toplamda 1550 saniyelik simülasyon verisi, 0.01 saniyelik örnekleme aralığıyla toplanmış ve 155.000 veri noktası elde edilmiştir. Ancak, MPC yapısı 0.1 saniyelik örnekleme (algılayıcı çalışma frekansı) ile çalıştığı için veri seti seyreltilmiş ve 15.500 örnekle sınırlı hale getirilmiştir.

2.7. LSTM EĞİTİM PROSEDÜRÜ (LSTM TRAINING PROCEDURE)

Şekil 8, ağın eğitim mimarisini göstermektedir. Burada u kontrol girişlerini (örneğin motor komutları), y sistem modelinden elde edilen gerçek hız çıktısını, ŷ ise ağ tarafından tahmin edilen çıktıyı ifade eder. LSTM ağı, kontrol girişleri ile sistem tepkileri arasındaki ilişkiyi zaman serisi üzerinde öğrenerek, dalga bozucuları altındaki AUV dinamiklerini öğrenmeye çalışır. Böylece, açıkça tanımlanmış hidrodinamik parametrelere ihtiyaç duymadan veri tabanlı bir sistem tanımlama gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 8. LSTM ağı eğitim yapısı (LSTM network training architecture)

Eğitim işlemleri MATLAB 2024a ortamında Tablo 5'te verilen parametreler ile gerçekleştirilmiştir.

En uygun hiperparametre değerleri, Ortalama Hataların Karesi (MSE) metriğine dayalı bir grid arama yöntemiyle belirlenmiştir. Bu süreçte toplam 450 farklı kombinasyon denenmiş, başarı metriği olarak MSE kullanılmıştır (Tablo 6).

Tablo 5. LSTM eğitim parametreleri (LSTM training parameters)

Parametre	***Değer***
Eğitim optimizasyon algoritması	*Adam*
Başlangıç öğrenme hızı	*0.001*
Öğrenme hızı tablosu	*Kosinüs*
Maksimum epochs	*50*
Mini-batch boyutu	*8*
Gizli birim sayısı	*50*
Sekans uzunluğu	*10*
Kayan pencere adımı	*1*
Derleme ortamı	*GPU*

Tablo 6. Eğitim başarısında kullanılan metrik (Metric used for training performance)

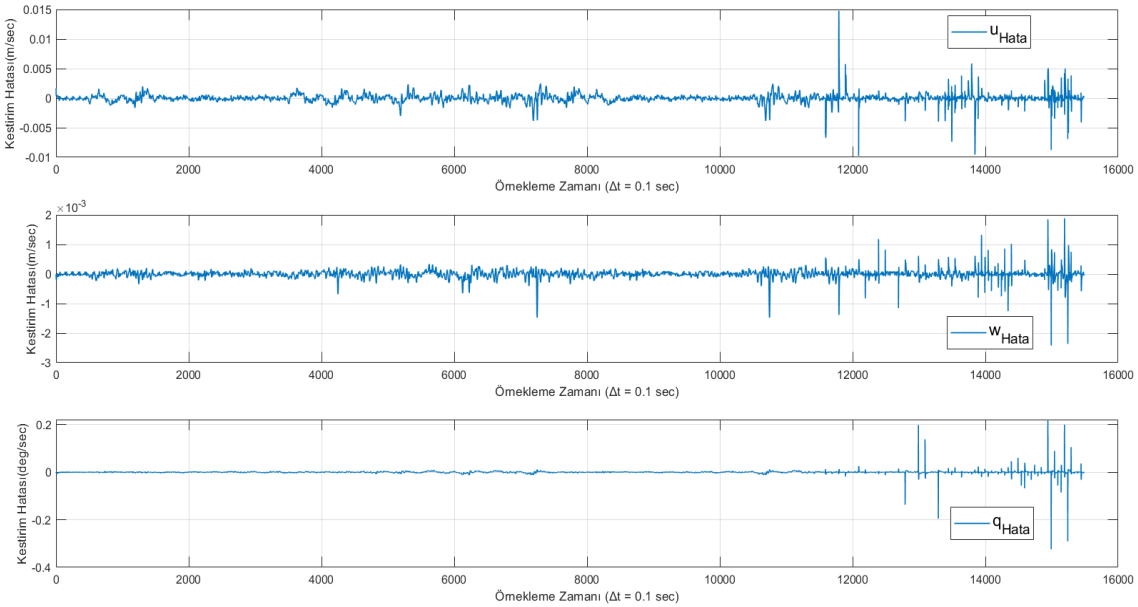
Metrik	***Eşitlik***	***Açıklama***
Ortalama hataların karesi (MSE)	$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} e_i^2$	*Düşük değerler eğitim başarısını göstermektedir.*

Eğitim süreci boyunca 96,875 iterasyon gerçekleştirilmiştir (Eşitlik 27). Eğitimin ardından LSTM modelinin farklı eksenlerdeki performansını gösteren grafikler Şekil 9'da verilmiş, başarıya ilişkin sayısal değerlendirme sonuçları ise Tablo 7'de verilmiştir.

$$Eğitim\ iterasyon\ sayısı = \left[\frac{Toplam\ veri\ noktası\ sayısı}{\text{Mini batch boyutu}}\right] \times \text{Epoch} \tag{27}$$

Tablo 7. Eğitim sırasında tahmin doğruluğu metriği (Prediction accuracy metric during training)

Metrik	***X***	***Z***	***Yunuslama***
MSE	*5.5270e-5*	*3.7399e-5*	*5.7532e-4*



Şekil 9. *Kestirim hataları (Eğitim)* (*Prediction errors (Training)*)

Yeni kontrol girdileriyle ayrı bir doğrulama veri kümesi hazırlamak yerine, LSTM modelinin doğrulaması, AUV'nin tasarlanan MPC denetleyicisi altında dalga bozucu koşullarında çalıştığı durumlarda gerçekleştirilmiştir. Bu doğrulama stratejisi, modelin tahmin yeteneğinin statik ve önceden kaydedilmiş veriler yerine, gerçekçi ve dinamik olarak değişen koşullar altında değerlendirilmesini sağlamaktadır. İlgili sonuçlar ve analizler Bölüm 3'te sunulmaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu bölümde, yüzey dalgası kaynaklı bozucular altında AUV'nin hız kararlılığını sağlamak amacıyla geliştirilen LSTM tabanlı Model Öngörülü Kontrol (MPC) yaklaşımının simülasyon sonuçları sunulmakta ve elde edilen bulgular tartışılmaktadır. Simülasyonlar, Bölüm 2'de açıklanan 3 serbestlik dereceli dinamik model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kontrol performansı, AUV'nin x(u), z(w) ve yunuslama(q) eksenlerindeki hız yanıtları temelinde değerlendirilmiştir.

Önerilen LSTM-MPC çerçevesi, eğitilmiş LSTM ağı üzerinden sistem davranışını kestirerek öngörü ufku boyunca kontrol sinyallerini optimize etmektedir. Kullanılan MPC parametreleri Tablo 8'de verilmiştir. Kontrol performansının değerlendirilmesi, Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve Karekök Ortalama Kare Hata (RMSE) ölçütlerine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir; bu metriklerin tanımları Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 8. MPC parametleri (MPC parameters)

Parametre	***Değer***
Kestirim ufku, $N_{kestirim}$	6
Hız hatası ağırlığı, γ	[4.4 1.6 1.4]
Kontrol sinyali değişim ağırlığı, λ	[0.6 0.1 2.8]

Tablo 9. Kontrol performansında kullanılan metrikler (Metrics used for control performance)

Metrik	*Eşitlik*	*Açıklama*
Ortalama Mutlak Hata (MAE)	$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lvert e_i \rvert$	*Düşük değerler eğitim başarısını göstermektedir.*
Karesel Ortalama Hata (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} e_i^2}$	

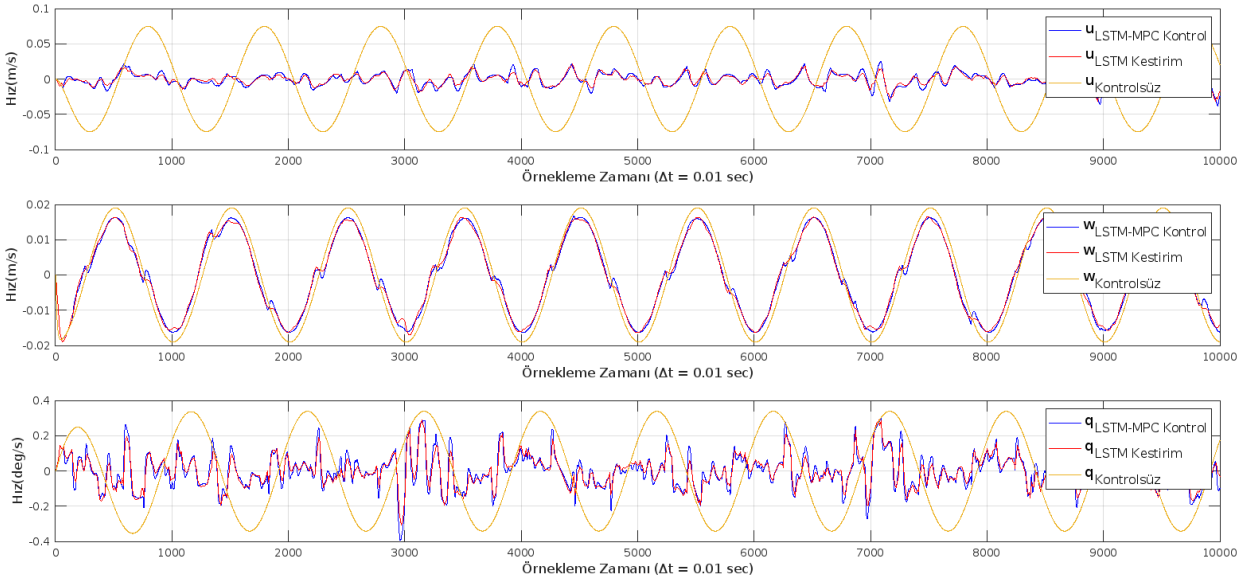
LSTM ağı eğitildikten sonra, önerilen MPC algoritması ile birlikte dalga bozucuları altında test edilmiştir. MPC altındaki kestirim doğruluğu, LSTM çıktıları ile dinamik model hız yanıtlarının karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiştir (Tablo 10, Şekil 10 ve Şekil 11). Dalga bozucuları altında sistemin kontrolsüz yanıtı ile LSTM-MPC kontrolü altındaki yanıtı da karşılaştırılmıştır. Elde edilen MAE ve RMSE değerleri Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 10. Dalga kaynaklı bozucularda MPC kontrolü altında LSTM kestirim doğruluğu (LSTM prediction accuracy under MPC control in wave-induced disturbances)

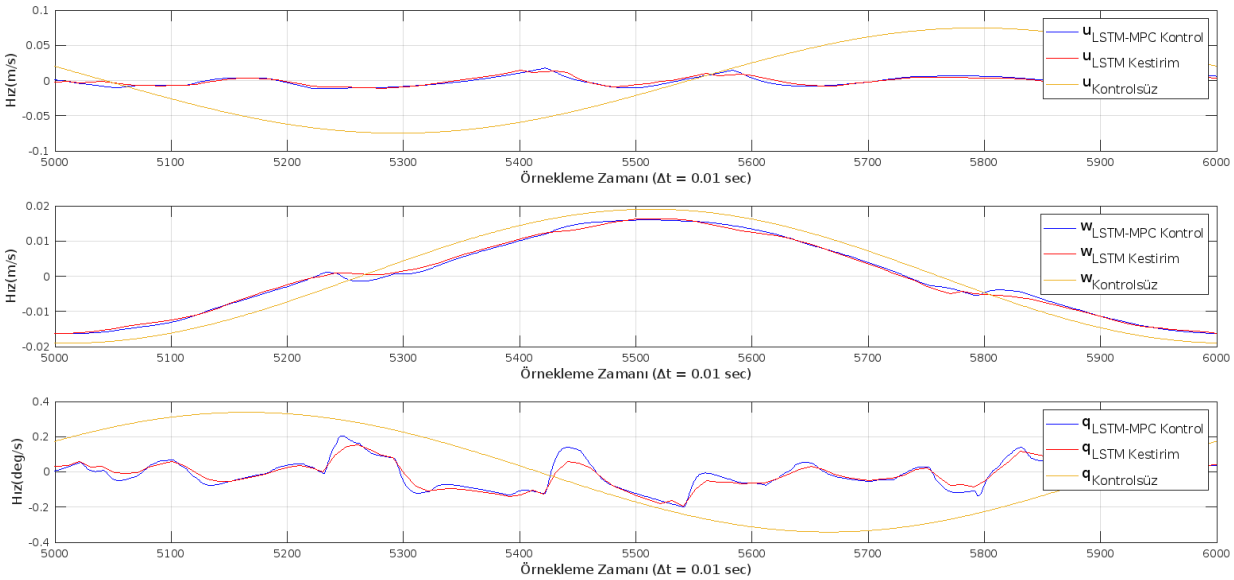
Metrik	*u*	*w*	*q*
MSE	*1.1154e-5*	*7.0228e-7*	*8.1185e-4*

Tablo 11. LSTM-MPC konrolü ve kontrolsüz hız takip performansı (Eğitilmiş dalga koşulu) (LSTM-MPC control and uncontrolled velocity tracking performance (Trained wave condition))

Metrik	*Kontrol*	*u*	*w*	*q*
MAE	*MPC Kontrol*	*0.007535*	*0.009518*	*0.074172*
	Kontrolsüz	*0.047575*	*0.012096*	*0.213438*
RMSE	*MPC Kontrol*	*0.009523*	*0.010911*	*0.098022*
	Kontrolsüz	*0.052851*	*0.013437*	*0.237791*



Şekil 10. LSTM kestirimi-LSTM-MPC kontrollü ve kontrolsüz hız takip performansı (Eğitilmiş dalga koşulu) (LSTM prediction – LSTM-MPC controlled and uncontrolled velocity tracking performance (Trained wave condition))



Şekil 11. LSTM kestirimi-LSTM-MPC kontrollü ve kontrolsüz hız takip performansı yakınlaştırılmış (Eğitilmiş dalga koşulu) (LSTM prediction – LSTM-MPC controlled and uncontrolled velocity tracking performance zoomed (Trained wave condition))

LSTM-MPC çerçevesi, farklı frekans ve genlikteki dalga koşulları altında da test edilmiştir. Bu senaryolardaki MAE ve RMSE sonuçları Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12. Farklı dalga koşullarında LSTM-MPC ve kontrolsüz hız takip performansı (LSTM-MPC and uncontrolled velocity tracking performance under different wave conditions)

Dalga Parametreleri	***Metrik***	***Kontrol***	***u***	***w***	***q***
Frekans = 0.125 Hz, Genlik = 0.5 m	*MAE*	*MPC Kontrol*	*0.026052*	*0.016443*	*0.149752*
		Kontrolsüz	*0.072785*	*0.018850*	*0.352877*
	RMSE	*MPC Kontrol*	*0.031047*	*0.018517*	*0.188591*
		Kontrolsüz	*0.080859*	*0.020939*	*0.392902*
Frekans = 0.0625 Hz, Genlik = 0.5 m	*MAE*	*MPC Kontrol*	*0.003884*	*0.002840*	*0.035782*
		Kontrolsüz	*0.018917*	*0.004745*	*0.069948*
	RMSE	*MPC Kontrol*	*0.004902*	*0.003311*	*0.051891*
		Kontrolsüz	*0.021055*	*0.005268*	*0.077712*
Frekans = 0.125 Hz, Genlik = 0.2 m	*MAE*	*MPC Kontrol*	*0.006984*	*0.005867*	*0.063407*
		Kontrolsüz	*0.029112*	*0.007540*	*0.141162*
	RMSE	*MPC Kontrol*	*0.008467*	*0.006605*	*0.082505*
		Kontrolsüz	*0.032341*	*0.008376*	*0.157170*
Frekans = 0.0625 Hz, Genlik = 0.8 m	*MAE*	*MPC Kontrol*	*0.006567*	*0.005187*	*0.059132*
		Kontrolsüz	*0.030267*	*0.007593*	*0.111913*
	RMSE	*MPC Kontrol*	*0.008505*	*0.006080*	*0.080125*
		Kontrolsüz	*0.033687*	*0.008429*	*0.124337*

Sonuçlar, MPC parametrelerinin deneysel ayarlama yoluyla belirlenmesine karşın önerilen LSTM-MPC kontrol yapısının, yüzey dalgası bozucuları altında AUV'nin kararlı hız takibi yapmasını sağlayabildiğini açıkça göstermektedir. Tüm test koşullarında MAE değerleri kontrolsüz duruma kıyasla belirgin şekilde azalmıştır. En kritik eksen olan yunuslama (q) üzerinde LSTM-MPC'nin sağladığı hata azalımı, sistem stabilizasyonunda belirleyici rol oynamıştır.

Bazı senaryolarda RMSE değerleri nispeten yüksek kalmış ve bu durum, sistemin ani moment değişimlerine karşı zaman zaman büyük hatalar üretebildiğini göstermiştir. Bu tür sıçramalar, dalga kaynaklı doğrusal olmayan dinamik etkilerden kaynaklanmaktadır. Bu gözlem, LSTM-MPC kontrolcüsünün genel başarısını gölgelememelidir. Ancak daha da geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, yüzey dalgalarının neden olduğu bozucu etkiler altında çalışan otonom sualtı araçlarının (AUV) hız kararlılığını sağlamak amacıyla LSTM tabanlı Model Öngörülü Kontrol (MPC) yaklaşımı geliştirilmiştir. Gerçekçi dalga koşulları altında simülasyon ortamında test edilen LSTM-MPC yapısı, AUV'nin dinamik tepkilerini başarıyla öğrenmiş ve tahmin edebilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin özellikle yunuslama ekseni gibi dalga etkisine en duyarlı eksenlerde hataları önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Farklı dalga frekansı ve genliği kombinasyonlarında da kabul edilebilir sonuçlar elde edilse de geliştirebilir olduğu görülmektedir.

Simülasyon sonuçları, LSTM-MPC denetleyicisinin kontrolsüz durumla kıyasla birçok senaryoda takip performansını iyileştirdiğini ortaya koymuştur (Tablo 11 ve Tablo 12). Özellikle öğrenilmiş dalga koşulunda (0.1 Hz frekans, 0.5 m genlik), x eksenindeki MAE değeri 0.047575'ten 0.007535'e (%84 azalma), yunuslama eksenindeki MAE değeri ise 0.213438'den 0.074172'ye (%65 azalma) düşürülmüştür.

Ortalama hata değerleri düşük düzeyde seyretmiş olsa da zaman zaman oluşan ani hata artışlarının ve öğrenilmemiş dalga etkilerinin kontrol performansını etkilediği gözlemlenmektedir. Gelecek çalışmalarda çevrimiçi öğrenme ya da ince ayar (fine-tuning) mekanizmaları ile önerilen kontrol stratejisinin uyarlanabilirliği ve kararlılığının daha da artırılabileceği öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Simülasyon sürecindeki yardımlarından dolayı Dr. Kemal Güven'e, araç üretimindeki desteklerinden dolayı Sn. Bülent Demirci ve Sn. Hüseyin Özmen'e teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Fossen, T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control; John Wiley & Sons: Chichester, İngiltere, 2011; pp. 1–227, 417–451. https://doi.org/10.1002/9781119994138

[2] Giorgi, G.; Ringwood, J.V. Analytical Formulation of Nonlinear Froude-Krylov Forces for Surging-Heaving-Pitching Point Absorbers. In Proceedings of the ASME 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2018), Madrid, İspanya, 17–22 Haziran 2018. https://doi.org/10.1115/OMAE2018-77072

[3] Guerinel, M.; Alves, M.; Sarmento, A. Nonlinear Modelling of the Dynamics of a Free Floating Body. In Proceedings of the 9th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC), Southampton, İngiltere, 5–9 Eylül 2011.

[4] Newman, J.N. Marine Hydrodynamics, 40th ed.; MIT Press: London, İngiltere, 2017; pp. 247–340.

[5] Sarpkaya, T. Wave Forces on Offshore Structures; Cambridge University Press: Cambridge, İngiltere, 2010; pp. 109–171.

[6] Park, J.; Kim, N.; Yoon, H.K.; Cho, H. Adaptive Depth Controller Design for a Submerged Body Moving Near Free Surface. Appl. Ocean Res. 2016, 58, 83–94. https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.04.001

[7] Zarzycki, K.; Ławryńczuk, M. Advanced Predictive Control for GRU and LSTM Networks. Inf. Sci. 2022, 616, 229–254. https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.10.078

[8] Ławryńczuk, M.; Zarzycki, K. LSTM and GRU Type Recurrent Neural Networks in Model Predictive Control: A Review. Neurocomputing 2025, 632, 129712. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2025.129712

[9] Wang, D.; Wan, J.; Shen, Y.; Qin, P.; He, B. Hyperparameter Optimization for the LSTM Method of AUV Model Identification Based

on Q-Learning. J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10, 1002. https://doi.org/10.3390/jmse10081002

[10] Arcos-Legarda, J.; Gutiérrez, Á. Robust Model Predictive Control Based on Active Disturbance Rejection Control for a Robotic Autonomous Underwater Vehicle. J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11, 929. https://doi.org/10.3390/jmse11050929

[11] Zimmerman, S.; Nagamune, R.; Rogak, S. Wind Estimation by Multirotor Drone State Using Machine Learning with data rotation and reduction. Measurement 2022, 199, 111491. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111491

[12] Mendez, A.P.; Whidborne, J.F.; Chen, L. Wind Preview-Based Model Predictive Control of Multi-Rotor UAVs Using LiDAR. Sensors 2023, 23, 3711. https://doi.org/10.3390/s23073711

[13] Kim, K.H.; Jeong, C.; Kim, J.; Lee, S.; Kang, C.M. Data-Driven LSTM Model and Predictive Control for Vehicle Lateral Motion. J. Electr. Eng. Technol. 2024, 19, 3635–3644. https://doi.org/10.1007/s42835-024-01982-w.

[14] Yu, Y.; Zhang, J.; Zhang, T. AUV Drift Track Prediction Method Based on a Modified Neural Network. Appl. Sci. 2022, 12, 12169. https://doi.org/10.3390/app122312169

[15] Wang, G.; Zhang, D.; Wu, Z. Reinforcement Learning-Based Tracking Control for AUVs Subject to Disturbances. In Proceedings of the 34th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Hefei, Çin, 15–17 Ağustos 2022; pp. 2222–2227. https://doi.org/10.1109/CCDC55256.2022.10033544

[16] Duan, Y.; Xiang, X.; Liu, C.; Yang, L. Double-loop LQR Depth Tracking Control of Underactuated AUV: Methodology and Comparative Experiments. Ocean Eng. 2024, 300, 117410. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117410.

[17] Muhssin, M.T.; Ajaweed, M.N.; Khalaf, S.K. Optimal Control of Underwater Vehicle Using LQR Controller Driven by New Matrix Decision Control Algorithm. Int. J. Dyn. Control 2023, 11, 2911–2923. http://dx.doi.org/10.1007/s40435-023-01186-6

[18] Turner, T.M.; Klamo, J.T.; Kwon, Y. Comparison of Wave-Induced Loads on a Near Surface Slender Body from Inviscid Flow Linear Solution and an Experimental Model Test. In Proceedings of the ASME 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2018), Madrid, İspanya, 17–22 Haziran 2018. https://doi.org/10.1115/OMAE2018-77760

[19] Massé, C.; Gougeon, O.; Nguyen, D.; Saussié, D. Modeling and Control of a Quadcopter Flying in a Wind Field: A Comparison Between LQR and Structured H∞ Control Techniques. In Proceedings of the 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Dallas, TX, ABD, 12–15 Haziran 2018; pp. 1408–1417. https://doi.org/10.1109/ICUAS.2018.8453402

[20] Cummins, W.E. Hydrodynamic Forces and Moments Acting on a Slender Body of Revolution Moving under a Regular Train of Waves; Report No. 910, Navy Department, The David W. Taylor Model Basin: Washington, DC, ABD, 1954.

[21] Kristia, S. Study of Wave-Induced Load Effects on a Submerged Body Near the Surface. Yüksek Lisans Tezi, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, ABD, 2019.

[22] Willy, C.J. Attitude Control of an Underwater Vehicle Subjected to Waves. Yüksek Lisans Tezi, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, ABD, 1994.

[23] Thu, A.M.; Htwe, E.E.; Win, H.H. Mathematical Modeling of a Ship Motion in Waves under Coupled Motions. Int. J. Eng. Appl. Sci. 2015, 2, 97–102.

[24] Faltinsen, O.M. Sea Loads on Ships and Offshore Structures; Cambridge University Press: Cambridge, İngiltere, 1990; pp. 13–170.

[25] Fossen, T.I. How to Incorporate Wind, Waves and Ocean Currents in the Marine Craft Equations of Motion. In Proceedings of the 9th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC), Arenzano, İtalyay, 19–21 Eylül 2012. https://doi.org/10.3182/20120919-3-IT-2046.00022

[26] Bergdahl, L. Wave-Induced Loads and Ship Motions; Report No. 2009:1, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Water Environment Technology, Chalmers University of Technology: Gothenburg, İsveç, 2009; pp. 113–163.

[27] Lima, F.T.; Souza, V.M.A. A Large Comparison of Normalization Methods on Time Series. Big Data Res. 2023, 34, 100407. https://doi.org/10.1016/j.bdr.2023.100407.

[28] Huang, K.; Wei, K.; Li, F.; Yang, C.; Gui, W. LSTM-MPC: A Deep Learning Based Predictive Control Method for Multimode Process Control. IEEE Trans. Ind. Electron. 2023, 70, 11544–11554. https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3229323.

[29] Silva, K.M.; Maki, K.J. Data-Driven System Identification of 6-DoF Ship Motion for Enhanced Navigation of Remotely Operated Vehicles. Appl. Ocean Res. 2022, 125, 103222. https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103222.

[30] Jung, M.; Mendes, P.R.D.C.; Önnheim, M.; Gustavsson, E. Model Predictive Control When Utilizing LSTM as Dynamic Models. Eng. Appl. Artif. Intell. 2023, 123, 106226. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106226.

[31] Zamarreno, J.M. Neural Predictive Control Toolbox for CACSD in MATLAB Environment. In Proceedings of the 15th IFAC Triennial World Congress, Barcelona, İspanya, 21–26 Temmuz 2002; pp. 61–66. https://doi.org/10.3182/20020721-6-ES-1901.00916

[32] Chin, C.; Lau, M.; Low, G.; Seet, G.G.L. Software for Modelling and Simulation of a Remotely-Operated Vehicle. Int. J. Simul. Model. 2006, 5, 114–125. https://doi.org/10.2507/IJSIMM05(3)3.077

[33] Gunel, O.; Ankaralı, A. Modeling of Basic Propeller Thrust Test System and Thrust Control Using PID Method. In Proceedings of the 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES), Alanya, Türkiye, 3–5 Kasım 2016; pp. 1663–1672.

[34] Ardhuin, F.; Orfila, A. Wind Waves. In New Frontiers in Operational Oceanography; Chapter 14; GOV Institutional Publication: Fransa, 2018; pp. 396. https://doi.org/10.17125/gov2018.ch14

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1046-1061 (2025)

Geçmişten Günümüze Gaz Basınç Sensörleri "Piezorezistif Sensörler Üzerine Bir Derleme"

Yasin ARSLAN[1*], Gülşah DEMİRHAN AYDIN[1], Deniz KARAÇOR[1], Nuri AKGÜN[1]

[1]*Baskent University, Institute of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey,*

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru:19/01/2025
Düzeltme:17/05/2025
Kabul: 18/05/2025

Anahtar Kelimeler

Basınç Sensörleri
Piezoresistif
MEMS

Article Info

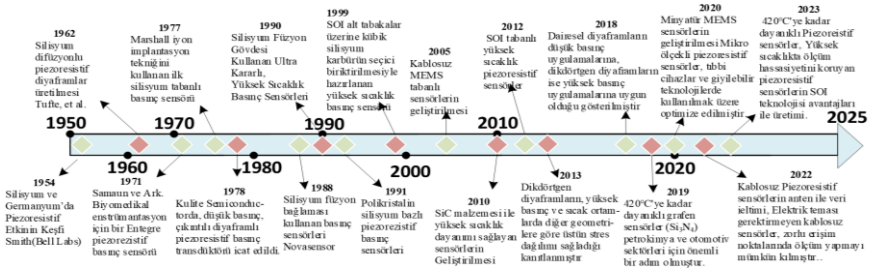
Review article
Received:19/01/2025
Revision: 17/05/2025
Accepted:18/05/2025

Keywords

Pressure Sensor
Piezoresistive
MEMS

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Çalışma geçmişten günümüze gelen basınç sensörlerini araştırıp bunların içinden yaygın kullanılan piezorezistif basınç sensörlerinin tarihini inceleyen ve gelişim yolunu takip eden bir derlemedir. Bu çalışmada uygulama alanlar fabrikasyon süreçleri de aktarılmaya çalışılmıştır. / The study is a compilation that investigates pressure sensors from the past to the present and examines the history of the widely used piezoresistive pressure sensors and follows the development path. In this study, application areas and fabrication processes are also tried to be conveyed.



Şekil A: Piezoresistif Basınç Sensörlerini Geçmişten günümüze gelişim süreçleri zaman akışı. / ***Figure A:*** Piezoresistive Pressure Sensors Time flow of development processes from past to present.

Önemli Noktalar (Highlights)

- ***Tarihsel Gelişim (Historical Development):*** *Gaz basınç sensörlerinin 1600'lerden günümüze uzanan tarihsel gelişimi, piezorezistif sensörlerin doğuşu ve MEMS teknolojisinin katkısı ayrıntılı şekilde incelenmiştir. / The historical evolution of gas pressure sensors from the 1600s to the present, including the emergence of piezoresistive sensors and the contributions of MEMS technology, has been examined in detail.*
- ***Piezorezistif Sensörlere Odak (Focus on Piezoresistive Sensors):*** *Makale, piezorezistif basınç sensörlerini hem malzeme seçimi hem de üretim süreçleri açısından detaylandırarak öne çıkarmaktadır. Yüksek sıcaklık ve Zorlu ortamlar için geliştirilen dayanıklı sensor çözümleri. / The article highlights piezoresistive pressure sensors in detail, focusing on material selection and fabrication processes.*
- ***Malzeme ve Diyafram Tasarımı (Material and Diaphragm Design):*** *Diyafram geometrisi (örneğin dikdörtgen diyafram) ve kullanılan malzemelerin sensör performansına etkileri kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. / The impact of diaphragm geometry (e.g., rectangular diaphragm) and materials used on sensor performance has been comprehensively analyzed.*

Amaç (Aim): *Piezorezistif gaz basınç sensörlerinin tarihsel gelişimini ve üretim süreçlerini inceleyerek mühendis ve akademisyenler için sensör seçimine rehberlik etmek amaçlanmıştır./This study aims to guide engineers and academics in sensor selection by examining the historical development and fabrication processes of piezoresistive gas pressure sensors.*

Özgünlük (Originality): *Bu çalışma, gaz basınç sensörlerinin tarihçesini ve modern uygulamalarını tek çatı altında toplayan nadir derlemelerdendir. / This review uniquely combines the historical journey and modern applications of gas pressure sensors in one article.*

Bulgular (Results): *MEMS teknolojisi ile minyatürleşen piezorezistif sensörlerin zorlu koşullarda daha dayanıklı ve hassas hale geldiği görülmüştür. /Piezoresistive sensors miniaturized by MEMS technology are found to be more durable and accurate in harsh conditions.*

Sonuç (Conclusion): *Piezorezistif basınç sensörlerinin MEMS teknolojileri ve yeni nesil malzemelerle entegrasyonu, Endüstri 4.0 ve yapay zekâ desteğiyle mühendislerin sensör seçim ve geliştirme süreçlerini kolaylaştırarak sanayi, otomotiv ve havacılıkta geniş kullanım potansiyeli sunar./The integration of piezoresistive sensors with MEMS and next-generation materials, supported by Industry 4.0 and AI, streamlines sensor selection and development while offering broad application potential in industry, automotive, and aerospace.*

*Corresponding author, e-mail: yasinarslan@logoskimya.com
DOI: 10.29109/gujsc.1622963

GU J Sci, Part C, 13(3): 1046-1061 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Geçmişten Günümüze Gaz Basınç Sensörleri "Piezorezistif Sensörler Üzerine Bir Derleme"

Yasin ARSLAN[1*], Gülşah DEMİRHAN AYDIN[1], Deniz KARAÇOR[1], Nuri AKGÜN[1]

[1]*Baskent University, Institute of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey,*

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru:19/01/2025
Düzeltme:17/05/2025
Kabul: 18/05/2025

Anahtar Kelimeler

Basınç Sensörleri
Piezoresistif
MEMS

Özet

Çalışmamız, endüstri, havacılık ve uzay, iklimlendirme, otomotiv ve biyomedikal alanlarında kullanılan gaz basınç sensörlerine odaklanmaktadır. Basınç sensörlerinin tarihsel gelişimi ele alındıktan sonra, sensörler iki ana başlık altında incelenmiştir: mekanik temelli sensörler ve modern teknolojilerle geliştirilen sensörler. Derleme makalemizin odağı, piezorezistif basınç sensörleridir; çünkü bu sensörler, yaygın kullanım alanlarının yanı sıra, malzeme ve üretim teknolojilerindeki gelişmelerin ışığında birçok geliştirme çalışmasına konu olarak bugün sahip oldukları üstün özelliklere ulaşmıştır. Sıcaklık değişimlerine karşı direnç göstermeleri, ölçüm sonuçlarının zamana bağlı stabilitesini korumaları, geniş basınç ve sıcaklık aralıklarında kullanılabilir hale gelmeleri, bu sensörlerin öne çıkan niteliklerindendir. Bu sensörlerin fabrikasyon ve tasarım süreçleri, kullanılan malzemeler ve tarihçeleri üzerine kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Ayrıca, piezorezistif sensörlerin kullanım alanları ve performansları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu bilgiler, mühendislerin ve akademisyenlerin basınç sensörü seçimlerini kolaylaştıracak ve çalışmalarını hızlandıracaktır. Makalede, piezorezistif gaz basınç sensörlerinin temel özellikleri, tasarımları ve kullanım alanları ele alınacak, ayrıca gelecekteki gelişmeleri hakkında öngörüler sunulacaktır. Farklı sensör tipleri arasında yapılan kıyaslamalarla, bu sensörlerin çeşitli uygulamalardaki etkileri değerlendirilmiştir.

Gas Pressure Sensors From Past to Present: "A Review On Piezoresistive Sensors"

Article Info

Review article
Received:19/01/2025
Revision: 17/05/2025
Accepted:18/05/2025

Keywords

Pressure Sensor
Piezoresistive
MEMS

Abstract

Our study focuses on gas pressure sensors used in industries, aerospace, HVAC(Heating, Ventilating and Air Conditioning), automotive, and biomedical fields. After discussing the historical development of pressure sensors, the sensors will be examined under two main categories: mechanical-based sensors and sensors developed with modern technologies. The focus of our review article is on piezoresistive pressure sensors, as these sensors have not only widespread applications but have also reached their superior characteristics today due to ongoing developments in materials and manufacturing technologies. Their resistance to temperature variations, stability of measurement results over time long-term stability of measurements, and ability to operate in a wide range of pressure and temperature conditions are some of the key features that make these sensors stand out. A comprehensive literature review has been conducted on the fabrication and design processes of these sensors, the materials used, and their history. Additionally, the applications and performances of piezoresistive sensors have been thoroughly analyzed. This information will facilitate pressure sensor selection for engineers and academics, accelerating their work. The paper will cover the basic features, designs, and applications of piezoresistive gas pressure sensors, as well as provide insights into future developments. By comparing different sensor types, the impacts of these sensors in various applications will be evaluated.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojik gelişmeler, sensör sistemlerinin duyarlılığını ve hızlı yanıtını artırmış, aynı zamanda ortam koşullarının etkilerini azaltan çözümler sunmuştur. Basınç sensörleri de bu ilerlemeler sayesinde daha küçük, hassas ve zorlu koşullarda bile doğru ölçüm yapabilme yeteneği kazanmıştır [1]. Basınç sensörleri, endüstri, aviyonik, savunma, otomotiv ve tıp gibi çeşitli sektörlerde hem hassas ölçümler sağlar hem de kontrol sistemleri için kritik öneme sahiptir [1], [2]. Özellikle gaz basınç

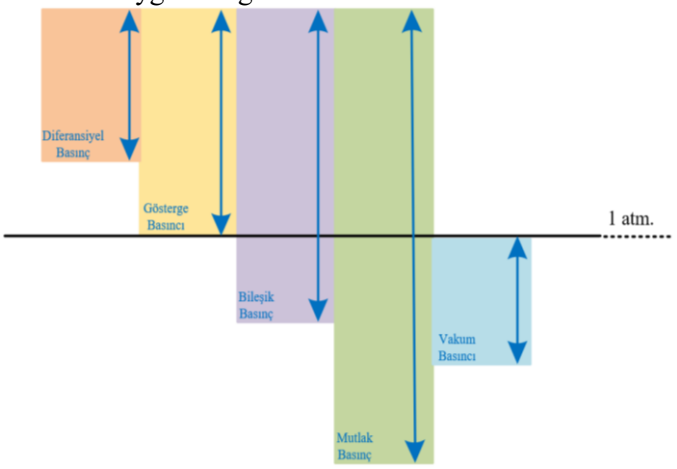
*Corresponding author, e-mail: yasinarslan@logoskimya.com
DOI: 10.29109/gujsc.1622963

sensörleri, bu alanlardaki süreçlerin güvenliği ve verimliliği için temel bir rol oynamaktadır [3]. Mikro Elektro Mekanik Sistemler (MEMS) teknolojisine dayalı basınç sensörleri, düşük maliyet ve yüksek performans talebiyle ana akım olmuştur [2]. Piezorezistif sensörler, kapasitif ve rezonans tiplerine göre daha az maliyetli üretim, daha yüksek üretilebilirlik ve elektronik sinyal işleme ile daha kolay entegrasyona sahiptir [1], [4], [5]. Bu çalışmanın amacı, basınç sensörlerini tanımak ve günümüzde kullanılan gaz basınç sensörlerinden piezorezistif gaz basınç sensörünün fabrikasyon ve tasarım süreçlerinin anlaşılmasını sağlamaktır. Bu derleme makalesi, piezorezistif gaz basınç sensörlerinin önemini ve gelişim süreçlerini okuyuculara aktarmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, basınç ölçümü gerektiren çalışmalarda uygun sensörün seçimini kolaylaştıracak bir rehber niteliğinde olması hedeflenmiştir. Piezorezistif gaz basınç sensörleri teknolojisinin MEMS ile birleştiğinde sunduğu esneklik ile tasarım optimizasyonunun sağladığı verimlilik avantajı, sürdürülebilir ve düşük maliyetli çözümler sunarak endüstriyel uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda çalışmamız, özellikle havacılık ve uzay sektörlerinde piezorezistif MEMS basınç sensör teknolojisinin nasıl uygulandığını ve sağladığı avantaj ve dezavantajları değerlendirmektedir. Bu çalışma, bu teknolojilerin gelecekteki entegrasyon potansiyelini ortaya koyarak, daha verimli ve yenilikçi üretim süreçleri geliştirme konusundaki önemini vurgulamaktadır.

2. BASINÇ SENSÖRLERİ (PRESSURE SENSORS)

2.1. Basınç Sensörlerine Genel Bakış (Overview of Pressure Sensors)

Basınç sensörü, algıladığı kuvveti uygulanan basıncın gücüne dönüştürerek elektriksel bir çıkış sinyali üretir; mekanik bir sistem ise basınç değerini ölçeklendirilmiş göstergelerindeki ibreler aracılığıyla göstermektedir. Basınç ölçümünde anlaşılması gereken bazı temel terimler vardır (Şekil 1). Gösterge Basıncı, yerel atmosfer basıncına göre ölçülen basınçtır. Mutlak Basınç, her yerde aynı olan, vakum referansına göre ölçülen basıncı ifade eder. Diferansiyel Basınç, borulardaki sıvı veya gaz akışını ölçmek için iki nokta arasındaki farkı belirtir. Vakum Basıncı, yerel atmosferik basınçtan daha düşük değerleri ölçer. Bileşik Basınç ise hem pozitif hem negatif basıncı ölçebilen sensörlerle ilgilidir [6].



Şekil 1. 1 atm. (atmosfer basıncı)'ye göre Basınç ölçüm metotları [6]. (According to 1 atm. (atmospheric pressure) Pressure measurement methods)

2.2. Tarihçe (History)

Basınç sensörlerinin tarihçesi 1600'lü yıllara dayanmaktadır. İlk basınç sensörü olarak İtalyan fizikçi ve matematikçi Evangelista Torricelli'nin icat ettiği barometreyi gösterebiliriz [7] Takip eden yüzyıllarda, Fransız mühendis ve mucit Lucien Vidi Aneroid Barometreyi geliştirmiştir [7]. 1848 yılında Ernst Schaeffer, bir diyafram tipi manometreyi geliştirmiştir ve 1849 yılında Fransız mühendis Eugene Bourdon kendi adını verdiği basınç sensörü Bourdon tüpünü icat etmiştir [7]. 1940'ta Hans Hintze ve Hans Illgen (Zeiss Ikon AG), yanmalı motorların pistonlarındaki basıncı ölçmek için piezoelektrik basınç göstergesini geliştirmiştir [8]. 1950'lerde MEMS teknolojisinin ilk adımlarıyla birlikte basınç sensörleri de minyatürleşme başlamış ve halen devam etmektedir. 1954'te C. S. Smith, silisyum (Si) ve germanyum (Ge) gibi yarı iletken malzemelerde piezodirenç etkisini keşfetmiş, bu malzemelerin basıncı metalden daha iyi algıladığını göstermiştir [8], [9]. 1959'da İlk Si basınç sensörünün Kulite tarafından tanıtılmıştır [8], [9]. 1970'lerde, IBM araştırma laboratuvarından Kurt Peterson tarafından Si diyafram kullanan mikro işlenmiş bir basınç sensörü geliştirilmiştir.

Bu ince diyaframlı basınç sensörleri, mikrosistem cihazlarının en eski ticari başarılarından biri olarak kabul edilebilecek kan basıncı izleme cihazlarında yaygınlaşmıştır [9]. 1982 yılında tek kullanımlık kan basıncı dönüştürücü Honeywell şirketi tarafından gerçekleştirilmiştir. 1983 yılında Entegre basınç sensörü Honeywell tarafından ve 1988 yılında plaka bağlama yoluyla seri olarak üretilen basınç sensörleri Nova Sensor tarafından geliştirilmiştir [9].

Bu tarihsel ilerlemeler, basınç sensörlerindeki gelişimi hızlandırmıştır. Özellikle MEMS yapılarının ve teknolojilerinin ilerlemesi, farklı türde basınç sensörlerinin gelişimini de tetiklemiştir. Makalenin "Piezorezistif Basınç Sensörleri" başlığı altında, bu yapıdaki sensörlerin gelişimi detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

3. BASINÇ SENSÖRLERİ TÜRLERİ VE ÇALIŞMA PRENSİPLERİ (TYPES AND WORKING PRINCIPLES OF PRESSURE SENSORS)

3.1. Mekanik Sensörler (Mechanical Sensors)

3.1.1. Aneroid Basınç Sensörleri (Aneroid Pressure Sensors)

Aneroid barometrik basınç göstergesi (Şekil 2 (a)) basıncı ölçmek için kullanılan tamamen mekanik cihazlardır ve atmosferik değişikliklere tepki olarak şekil değiştiren esnek bir metal kapsül (Şekil 2(b)) içermektedir [7]. Genellikle uçaklarda ve çevresel uygulamalarda kullanılan bu kompakt ve dayanıklı sensörler, basınç algılama elemanlarının kütlesi nedeniyle dinamik basınç uygulamalarında sınırlı etkiye sahiptirler.



(a) *(b)* *(c)* *(d)*

Şekil 2. (a) Aneroid Barometre, (b) Aneroid barometre içindeki metal kapsül, (c) U Tip Manometre ve (d) Bourdon tüpü. ((a) Aneroid Barometer, (b) Metal capsule inside the aneroid barometer, (c) U Type Manometer and (d) Bourdon tube.)

3.1.2. Manometre Basınç Sensörleri (Manometer Pressure Sensors)

Manometre basınç sensörleri, basit bir tasarım yapısına sahip olmalarına rağmen, aneroid barometrik basınç sensörlerinden daha yüksek hassasiyete sahiptirler. Cam tüp içindeki sıvının hareketi, iki yüzey arasındaki basınç farkını ölçmektedir. En yaygın manometre sensörü U şeklindedir (Şekil 2 (c)) ve basınç, tüpün bir tarafına uygulandığında sıvının seviyesindeki değişiklikle basınç seviyesini göstermektedir. Bu sensörler genellikle laboratuvar ekipmanlarını kalibre etmek için kullanılır, ancak yavaş tepki hızına ve sınırlı basınç aralığına sahiptirler, bu nedenle dinamik basınç algılamada etkili değildirler [7].

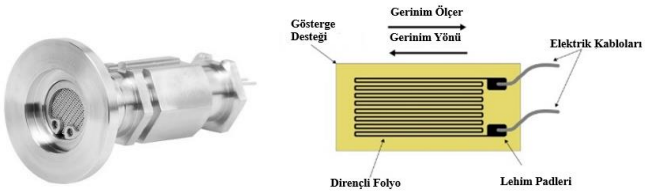
3.1.3. Bourdon Tüpü Basınç Sensörleri (Bourdon Tube Pressure Sensors)

Bourdon tüpü basınç sensörleri (Şekil 2 (d)), aneroid barometrelerle benzer şekilde çalışmakta ancak içi boş kapsül yerine sarmal veya C şeklinde bir algılama elemanına sahiptirler. Gösterge ve diferansiyel sensörler olarak kullanılan Bourdon tüpleri, sağlamlıkları ve düşük maliyetleri nedeniyle tercih edilirken, mekanik yapıları sebebiyle şok ve titreşime karşı hassas olmalarından dolayı düşük basınçlı hassas ölçümler için önerilmemektedirler [7].

3.2. Modern Sensörler (Modern Sensors)

3.2.1. Vakum Basınç Sensörleri (Vacuum Pressure Sensors)

Vakum teknolojisi, doğal bilimler ve mühendislik dahil olmak üzere çeşitli araştırma ve endüstriyel alanlarda kullanılır [10]. Mekanik basınç sensörleri genellikle kuvvet ölçmekteyken, düşük atmosferik basınçlarda malzeme etkilerini gözlemleyen vakum basınç sensörleri devreye girmektedir. Özellikle düşük vakum aralıklarını ölçen Pirani sensörü, ısıtılmış filamanının direncini ölçerek çalışmaktadır (Şekil 3(a)). Bu direnç, çevresel vakum basıncına bağlı olarak değişmekte ve elektrik devresine bağlanarak basınç değeri olarak tayin edilmektedir.



(a) (b)

Şekil 3. (a) Vakum basınç sensörü [11], (b) Gerinim Ölçer Basınç sensörü.((a)Vacuum pressure sensor [11], (b) Strain gauge Pressure sensor)

3.2.2. Gerinim Ölçer Basınç Sensörleri (Strain Gauge Pressure Sensors)

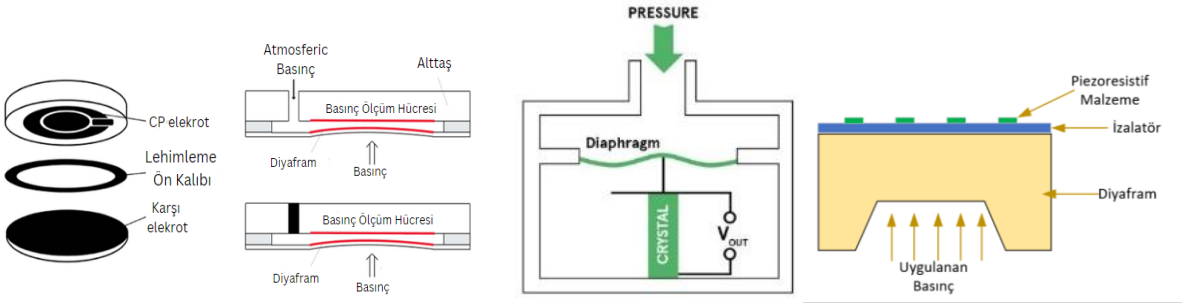
Gerilim ölçer basınç sensörleri (Şekil 3(b)), ilk olarak 1952 yıllarında Peter George Scott Jackson tarafından icat edilmiştir [8]. Temel prensibi, bir yayın boyutlarında meydana gelen genişleme veya daralmayı kullanarak basınç ölçülmesidir. Uygulanan kuvvetle yay deforme olur, bu da direncin dalgalanmasına ve voltajın elektrik sinyallerine dönüşmesine neden olur. Bu sinyaller, basınç değerlerine dönüştürülerek görüntülenir. Bu sensörler, araçlar, gemi gövdeleri, barajlar ve petrol platformları gibi yapıların uzun vadeli tork, gerilim ve sapma gibi özelliklerini izlemek için kullanılmaktadır.

3.2.3. Kapasitif Basınç Sensörleri (Capacitive Pressure Sensors)

Kapasitörler elektrik yükünü depolamak için kullanılan komponentlerdir. Aralarında yakın bir boşlukla ayrılmış iki iletkenle çalışmaktadır. Çoğu kapasitif basınç sensörü de benzer yapıdadır, iki elektrot plakası arasına sıkıştırılmış bir dielektrik tabaka ile karakterize edilen paralel plaka kapasitörleri olarak üretilmektedir [12]. Sensör iki plaka arasındaki kapasitansı ölçmektedir. İki plaka arasındaki mesafe, çevredeki basınca göre değişen kapasitans değerlerini belirlemektedir. Kapasitif basınç sensörü modeli Şekil 4 (a)'de gösterilmektedir. Kapasitif basınç sensörlerinin uygulamaları arasında jet motorları, araba lastikleri ve gemilerdeki basınç değişikliklerinin ölçülmesi yer almaktadır. Zorlu ortamlara dayanmalarını sağlayan basit bir mekanik tasarıma sahiptirler.

3.2.4. Piezoelektrik Basınç Sensörleri (Piezoelectric Pressure Sensors)

Piezoelektrik basınç sensörleri (Şekil 4(b)), hızlı tepki süresi, yüksek yer değiştirme çözünürlüğü ve düşük ısı üretimi gibi özellikler sayesinde, hassas hareketlerin gerektiği uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sensörler, kuvvet uygulandığında piezoelektrik malzemeden elektrik yükü üretme kabiliyetine sahip olup, bu özellik geniş basınç seviyelerinde yüksek voltaj çıkışları sağlamaktadır. Ayrıca, harici bir güç kaynağına ihtiyaç duymayan yapıları ile enerji verimli ve kompakt tasarımları mümkün kılmaktadır, bu da onları zorlu çevre koşullarında bile dayanıklı ve uzun ömürlü yapmaktadır. Bu avantajlar, piezoelektrik basınç sensörlerini hem endüstriyel hem de bilimsel uygulamalar için ideal bir tercih haline getirmektedir.



(a) (b) (c)

Şekil 4. (a) Kapasitif basınç sensörü modeli, (b) Piezoelektrik Basınç sensörü [13], (c) Piezorezistif sensör katman gösterimi. ((a) Capacitive pressure sensor model, (b) Piezoelectric pressure sensor [13], (c) Piezoresistive sensor layer representation.)

3.2.5. Rezonans Basınç Sensörleri (Resonant Pressure Sensors)

Yarı dijital çıkışları, üstün kararlılıkları ve yüksek sinyal-gürültü oranları (SNR - Signal-to-Noise Ratio) ile rezonans basınç sensörleri, piezorezistif ve kapasitif basınç sensörlerine kıyasla daha yüksek hassasiyet ve uzun vadeli stabilite sunmaktadır. Bu sensörler, basıncı mekanik rezonans frekansındaki değişimle ölçerek frekans tabanlı bir çıkış üretir. Frekans tabanlı bu çıkış, dijital sistemler tarafından doğrudan işlenebilir olduğu için 'yarı dijital' olarak adlandırılmaktadır.

Bu özellikleri sayesinde rezonans basınç sensörleri, havacılık, endüstriyel kontrol sistemleri ve ölçüm cihazlarının kalibrasyonu gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda bu sensörler üzerine yapılan araştırmalar artış göstermiş olup, MEMS üretim teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte silisyum ve kuvars bazlı varyantlar önerilmektedir. Ancak, ticari kullanım açısından silisyum rezonatör bazlı basınç sensörlerinin piyasada yaygın olarak bulunabilirliği halen sınırlıdır [14] .

3.2.6. Piezorezistif Basınç sensörleri (Piezoresistive Pressure Sensors)

Piezorezistif basınç sensörlerinde (Şekil 4(c)), diyaframa uygulanan mekanik basınç, mekanik stres oluşturur ve gerilme meydana gelir. Bu gerilme malzemenin elektrik direncindeki değişimine dayanan ve piezorezistör etkisini kullanarak çalışan önemli sensörlerden biridir [15]. Piezorezistif sensörler, basınç değişikliklerini direnç değişimleri aracılığıyla ölçerek farklı uygulama alanlarında geniş bir kullanım bulmaktadır. Ana odağımız olan bu sensör tipi detaylı olarak 4. başlık altında anlatılacaktır.

4. PİEZOREZİSTİF BASINÇ SENSÖRLERİ (PIEZORESISTIVE PRESSURE SENSORS)

Gelişmiş mikro işlenmiş basınç sensörlerinin modellenmesi, tasarımı ve üretimi konusundaki çalışmalarda piezorezistif, kapasitif, optik, rezonans ve akustik transdüksiyon prensipleri literatürde detaylı bir şekilde incelenmiştir [16]. Bu prensipler arasında, piezorezistör ve kapasitif transdüksiyon mekanizmaları genellikle tercih edilen ve çeşitli endüstrilerde yaygın olarak benimsenen yöntemlerdir. Piezorezistif basınç sensörü (Şekil 5 (a)) türleri mutlak basınç sensörleri, atmosferik basınç sensörler ve diferansiyel basınç sensörleri şeklinde adlandırılmaktadır [15].



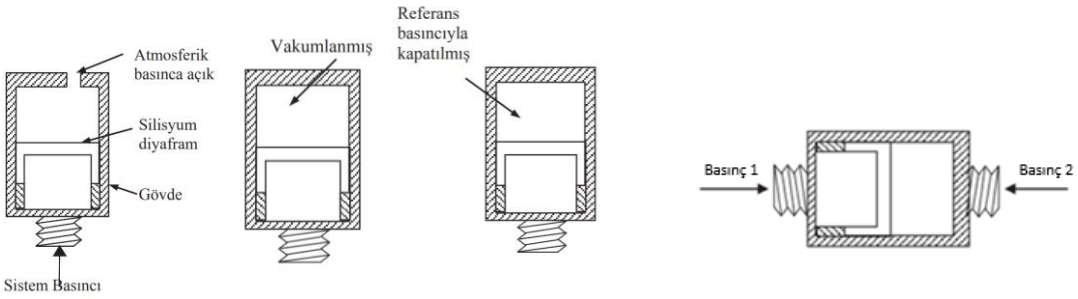
(a) (b) (c)

Şekil 5. (a) Piezorezistif sensör, (b) Metal diyaframlı Piezorezistif Basınç sensörü ve (c) Diferansiyel Piezorezistif Basınç Sensörü. ((a) Piezoresistive sensor, (b) Piezoresistive Pressure sensor with metal diaphragm and (c) Differential Piezoresistive Pressure Sensor.)

Atmosferik basınç sensörleri (Şekil 5 (b), Şekil 6 (a)) adından da anlaşıldığı üzere atmosferik basıncı referans olarak kullanmaktadır. Mutlak basınç sensörlerinde (Şekil 6 (b)), sensör içerisindeki referans bölge vakumlanır, bu kısım vakumlandığından dolayı ölçüm oluşan vakuma göre yapılmaktadır. Ancak teknolojik sınırlamalar nedeniyle "mutlak vakum" oluşturulamaz [15]. Diferansiyel basınç sensörleri (Şekil 5 (c), Şekil 6 (d)) ise iki giriş portu arasında fark basıncı ölçer diğer sensör türlerine göre daha karmaşıktır ve genellikle sınırlı uygulamalarda kullanılmaktadırlar [15].

Silisyum malzeme ve paketleme ortamı, çevredeki sıcaklık değişimlerinden kolayca etkilenerek sensör çıkışında sıcaklık kaymasına neden olmaktadır. Günümüzde, sıcaklık kompanzasyonu için temel olarak donanım ve yazılım tabanlı yöntemler uygulanmaktadır. Donanım kompanzasyonu, karmaşık devre tasarımı gerektirmesi, hata ayıklama sürecinin zorlukları, düşük hassasiyet ve sınırlı uyumluluk gibi dezavantajlar nedeniyle

mühendislik uygulamalarında yeterince verimli olamamaktadır. Bu sebeple, pratik uygulamalarda yazılım tabanlı kompanzasyon yöntemleri daha yaygın olarak tercih edilmektedir [17].



(a) *(b)* *(c)* *(d)*

Şekil 6.(a)Atmosferik basınç sensörü, (b)Mutlak Vakum sensörü, (c) Referans basınç sensörü, (d)Fark(diferansiyel) basınç sensörü, Paketlenmiş Basınç sensörünün basınç ölçümü için yapısal gösterimleri. ((a) Atmospheric pressure sensor, (b) Absolute vacuum sensor, (c) Reference pressure sensor, (d) Differential pressure sensor, Structural representations of a packaged pressure sensor for pressure measurement.)

4.1. Temel Çalışma Prensibi (Basic Working Principle)

Piezoresistif basınç sensörleri, genellikle silisyum malzemesinin piezoresistif etkisini kullanarak çalışmaktadır. Silisyumun atom düzeyindeki özellikleri, bu sensörlerin üretiminde avantaj sağlar ve mevcut silisyum fabrikalarının toplu üretim imkanlarından yararlanılabilir. Bu nedenle, birçok ticarileştirilmiş MEMS basınç sensörü, basınç değişikliklerini direnç değişiklikleri üzerinden ölçmek için piezorezistör transdüksiyon mekanizmasını kullanmaktadır [18]. Piezoresistif basınç sensörlerinin tasarımı, piezorezistör elemanlarının zarın üstüne yerleştirilmesini esas alır. Hassasiyet, tekrarlanabilirlik ve sıcaklık sapması özellikleri, piezoresistif basınç sensörlerinin özellikle önemli performans göstergeleridir [1]. Hassas ölçümler yapabilmek için piezorezistör malzemesinin yerleşim konumu büyük önem taşır, özellikle maksimum stres bölgelerinde, sensör performansını doğrudan etkilemektedir [19]. Bu sensörler, Wheatstone köprüsü konfigürasyonunda piezorezistörlerin basınca duyarlı bir diyaframa bağlanmasıyla çalışır. Uygulanan basınç, diyaframın eğilmesine ve piezorezistörlerin direncinde değişikliğe yol açar. Bu direnç değişikliği, basınçla orantılı bir çıkış gerilimi olarak ölçülür [18]. Şekil 7 (a) ve (b)'de sırasıyla Wheatstone köprüsü yapısı ve sensör yerleşimi gösterilmiştir. Piezorezistif malzemenin direnci değiştiğinde, Wheatstone köprüsünün dengesi bozulur ve bir çıkış voltajı üretilir. Bu çıkış voltajı, sensörün direncindeki değişimle doğru orantılıdır ve sensörün kalibrasyonu yapılarak basınç değeri hesaplanabilir. Direnç değişimi eşitlik (1)'de gösterilmiştir.

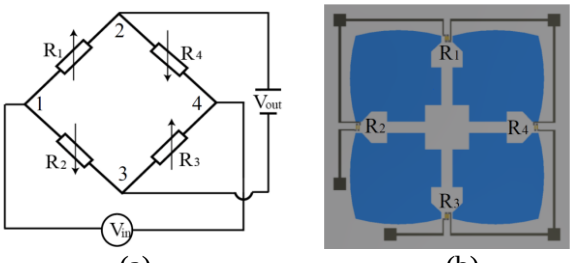
$$R = \rho * \frac{L}{A} \quad (1)$$

Burada, ρ bir piezorezistör malzemesinin direncidir, L uzunluğu ve A alanıdır. Wheatstone köprüsü, diyaframa monte edilir. Basınç diyaframa uygulandığında, basınca maruz kalan yönde kayma gerilmesini yaşar. Bu kayma sonrası piezoresistörleri gererek uzunluklarını artırır ve alanlarını azaltır. Eşitlik (1)'den, piezorezistörlerin direnci artar ve çıkış gerilimi düşer. Transdüksiyondaki basıncı hesaplamak için eşitlik (2) ve (3) kullanılır.

$$V_{out} = V_{in}\frac{\Delta R}{R} \quad (2)$$

$$S = \frac{\Delta V}{P_I - P_M} * \frac{1}{V_{in}} = \frac{\Delta V}{\Delta P * V_{in}} \quad (3)$$

Burada V_{in} uyarım voltajını; ΔV ise sensörün çıkışını tam ölçek temsil eder ve cihazın çıkış voltajındaki değişimi, P_I basıncından P_M basıncına kadar olan değişimi ifade eder [19].



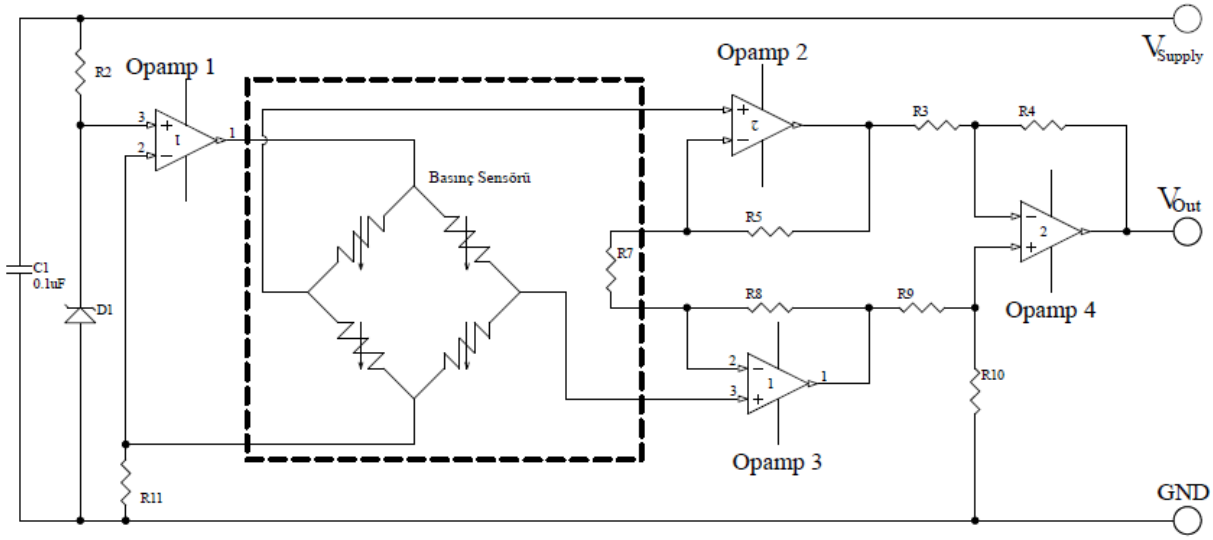
(a) (b)

Şekil 7. (a) Piezorezistif sensörün oluşturduğu wheatstone devresi ve (b) örnek sensör görseli. ((a) Wheatstone circuit generated by the piezoresistive sensor and (b) sample sensor image.)

Piezoresistif basınç sensörlerinin elektronik devrelerinde bir uyarım voltaj ya da akım devresiyle güç sağlanır (V_{Supply}). V_{Out} ise diferansiyel bir

analog çıkış vermektedir. Bu analog çıkışı ölçmek için diferansiyel analog okuma devresi kullanılmaktadır.

Şekil 8' de gösterilen devrede Basınç değiştikçe köprü devresi dengesiz hale gelir ve küçük bir diferansiyel voltaj üretir. Opamp(Operational amplifier-İşlevsel yükselteç) 2 ve Opamp 3 bu küçük sinyali kuvvetlendirir. Opamp 4 son kazancı uygular ve işlenmiş gerilim çıkışına gönderir. V_{Out} çıkışı, basınca orantılı olarak değişir ve bir ADC (Analog to Digital Converter) veya diğer ölçüm sistemlerine iletilir.

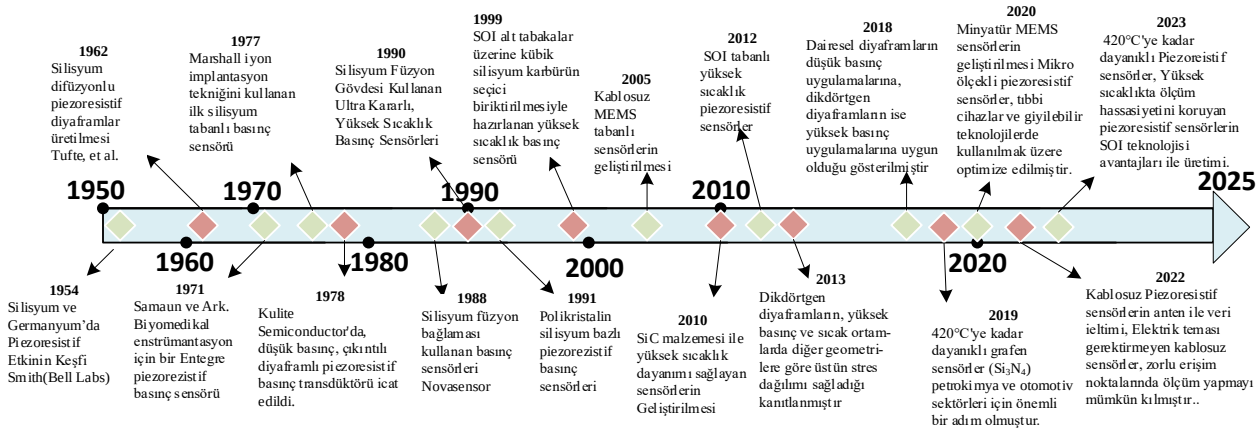


Şekil 8. Piezoresistif basınç sensörü elektronik ölçümü için kullanabilecek devre örneği.(Example of a circuit that can be used for electronic measurement of piezoresistive pressure sensor.)

4.2. Tarihsel Gelişim ve Yenilikler (Historical Development and Innovations)

Piezoresistif basınç sensörleri, C.S. Smith'in, 1954'te Si (Silisyum) ve Ge (Germanyum)'de piezorezistif etkiyi keşfetmesinin [20] ardından, 1962'de Tufte ve diğerleri silisyum difüzyonlu piezorezistif diyaframlar üretilip test edilmiştir. Bu, piezoresistif etkiyle çalışan ilk bütünleşik basınç sensörü örneği olmuştur [21]. 1967'de Stedman, çıkıntılı diyaframlı basınç sensörlerini geliştirmiştir [22]. Samaun ve arkadaşları, piezorezistörler yerleştirerek diyaframın hassasiyetini artıran anizotropik aşındırma yöntemiyle biyomedikal enstrümasyon için entegre piezorezistif basınç sensörü geliştirmişlerdir [23]. 1970'lerde Kulite Semiconductor ve Honeywell, ticari entegre basınç sensörleri üretmeye başlamıştır. 1977'de Marshall, Honeywell'de iyon implantasyonu kullanarak ilk silisyum tabanlı basınç sensörünü patentlemiştir [22]. 1978'de Kurtz ve ekibi, Kulite Semiconductor'da, düşük basınç, çıkıntılı diyaframlı piezorezistif basınç transdüktörü icat etmiştir [22]. Clark ve Wise, ince diyafram silisyum sensörleri için elektrokimyasal denklemlerin türevlerini kullanarak hassas tasarımlar geliştirmiştir. Çözümler, mikro işlenmiş kare diyaframlarda uygulamalı anizotropik aşındırmaya uygun boyutsuz bir formda sunulmuştur [22]. MEMS teknolojisiyle bu sensörler küçülmüş, hassasiyetleri artmış; tasarım, malzeme seçimi ve üretim süreçlerinde yenilikler yapılmıştır [24], [25].Sensör malzemeleri, performansı artırmak ve çevresel etkilere karşı dayanıklılığı sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Silisyum Karbür (SiC), yüksek sıcaklık ve radyasyon ortamlarında başarılı sonuçlar verirken [26], esnek malzemeler, giyilebilir teknolojiler ve biyomedikal cihazlar için optimize edilmesini sağlamıştır [27]. Yüksek sıcaklık uygulamaları için piezoresistif sensörler, SOI (Silicon-on-Insulator, yalıtkan üzerine silisyum) gibi yenilikçi malzemelerle donatılmıştır ve 300°C gibi yüksek sıcaklıklarda bile doğrusal yanıt ve hassasiyet sağlar. Bu otomotiv ve havacılık gibi alanlarda kullanımı için önemli bir rol oynamaktadır [28]. Grafen tabanlı sensörlerdeki Silisyum Nitrür (Si_3N_4) kaplamalar ise 420°C'ye kadar mükemmel performans göstererek termal kararlılığı artırmıştır [29]. Son gelişmeler, optoelektronik bileşenlerin piezoresistif sensörlerle entegrasyonunu mümkün kılarak veri aktarım hızını artırmış ve hassas ölçümlerde büyük avantaj sağlamıştır. Monolitik entegrasyon ise, sensörlerin elektronik devrelerle doğrudan uyumlu hale getirilmesini sağlamıştır [30], [31]. Piezorezistif etkilerin modellenmesi ve diyafram malzemesi optimizasyonu, diyaframın geometrik yapısı, hassasiyet ve doğruluk açısından önemli ilerlemeler sağlamıştır [32]. Kablosuz sensör tasarımları, rüzgar ve basınç ölçümlerinden tıbbi cihazlara

kadar geniş bir uygulama alanı sağlamaktadır [33], [34]. Kablosuz piezoresistif basınç sensörleri, zorlu erişim noktalarında ölçüm yapmayı kolaylaştırmak için geliştirilmiş, sandviç yapısı sayesinde elektrik teması gerektirmeyen bir tasarım sunarak verilerin kablosuz iletilmesini sağlamaktadır [35]. Esnek ve minyatür MEMS sensörler, düşük maliyetli ve kompakt çözümler sunarak günlük hayatta daha geniş kullanım alanı bulmuş [36], [37], esnek polimerik sensörler ise hafif ve dayanıklı tasarımlarıyla tıbbi cihazlar ve giyilebilir teknolojilerde yaygınlaşmıştır [36]. 600 °C'de ortaya çıkan sıfır basınç çıkışındaki voltaj kaymalarının giderilmesine yönelik çalışmalar, piezorezistif silisyum karbür (SiC) basınç sensörlerinin güvenilirliğini artırarak hem kısa süreli motor testlerinde hem de uçuş testlerinde kullanımını mümkün kılmıştır [38]. Piezoresistif basınç sensörlerinin tarihsel gelişimi, malzeme bilimindeki yenilikler ve MEMS teknolojisinin sunduğu avantajlarla hız kazanmıştır. Piezoresistif basınç sensörlerinin gelişim sürecindeki önemli adımları Şekil 9'te kronolojik olarak gösterilmektedir.



Şekil 9. Piezoresistif Basınç Sensörlerini Geçmişten günümüze gelişim süreçleri zaman akışı.(

Piezoresistive Pressure Sensors Time flow of development processes from past to present.)

4.3. Malzemeler ve Tasarım Özellikleri (Materials and Design Features)

Piezorezistif basınç sensörün önemli bileşenleri diyafram ve piezorezistörlerdir [15]. Diyaframın kalınlık, genişlik ve geometrisi analiz edilerek optimum mekanik dayanıklılık ve hassasiyet sağlanmalıdır. Sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Modeling, FEM) ile diyafram deformasyonu ve gerinim bölgelerinin modellenmesi önemlidir. İnce diyaframlar yüksek hassasiyet sunsa bile, mekanik dayanıklılığı azalmaktadır. Bu nedenle dengeli bir tasarım yapılmasının önemi literatürdeki çalışmalarda vurgulanmıştır [19], [28], [39]. Literatürde piezorezistörler maksimum gerinim bölgelerine yerleştirilmiş ve Wheatstone köprüsü ile entegre edilmiştir. Bu entegrasyon direnç değişimlerini hassas elektrik sinyaline dönüştürür. Farklı piezorezistif malzemeler, uygulama ve ortam koşullarına göre seçilmelidir; örneğin silisyum (Si), yalıtkan üzerine silisyum (SOI), safir üzerine silisyum (SOS), silisyum karbür (SiC), çelik, karbon nanotüpler (CNT), grafen ve elmas gibi [29], [40]. Malzemeler değişse de basınç algılama prensip aynıdır. Kullanılan malzeme, diyafram tasarımını belirleyerek, basınç sensörünün uygulama alanında önemli bir rol oynar [18]. Piezorezistif basınç sensörlerinde Young Modülü (E) ve Poisson oranı (ν) önemli özelliklerindendir [41]. Young modülü, piezorezistif yapı ile diyafram malzemesinin sertliğini belirler [18]. Poisson oranı (ν), bir malzemenin boyutlarının, özellikle genişlik ve yükseklik gibi özelliklerinin, uzama veya sıkıştırma sırasında nasıl değiştiğini tanımlar. Bu oran sensör elemanındaki gerilmeyi doğru şekilde ölçme yeteneğini etkileyebilir.

Tablo ***1*** çeşitli diyafram malzemelerinin özelliklerini listelemektedir. Tablo 2 çeşitli piezorezistif malzemelerinin özelliklerini listelemektedir. Piezorezistif sensörlerde diyafram tasarımı, hassasiyet ve doğruluğu artırmada kritik bir rol oynar. Dikdörtgen diyaframlar, yüksek basınç ortamlarında benzersiz stres dağılımı özellikleri yuvarlak diyaframların aksine, hassasiyet ve sıcaklık açısından daha etkili çalıştıkları kanıtlanmıştır [39], [42]. Piezorezistif basınç sensöründe çıkış sinyali Wheatstone köprüsünden gelir. Köprüdeki direnç dört yönde dağılmıştır. Çıkış sinyali (V_{OUT}) hesaplamak için eşitlik (4) kullanılır.

$$V_{OUT} = V_{IN} * (\Delta R/R) \quad (4)$$

Burada V_{OUT} çıkış gerilimini (V), V_{IN} giriş sinyali gerilimini (V), ΔR direncin değişimini (kΩ) ve R direncin başlangıç değerini (kΩ) temsil eder. Dirençlerin voltaj hassasiyetindeki değişim miktarı eşitlik (5)'te gösterildiği gibi ifade edilir:

$$\Delta R/R = (\pi_l * \sigma_l) + (\pi_t * \sigma_t) \qquad (5)$$

Burada σ_l direncin iç kısmında akım yönlendirme ile paralel olan uzunlamasına stresi (N/m^2), σ_t akım yönlendirme ile dik olan enine stresi (N/m^2) ifade ederken, π_l uzunlamasına stresle aynı yönde, silisyumun uzunlamasına piezorezistör katsayısıdır (m^2/N), π_t ise enine stresle aynı yönde silisyumun enine piezorezistör katsayısıdır (m^2/N). Piezorezistör oryantasyonları silisyum levhanın kristal yapısının düzenini tanımlar ve Miller indeksleri kullanılarak belirtilir. Yaygın yerleşim türleri arasında <100>, <110> ve <111> yer alır. En yaygını düz yüzeyli ve yüksek kaliteli üretim için kullanılan <100> oryantasyonudur. <110> Oryantasyonlu silisyum kristalin farklı özelliklere sahip bir yüzeyi olduğunu temsil eder ve çoğu elektronik uygulamada kullanılır. <111> Oryantasyonu en düşük yüzey enerjisine sahiptir ve özel uygulamalar için tercih edilmektedir. Tablo 3, <110> silisyum alttaş (wafer) için piezorezistör katsayılarını göstermektedir [18]. Piezorezistif basınç sensöründe kullanılan malzemelerin avantaj, dezavantaj ve kullanım alanları Tablo 4'de verilmiştir. Şekil 10 (a)'da çeşitli malzemelere göre sıcaklık dayanımlarını göstermektedir.

***Tablo 1**. Çeşitli diyafram malzemelerinin özellikleri [18]. (Properties of various diaphragm materials)*

	Materyal	**Yoğunluk (kg/m^3)**	**Young modülü (GPa)**	**Poisson Oranı**
1	Silisyum Di Oksit	2270	70	0.17
2	Polisilisyum	2320	169	0.22
3	Çelik (AISI 4340)	7850	205	0.28
4	Al_20_3	3970	393	0.27
5	Si_3N_4	3310	317	0.23
6	Germanyum	5323	103	0.26
7	Al	2700	68	0.25
8	Cu	8960	130	0.34

***Tablo 2.** Çeşitli piezorezistif malzemelerinin özellikleri [18].(Properties of various piezoresistive materials)*

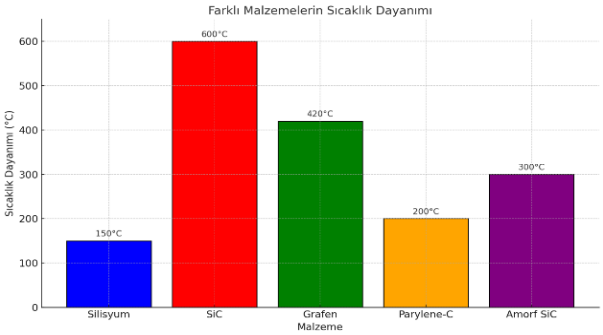
	Materyal	**Yoğunluk (kg/m^3)**	**Young modülü (GPa)**	**Poisson Oranı**
1	Tek Kristalli Silisyum (n,p tipi)	2329	168	0.24
2	Karbon Nanotüpler	1600	1000	0.2
3	Elmas	3520	1220	0.2
4	SiC	3210	410	0.19
5	Silisyum	2330	160	0.22
6	SOS	3.97	250-400	0.29
7	Polikristalin Si	2330	160	0.23

***Tablo 3**. Piezorezistif silisyum katsayı sabitleri [18].(Piezoresistive silicon coefficient constants)*

	Alttaş (Wafer) Türü	π_l	π_t	Oryantasyon
1	P- Tipi	-31.6	-17.16	<110>
2	N-Tipi	71.8	-66.3	<110>

Tablo 4. *Piezorezistif basınç sensörü malzemelerinin karşılaştırması.(Comparison of piezoresistive pressure sensor materials.)*

Malzeme	Avantajları	Dezavantajları	Kullanım Alanları
Silisyum (Si) [29], [40]	- Yüksek piezorezistif katsayı (hassasiyet) - MEMS ile kolay üretim - Düşük maliyet	- Yüksek sıcaklıklarda performansı düşebilir	Endüstriyel sensörler, MEMS tabanlı basınç sensörleri
Yalıtkan Üzerine Silisyum (SOI) [29], [40]	- Yüksek sıcaklık stabilitesi - Daha iyi izolasyon (sızıntı azalır) - Düşük güç tüketimi	- Üretim maliyeti daha yüksek	Havacılık, otomotiv, yüksek sıcaklık sensörleri
Safir Üzerine Silisyum (SOS) [29], [40]	- 500°C'ye kadar çalışma sıcaklığı - Yüksek yalıtkanlık, düşük gürültü - Kimyasallara ve radyasyona dayanım	- Üretimi pahalı - Mekanik esneklik düşük	Havacılık, askeri uygulamalar, nükleer alanlar
Silisyum Karbür (SiC) [29], [40]	- Yüksek sıcaklık ve aşındırıcı ortamlara dayanım - Yüksek sertlik ve kimyasal direnç - Düşük sıcaklık bağımlılığı (doğruluk artar)	- Üretim zor ve pahalı	Havacılık, otomotiv, petrol sondajı, aşındırıcı ortamlarda sensörler
Çelik [29], [40]	- Mekanik olarak dayanıklı - Yüksek basınç ve korozyon direnci	- Piezorezistif etkisi düşük	Endüstriyel yüksek basınç sensörleri
Karbon Nanotüpler (CNT) [27], [29], [39]	- Çok yüksek esneklik ve mukavemet - Hafif ve minyatür yapı - Düşük enerji tüketimi	- Üretim süreci karmaşık - Endüstriyel ölçekte kullanımı sınırlı	Esnek sensörler, biyomedikal uygulamalar
Grafen [29], [40]	- Çok yüksek mekanik dayanıklılık ve esneklik - Süper hassas ve ultra hafif - Yüksek iletkenlik, düşük güç tüketimi	- Kararlı üretim zorluğu - Henüz yaygın üretime geçmemiş	Nano sensörler, giyilebilir teknolojiler
Elmas [29], [40]	- Aşınma ve mekanik hasara dayanıklı - Yüksek sıcaklıklarda çalışabilir - Kimyasal olarak inert (aşındırıcı ortamlara dayanıklı)	- Çok pahalı ve üretimi zor - Mikro işleme zorlukları var	Aşındırıcı ortam sensörleri, havacılık, nükleer uygulamalar

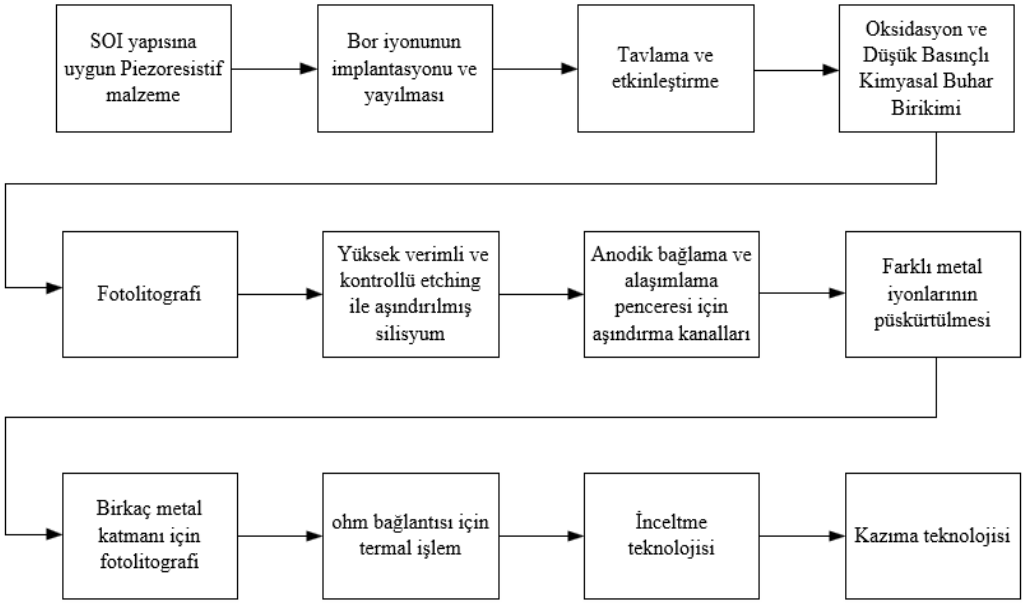


Şekil 10. Malzemelere göre sıcaklık dayanımları.

(Temperature resistance according to materials)

4.4. Fabrikasyon Süreçleri (Fabrication Processes)

Literatür irdelendiğinde piezorezistif basınç sensörlerinin fabrikasyon süreçlerinde benzer yöntemlerin izlendiği gözlemlenmiştir. Genel olarak termal yönetim ve radyasyon dayanıklılığına sahip malzemelere karar verilip ilgili simülasyon ve testler ile diyafram optimizasyonu yapıldıktan sonra fotolitografi ve mikro işleme teknikleri ile üretimin gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Şekil 11'de SOI yapısına uygun piezorezistif malzeme ile başlayıp iyon implantasyonu, tavlama, oksidasyon, fotolitografi, aşındırma, anodik bağlama, iyon püskürtme, tekrardan farklı metal katmanlar için fotolitografi, piezorezistif bağlantısı için termal işlem, inceltme ve kazıma şeklinde tamamlanan genel bir üretim akış süreci gösterilmektedir.



Şekil 11. Piezorezistif basınç sensörlerin yaygın fabrikasyon süreçleri [43]. (Common fabrication processes of piezoresistive pressure sensors)

Şekil 11'de görselleştirilen süreç, SOI yapısına sahip piezorezistif bir basınç sensörünün üretim aşamalarını göstermektedir. Aşamaların alt işlevleri de aşağıda belirtilmiştir.

I. Adım: SOI Yapısına Uygun Piezorezistif Malzeme Seçimi

- SOI teknolojisi, ince bir silisyum katmanının bir yalıtkan (genellikle silisyum dioksit(SiO_2)) üzerine yerleştirilmesiyle oluşturulur.
- Bu yapı, düşük güç tüketimi ve yüksek sıcaklık dayanımı sağlar.
- Kullanılacak piezorezistif malzeme, sensörün hassasiyetini ve performansını belirler.

II. Adım: Bor İyonunun İmplante Edilmesi ve Yayılması

- Piezorezistif dirençlerin oluşturulması için silisyum içine bor iyonu eklenir (p-tipi katkılama).
- İyon implantasyonu: Yüksek enerjili bor iyonları, silisyum yüzeyine belirli bir derinliğe kadar gömülür.
- Yayılma (diffusion): İyonlar, kontrollü bir sıcaklıkta ısıtılarak malzeme içinde homojen şekilde dağıtılır.

III. Adım: Tavlama ve Etkinleştirme

- İmplante edilen bor iyonlarının kristal yapı içinde doğru yerlere oturması için ısıtma işlemi uygulanır.
- Bu işlem, piezorezistif bölgelerin elektriksel özelliklerini iyileştirir.

IV. Adım: Oksidasyon ve Düşük Basınçlı Kimyasal Buhar Biriktirme (LPCVD-Low Pressure Chemical Vapor Deposition)

- Oksidasyon: Silisyum yüzeyi, silisyum dioksit(SiO_2) tabakası oluşturacak şekilde oksitlenir. Bu tabaka, maskeleme ve izolasyon için gereklidir.
- LPCVD: İnce film kaplama yöntemiyle ek yalıtım veya pasivasyon katmanları oluşturulur.

V. Adım: Foto-litografi (Fotorezist Kaplama ve Pozlama)

- Yüzeye ışığa duyarlı bir polimer (fotorezist) kaplanır.
- Bir maske kullanılarak belirli bölgeler UV (Ultra Violet) ışığı ile pozlanır.
- Pozlanan alanlar kimyasal çözeltilerle geliştirilerek istenen desenler oluşturulur.

VI. Adım: Yüksek Verimli ve Kontrollü Aşındırma (Etching) ile Aşındırılmış Silisyum

- Kimyasal veya plazma kullanılarak belirli bölgelerdeki silisyum aşındırılır.
- Islak aşındırma (wet etching): Kimyasal çözeltilerle yapılır (örneğin KOH (Potasyum hidroksit) ile).
- Kuru aşındırma (dry etching): Plazma veya iyonlarla seçici olarak silisyum kazınır.

VII. Adım: Anodik Bağlama ve Alaşımlama Penceresi için Aşındırma Kanalları

- Cam ve silisyum, yüksek sıcaklık ve elektrik alanı kullanılarak anodik bağlama yöntemiyle birleştirilir.
- Bağlantı bölgelerinde metal iletkenlerin yerleştirilmesi için kanallar açılır.

VIII. Adım: Farklı Metal İyonlarının Püskürtülmesi (Sputtering)

- Metal kontaklar (örneğin altın, alüminyum veya platin) ince film kaplama ile püskürtülerek yüzeye yerleştirilir.
- Bu işlem, piezorezistif sensörlerin bağlantıları için iletken yollar oluşturur.

IX. Adım: Birkaç Metal Katmanı İçin Foto-litografi

- Sensörün metal bağlantıları için ek katmanlar oluşturulur.
- Bu katmanlar, bağlantıların dayanıklılığını ve iletkenliğini artırır.

X. Adım: Ohm Bağlantısı İçin Termal İşlem

- Metal bağlantıların direnç kayıplarını azaltmak için ısıtma işlemi uygulanır.
- Bu işlem, iletkenlik ve temas kalitesini iyileştirir.

XI. Adım: İnce Film Teknolojisi ile Yapının İnceltilmesi

- Sensörün hassasiyetini artırmak için belirli bölgeler inceltilir.
- Bu işlem, özellikle diyafram yapısını optimize etmek için gereklidir.

XII. Adım: Kazıma Teknolojisi ile Nihai Yapının Oluşturulması

- Mikro-kanallar veya boşluklar kazınarak yapı tamamlanır.
- Bu işlem, sensörün mekanik özelliklerini iyileştirmek ve optimum çalışma koşullarını sağlamak için yapılır.

Bu adımlar, piezorezistif basınç sensörlerinin üretimi için kullanılan karmaşık mikro işleme tekniklerini özetlemektedir. Her bir aşama, sensörün performansını ve güvenilirliğini artırmaya yönelik kritik bir role sahiptir.

4.5. Termal Kompanzasyon ve Termal Etkilerin Yönetimi (Fabrication Processes)

Termal genleşmeden kaynaklanan hata oranlarını azaltmak için uyumlu malzeme seçimi yapılması oldukça önemlidir. Diyafram ve piezorezistör malzemelerinin termal genleşme katsayıları literatürde yapılan çalışmalarda dengelenmiş ve sıcaklık kompanzasyon devreleri eklenmiştir [44], [45], [46].

4.6. Radyosyon Dayanıklığı Analizleri (Fabrication Processes)

Gamma radyasyonu altındaki sensör performansının analiz edilmesi de radyasyon dayanıklılığı açısından oldukça önemlidir. Piezorezistör ve diyafram malzemeleri Polisilisyum ve silisyum karbür gibi radyasyona karşı yüksek dayanıklılığa sahip malzemelerden seçilmelidir. Literatürde simülasyon ve deneysel testlerle radyasyonun sensör üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir [44], [46].

4.7. Fotolitografi ve Mikro İşleme Teknikleri (Photolithography and Micromachining Techniques)

MEMS sensörlerin üretiminde entegre devre üretiminde yaygın olarak kullanılan fotolitografi ve mikro işleme teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknikler, yüksek hassasiyetli diyafram ve piezorezistör üretimi sağlamaktadır. Fotolitografi, diyafram yapılarının boyutlarının ve konumlarının hassas bir şekilde tanımlanmasını sağlamaktadır [28], [39], [44].

4.8. Hermetik Paketleme ve Çevresel Koruma (Hermetic Packaging and Environmental Protection)

Hermetik sızdırmazlık, sensörün nem, sıcaklık değişimleri ve mekanik şoklara karşı korunmasını sağlamak için oldukça önemlidir. Bu süreçte yüksek sıcaklık dayanımına sahip malzemeler kullanılarak sensör dayanıklılığının artırılması göz ardı edilemeyecek bir önem arz etmektedir [47].

4.9. Uygulama Alanları (Application Areas)

Piezorezistif basınç sensörleri, yüksek ölçek faktörü ve seri üretime uygunluğu nedeniyle birçok uygulama alanında tercih edilmektedir. Geniş bir yelpazede güvenilir, hassas ölçümler için kullanılır. Biyomedikal uygulamalarda biyouyumluluk, uzun süreli doğruluk, minyatürleşme ve zorlu koşullarda çalışma gibi özellikleriyle kan basıncı ölçümünde, solunum izleme sistemlerinde ve çoklu hayati sinyal takibinde kullanılmaktadır [48] . Bu sensörler, günümüzde ticari olarak en gelişmiş MEMS tabanlı sensörler arasında yer almakta olup, birçok farklı sektörde kendine kullanım alanı bulmaktadır. Otomotiv endüstrisinde lastik basıncı izleme sistemleri (TPMS-Tire Pressure Monitoring System), motor performansı ve yakıt verimliliği takibi gibi kritik uygulamalarda kullanılmaktadır [49]. Endüstriyel süreç kontrolü ve otomasyon sistemlerinde, sıvı ve gaz akış basıncının izlenmesi için tercih edilmektedir. Uçak ve havacılık uygulamalarında ise motor basıncı, kabin basıncı kontrolü ve aerodinamik testlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [50]. Ayrıca, piezorezistif basınç sensörleri savunma ve uzay sistemlerinde de dayanıklılık açısından geliştirilerek yer almaktadır. Uydu sistemlerinde atmosferik basınç değişimlerinin ölçülmesi, roket motorlarının basınç analizleri ve yüksek G kuvvetlerine dayanıklı aviyonik sensörler gibi uygulamalar için optimize edilmektedir [51]. Giyilebilir teknolojilerde de piezorezistif sensörler yaygınlaşmıştır. Akıllı tekstil uygulamalarında, esnek ve hafif sensörler olarak

insan hareketlerini izleme ve biyomekanik analiz için kullanılmaktadır. Özellikle melamin köpük yapıdaki esnek sensörler, vücut hareketlerini izleme ve spor performansı değerlendirme çalışmalarında geliştirilmiştir [52].
Bunlara ek olarak, tıbbi cihazlar, deniz altı basınç ölçüm sistemleri, petrol ve doğalgaz sektöründe kuyu içi basınç izleme, gıda işleme endüstrisi ve çevresel hava basıncı izleme gibi birçok alanda piezorezistif sensörlerin kullanımı artmaktadır. Bu geniş kullanım alanı, piezorezistif basınç sensörlerini modern mühendislik uygulamalarında vazgeçilmez bir teknoloji haline getirmiştir.

4.10. Avantajlar ve Sınırlamalar (Advantages and Limitations)

Piezorezistif basınç sensörleri, basit yapıları nedeniyle düşük maliyetli, dayanıklı ve şoka, titreşime karşı dirençlidir. Elektronik okuma devreleri basit olup yüksek çözünürlük sağlar, çıkışları basınçla doğrusaldır ve tepki süresi milisaniyenin altındadır. 3 psi ile 20.000 psi arasında geniş bir basınç ölçüm aralığına sahiptir. Çıkışı zaman içinde stabildir ve kalibrasyon gereksinimi azdır. Piezorezistif elemanlar diyaframa bağlanabilir, ancak yüksek sıcaklık ve aşırı basınçta yapıştırıcılarda sorunlar yaşanabilir. Alternatif olarak, doğrudan membran üzerinde ince film dirençler kullanılabilir. Bu dirençler daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilir ve zorlu ortamlarda daha uygundur. Ancak, sensörlerin güç gereksinimi düşük güçlü sistemlerde kullanımı zorlaştırır. Boyut küçültme, direnci azaltarak güç tüketimini artırır ve hassasiyet kaybına yol açabilir. MEMS cihazları küçük boyutlarda üretilebilir, ancak gerinim ortalaması hassasiyeti düşürebilir. Ayrıca, sıcaklık değişimleri ve bağlantı kaçak akımları doğruluğu etkileyebilir.

5. SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ (CONCLUSIONS AND FUTURE PERSPECTIVES)

Gaz sensörlerinin geçmişten günümüze göre gelişimi araştırılmış, MEMS teknolojisinin gelişimiyle boyutlardaki küçülmeleri gözlemlenmiştir. Üretim olarak en yaygın basınç sensörlerinin piezorezistif özellikte olduğu ve yüksek basınç okuma çalışmalarında da piezorezistif basınç sensörün diyafram yapısının daireselden dikdörtgen hale getirilmesi ile başarımın arttığı yapılan literatür araştırmalarımızda gözlemlenmiştir. Piezorezistif basınç sensörlerindeki yüksek sıcaklık dezavantajını malzeme teknolojisi ile çözüm çalışmaları yapılmış, 600°C'ye kadar güvenilir sonuç veren piezorezistif basınç sensörü çalışması literatüre eklenmiştir [38] ve MEMS tabanlı piezorezistif sensörlerin endüstrideki rolü diğer sensörlere göre daha da artmıştır. 800°C ve üzerinde çalışacak yapıda sensörlerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar literatürde görülmüştür. Benzer şekilde uzun süreli doğruluk üzerine de çalışmaların olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, MEMS tabanlı piezorezistif sensörler günümüzde ve gelecekte endüstriyel üretimde devrim yaratacak potansiyele sahiptir. Endüstri 4.0'ın getirdiği dijitalleşme, nanoteknoloji ve malzeme bilimindeki gelişmeler, farklı geometriler kullanılarak yapılabilecek özgün tasarımlar, nesnelerin interneti (IoT- Internet of Things) ve yapay zekâ (AI- Artificial Intelligence) entegrasyonuyla birlikte bu teknolojinin önemi daha da artacaktır ve sektörel uygulamaları gelecekte daha geniş bir yelpazeye yayılacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Yazmış olduğumuz derleme makalesine desteklerinden dolayı LOGOS KİMYA TEKNOLOJİLERİ SAN. TİC. ve LTD ve TÜBİTAK TEYDEP 1501 SANAYİİ ARGE PROGRAMI DESTEKLİ 3240060 Numaralı Hava ve Uzay Platformlarına Yönelik Yüksek Basınç ve Hassasiyette Çalışabilen, Askeri Standartlara Uygun Basınç Sensörünün Geliştirilmesi projesine teşekkür eder; ayrıca bu makalenin çıkmasında bize sabır gösteren ailemize de teşekkürü bir borç biliriz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

***Yasin ARSLAN*:** Araştırmaları yapmış literatür taramış ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted research, reviewed the literature and carried out the writing of the article.

***Gülşah DEMİRHAN AYDIN*:** Fikri öne sürmüş, araştırmaları yönlendirmiş, makalenin yazım ve kontrol işlemini gerçekleştirmiştir.

She proposed the idea, guided the research, and carried out the writing and revision of the article.

***Deniz KARAÇOR*:** Makalenin yazım ve kontrol işlemini gerçekleştirmiştir.

She carried out the writing and revision of the article.

***Nuri AKGÜN*:** Makalenin yazım ve kontrol işlemini gerçekleştirmiştir.

He carried out the writing and revision of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Z. Xu *et al.*, "An SOI-Structured Piezoresistive Differential Pressure Sensor with High Performance," *Micromachines (Basel)*, vol. 13, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/mi13122250.

[2] B. Ganev, D. Nikolov, and M. B. Marinov, "Performance evaluation of MEMS pressure sensors," in 11th National Conference with International Participation, ELECTRONICA 2020 - Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2020. doi: 10.1109/ELECTRONICA50406.2020.9305140.

[3] V. Belwanshi, S. Philip, and A. Topkar, "Performance Study of MEMS Piezoresistive Pressure Sensors at Elevated Temperatures," *IEEE Sens J*, vol. 22, no. 10, pp. 9313–9320, May 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3164435.

[4] C. Gao and D. Zhang, "The Establishment and Verification of the Sensitivity Model of the Piezoresistive Pressure Sensor Based on the New Peninsula Structure," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 31, no. 2, pp. 305–314, Apr. 2022, doi: 10.1109/JMEMS.2022.3150909.

[5] R. Gao *et al.*, "Design, Fabrication, and Dynamic Environmental Test of a Piezoresistive Pressure Sensor," *Micromachines (Basel)*, vol. 13, no. 7, Jul. 2022, doi: 10.3390/mi13071142.

[6] Paul Francoletti, "https://blog.ashcroft.com/absolute-vacuum-and-compound-pressure#:~:text=Compound%20pressure%20measures%20both%20positive,is%20applied%20to%20the%20gauge."

[7] L. B. Lambert, "History of measurement and control A history of pressure measurement," 1979.

[8] Instrupaedia, "History of electronic pressure transducers." Accessed: Jan. 02, 2025. [Online]. Available: https://instrulearning.com/pressure/pressure-transducer-history/

[9] "History of MEMS Primary Knowledge Participant Guide."

[10] S. Il Ahn, "High-temperature vacuum pressure sensor using carbon nanotubes," *Mater Lett*, vol. 268, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.matlet.2020.127643.

[11] "Edwards Vacuum - Wikiwand." Accessed: Jan. 14, 2025. [Online]. Available: https://www.wikiwand.com/en/articles/Edwards_Vacuum

[12] W. H. Ko, B.-X. Shao, C. D. Fung, W.-3 Shen, G.-J. Yeh, and B. E. Resource, "CAPACITIVE PRESSURE TRANSDUCERS WITH INTEGRATED CIRCUITS*," 1983.

[13] "Piezoelectric Pressure Sensors | The Design Engineer's Guide | Avnet Abacus." Accessed: Jan. 06, 2025. [Online]. Available: https://my.avnet.com/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/piezoelectric/

[14] X. Han *et al.*, "Novel resonant pressure sensor based on piezoresistive detection and symmetrical in-plane mode vibration," *Microsyst Nanoeng*, vol. 6, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41378-020-00207-0.

[15] L. Gupta, G. Singh, and V. Pandey, "A study of piezoresistive pressure sensor technology," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Feb. 2021. doi: 10.1063/5.0039425.

[16] W. P. Eaton and J. H. Smith, "Micromachined pressure sensors: review and recent developments," 1997. [Online]. Available: http://iopscience.iop.org/0964-1726/6/5/004

[17] J. Wang, G. Hu, J. Li, Y. Zhou, C. Zou, and S. M. Jahangir Alam, "Research on Temperature Compensation of Piezo-resistive Pressure Sensor Based on Newton interpolation and Spline interpolation," in *2021 15th IEEE International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 109–113. doi: 10.1109/ICEMI52946.2021.9679505.

[18] S. Meti, K. B. Balavald, and B. G. Sheeparmatti, "MEMS Piezoresistive Pressure Sensor: A Survey," 2016. [Online].

[19] P. Thawornsathit *et al.*, "Mechanical Diaphragm Structure Design of a MEMS-Based Piezoresistive Pressure Sensor for Sensitivity and Linearity Enhancement,"

Engineering Journal, vol. 26, no. 5, pp. 43–57, May 2022, doi: 10.4186/ej.2022.26.5.43.

[20] Q. Meng, Y. Lu, J. Wang, D. Chen, and J. Chen, "A piezoresistive pressure sensor with optimized positions and thickness of piezoresistors," *Micromachines (Basel)*, vol. 12, no. 9, Sep. 2021, doi: 10.3390/mi12091095.

[21] O. N. Tufte, P. W. Chapman, and D. Long, "Silicon diffused-element piezoresistive diaphragms," *J Appl Phys*, vol. 33, no. 11, pp. 3322–3327, 1962, doi: 10.1063/1.1931164.

[22] A. A. Barlian, W. T. Park, J. R. Mallon, A. J. Rastegar, and B. L. Pruitt, "Review: Semiconductor piezoresistance for microsystems," 2009, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/JPROC.2009.2013612.

[23] SAMAUN, K. D. Wise, and J. B. Angell, "An IC P ezoresistive Pressure Sensor for Biomedical Instrumentation," Analog Dialogue, 1973.

[24] J. Akhtar, B. B. Dixit, B. D. Pant, and V. P. Deshwal, "Polysilicon piezoresistive pressure sensors based on mems technology," *IETE J Res*, vol. 49, no. 6, pp. 365–377, 2003, doi: 10.1080/03772063.2003.11416360.

[25] K. N. Bhat and M. M. Nayak, "MEMS Pressure Sensors-An Overview of Challenges in Technology and Packaging," 2012. [Online]. Available: www.isssonline.in/journal/02paper05.pdf

[26] M. A. Fraga, H. Furlan, M. Massi, I. C. Oliveira, and L. L. Koberstein, "Fabrication and characterization of a SiC/SiO2/Si piezoresistive pressure sensor," in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2010, pp. 609–612. doi: 10.1016/j.proeng.2010.09.183.

[27] S. Kurnaz, O. Ozturk, A. H. Mehmet, U. Guduloglu, N. Yilmaz, and O. Cicek, "Flexible capacitive and piezoresistive pressure sensors based on screen-printed parylene C/polyurethane composites in low-pressure range," *Flexible and Printed Electronics*, vol. 8, no. 3, Sep. 2023, doi: 10.1088/2058-8585/acf774.

[28] P. Li *et al.*, "A Single-Side Micromachined MPa-Scale High-Temperature Pressure Sensor," *Micromachines (Basel)*, vol. 14, no. 5, May 2023, doi: 10.3390/mi14050981.

[29] C. Mo, Z. Tian, and D. Wang, "A Novel High-Performance MXene-Doped Graphene Pressure Sensor," *IEEE Sens J*, vol. 24, no. 9, pp. 14059–14067, May 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3382107.

[30] T. Nguyen and T. Dinh, "OPTOELECTRONIC ENHANCEMENT FOR PIEZORESISTIVE PRESSURE SENSOR," p. 945, 2020.

[31] D. Lin, R. Shi, M. Wong, and K. Chau, "Metal-Oxide Thin-Film Transistor for Monolithic Integration with High-Pressure MEMS Pressure Sensor," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 672–675. doi: 10.1109/MEMS51670.2022.9699551.

[32] L. Kaabi, A. Kaabi, J. Sakly, and F. AbdelMalek, "Modelling and analysis of MEMS sensor based on piezoresistive effects," May 16, 2007. doi: 10.1016/j.msec.2006.06.022.

[33] A. Arshak *et al.*, "Review of the potential of a wireless MEMS and TFT microsystems for the measurement of pressure in the GI tract," 2005, *Elsevier BV*. doi: 10.1016/j.medengphy.2004.11.002.

[34] A. Rossetti, R. Codeluppi, A. Golfarelli, M. Zagnoni, A. Talamelli, and M. Tartagni, "Design and characterization of polymeric pressure sensors for wireless wind sail monitoring," Jun. 2011. doi: 10.1016/j.sna.2011.02.033.

[35] S. Rodini, S. Genovesi, G. Manara, and F. Costa, "A Pressure Sensor based on Piezoresistive Loaded Electromagnetic Absorber," in *2022 IEEE 12th International Conference on RFID Technology and Applications, RFID-TA 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 194–196. doi: 10.1109/RFID-TA54958.2022.9923961.

[36] Y. Huang, X. Fan, S. C. Chen, and N. Zhao, "Emerging Technologies of Flexible Pressure Sensors: Materials, Modeling, Devices, and Manufacturing," Mar. 21, 2019, *Wiley-VCH Verlag*. doi: 10.1002/adfm.201808509.

[37] P. Song *et al.*, "A novel piezoresistive MEMS pressure sensors based on temporary bonding technology," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 2, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20020337.

[38] B. Tian, H. Shang, and W. Wang, "Research on Temperature Zero Drift of SiC Piezoresistive Pressure Sensor Based on Asymmetric Wheatstone Bridge," *Silikon(2922)*, Aug. 2021, doi: 10.1007/s12633-021-01330-x/Published.

[39] A. Nallathambi, T. Shanmuganantham, and D. Sindhanaiselvi, "Design and Analysis of MEMS based Piezoresistive Pressure sensor for Sensitivity Enhancement," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2018, pp.

1897–1903. doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.291.

[40] S. Zeng *et al.*, "A Novel High-Temperature Pressure Sensor Based on Graphene Coated by Si3N4," *IEEE Sens J*, vol. 23, no. 3, pp. 2008–2013, Feb. 2023, doi: 10.1109/JSEN.2022.3232626.

[41] S. S. Kumar and B. D. Pant, "Effect of piezoresistor configuration on output characteristics of piezoresistive pressure sensor: an experimental study," *Microsystem Technologies*, vol. 22, no. 4, pp. 709–719, Apr. 2016, doi: 10.1007/s00542-015-2451-5.

[42] Z. Niu, Y. L. Zhao, B. Tian, and F. F. Guo, "Comparative Study of a High Pressure Sensor with Rectangular Diaphragm," Apr. 2013.

[43] L. B. Zhao, Y. L. Zhao, and Z. D. Jiang, "Design and fabrication of a piezoresistive pressure sensor for ultra high temperature environment," *J Phys Conf Ser*, vol. 48, no. 1, pp. 178–183, Oct. 2006, doi: 10.1088/1742-6596/48/1/033.

[44] J. Akhtar, B. B. Dixit, B. D. Pant, and V. P. Deshwal, "Polysilicon piezoresistive pressure sensors based on mems technology," *IETE J Res*, vol. 49, no. 6, pp. 365–377, 2003, doi: 10.1080/03772063.2003.11416360.

[45] X. Han *et al.*, "Advances in high-performance MEMS pressure sensors: design, fabrication, and packaging," Dec. 01, 2023, *Springer Nature*. doi: 10.1038/s41378-023-00620-1.

[46] V. Belwanshi, S. Philip, and A. Topkar, "Gamma Radiation Induced Effects on the Performance of Piezoresistive Pressure Sensors Fabricated Using Different Technologies," *IEEE Trans Nucl Sci*, vol. 66, no. 9, pp. 2055–2062, Sep. 2019, doi: 10.1109/TNS.2019.2931777.

[47] R. H. Krondorfer and Y. K. Kim, "Packaging effect on MEMS pressure sensor performance," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 30, no. 2, pp. 285–293, Jun. 2007, doi: 10.1109/TCAPT.2007.898360.

[48] M. Alghrairi, B. A. K. Farhan, H. M. Ridha, S. Mutashar, W. Algriree, and B. M. Sabbar, "Advancing healthcare through piezoresistive pressure sensors: a comprehensive review of biomedical applications and performance metrics," Sep. 01, 2024, *Institute of Physics*. doi: 10.1088/2399-6528/ad7d5d.

[49] B. Song, F. Li, F. Zhu, and S. liu, "High reliability of piezoresistive pressure sensors by wafer to wafer direct bonding at room temperature," *Sens Actuators A Phys*, vol. 364, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.sna.2023.114834.

[50] S. Büttgenbach, I. Constantinou, A. Dietzel, and M. Leester-Schädel, "Piezoresistive Pressure Sensors," in *Case Studies in Micromechatronics*, Springer Berlin Heidelberg, 2020, pp. 21–85. doi: 10.1007/978-3-662-61320-7_2.

[51] T. Beutel, M. Leester-Schädel, and M. Sinapius, "Novel Pressure Sensor for Aerospace Purposes." [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/225025778

[52] Y. Su, K. Ma, X. Mao, M. Liu, and X. Zhang, "Highly Compressible and Sensitive Flexible Piezoresistive Pressure Sensor Based on MWCNTs/Ti3 C2 Tx MXene @ Melamine Foam for Human Gesture Monitoring and Recognition," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 13, Jul. 2022, doi: 10.3390/nano12132225.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1062-1082 (2025)

AM/FM Radyo Sistemleri için Otomotiv Aktif Çubuk Anten Tasarımı

Olcay YİĞİT[1*]

[1]*Ege Universitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/11/2024
Düzeltme: 17/04/2025
Kabul: 29/04/2025

Anahtar Kelimeler

Otomotiv Antenleri,
Çubuk antenleri,
AM/FM radyo sistemleri

Article Info

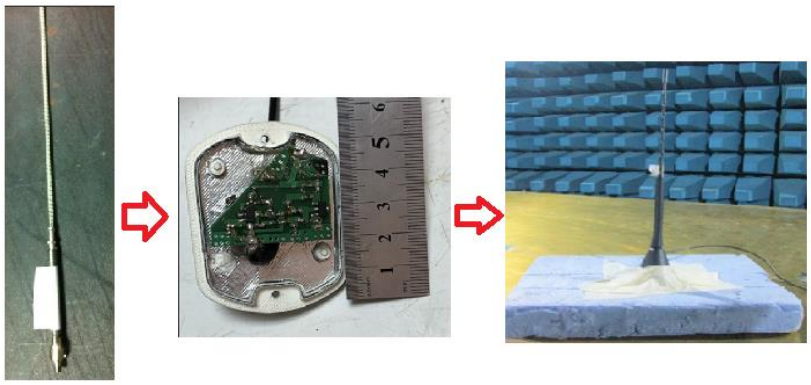
Research article
Received: 23/11/2024
Revision: 17/04/2025
Accepted: 29/04/2025

Keywords

Automotive antennas,
Rod atennas,
AM/FM radio systems

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

AM ve FM bantlarında çalışan, 1.2 dB gürültü seviyesine sahip bir yükseltici ile donatılmış 40 cm boyunda bir çubuk anten tasarlanmıştır. Helisel yapı sayesinde rezonans frekansı 180 MHz ve şerit boyunun anten boyundan uzun olması sayesinde kapasitif giriş empedansı düşürülmüştür.



Şekil A: *Aktif anten sistemi /* ***Figure A****: Active antenna system*

Önemli noktalar (Highlights)

- *AM ve FM system sinyalleri tek bir aktif bir anten ile alıcıya iletilir./ AM and FM system signals are transmitted to the receiver via a single active antenna*
- *Ticari satılan yükselticiler kullanmak yerine anten empedansına uyumlu bir yükselticinin tasarlanması verimi artırmıştır ve ses kalitesi yükselmiştir. / Designing an amplifier matched to the antenna impedance, instead of using commercially available amplifiers, has improved efficiency and enhanced sound quality.*
- *Rezonansa gireceği boyutlardan daha küçük 40 cm boyunda estetik bir anten taasarlanmıştır. / "An aesthetically designed antenna measuring 40 cm in length has been developed, which is smaller than the dimensions required for resonance.*

Amaç (Aim): *Araç gereksinimi için belirlenen boyutlarda anten ile AM/FM radio sistemlerini kullanabilmek için aktif anten tasarlamak. To design an active antenna that enables the use of AM/FM radio systems within the antenna dimensions specified for vehicle requirements.".*

Özgünlük (Originality): *Aktif anten bölümleri olan radyasyon yapan çubuk ve yükseltici tasarımı gerekli kritirlere uyması için özgün tasarlanmıştır. Yerleştirilecek yer sınırlı olduğu için anten çubuğunun altında kalan bölümde bulunan yükseltici tek kart üzerinde iki system sinyallerini yükseltebilmektedir. The radiation rod and amplifier components of the active antenna have been uniquely designed to meet the required criteria. Due to limited installation space, the amplifier is located beneath the antenna rod, enabling it to amplify both system signals on a single circuit board.*

Bulgular (Results): *40 cm boyunda helisel şekilde tasarlanan çubuk anten 108 sargı sayısı ile en verimli hale gelmiştir. Bu boyutlardaki çubuk anten ile empedans ve kazanç değerleri hesaplanmış ve buna göre FM yükseltici 10 dB kadar AM yükseltici 2 dB kadar yükseltmesi yeterli olmuştur. A helical-shaped dipole antenna, measuring 40 cm in length and consisting of 108 turns, has been found to be most efficient. Impedance and gain values for this antenna have been calculated, indicating that an FM amplifier requires a gain increase of 10 dB, while an AM amplifier needs a 2 dB increase to achieve optimal performance.*

Sonuç (Conclusion): *40 cm boyunda aktif anten tasarlanmış ve araç üstü testleri yapılmıştır. Testler sonucunda gereksinimlerin karşılnandığı anlaşılmıştır. A 40 cm active antenna has been designed, and vehicle-mounted tests have been conducted. As a result of these tests, it has been measured that the requirements are met.*

*Corresponding author, e-mail: olcyygt@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1590314

GU J Sci, Part C, 13(3): 1062-1082 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

AM/FM Radyo Sistemleri için Otomotiv Aktif Çubuk Anten Tasarımı

Olcay YİĞİT[1*]

[1]*Ege Universitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/11/2024
Düzeltme: 17/04/2025
Kabul: 29/04/2025

Anahtar Kelimeler

Otomotiv Antenleri,
Çubuk antenleri,
AM/FM radyo sistemleri

Öz

Bu makalede, otomobil antenlerinin tarihsel gelişimi araştırılmış ve günümüz akıllı anten tasarımlarının önemi incelenmiştir. 1970'lerde kullanılan yaklaşık 1.5 metre uzunluğundaki çubuk antenlerin yerini, 1984 yılından itibaren araç camlarına entegre edilen aktif AM/FM antenler almıştır. Günümüzde ise 5-15 cm boyutlarındaki sarmal anten tasarımları; anten performansını artırmak, aerodinamik avantaj sağlamak ve elektromanyetik uyumluluk düzenlemelerine uyum sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca sayısal video yayını (SVY) ve V2X iletişim sistemleri gibi modern uygulamalara yönelik anten entegrasyonu; yüksek empedanslı amplifikatörler (15-25 dB kazanç) ve triband antenler gibi yeniliklerle desteklenmektedir. Aktif anten tasarım sürecinde, empedans uyumu, kazanç, kararlılık ve gürültü gibi parametrelerin optimize edilmesi; anten performansını ve elektromanyetik bağışıklığı artırmak için kritik öneme sahiptir. Çalışma kapsamında, AM ve FM bantlarında çalışan, 1.2 dB gürültü seviyesine sahip bir yükseltici ile donatılmış 40 cm boyunda bir çubuk anten tasarlanmıştır. Anten, araç üzerinde test edilmiş ve alınan sinyalin güç değeri Rigol Spektrum Analizörü ile ölçülmüştür. Orijinal cihazla kıyaslandığında, sinyalin gürültü seviyesinin 1 dB daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Tasarımda kullanılan helisel yapı, rezonans frekansını 180 MHz'e ayarlamış ve şerit boyunun anten boyundan uzun olması sayesinde kapasitif giriş empedansı düşürülmüştür. Bu durum, antenin performansını artıran önemli bir teknik yenilik olarak öne çıkmıştır.

Automotive Active Antenna Design for AM/FM Radio Systems

Article Info

Research article
Received: 23/11/2024
Revision: 17/04/2025
Accepted: 29/04/2025

Keywords

Automotive antennas,
rod atennas,
AM/FM radio systems

Abstract

This article examines the historical development of automobile antennas and highlights the significance of modern smart antenna designs. In the 1970s, long rod antennas approximately 1.5 meters in length were commonly used. These were replaced in 1984 by active AM/FM antennas integrated into vehicle windows. Today, spiral antenna designs ranging from 5 to 15 cm in length are widely employed to improve antenna performance, offer aerodynamic advantages, and ensure compliance with electromagnetic compatibility (EMC) regulations. The article also discusses innovations such as antenna integration for digital video broadcasting (DVB) and V2X communication systems, as well as the use of high-impedance amplifiers (typically providing 15–25 dB gain) and triband antennas. During the active antenna design process, the optimization of parameters such as impedance matching, gain, stability, and noise (typically 1–2 dB) is emphasized as critical for enhancing antenna performance and electromagnetic immunity. As part of the study, a 40 cm rod antenna was designed, equipped with an amplifier operating in the AM and FM bands with a noise figure of 1.2 dB. The antenna was tested on a vehicle, and the received signal strength was measured using a Rigol Spectrum Analyzer. It was observed that the signal's noise level was 1 dB lower compared to the original device. The helical structure used in the antenna design set the resonance frequency at 180 MHz. Moreover, the use of a strip length longer than the antenna's physical length reduced the capacitive input impedance, contributing to improved performance through this key technical innovation.

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Literatürde yer alan otomobil elektronik parça patentlerinden anten tasarımları, yıllar içinde evrimleşerek daha estetik ve kullanışlı hâle gelmiştir. Ancak, bireysel anlamda antenin elektriksel performansında düşüş gözlemlenmiştir. Buna karşın, otomobilin genel performansının arttığı ve tasarımsal kusurların azaldığı belirtilmektedir. Araç hareket hâlindeyken antenin kıvrılması, titremesi ve rüzgâra karşı ses üretmesi gibi sorunlar, yeni tasarım kriterleri sayesinde

*Corresponding author, e-mail: olcyygt@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1590314

büyük ölçüde giderilmiştir. Bu nedenle, yeni nesil akıllı anten tasarımları büyük ilgi görmüş ve son on yılda bu alanda birçok yenilik ortaya çıkmıştır. Bu tasarımlar; anten sürüklenmesini azaltmayı, araç ağırlığını düşürmeyi ve elektromanyetik uyumluluk (EMC) düzenlemelerini karşılamayı hedefleyerek hem aerodinamik performansı hem de güvenilirliği artırmayı amaçlamaktadır [1-3].

Başlangıçta, uzunluğu 80 ila 100 cm arasında değişen çubuk antenler otomobillerde yaygın olarak kullanılıyordu. Ancak, 1970'lerin başında özellikle 40 cm uzunluğundaki aktif çubuk antenler, düşük maliyetleri ve yeterli performansları nedeniyle tercih edilmeye başlanmıştır. Bu antenler aynı zamanda estetik beklentileri karşılamak, rüzgâr sesini azaltmak ve sağlamlığı artırmak amacıyla da geliştirilmiştir [4-6].

Teknolojik ilerlemelerle birlikte otomobillerde kullanılan anten tasarımları önemli değişiklikler geçirmiştir. 1984 yılından itibaren aktif AM/FM antenleri, ince teller veya cam ısıtıcı hatlarını anten elemanı olarak kullanarak ön camlara entegre edilmiştir. Son yıllarda ise anten uzunluklarının kısaltılması amacıyla sarmal yapılar tercih edilmekte, bu yapılar etkin anten yüksekliği ve empedansla ilgili sorunların aşılmasına katkı sağlamaktadır [7]. Literatürde, Sayısal Video Yayını (SVY) için geleneksel AM/FM antenleriyle entegrasyon önerileri sunulmuş ve DAB-VHF ile DAB-L Band alımı için sarmal anten tasarımları üzerinde durulmuştur. Hem FM hem de DAB sinyallerini destekleyen tek bir amplifikatör tasarımıyla, yüksek empedanslı amplifikatörlerin performans, gürültü ve intermodülasyon davranışları detaylı olarak incelenmiştir. Bu tasarımların kablosuz iletişim sistemleriyle uyumlu hâle getirilmesinin önemli avantajlar sunduğu vurgulanmıştır [8].

Bir başka çalışmada yeni bir AM/FM ve mobil iletişim (MT) üç bantlı anten tasarımı sunulmuştur. Bu tasarımda çift kılıf kullanılarak bobinler entegre edilmiş ve ölçülen akım dağılımı ile iyi bir uyum sağlandığı görülmüştür. Çift kollu üç bantlı antenin iyi bir ışımaya sahip olduğu, ışıma desenleri ile Voltaj Durağan Dalga Oranı (VSWR) değerlerinin tasarım kriterlerini karşıladığı belirtilmiştir. Ayrıca bu antenin V2X iletişimi için de uygun olduğu ve iletişim mesafesinin 995 ile 1329 metre arasında değiştiği rapor edilmiştir [9].

V2X iletişim sisteminin mimarisi ve anten tasarımı hakkında da literatürde çeşitli bilgiler yer almaktadır. V2X iletişimi; araçtan altyapıya (V2I), araçtan araca (V2V), araçtan yayaya (V2P) ve araçtan ağa (V2N) veri aktarımı yaparak araçlara yol durumu ve çevredeki araçlar hakkında bilgi sağlamaktadır. Bu sistem, trafik akışını düzenlemeye, yaya güvenliğini artırmaya ve sürüş esnasında oluşabilecek riskleri önceden tahmin etmeye yardımcı olmaktadır. V2X iletişimi için 5.850 GHz–5.925 GHz frekans aralığı kullanılmakta olup, bu sistemlerde kullanılan antenlerin çok yönlü ışıma desenine sahip olması gerekmektedir [10].

İncelenen çalışmalarda, AM/FM yayın (BC) ve cep telefonları (MT) için otomobillerde kullanılan üç bantlı anten tasarımları da ele alınmıştır. MT antenleri için başlıca gereksinimler; geniş ışıma modeli, yönlülük, kazanç ve uzunluktur. Bobinli üç bantlı antenlerin mekanik olarak zayıf yapıda oldukları ve uzunluk arttıkça istenilen özellikleri sağlamanın zorlaştığı belirtilmiştir. Bu nedenle, AM/FM BC ve MT sistemleri için geliştirilen üç bantlı antenler, anten sayısını azaltmak ve performansı artırmak amacıyla yeniden tasarlanmıştır [11-12].

Başka bir çalışmada ise 100 MHz'de empedans uyumu sağlamak amacıyla yüksek empedanslı bir amplifikatör tasarımı sunulmuştur. Bu sorunun çözümü için aktif anten kullanımı önerilmiş; tasarımda doğrudan bir amplifikatörle beslenen anten ucunun optimize edilerek yüksek giriş empedansı elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede anten geriliminden maksimum güç alınabilmekte ve sistem bir empedans dönüştürücü olarak radyo alıcısı işlevi görebilmektedir [13].

Literatürde farklı bir anten tipi olan Dörtgen Sarmal Anten (QHA) tasarımı üzerinde de durulmuştur. Bu anten türü; Düşük Dünya Yörüngesi'ndeki (LEO) uydularla iletişim, küresel konumlama sistemleri (GPS) ve uydu tabanlı cep telefonları için uygundur. QHA, kardioid şekilli ışıma deseniyle iyi dairesel polarizasyon sunarken, geniş bant özellikli uygulamalar için yeterli bant genişliğine sahip olmaması temel bir sorundur. Bu sorunu çözmek için çeşitli teknikler önerilmiş olsa da her yöntemin belirli sınırlamaları bulunmaktadır [14].

Günümüzde çoğu otomobil, yol durumunu takip etme, dış dünya ile iletişim kurma (örneğin mobil cihazlarla), bilgi-eğlence sistemleri, sürücü konforu ve güvenliğini artırma ve otonom sürüş deneyimi gibi birçok işlevi yerine getirmektedir. Bu işlevler için uygun antenlerin kullanımı zorunlu hâle gelmiş ve tasarımlarda müşteri ihtiyaçları ile teknik gereksinimlere odaklanılmıştır [15].

Bu çalışmada, 40 cm uzunluğunda bir sarmal anten ile yüksek giriş empedanslı bir amplifikatör (YEA) tasarımı sunulmuştur. AM/FM bantlarında çalışan bu tasarımın farklı aktif anten uzunluklarıyla uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Makale kapsamında, araçlarda kullanılan aktif antenlerin elektromanyetik uyumluluk düzenlemeleri ile uyumlu hâle getirilmesi ve elektromanyetik bağışıklık testlerinde performanslarının artırılması hedeflenmiştir. Ayrıca intermodülasyon etkilerinin belirlenmesi ve bu etkilerin bastırılması amacıyla yapılan deneysel bir çalışma da sunulmuştur. Yayılan bağışıklık testleri sırasında aktif antenlerin performansının optimize edilmesi, gelecekteki anten tasarımları açısından kritik öneme sahiptir.

Bu süreçte anten performansına yönelik yapılan testler ve ölçümler büyük rol oynamaktadır. Özellikle aracın gövde boyutunun, elektromanyetik uyumluluk testleri ve anten performansı üzerinde belirleyici bir etken olduğu gözlemlenmiştir. Aktif antenlerin elektromanyetik bağışıklık koşullarındaki etkileri araştırılarak, anten sağlamlığını artırmaya yönelik çeşitli iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Deneysel ve Teorik Metod (Experimental and Theoritical Method)

Saçılma parametreleri, bir sisteme giren, sistemden yansıyan ve sistem içinde iletilen sinyaller arasındaki oranları ifade eder. Bu parametreler sayesinde, sistemdeki empedans uyumu ve çıkış sinyali büyüklüğü gibi değişkenler kolaylıkla analiz edilebilir. Denklem 1'deki "+" ve "–" işaretleri, sisteme giren ve çıkan sinyalleri belirtirken; 1 ve 2 numaralı indisler sırasıyla giriş ve çıkışı ifade eder.

Saçılma parametreleri Denklem (1) ile hesaplanır:

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1+} \\ V_{2+} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{1-} \\ V_{2-} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Giriş ve çıkışlardaki gelen ve yansıyan sinyaller ölçülerek saçılma parametreleri hesaplanabilir. Bu ölçümler sonucunda dört bilinmeyenli dört denklem elde edilir. "1" indisine sahip parametrenin mutlak değeri, geri dönüş kaybı olarak adlandırılır. Bu değerin düşük olması, geri yansıyan sinyalin küçük olduğunu ve empedans uyumunun sağlandığını gösterir. "21" ve "12" parametreleri, iletimin ya da geri iletimin kazançlı mı yoksa kayıplı mı gerçekleştiğini belirtir. Bu parametreler, sistemin gereksinimlerine göre optimize edilir. "22" parametresinin mutlak değeri ise çıkış geri dönüş kaybını ifade eder ve çıkışın empedans uyumu hakkında bilgi verir.

Yükseltici tasarımı gibi birçok elektronik uygulamada, gürültü önemli bir etkendir. Gelen sinyalin içerdiği gürültünün yanı sıra, elektronik sistemin kendisinin oluşturduğu gürültü de iletilmek istenen sinyali olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, sinyal bozulmalarını önlemek için gürültü seviyesinin doğru şekilde hesaplanması ve belirlenen sınırlar içinde tutulması gereklidir. Temel gürültü türleri arasında flicker (alçak frekanslı) gürültü ve termal (ısıl) gürültü bulunur.

Sistemin kararlı olması, çalışma frekansı dışında başka frekanslarda sinyal üretmemesi veya istenmeyen sinyaller oluşturmaması açısından kritiktir. Kararlılık durumu, saçılma parametrelerinden elde edilen bir fonksiyonun tüm frekans aralığında 1'in üzerinde olmasıyla anlaşılır.

$$K = \frac{1-|S_{11}|^2-|S_{22}|^2+|\Delta|^2}{2|S_{21}S_{12}|} \quad (2)$$

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} \quad (3)$$

Denklem 2, saçılma parametreleri kullanılarak sistemin kararlılık katsayısını hesaplamaktadır. Denklem 3 ise, Denklem 2'de kullanılan delta değişkeninin formülünü göstermektedir. Frekansa bağlı olarak elde edilen sonuçların 1'in üzerinde olması, sistemin kararlı olduğunu gösterir. Kararlılık, istenmeyen frekanslardaki sinyallerin kendiliğinden üretilmediği ve zamanla sapma yaşanmadığı anlamına gelir.

İç modülasyon, sisteme giren iki farklı frekanstaki sinyalin etkileşerek başka frekanslarda sinyaller üretmesini inceleyen bir parametredir. Bu çarpışma sonucu oluşan sinyallerin büyüklüğü arttıkça, veri sinyalleri etkilenir ve iletimde bozulmalar meydana gelir. Test amacıyla iki farklı sinyal kaynağı kullanılarak, birbirine yakın frekanslarda iki sinyal yükselticiye gönderilir. Ardından spektrum analizörü ile sinyalin frekans aralığındaki tepkisi gözlemlenir. Ana sinyaller frekans ekseninde görünür ve bu frekans bandı dışında, yakın frekanslarda belirli güç seviyelerinde yeni sinyaller oluşur. Bu sinyallere "kulak sinyalleri" denir. Bu sinyallerin büyüklüğü, ana sinyali etkileyebileceği için kritik öneme sahiptir ve belirli bir eşik değerin altında olması istenir.

Aktif anten tasarımı, aşağıdaki alt başlıklar altında özetlenmiştir:

Pasif Anten Ölçümleri: Monopole antenin FM ve AM bandı için empedans ve geri dönüş kaybı ölçümleri yapılmıştır. Anten boyu kısaldıkça, FM ve AM bantlarında anten empedansı kapasitif özellik göstermektedir.

FM Bandı ve AM Bandı için Anten Eşdeğer Devrelerinin Kurulması: Antenin eşdeğer devresi; girişte paralel ve seri kapasitörlerin yanı sıra bir uyumlama direncini içeren bir yapı olarak tasarlanmıştır.

FM Yükseltici ve AM Yükseltici: FM yükseltici devresi, BFQ19 transistörü kullanılarak tasarlanmıştır. Besleme devresi ile giriş ve çıkış empedansları uyumlu hale getirilmiştir. AM bandında ise, antenin yüksek kapasitif etki göstermesi nedeniyle MOSFET transistör kullanımı avantajlı olmuştur.

Devre Yerleşimi ve Gerçekleştirilmiş Devreler: Tasarlanan devrelerin baskı devre kartına (PCB) yolları çizilmiş ve devreler kart üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada yolların uzunluğu, kalınlığı ve kullanılan yalıtkan malzemenin özellikleri optimize edilmiştir.

Sonuçlar: Tasarlanan devrelerin simülasyon ve ölçüm sonuçlarına dayanarak amplifikatörlerin performansı değerlendirilmiştir.

Aktif Antenin Son Hali: Tasarlanan anten dış kısmı makaronla kaplanmış ve anten tabanına yerleştirilmiştir.

Bu süreçte, tasarlanan devrelerin performanslarını optimize etmek ve ölçümlemek için kapsamlı bir yaklaşım benimsenmiştir. Böylece, devrelerin kullanılacakları uygulamalara uygun şekilde geliştirilmesi ve performanslarının doğru biçimde değerlendirilmesi sağlanmıştır. Öncelikle, hâlihazırda tasarlanmış 40 cm boyunda bir antenin ölçümleri yapılmış ve yeni tasarlanacak antenin gereksinimleri belirlenmiştir. Monopole anten ölçümleri, toprak plakası üzerine dikey yerleştirilen düz bir çubuk ile gerçekleştirilmiştir. "Network Analyzer R&S ZVA40" cihazı ile FM ve AM bantları için giriş empedansları ve geri dönüş kayıpları ölçülmüştür. Şekil 3'te antenin FM bandı için göstermiş olduğu S11 değeri sunulmuştur.

Aktif anten tasarımına geçmeden önce, tasarımda kullanılan iki elektronik sistemin elektriksel özelliklerini ve sistemdeki görevlerini açıklamak daha doğru olacaktır. Bu sistemler; elektromanyetik dalgayı hava ortamı gibi kablosuz bir ortamdan alarak, iletken bir sistem üzerinde elektrik akımına dönüştüren pasif bir anten ile bu sinyali belirli bir şiddete yükselten yükseltici elektronik devreden oluşmaktadır.

Pasif anten tasarımı, alınan sinyalin frekansında rezonansa girebilmesi ve ortamdaki sinyali kendi kazancı ile en verimli şekilde alabilmesi amacıyla gerçekleştirilir. Antenin istenilen rezonans frekansında çalışabilmesi için dalga boyu dikkate alınarak antenin şekli ve boyutları hesaplanır. Bu bağlamda, anten kazancı, yarım güç ışıma açısı, ışıma yönü, giriş empedansı ve geri dönüş kaybı gibi parametreler anten tasarımında önemli kriterlerdir.

Yükseltici tasarımında ise kazanç, giriş ve çıkış empedans değerleri, maksimum giriş gücü, intermodülasyon oranı, geri dönüş kazancı, gürültü ve kararlılık gibi parametreler dikkate alınması gereken unsurlardır.

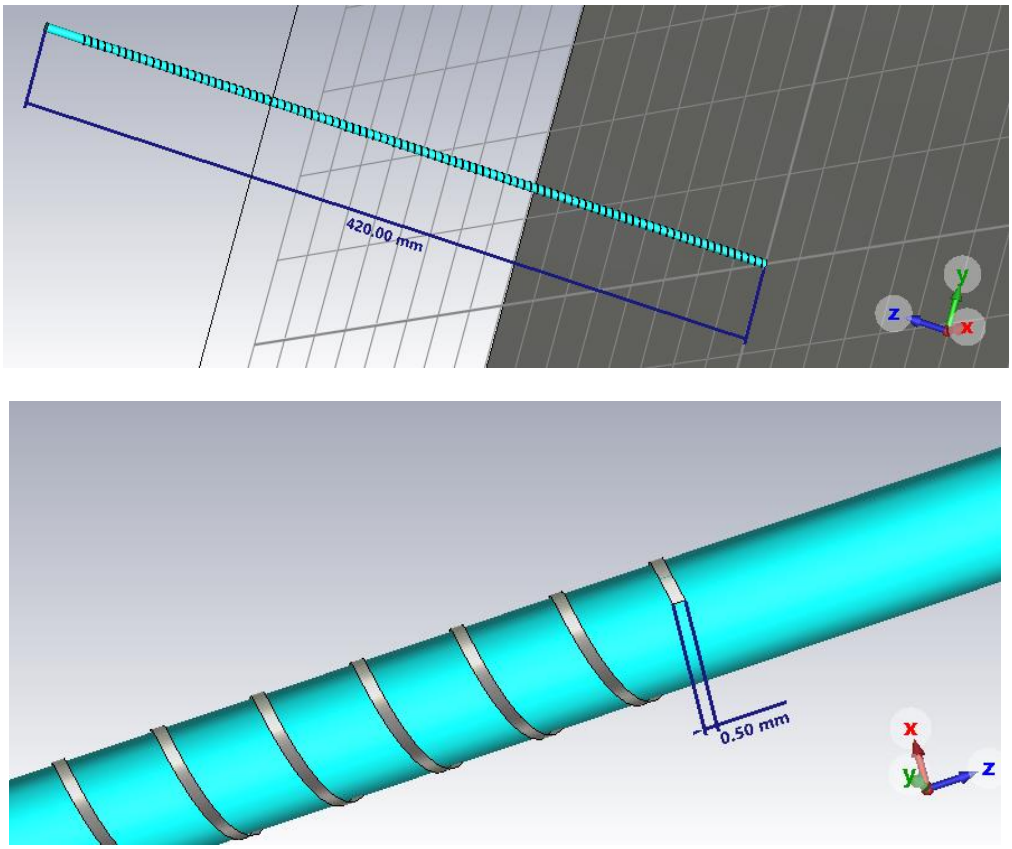
2.2. **Anten Tasarımı** (Antenna Design)

Helisel anten, antenin bulunduğu doğrunun normal yönünde ve normale dik yönde ışıma yapmasına göre ikiye ayrılır. Burada tasarlanmış anten yatay açıda 360 derece ışıma yapan tek kutuplu anten gibi çalışmaktadır. Helisel yapıda olması iletken telin daha uzun olmasını sağlamış ve böylece boyunun kısa olmasından dolayı giriş empedansında gözlenen kapasitif etkiyi azaltarak daha düşük frekanslarda rezonansa girmiştir.



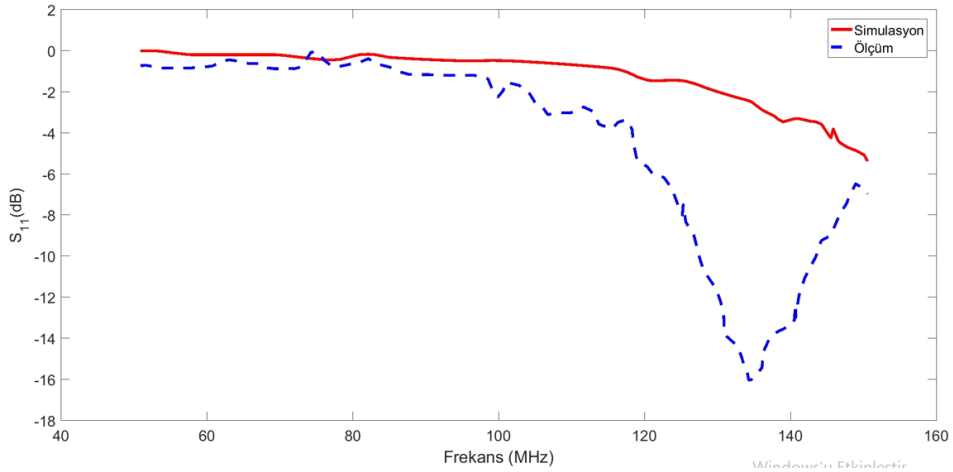
Şekil 1. Çubuk anten (Rod antenna)

Şekil 1'de gösterilen çubuk anten, dielektrik katsayısı 2.2 olan teflon malzeme etrafına sarılmış iletken bir şerit ile oluşturulmuştur. Bu anten, simülasyonda tasarlandığı şekilde toplam 40 cm uzunluğunda helisel yapıda bir antendir. Tasarımın gerçekleştirilmesi sırasında, teflon çubuk, kendi etrafında döndürülerek kaydıran bir mekanizmaya yerleştirilir. Bu mekanizma sayesinde çubuk dönerken, metal şerit çubuğa sarılır. Anten tasarımında sarmal yapı, iletkenin boyunun uzamasına neden olur; böylece kapasitif etki azalır ve rezonans frekansı düşer. Metalik şerit, metal çubuğa 107 tur olacak şekilde sarılmış olup, şerit genişliği 0,5 mm'dir.



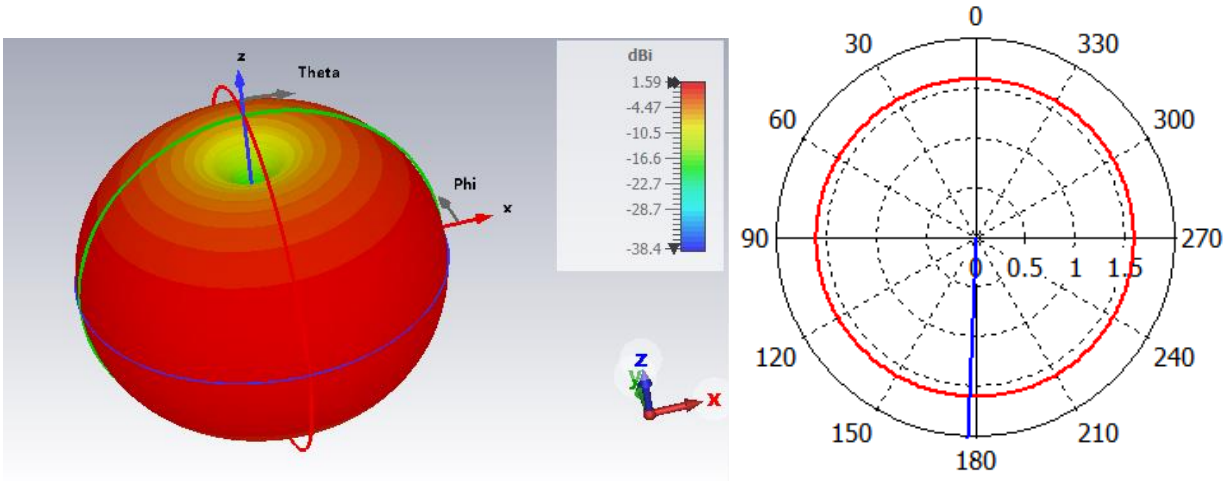
Şekil 2. Anten tasarımı similasyonu (Simulation of antenna design)

Şekil 2'de anten tasarımının 3 boyutlu çizimi görülmektedir. Burada, "Computer Simulation Tool" programı kullanılarak helisel yapıda bir anten tasarlanmış ve simüle edilmiştir. Antenin şerit kalınlığı w=0.5mm sarmal arası boşluk s=1.5 mm ve toplam boyu 40 cm'dir. Simülasyonda, frekans aralığı çalışma frekans aralığından daha geniş seçilmiştir. Simülasyonun önemli bir parametresi olan ayrıklama sayısı (mesh number) çizime göre ayarlanmıştır. Sistem frekansındaki kaymaları gözlemlemek ve diğer frekanslarda rezonans durumunu incelemek amacıyla, çalışma frekansından daha geniş bir frekans aralığında sonuçlar incelenmiştir. Ayrıklama sayısının uygun seçilmesi, simülasyon sırasında 3 boyutlu cismin küçük ayrıntılarının da analize dahil edilmesini sağlar. Küçük ayrıntılar, kuplaj ve kısa devre gibi özelliklerin belirlenmesinde önemli rol oynar, bu nedenle yanlışlık analizi başka bir sonuca taşınabilir.



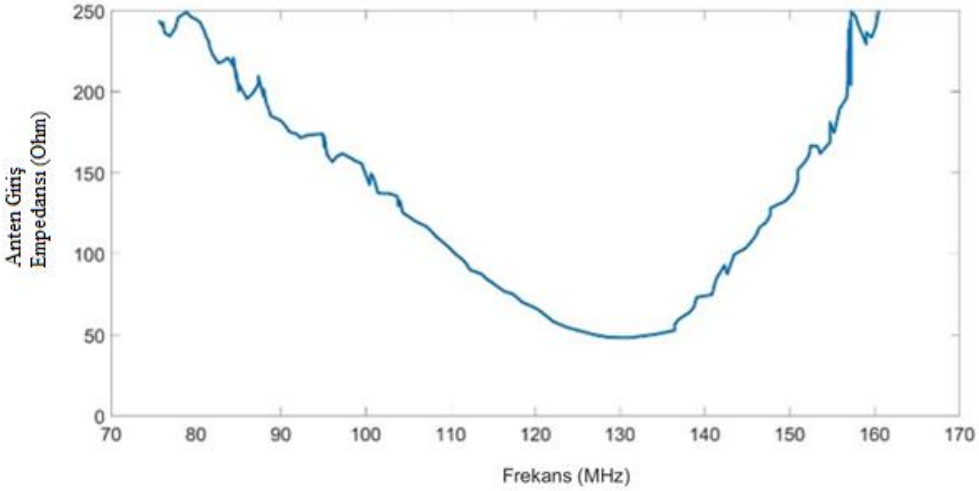
Şekil 3. Antenin similasyon ve prototip saçılma parametre(S_{11})ölçüm sonucu (Return loss values of realized antenna and simulation antenna)

Şekil 3'te, simülasyon sonuçları ile gerçekleştirilen antenin S11 değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. 135 MHz, rezonans frekansı olarak gözlemlenmiştir ve bu değer, ilgili anten boyu için beklenen bir sonuçtur. Antenin fiziksel yüksekliğinin azaltılması, rezonans frekansının artmasına neden olur. Bu durum, anten tasarımında dikkate alınması gereken önemli bir parametredir.



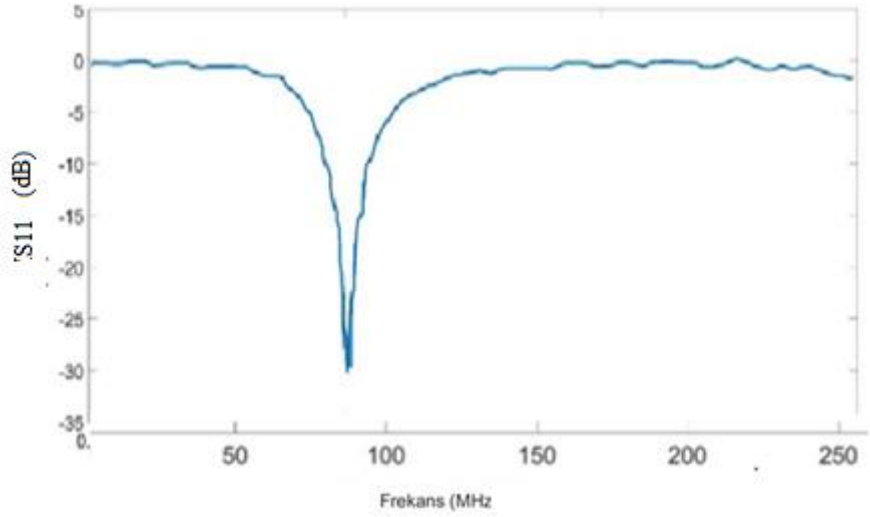
Şekil 4. Antenin 3 boyutlu ışıma şekli ve polar grafikte ışıma gösterim (3 dimensional radiation pattern and polar graphic)

Şekil 4, antenin ışıma yönünü ve şiddetini göstermektedir. Anten, tüm yönlere eşit şiddette ışıma yapmakta olup bu özellik, karakteristik olarak tek kutuplu bir antenin davranışını yansıtmaktadır. Bu tür antenler, yönsüz ışıma yapmaları sebebiyle belirli uygulamalarda tercih edilmektedir. Otomobil antenlerinde, estetik görünüm ve çevresel dayanıklılık öncelikli tasarım kriterlerindendir. Bu nedenle, antenin boyutları ve geometrik şekli tasarım sürecinden önce belirlenmiştir. Bu doğrultuda, standartlara uygun bir çubuk anten üretilmiş ve bu antenin giriş empedansı, kazancı gibi temel parametreleri ölçülerek değerlendirilmiştir.



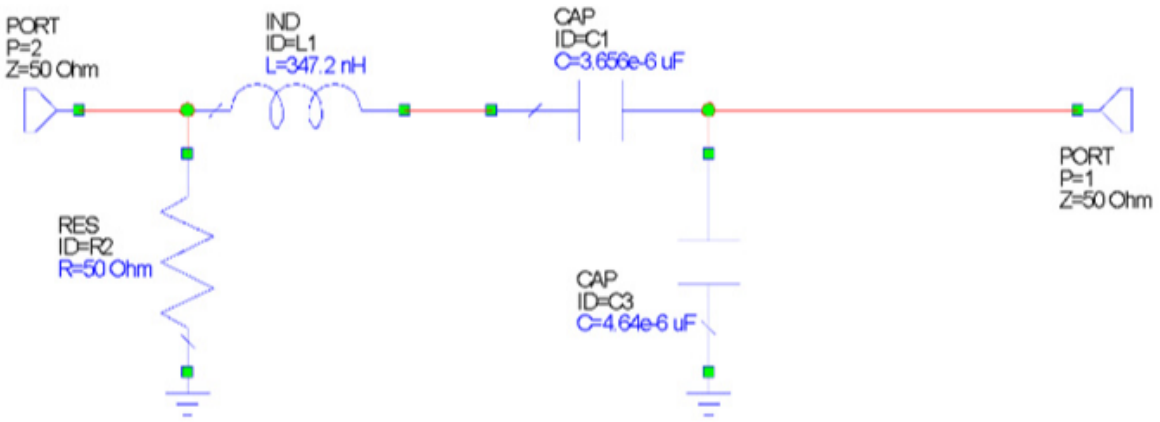
Şekil 5. Antenin frekansa bağlı giriş empedans değeri (Input impedance versus frequency)

Şekil 5'te görüldüğü üzere, antenin giriş empedansı rezonans frekansında 50 Ω değerindedir. Bu, sistemin empedans uyumu açısından ideal bir değerdir. Diğer frekanslarda ise antenin empedansı yüksek seviyelerde seyretmektedir. Şekil 3 incelendiğinde de benzer şekilde, antenin empedansının yalnızca rezonans frekansı civarında düşük olduğu, diğer frekanslarda ise yüksek empedans gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu gözlemler doğrultusunda, antenin empedans karakteristiğine uygun şekilde eşdeğer bir devre modeli oluşturulmuştur. Bu eşdeğer devre temel alınarak, anten yerine kullanılabilecek daha kompakt ve uygulanabilir bir kart tasarlanmıştır. Böylece laboratuvar ortamında antenin davranışını taklit edebilen ve test süreçlerinde kolaylık sağlayan bir devre elde edilmiştir



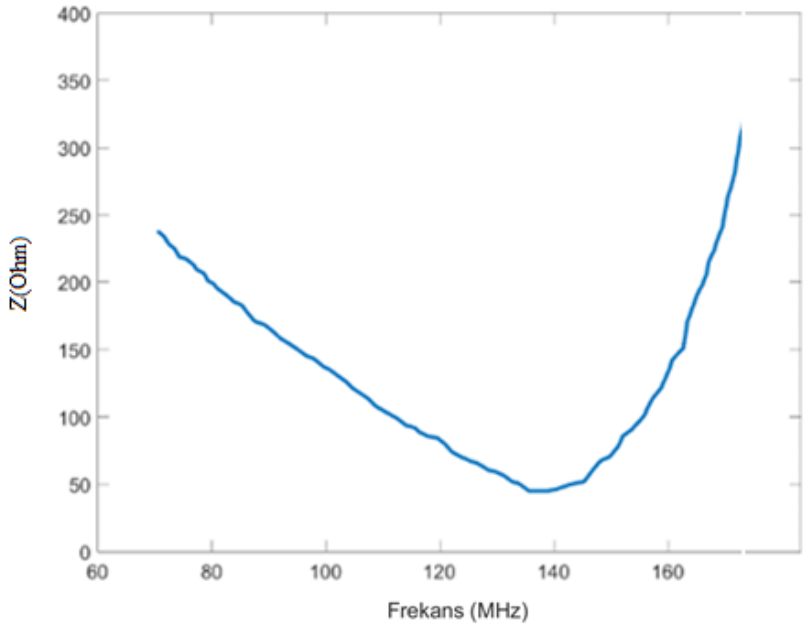
Şekil 6. Antenin FM bandında S_{11} grafiği (Return loss(S_{11}) values in FM frequency band)

Şekil 6'da sunulan grafik, Şekil 5'teki verileri doğrular niteliktedir. Şekil 5'te, 50 Ω empedans gösterilen bölgede, S11 grafiğinde rezonans durumuna geçildiği ve değerin -10 dB'nin altına düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum, antenin rezonans frekansında etkin bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Devamında, FM bandı için antenin eşdeğer devresi tasarlanmış ve bir similasyon programı kullanılarak modellenmiştir. Bu devrede, antenin kapasitif karakteristiğini yansıtmak amacıyla hem paralel hem de seri kapasitörlere yer verilmiştir. Ayrıca, devrenin giriş ve çıkış empedanslarının uyumlu hâle getirilmesi için gerekli ayarlamalar yapılmıştır. Bu ayarlamalar, kullanılan ayrık devre elemanlarının değerlerinin optimize edilmesiyle gerçekleştirilmiş ve sistemin standartlara uygun şekilde çalışması sağlanmıştır.



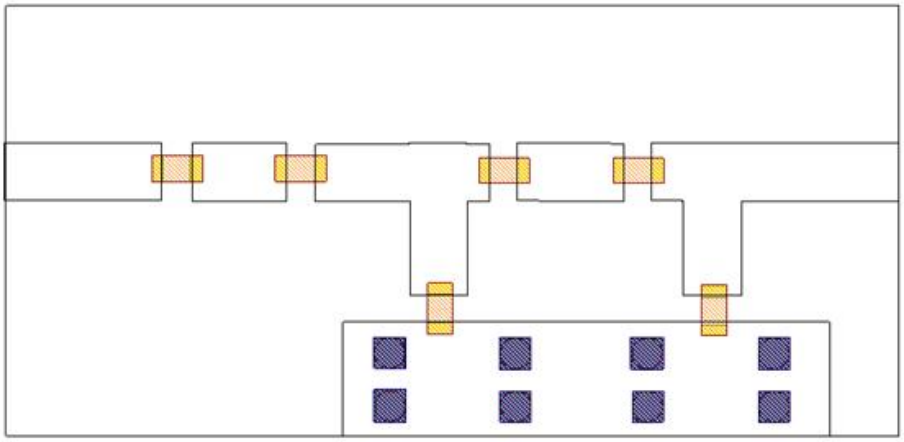
Şekil 7. FM anten eşdeğer devresi (Equivalent circuit for FM band) (L=347 nH,C1=3.656 pF, R=50, C3=4.64 pF)

Şekil 7'de, antenin eşdeğer devresine ait giriş empedansı grafiği sunulmuştur. Bu grafik, başlangıçta ölçülen anten giriş empedansıyla büyük benzerlik göstermektedir. Bu benzerlik sayesinde, eşdeğer devre, antenin yerine kullanılabilmiş ve yükselticiye kolayca entegre edilebilmiştir. Ayrıca, ölçüm sırasında giriş ve çıkış portlarıyla kolay bağlantı kurulması, hem tasarımı hem de ölçüm sürecini daha pratik ve doğru hâle getirmiştir.



Şekil 8. Eşdeğer devrenin empedans grafiği (Impedance values of equivalent circuit)

Şekil 8'de, antenin FM bandındaki eşdeğer devresi verilmiştir. Tasarım sırasında, antenin 132 MHz frekansında rezonansa girmesi ve FM bandında kapasitif davranış göstermesi dikkate alınarak, empedans değerlerinin birebir aynı olması amacıyla optimize edilmiştir. Şekil 8'de yer alan FM eşdeğer devresinde, girişte bulunan paralel ve seri kapasitörler, kapasitif etki gösteren antenin karşılığı olarak devreye dahil edilmiştir. Devrenin en sonunda yer alan paralel bağlı 50 Ω direnç ise empedans uyumlaması amacıyla eklenmiştir. Şekil 7'de, antenin FM bandındaki giriş empedansına göre tasarlanmış bir devre sunulurken; Şekil 8'de bu devreye ait giriş empedans grafiği gösterilmiştir. Bu grafik, Şekil 5'te ölçülmüş olan empedans değerleriyle yüksek uyum göstermektedir.

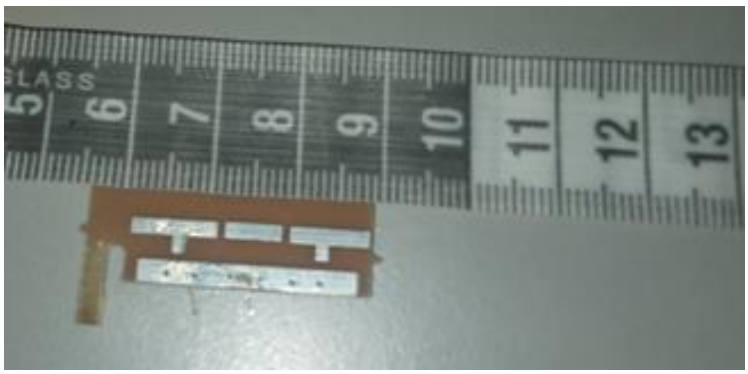


Şekil 9. Eşdeğer devrenin PCB çizim şeması (Schematic of layout of equivalent circuit)

Eşdeğer devrenin gerçekleştirilmesi amacıyla, kart üzerinde sinyal yollarını gösteren iki boyutlu bir çizim yapılmıştır. Bu çizim, Gerber uzantılı dosya formatında çıktı alınarak devre üretimi için kullanılmıştır. Kart tasarımında yollar 1 mm genişliğinde olacak şekilde belirlenmiş ve yüzeye monte edilebilir (SMD) devre elemanlarının yerleştirilebilmesi için 1 mm boşluk bırakılmıştır.

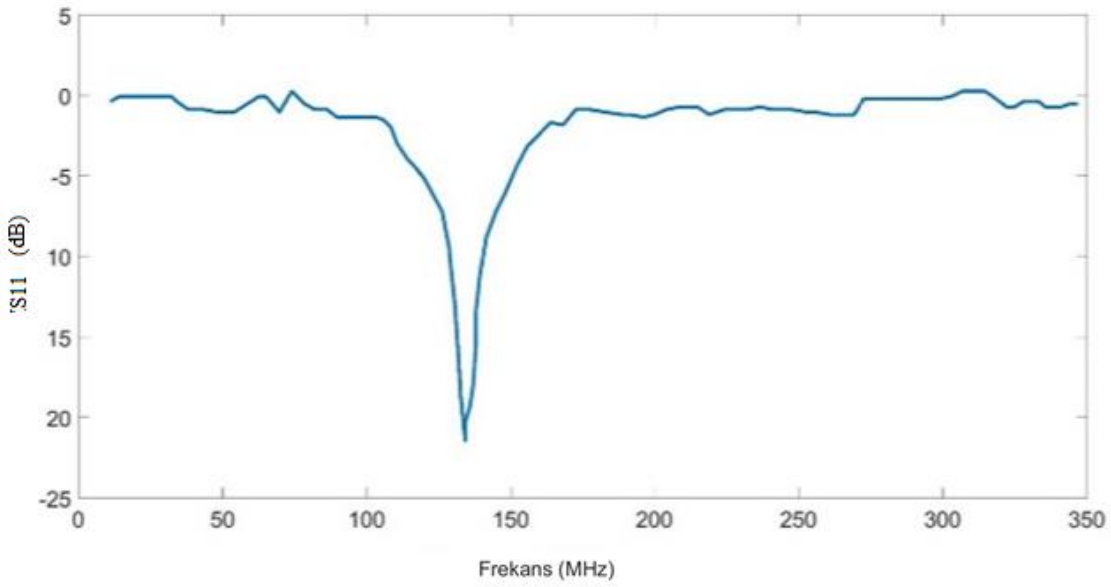
Şekil 9'da mor renk ile gösterilen bölgeler, kartın arka yüzeyine bağlantı sağlayan delikleri ifade etmektedir. Bu delikler aracılığıyla üst yüzeydeki bakır ile alt yüzeydeki bakır tabaka elektriksel olarak birbirine bağlanmakta ve bu sayede kısa devre sağlanmaktadır. Beyaz renkle gösterilen adalar sinyal hatlarını ve aralarındaki boşlukları tanımlarken, iki renkli parçalar ise yüzeye monte edilebilir devre elemanlarını temsil etmektedir.

Gerber tasarım dosyası benzetim ortamına aktarılmış ve kart yüzeyi ile birlikte devre elemanları da analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, devre elemanlarının uygun çalışması sağlanacak şekilde optimizasyon yapılmıştır. Özellikle, elemanlar arası yolların uzunluğu ve kalınlığı ile bu yolların bulunduğu yalıtkan malzemenin dielektrik katsayısı ve kayıp faktörleri, devrenin performansını etkileyen başlıca parametreler olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 10. Eşdeğer devre PCB (Realized equivalent circuit)

Şekil 10'da gösterilen eşdeğer devre, üretilmiş devre kartı üzerine dizilerek gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamada, kart üzerine yüzey montajlı komponentler lehimlenmiş ve uçlarına SMA konnektörler bağlanmıştır. Böylece, ağ analizörü cihazı ile saçılma parametreleri kolayca ölçülebilmektedir.



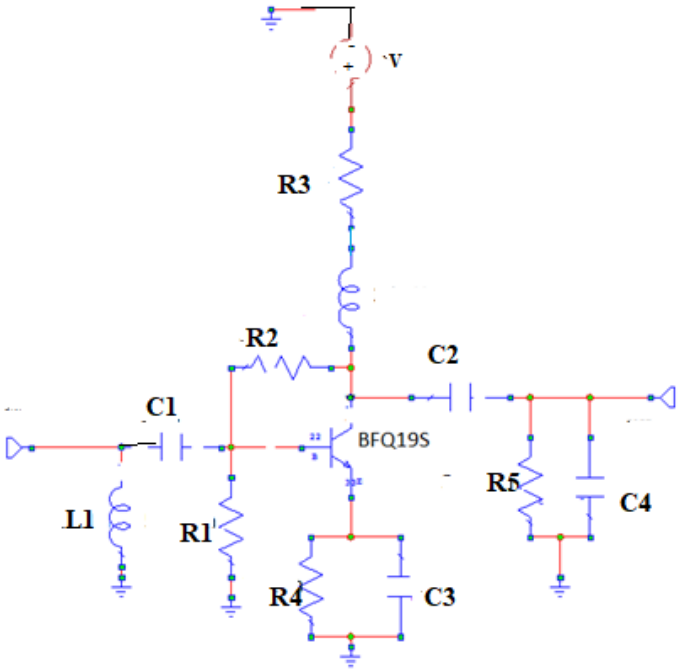
Şekil 11. Gerçekleştirilmiş devrenin S11 grafiği (Return loss(S_{11}) values of realized circuit)

Elde edilen geri dönüş kaybı (S11) değerleri temel alınarak, AM ve FM bandında çalışabilecek şekilde çıkış empedansları mikrodalga teorisi yardımıyla belirlenmiştir. Bu empedans değerlerine uygun olarak yükseltici tasarımına geçilmiştir. Ancak gerçekleştirilen prototip antenin rezonans frekansı, simülasyona kıyasla daha düşük çıkmıştır. Bu farkın temel nedeni, antenin bir taban üzerine monte edilmesidir. Tabanın yüksekliği nedeniyle antenin etkin yüksekliği artmakta ve bu da rezonans frekansını düşürmektedir.

Teorik olarak, tek kutuplu bir antenin çalıştığı frekans, o frekanstaki dalga boyunun dörtte biri kadar uzunlukta olması ile belirlenir. Araç üzerine monte edilen antenin çalışma frekansı hesaplanırken, antenin uç noktası ile monte edildiği tavan yüzeyi arasındaki toplam uzunluk esas alınır. Bu uzunluğa yalnızca antenin fiziksel boyu değil, aynı zamanda montajda kullanılan ara bağlantı aparatının boyu da dahildir. Söz konusu aparat içerisinde yer alan metal parçalar da iletken özellik gösterdiğinden, toplam anten yapısının ışımaya olan etkisini artırır. Bu nedenle, pratikte anten tasarımı ve montajı sırasında kullanılan tüm bileşenlerin elektromanyetik özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır.

2.3. Yükseltici Tasarımı (Amplifier Design)

FM yükseltici devresi de benzer bir şekilde tasarlanmış, BFQ19 transistörü kullanılarak giriş ve çıkış empedans uyumu sağlanmıştır. Besleme devresi ve uyumlamalar yapılarak devrenin kararlılık, kazanç ve gürültü gibi önemli özellikleri incelenmiştir. Şekil 12'deki yükseltici, transistorun giriş ve çıkış empedans uyumu ile tüm devrenin giriş ve çıkış empedans uyumu göz önüne alınarak tasarlanmıştır. Devrenin çıkış empedansı 50 Ω'a uyumlu ve giriş empedansı pasif antenin çıkış empedansına uyumludur.



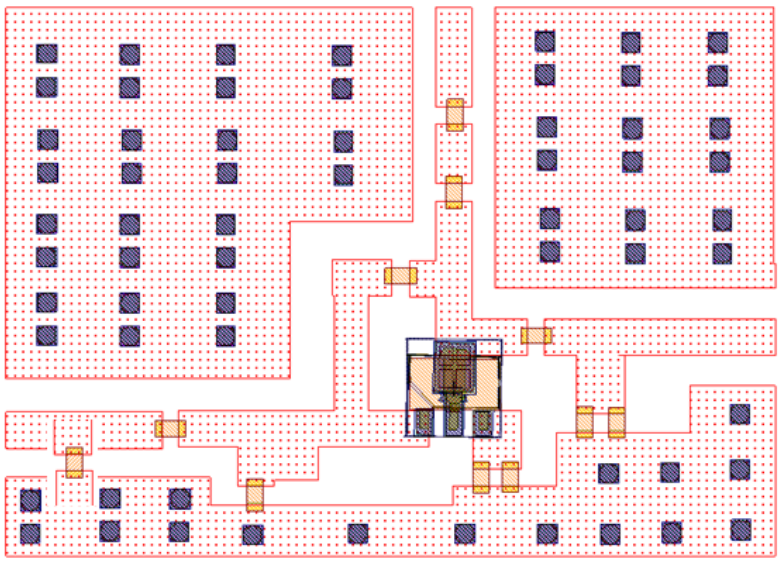
Şekil 12. FM yükselticinin devre şeması (Circuit schematic of FM amplifier)

Şekil 12'de FM bandı için BFQ19 transistörü ile bir yükseltici devresi gösterilmiştir. Bu devrede, tasarım işlem sırasına göre ilk adım olarak transistörün çalışmasını sağlayan bir besleme devresi kurulmuştur. Ardından, bu besleme devresiyle giriş ve çıkış empedans değerleri belirlenmiş ve bu değerlere uygun olacak şekilde giriş ve çıkış uyumlama devreleri tasarlanmıştır.

Besleme hattında bulunan bobin, radyo frekans (RF) sinyalinin DC hattına gitmesini engellerken, RF hattındaki kapasitör ise besleme hattının RF hattında dolaşmasını önlemek için kullanılmıştır. Devrenin giriş ve çıkış empedans değerlerine ulaşılırken, kazanç, kararlılık, iç modülasyon ve gürültü gibi kritik parametreler göz önünde bulundurulmuştur. Bu değerlerin belirli sınırlar içinde olması, alınan sinyalin kaliteli bir şekilde iletilmesi için gereklidir.

400 Ω'luk bir direnç, düşük frekanslarda sistemi kararlı hale getirmek için önemli bir bileşendir. Giriş ve çıkışta bulunan 1 µF kapasitörler ise, RF hattından DC sinyalin akmasını engeller. Kapı (gate) ayağına bağlı 2 kΩ direnç, DC sinyali kapı ve toplayıcı (collector) arasında bölüştürerek sistemin kararlılığını artırır. Ayrıca, toplayıcıdan kapıya geri besleme devresi oluşturulduğu için, toplayıcıda istenmeyen frekansların üretilmesini veya soğrulmasını engeller.

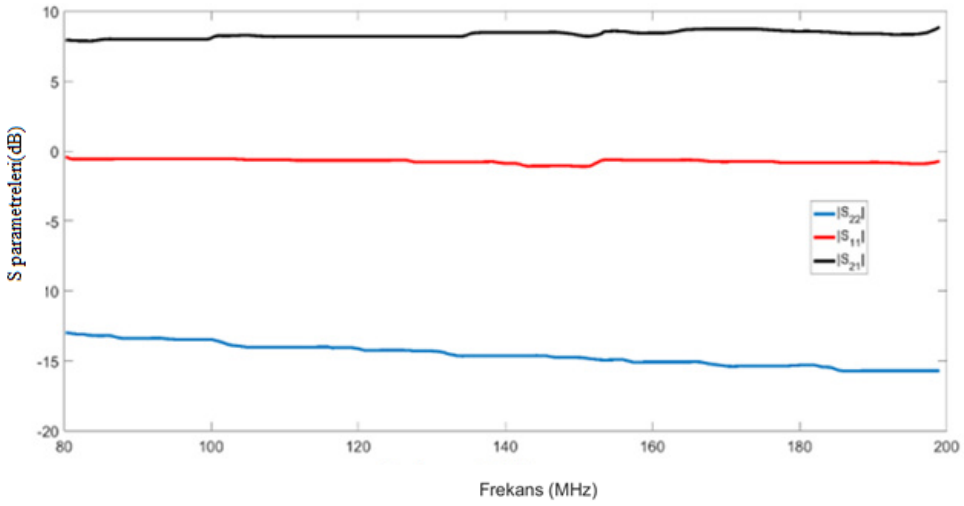
35 nH'lik bobin, RF sinyalinin DC hatta karışmasını engeller. Dağıtıcıya (emitter) bağlı olan 5 pF kapasitör ve 5 Ω direnç, düşük frekanslı parazit sinyaller için yüksek empedans sağlar. 5 Ω direnç, üzerinden geçen sinyalin frekansı arttıkça soğurma oranını artırdığı için, yüksek frekanslı sinyaller için yüksek bir direnç cevabı verir ve bu sinyallerin sistemden akmasını engeller. Bu şekilde, paralel bağlı direnç ve kapasitör sayesinde bir bant geçiren filtre yapılmış olur ve çalışma frekansı dışındaki parazitik sinyaller engellenir.



Şekil 13. FM yükselticinin PCB yolu (PCB layout of FM amplifier)

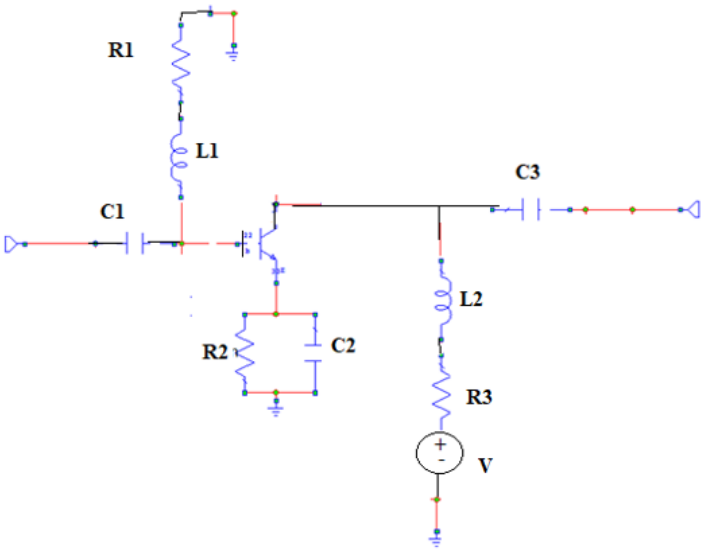
Şekil 13'de tasarlanan yükselticinin elektronik kart üzerindeki hatların çizimi gösterilmiştir. Burada hatlar ve aralarındaki boşluklar bir bütün olarak devreyi etkilediğinden, bu kart ile birlikte benzetim analizi yapılmış ve devre elemanları değerleri tekrar optimize edilmiştir. Şekil 13'de mor kareler, elektronik kartın üzerindeki delikleri temsil etmektedir. Bu delikler sayesinde kartın ön yüzündeki bakır ile arka yüzündeki bakır kısa devreye yapılmıştır. Noktalı pembe yüzeyler, bakır yüzeylerdir. Yüzeylerin arasında bulunan dikdörtgen parçalar, SMD elektronik komponentlerini gösterir.

Şekil 14'de verilen saçılma parametreleri ile yükselticinin kazancı ve giriş-çıkış empedans değerleri hakkında yorum yapılabilmektedir. Bu yükseltici araçlarda kullanılacağı için özellikle anten ile alıcı arasındaki kablo kayıplarını azaltmak ve gürültünün etkisini minimize etmek, sinyal gürültü oranını artırmak (SGO) için 8 dB olarak belirlenmiştir.



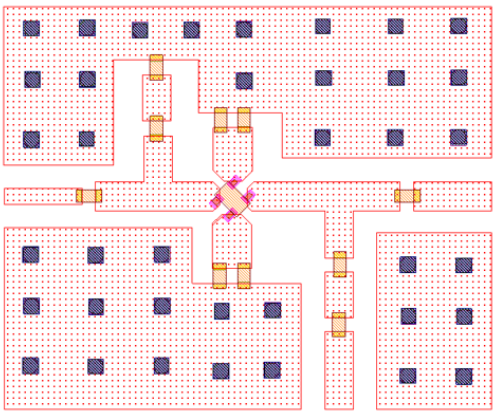
Şekil 14. Yükselticinin frekansa bağlı kazanç grafiği, giriş ve çıkış geri dönüş kaybı (Gain, input return loss and output return loss versus frequency)

AM bandı için ise NE3509 transistörü kullanılarak benzer bir süreç izlenmiştir. AM bandında anten eşdeğer devresi tamamen kapasitif ve yüksek empedans gösterdiği için seri 4.2 pF kapasitör anten yerine kullanılabilmektedir. Bu eşdeğer devresi ile birlikte tasarlanan AM yükselticinin performansı ölçülmüştür.



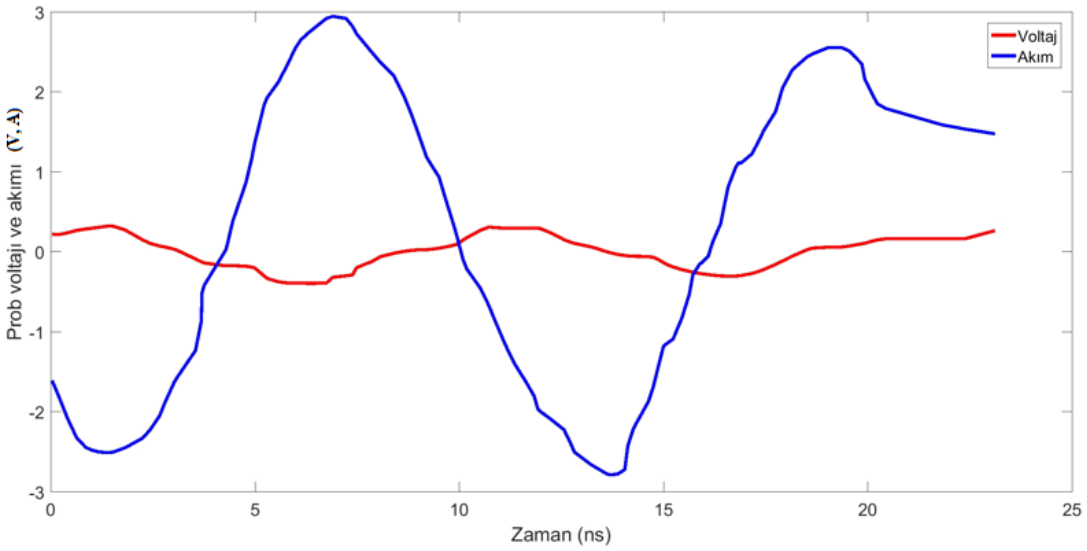
Şekil 15. AM yükseltici devresi (AM amplifier circuit) (NE3509)

Şekil 15'teki yükseltici tasarımında MOSFET kullanıldığı için BJT tasarımlarından farklıdır. Besleme sinyali MOSFET'in "Drain" kolundan verilir ve aktif hale gelir. Girişinde basit bir uyumlama devresi bulunmaktadır. MOSFET yükseltici tasarımlarının tercih edilme sebeplerinden birisi, transistörün giriş empedansının yüksek olmasıdır, bu nedenle yüksek empedans gerektiren devrelerde uyumlama yapmak daha kolaydır. R2 ve C2 elemanları, bant geçiren filtre olarak çalıştığından, istenmeyen frekanslardaki sinyallerin oluşmasını engeller. C3 kapasitörü DC engelleme elemanıdır. R1, L1, L2 ve R3 elemanları, RF sinyalinin DC hattına geçmesini engeller ve aynı zamanda uyumlama için uygun bir empedans oluşturmuş olur.



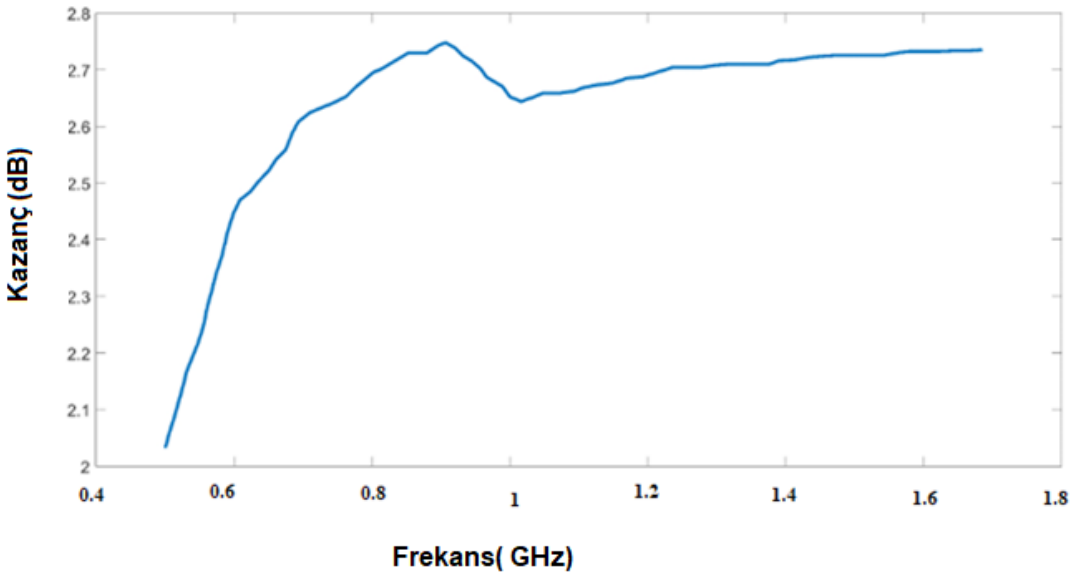
Şekil 16. AM yükseltici PCB planı (Layout of AM amplifier)

Şekil 16'da devresi oluşturulan AM yükselticinin kart çizim planı verilmiştir. Hatlar kaybın az olması için kısa seçilmiştir ve empedans uyumlamada sorun olmaması ve yansımayı engellemek için 50 Ω hatlar kullanılmıştır. Şekil 16'da PCB planı, PCB kartı üzerindeki hatların, boşlukların ve deliklerin yerini göstermektedir. Noktalı pembe yüzeyler bakır yüzeylerdir. Mor renkteki kare alanlar delik içi kaplama yapılacak yerleri gösterir. Bu delikler, elektronik kartın üst yüzeyi ile arka yüzeyi arasında kısa devre bağlantı sağlar. Boşlukların üzerindeki SMD görselleri, bu boşluklara SMD yerleştirileceğini gösterir. Son olarak, AM/FM amplifikatörünün sonuçlarına değinilmiştir.



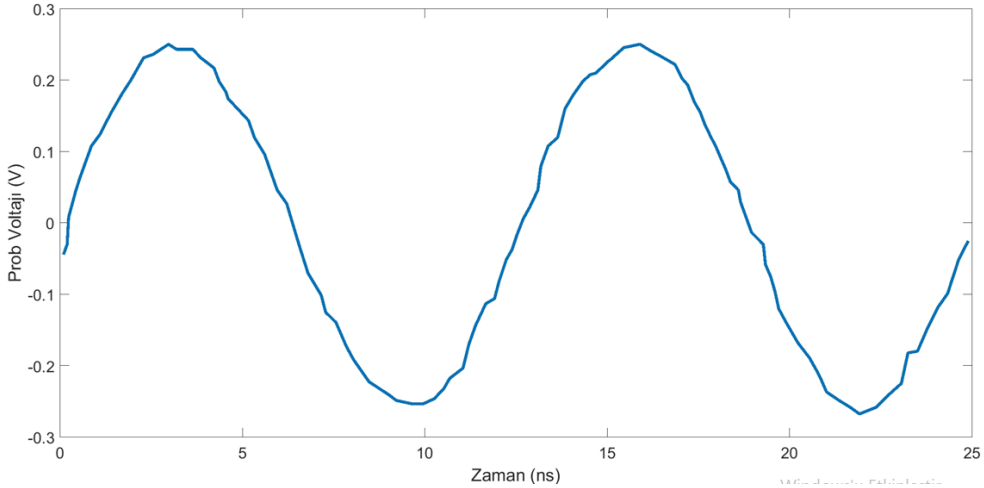
Şekil 17. Probe voltaj ve akım değer grafiği (Graph of voltage and current of probe)

Her iki bant boyunca yükselticinin performansı incelenmiş; çıkış voltajı, gürültü değeri ve kararlılık gibi parametreler ölçülmüştür. 6 Volt AC giriş uygulandığında, eşdeğer devre ile yükseltici arasındaki ölçüm değerinin maksimum 3 Volt olduğu Şekil 17'den anlaşılmaktadır. Bu durum, eşdeğer devre ile yükselticinin uyumlu olduğunu göstermektedir. boşluklara SMD yerleştirileceğini gösterir. Son olarak, AM/FM amplifikatörünün sonuçlarına değinilmiştir.



Şekil 18. Anten frekansa bağlı kazanç grafiği (Gain versus frequency)

Şekil 18'de, S-parametreleri ile elde edilen AM bandına ait kazanç değerleri gösterilmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre, yaklaşık 2,7 dB civarında bir kazanç elde edildiği anlaşılmaktadır.

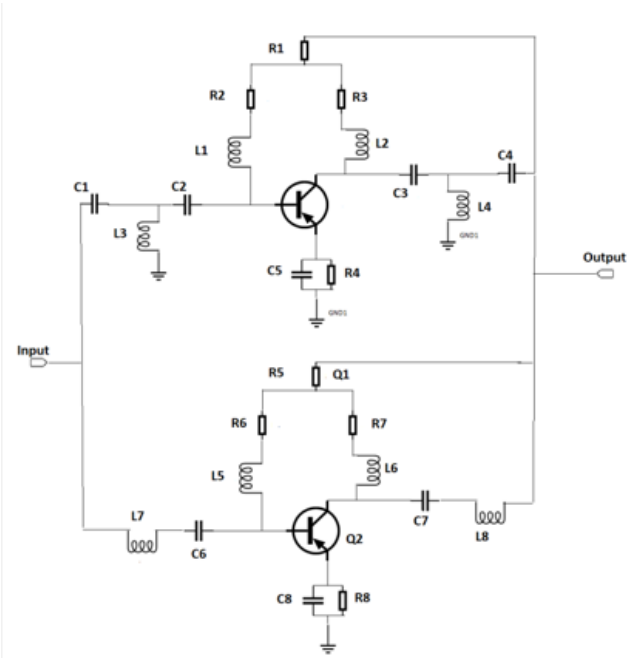


Şekil 19. Zamana bağlı voltaj değeri (Voltage versus time)

Yükselticinin AM bandı kazancını hesaplamak için AM bandına giren ve çıkan sinyal voltaj değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu işlemde, yükselticiye anten görevi gören bir eşdeğer devre bağlandığında girişe 0.3 Volt büyüklüğünde bir sinyal uygulanmıştır. Ancak, bu sinyalin bir kısmı eşdeğer devre içinde kaybolacağı için, yükselticinin girişine bir prob bağlanmış ve giren sinyalin voltaj değeri ölçülmüştür. Şekil 19'da görüldüğü gibi, giren sinyalin büyüklüğü 0.3 Volt'tan daha düşük bir değerdir.

AM/FM yükseltici yapısı, AM yükseltici ve FM yükseltici olmak üzere iki kısımdan oluşur. Yükselteçlerin giriş ve çıkış empedansları, anten çıkış empedansı ve alıcı giriş empedansına uygun şekilde ayarlanmıştır. Her iki yükseltici birbirine bağlanır ve sinyallerin ayrılması filtreler yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

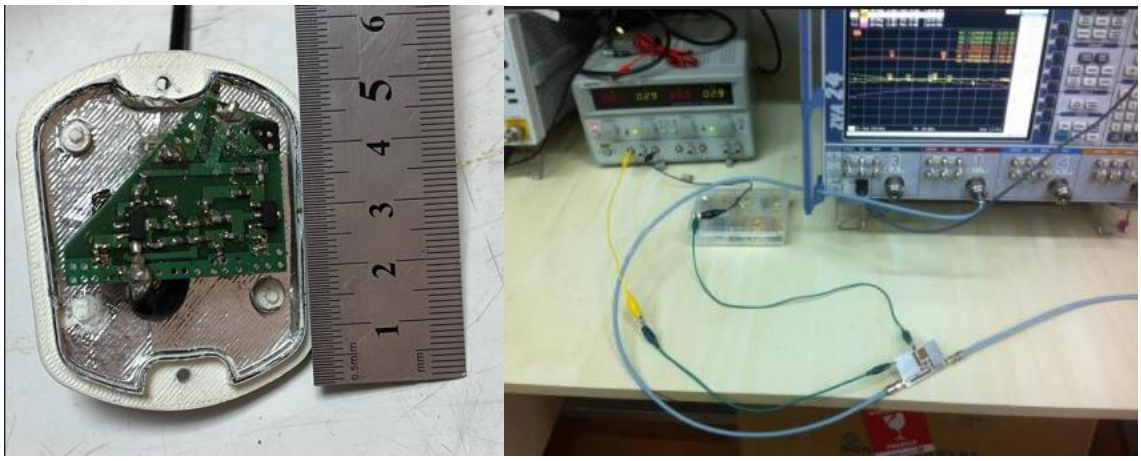
Alçak geçiren filtre, AM yükselticinin girişine ve çıkışına bağlanmıştır. Yüksek endüktansa sahip FM sinyalini filtrelemek için ise seri bir indüktör kullanılmıştır. Yüksek geçiş filtresi, FM yükselticinin hem girişine hem de çıkışına bağlanır. Şekilde görüldüğü gibi, AM sinyallerini filtrelemek amacıyla bir şönt indüktör ve seri kapasitör kullanılmıştır.



Şekil 20. Gerçekleştirilen yükseltici devre şeması (Schematic of realized amplfier circuit)

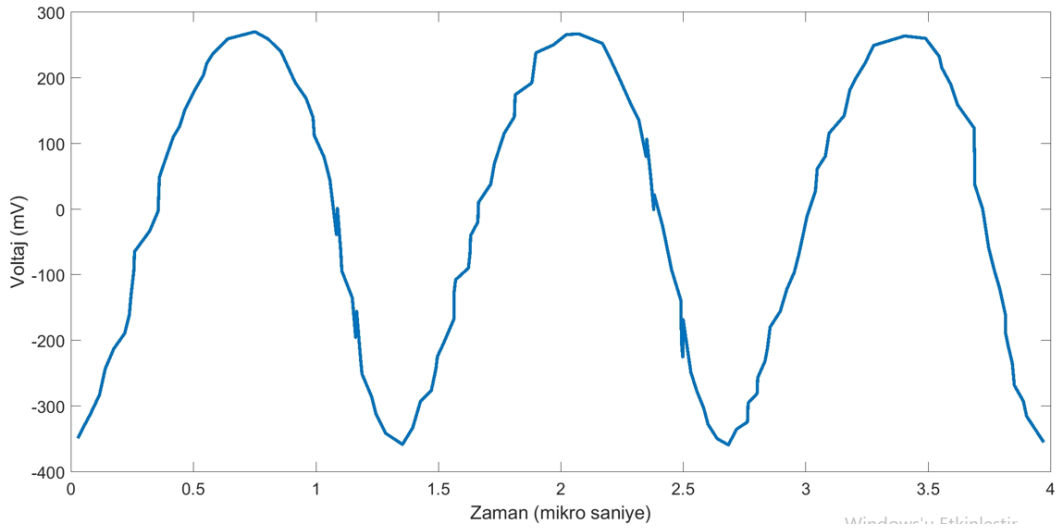
Gerçekleştirilen amplifikatör yapısı Şekil 20'de gösterilmiştir. Yükseltici için FM bandı için BFQ19s model BJT tipinde bir transistör ve AM bandı için yüksek empedansdan dolayı MOSFET

kullanılmıştır. Şekil 20'de her iki yükseltici için de BJT tipinde bir transistör kullanılmıştır. Devre hazırlanırken kolaylık sağlaması ve daha doğru sonuçlar elde edilmesi amacıyla bu tercih yapılmıştır. AM kısmındaki giriş bobin değeri çok yüksek olduğu için uyumlama sağlanmıştır. Ağ Analizörü kullanılarak amplifikatörün özelliklerini ölçmek için kart üzerinde her AM ve FM bandı için anten eşdeğer devresi ve alıcı eşdeğer devresi gerçekleştirilmiştir. Şekil 20'de yükselticinin gerçekleşmiş hali görülmektedir. Devre yeşil maskelenmiş dielektrik sabiti 4.5 olan FR4 malzemesi üzerine yüzeye montajı yapılan devre elemanlarının lehimlenerek dizilmesiyle oluşturulmuştur.



Şekil 21. Üretilmiş yükseltici devresi (Realized amplifier circuit)

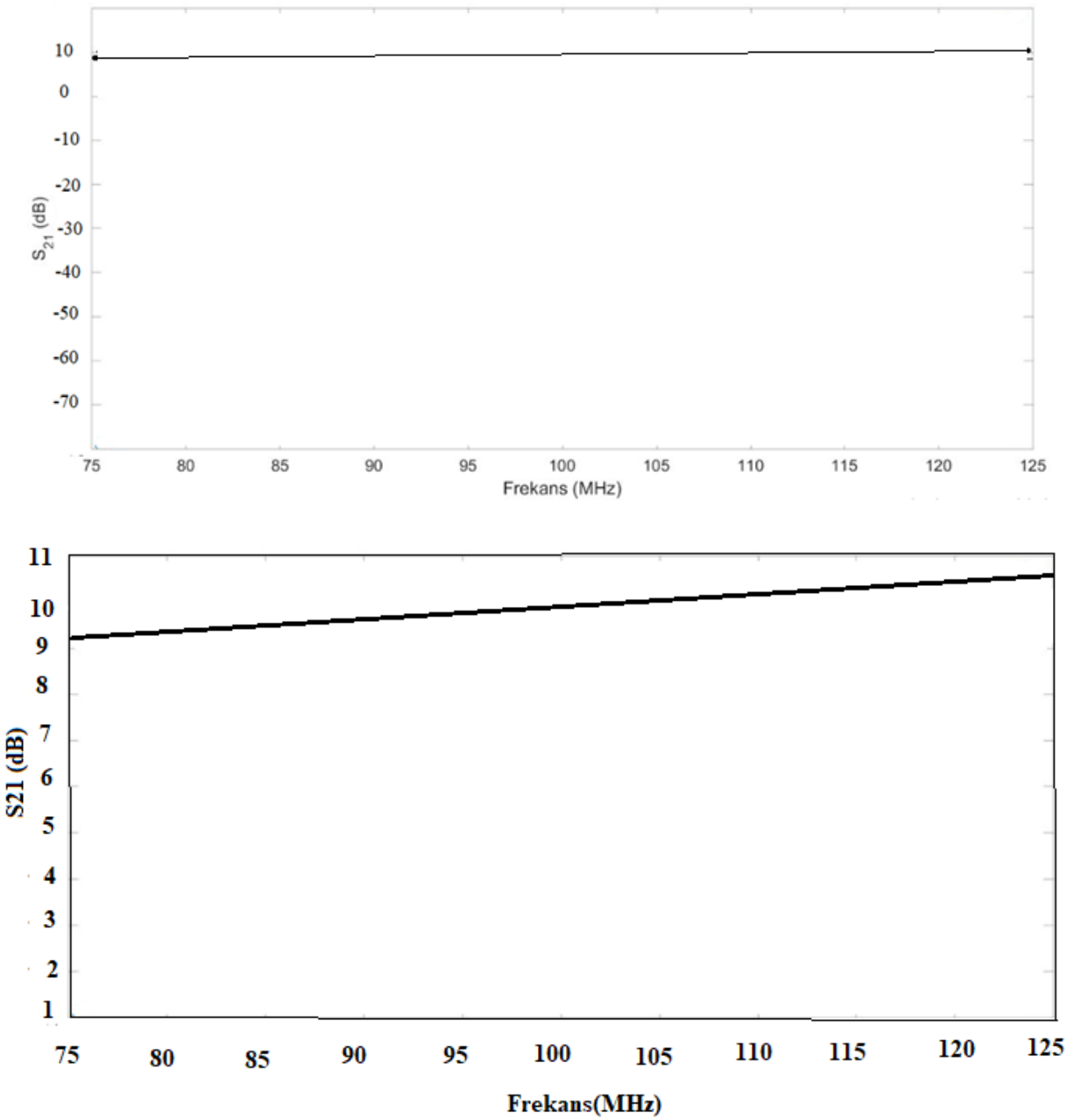
Anten çıkış empedansı ve alıcı empedansı yüksek olduğundan AM amplifikatör giriş ve çıkış empedansları yüksektir. Yani anten ve alıcı ile eşleştirilmiştir.



Şekil 22. AM bandında yükselticinin çıkışında okunan voltaj sinyali (Voltage of output of amplifier in AM band)

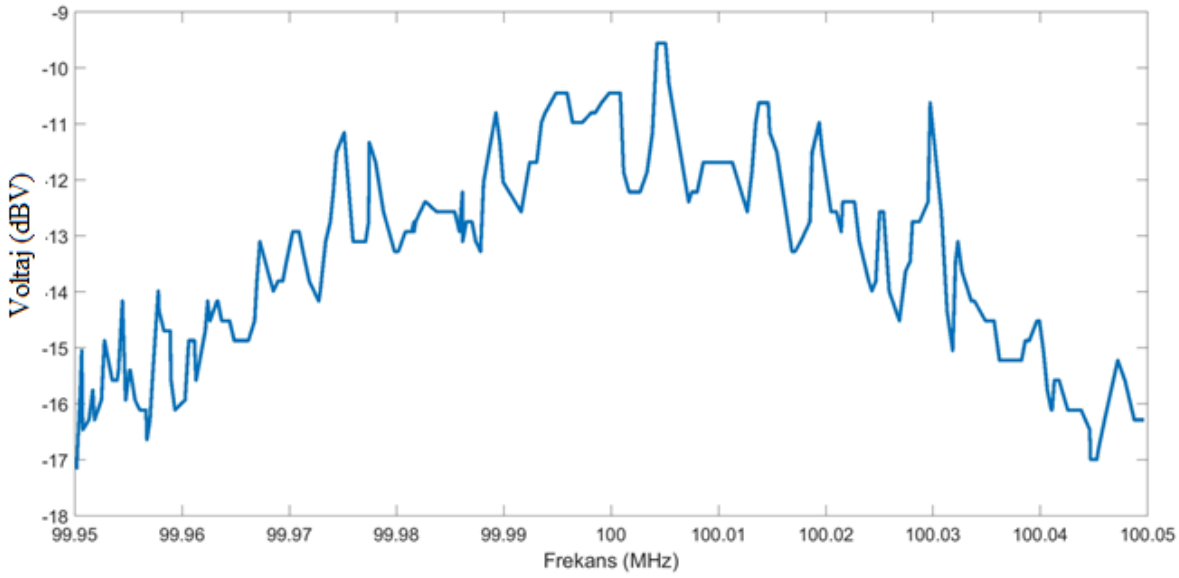
Çıkış sinyali genliği, amplifikatörün girişi 50 mV tepeden tepeye voltaj olduğunda, Şekil 22'de gösterildiği gibi tepeden tepeye 300 mV'dir. Yani amplifikatörün voltaj kazancı 6'dır.

FM bandı için alıcı giriş empedansı 50 Ω'dur. Ağ analizör portları 50 Ω olduğundan alıcı eşdeğer devre yapılmasına gerek kalmamıştır. Yükselticiye anten eşdeğer devresi bağlanmıştır ve yükselticinin FM bandı için saçılma parametreleri ölçülmüştür. Kazanç, Şekil 23'de gösterildiği gibi 9 dB ile 11 dB arasında değişmektedir. Giriş ve çıkış geri dönüş kayıpları -10 dB'in altında çıkmıştır.



Şekil 23. Üretilmiş yükselticinin kazanç grafiği ve detaylı görünümü (Gain of realized amplifier and zoom version)

Yükselticinin çıkış gürültü voltajı değerleri, hem AM hem de FM bandı için yaklaşık -10 dBµV'dur. Ayrıca, yükselticinin gürültü değeri bir gürültü üreteci kullanılarak ölçülmüştür. Y-faktörü hesabına göre, yükselticinin 100 MHz'deki gürültü değeri 1,18 dB olarak belirlenmiştir. Yükselticinin çıkış gürültü voltajı değerleri, hem AM hem de FM bandı için yaklaşık -10 dBµV'dur. Ayrıca, yükselticinin gürültü değeri bir gürültü üreteci kullanılarak ölçülmüştür. Y-faktörü hesabına göre, yükselticinin 100 MHz'deki gürültü değeri 1,18 dB olarak belirlenmiştir



*

Şekil 24. Yükseltici çıkış voltajı spektrum analizör gösterimi (Spectrum analyzer screen of output voltage of amplifier)

Şekil 24'te ise yükselticinin çıkışında ölçülen voltaj değeri gösterilmiştir. Bu değer, 100 MHz frekansındaki çıkış gürültüsünü temsil etmektedir. Test sırasında, yükseltici aktif olarak çalışırken çıkışındaki voltaj değeri spektrum analizörü ile ölçülmüştür. Elde edilen bu voltaj değeri, elektronik kartın çıkış gürültüsünü ifade etmektedir.

3. AKTİF ANTEN ÖLÇÜMLERİ VE ÖZGÜNLÜK DEĞERLENDİRMESİ (MEASUREMENT OF ACTIVE ANTENNA AND ORİGİNALITY RESEARCH)

Kapalı yansımasız bir odada ölçülmek üzere anten hazırlanmıştır. Vericiyi direk görecek şekilde aralarında 5 metre olacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 25. Yansımasız oda içerisinde anten ölçümleri alınırken (Active antenna in anechoic chamber)

Şekil 25'te, aktif antenin son hali gösterilmiştir. Burada antenin dışı makaron ile sarılmış ve anten tabanına yerleştirilmiştir. Anten tabanı içerisinde ise tasarladığımız yükseltici bulunmaktadır. Figürde, anten etrafında bulunan mavi süngerler elektromanyetik soğuruculardır. Anten ölçümleri, bu tür soğurucular ile döşenmiş ve dışarıdan herhangi bir sinyalin içeriye girmesini engelleyen metal yüzey ile kaplanmış yansımasız bir oda içerisinde yapılmıştır.

Tablo 1. Literatür karşılaştırma tablosu (List of comparison of samples in the literaure)

Referans No	Anten Tipi	Anten Boyutları	Anten Kazancı/Yönlülüğü
12	Çubuk Anten	60 cm	0 dBi Yönlülük
11	Cam üstü	76 cm	-13.7 dBi maksimum kazanç
4	Çubuk Anten	20 cm	-4 dBi yönlülük
3	Çubuk Anten	14 cm	-8 dBi yönlülük
1	Çubuk Anten	14 cm	-6 dBi yönlülük
Bu çalışma	Çubuk Anten	40 cm	Maksimum 1.5 dBi yönlülük ve -13 dBi kazanç

Tablo 1, literatürde bulunan AM/FM radyo sistemleri için yapılmış antenlerin tip, boyut ve kazanç/yönlülük değerlerini göstermektedir. Tabloda belirtilen çubuk antenlerin hepsi, tasarlanan 40 cm boyundaki çubuk antenin boyutundan daha kısa olup, performansları daha düşüktür. Çünkü yönlülük değeri 0 dBi'yi geçmemektedir. Tasarlanan antenin yönlülük değeri ise 1.5 dBi'ye kadar çıkmakta olup, her yöne ışıma yapabilme özelliğine sahiptir. Bu nedenle, alıcıya iletilen sinyal kalitesinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Tabloda bulunan, daha yüksek bir dielektrik malzeme üzerinde olmasına rağmen cam üstü anten, 40 cm'lik çubuk anteni geçememiştir. Maksimum kazanç değerleri birbirine çok yakındır. Aktif antenin yükseltici kısmının yüksek performans göstermesi, çalışmanın özgünlüğüne katkı sağlamıştır. Kazanç değerleri, her bir sistem için kayıpları gidermek amacıyla ayrı ayrı hesaplanmıştır. FM bandı frekansı yüksek olduğu için, özellikle anten ile alıcı arasındaki kayıpları gidermek için kazanç değeri yüksek seçilmiştir.

Aktif anten, araç üzerinde test edilmiş ve alınan sinyalin güç değeri Rigol Spectrum Analizörü ile ölçülmüştür. Test sonuçlarına göre, sinyalin gürültü değeri, orijinal cihaza göre 1 dB kadar daha düşük olduğu gözlemlenmiştir

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makalede, 40 cm uzunluğunda aktif AM/FM anteni sunulmuştur. Sinyal alış gücü ve verimini iyileştirmek amacıyla, pasif çubuk antenin sonuna bir yükseltici eklenmiştir. Önerilen aktif anten, AM ve FM bantlarında farklı performanslar sergileyen bir sistemdir. Özellikle kazanç ve giriş-çıkış empedans değerleri birbirinden oldukça farklıdır. Bu farklılık, iki sistemin çalışma frekanslarının birbirinden uzak olmasından kaynaklanmaktadır. AM bandı özellikle 1 MHz civarında çalışırken, FM bandı 100 MHz civarında çalışmaktadır. Aralarındaki 100 katlık frekans farkı ve antenin boyutunun kısalması, rezonans frekansının yüksek olmasından dolayı bu fark oldukça belirgindir. Her bir sistemin sinyal güçleri farklıdır, bu nedenle kazanç değerleri de her bir sistem için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Ayrıca, yükselticinin gürültü seviyesi arttığı için bu değer, sinyal-gürültü oranını göz önüne alarak doğru bir şekilde hesaplanmalıdır. İletim sırasında, sinyal frekansı arttıkça kayıplar da artmaktadır. İletim hattında kullanılan yalıtkan malzemenin iç kaybı ve iletim telinin iç direnci nedeniyle kayıplar, frekansla doğru orantılıdır. Bu nedenle FM bandı yüksek frekansa sahip olduğunda, anten ile alıcı arasındaki kayıpların giderilmesi amacıyla kazanç değeri yüksek seçilmiştir.

Aktif anten, araç üzerinde test edilmiştir ve alınan sinyalin güç değeri Rigol Spectrum Analizörü ile ölçülmüştür. Test sonuçlarına göre, sinyalin gürültü değeri, orijinal cihaza göre 1 dB daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Tasarlanan sistemin düşük gürültü değeri, sistemin daha düşük kazanç gereksinimine ve daha az güç tüketen sistemlerde kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Çalışmada destek ve yardımlarını esirgemeyen Ünüvar Elektronik A.Ş. Müdürü Ahmet Baydar'a, teknik ekipte bulunan Hata-Analiz Sorumlusu Serkan Kayalı'ya teşekkür ederim. Ünüvar Elektronik A.Ş ve KOSGEB tarafından bu çalışma desteklenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI
(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

***Olcay YİĞİT*:** Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir. / He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] L. Reiter, A. Böge, A. Negut and S. Lindenmeier, "A new low-cost active rod antenna for automotive reception of all terrestrial audio broadcast services," The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014), The Hague, Netherlands, 2014, pp. 2981-2984, doi: 10.1109/EuCAP.2014.6902454..

[2] A. Sakitani, "Comments on "A design of AM/FM mobile telephone triband antenna" [with reply]," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 43, no. 5, pp. 544-545, May 1995, doi: 10.1109/8.384204.

[3] R. Iustin, R. Petersson and J. Wettergren, "A Triband Wire Antenna for All Radio and TV bands," 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 2020, pp. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135651.

[4] J. J. H. Wang, D. J. Triplett and S. C. Workman, "Miniaturized planar slow-wave antennas and their application to ultrawideband multifunction antennas," 2011 4th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, Beijing, China, 2011, pp. 733-736, doi: 10.1109/MAPE.2011.6156260.

[5] O. J. Sather, "Construction of the WOR Transmitter and Directional Antenna System," in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. BC-15, no. 3, pp. 65-77, Sept. 1969, doi: 10.1109/TBC.1969.265988.

[6] M. Wechsberg and D. E. Snyder, "AM/FM noise in fiber optic links for radar antenna remoting," Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Ann Arbor, MI, USA, 1993, pp. 1534-1537 vol.3, doi: 10.1109/APS.1993.385488.

[7] C. Rostamzadeh, P. DeRoy, A. Barchanski and B. Abdolali, "Investigation of electromagnetic field coupling from DC-DC buck converters to automobile AM/FM antennas," 2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), Ottawa, ON, Canada, 2016, pp. 364-369, doi: 10.1109/ISEMC.2016.7571674

[8] H. Lindenmeier, J. Hopf and L. Reiter, "Active AM-FM windshield antenna with equivalent performance to the whip now as standard equipment in car production," 1985 Antennas and Propagation Society International Symposium, Vancouver, BC, Canada, 1985, pp. 621-624, doi: 10.1109/APS.1985.1149458.

[9] S. Egashira, T. Tanaka and A. Sakitani, "A design of AM/FM mobile telephone triband antenna," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 42, no. 4, pp. 538-540, April 1994, doi: 10.1109/8.286224.

[10] T. Tanaka, S. Egashira and A. Sakitani, "AM-FM-cellular mobile telephone tri-band antenna with double sleeves," Antennas and Propagation Society Symposium 1991 Digest, London, ON, Canada, 1991, pp. 958-961 vol.2, doi: 10.1109/APS.1991.175003.

[11]]M. F. F. Chowdhury, Y. -K. Hong, H. Won, W. Lee and M. Choi, "A Glass-Integrated Ferrite FM Antenna for Vehicle Telematics," 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI

Radio Science Meeting, Atlanta, GA, USA, 2019, pp. 921-922, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889229.

[12] R. Iustin, R. Petersson and J. Wettergren, "A Triband Wire Antenna for All Radio and TV bands," 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 2020, pp. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135651.

[13] B. Seungbok, K. Sangpil, H. Choulhee, K. Heeyoung and K. yoongi, "Design of a V2X Vehicle Antenna," 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Busan, Korea (South), 2018, pp. 1-2.

[14] H. -S. Tae, W. -I. Son, M. -Q. Lee, S. -B. Min and J. -W. Yu, "Printed square quadirifilar helix antenna (QHA) for XM Satellite Radio receiver," The 40th European Microwave Conference, Paris, France, 2010, pp. 1469-1471, doi: 10.23919/EUMC.2010.5616513.

[15] M. Rütschlin and D. Tallini, "Simulation for antenna design and placement in vehicles," Antennas, Propagation & RF Technology for Transport and Autonomous Platforms 2017, Birmingham, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1049/ic.2017.0021.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1083-1099 (2025)

Investigation of the Effects of Two Different Biopolymers on the Strength Parameters of Silty Soil

Halil Oğuzhan KARA[1*] Mehmet Uğur YILMAZOĞLU[2]

[1,2]*Kastamonu University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering, Kastamonu, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 29/01/2025
Revision: 28/04/2025
Accepted: 29/05/2025

Keywords

Biopolymer
Soil stabilization
Xanthan gum
Guar gum
Cross-linking

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29/01/2025
Düzeltme: 28/04/2025
Kabul: 29/05/2025

Anahtar Kelimeler

Biyopolimer
Zemin iyileştirme
Xanthan gum
Guar gum
Çapraz bağlanma

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study investigates the effects of Xanthan Gum and Guar Gum biopolymers combined with $CaCl_2$ on the strength parameters of silty soil. UCS and shear strength tests were performed at various curing times. Results showed that biopolymers, particularly Guar Gum, significantly enhance long-term soil strength. / Bu çalışma, Xanthan Gum ve Guar Gum biyopolimerlerinin $CaCl_2$ ile birlikte kullanılarak siltli zeminin dayanım parametrelerine etkisini araştırmıştır. Deneyler, farklı kür sürelerinde UCS ve kayma mukavemeti testleriyle gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, biyopolimerlerin özellikle Guar Gum'un uzun vadeli dayanımı artırdığını göstermiştir.

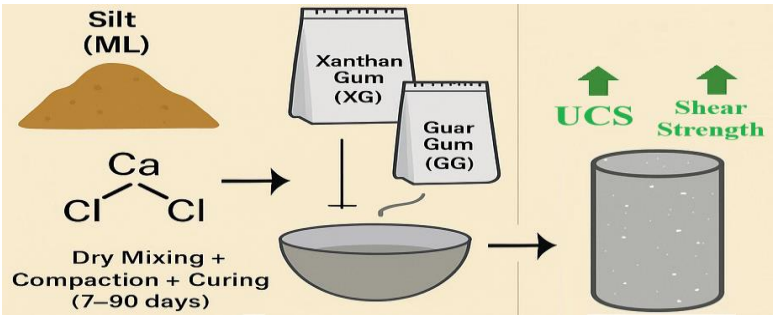


Figure A: *Experimental process /* ***Şekil A:*** *Deneysel süreç*

Highlights (Önemli noktalar)

- *Xanthan Gum ve Guar Gum; siltli zemin stabilizasyonu için, sabit miktarda (%0,5) $CaCl_2$ içeriğinde kullanıldı. / Xanthan Gum and Guar Gum were used for silty soil stabilization at constant amount (%0.5) of CaCl2 content.*
- *Guar Gum, Xanthan Gum'a göre uzun vadede daha yüksek dayanım sağladı. / Guar Gum provided superior long-term strength gains compared to Xanthan Gum.*
- *En iyi performans için optimum biyopolimer oranı %0,5 belirlendi. Aşırı biyopolimer kullanımı, aşırı jel oluşumu nedeniyle UCS değerini düşürdü. / Optimal biopolymer content was determined as 0.5% for best performance. Excessive biopolymer content reduced UCS due to over-gelation effects.*

Aim (Amaç): *Investigate the effects of Xanthan Gum and Guar Gum biopolymers, used in combination with constant amount of Calcium Chloride, on the strength parameters soil and to determine the optimum biopolymer content. / Xanthan Gum ve Guar Gum biyopolimerlerinin, sabit oranda Kalsiyum Klorür ile birlikte kullanıldığında zeminin dayanım parametreleri üzerindeki etkilerini araştırmak ve optimum biyopolimer oranını belirlemektir.*

Originality (Özgünlük): *The effects of Xanthan and Guar Gum with $CaCl_2$ on silty soil strength, focusing on long-term curing and optimal biopolymer content. / Xanthan ve Guar Gum'un $CaCl_2$ ile siltli zemindeki etkilerini, uzun süreli kürleme ve optimum biyopolimer oranına odaklanarak özgün biçimde incelenmektedir.*

Results (Bulgular): *Xanthan Gum improved short-term strength, while Guar Gum enhanced long-term strength of silty soil. The optimum biopolymer content was determined as 0.5%. / Xanthan Gum'un kısa vadede, Guar Gum'un ise uzun vadede zemin dayanımını artırmıştır. Optimum biyopolimer oranı %0,5 bulunmuştur.*

Conclusion (Sonuç): *Xanthan Gum and Guar Gum biopolymers, when combined with $CaCl_2$, significantly improve the strength of silty soil. Guar Gum showed superior performance in long-term strength. The optimum biopolymer content was found to be 0.5%, as higher contents reduced strength. / Xanthan Gum ve Guar Gum biyopolimerlerinin, $CaCl_2$ ile birlikte kullanıldığında siltli zeminin dayanımını önemli ölçüde artırabilir. Özellikle Guar Gum, uzun vadeli dayanımda üstün performans sergilemiştir. Optimum biyopolimer oranı %0,5 olup, daha yüksek oranlar dayanımı düşürmüştür.*

*Corresponding author, e-mail: hokara@kastamonu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1628900

GU J Sci, Part C, 13(3): 1083-1099 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Investigation of the Effects of Two Different Biopolymers on the Strength Parameters of Silty Soil

Halil Oğuzhan KARA[1*] Mehmet Uğur YILMAZOĞLU[2]

[1,2]*Kastamonu University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering, Kastamonu, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 29/01/2025
Revision: 28/04/2025
Accepted: 29/05/2025

Keywords

Biopolymer
Soil stabilization
Xanthan gum
Guar gum
Cross-linking

Abstract

Soil improvement methods are commonly employed to enhance the load-bearing capacity of weak soils. Due to environmental concerns, traditional additives like lime and cement are increasingly being replaced by more sustainable alternatives. Recently, biopolymers have gained attention as environmentally friendly options for soil stabilization. However, studies on combining biopolymers with supplementary additives to enhance the strength of the bonds formed between the soil and biopolymers are scarce. This study investigates the effects of using Guar Gum and Xanthan Gum biopolymers in combination with Calcium Chloride ($CaCl_2$) on the strength parameters of silty soil. Biopolymers are known to form gel-like structures between soil particles, increasing strength. At the same time, Calcium Chloride interacts with the carboxyl groups of biopolymers, creating cross-linkages that further improve soil strength. In this research, biopolymers and Calcium Chloride were combined with silty soil and subjected to 7,28,56 and 90 days of curing. Unconfined compressive strength (UCS) and direct shear tests were conducted, and the results were compared with reference samples. Changes in internal friction angle and cohesion were also analyzed based on different biopolymer ratios. The results demonstrated significant improvements in the strength of long-term cured samples, with Calcium Chloride enhancing the cross-linking effect of biopolymers. These findings suggest that biopolymers, in combination with Calcium Chloride, can be effective in environmentally friendly soil stabilization projects.

İki Farklı Biyopolimerin Siltli Zemin Dayanım Parametreleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29/01/2025
Düzeltme: 28/04/2025
Kabul: 29/05/2025

Anahtar Kelimeler

Biyopolimer
Zemin iyileştirme
Xanthan gum
Guar gum
Çapraz bağlanma

Öz

Zemin iyileştirme yöntemleri zayıf zeminlerin taşıma gücünü artırmak için yaygın olarak kullanılır. Çevresel kaygılar nedeniyle kireç ve çimento gibi geleneksel katkı maddeleri, yerini giderek daha sürdürülebilir alternatiflere bırakmaktadır. Son zamanlarda, biyopolimerler zemin iyileştirme amacıyla, çevre dostu seçenekler olarak dikkat çekmektedir. Ancak, zemin ve biyopolimer arasında oluşan bağların mukavemetini artırmak için biyopolimerleri ek maddelerle birleştirme konusundaki çalışmalar nadirdir. Bu çalışma, Guar Gum ve Xanthan Gum biyopolimerlerinin kalsiyum klorür ($CaCl_2$) ile birlikte kullanılmasının siltli zeminin mukavemet parametreleri üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. Biyopolimerlerin zemin matrisi arasında jel benzeri yapılar oluşturarak mukavemeti artırdığı bilinmektedir. Aynı zamanda kalsiyum klorür, biyopolimerlerin karboksil gruplarıyla etkileşime girerek zemin mukavemetini daha da artıran çapraz bağlar oluşturur. Bu çalışmada, biyopolimerler ve kalsiyum klorür siltli zeminle birleştirilerek 7,28,56 ve 90 günlük kürlemeye tabi tutulmuştur. Kürlenen numunelerin serbest basınç ve kayma mukavemetleri, referans numune ile karşılaştırılmıştır. İçsel sürtünme açısı ve kohezyondaki değişiklikler de farklı biyopolimer oranlarına göre analiz edilmiştir. Sonuçlar, kalsiyum klorürün biyopolimerlerin çapraz bağlama etkisini artırmasıyla uzun süreli kürlenmiş numunelerin mukavemetinde önemli iyileştirmeler olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, biyopolimerlerin kalsiyum klorürle birlikte çevre dostu zemin stabilizasyon projelerinde etkili olabileceğini ortaya koymaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Soil improvement is one of the primary engineering applications used to increase the shear strength and stability properties [1]. Weak soils can negatively affect the load-bearing capacity of structures, making soil improvement methods crucial for the safety and longevity of construction projects [2].

*Corresponding author, e-mail: hokara@kastamonu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1628900

While chemical stabilizers such as cement and lime have traditionally been used in soil stabilization, they pose environmental sustainability concerns [3–7]. As a result, natural and eco-friendly alternatives are increasingly preferred [8–12].

Biopolymers have emerged as an environmentally friendly alternative to traditional soil stabilization methods, such as lime and cement, demonstrating significant potential in improving the strength parameters of silty soils. Xanthan gum (XG), guar gum (GG), and agar gum (AG) are among the biopolymers extensively studied for their ability to enhance soil strength [13]. Biopolymers from natural sources offer sustainable and environmentally friendly alternatives for soil improvement projects [14]. Biopolymers like Guar Gum and Xanthan Gum form gel-like structures when combined with water, creating bonds between soil particles and thus improving soil strength [15–18]. These biopolymers present sustainable and eco-friendly solutions, particularly in fine-grained soils, where their high water retention capacity enhances soil strength by forming gel-like structures between soil particles [13,19–21]. The addition of XG to highly plastic silty soils in the Brahmaputra Valley resulted in a fourfold increase in unconfined compressive strength (UCS) while maintaining low thermal conductivity and moderate abrasiveness, highlighting its effectiveness in enhancing soil strength for temporary infrastructure applications [22].

Similarly, the application of XG in low-plasticity silty soils showed significant improvements in both tensile and compressive strength, with its effectiveness influenced by the presence of fine particles such as kaolin in the soil matrix [23]. Although a reduction in the effective friction angle was observed in granular soils, the shear strength was still enhanced due to increased effective cohesion, as evidenced by biopolymer treatment [24]. Additionally, guar gum (GG) has been shown to improve the stiffness and strength of clay soils by forming viscous gels and hydrogen bonds, which progressively enhance the soil's modulus of stiffness over time [25]. In the Kuttanad region, the application of XG and GG led to a substantial increase in UCS and a decrease in optimum moisture content, emphasizing their potential to improve the mechanical properties of silty and clayey soils [26]. Despite these promising results, the durability of biopolymer-treated soils under extreme weather conditions, such as wet-dry and freeze-thaw cycles, remains a concern. These conditions can lead to strength degradation due to water adsorption and dilution of the biopolymer matrix [27].

The literature shows that various studies have examined the effects of biopolymers on soil. In a study by Muguda et al. [28], the unconfined compressive strength of clay and sand soils improved by Guar Gum was measured, showing a 110% increase in clay and approximately 85% in sand compared to reference samples. Similarly, [14] improved the strength of wind-eroded sandy soils using Xanthan Gum, reducing wind erosion by approximately 40%. Kavazanjian et al. [29] reported a 60% reduction in erosion using Xanthan Gum. Additionally, Soldo et al. [30] observed that Xanthan Gum and Guar Gum increased cohesion in clay soils by over 150%. In conclusion, biopolymers represent a sustainable and effective tool for enhancing the strength parameters of silty soils. However, further research is required to optimize their application and ensure long-term durability under varying environmental conditions [17,31]. In addition to these studies, the relationship between various biopolymers and soil strength parameters has been extensively investigated in the literature [32–45]. However, these studies are generally limited to examining the effect of a single biopolymer [46].

The effect of biopolymers is enhanced by specific amounts of various cross-linking agents in the environment, allowing them to form hydrogen bonds with the matrix they are introduced into [27,28]. The required amount of cross-linking agent varies depending on the type of biopolymer used, the cross-linking agent itself, and the characteristics of the medium in which they are incorporated [20,47–50]. If an optimum bonding structure is desired, the cross-link agent ratio should be higher than the biopolymer content when forming ionic bonds (e.g., Alginate, Pectin, Carrageenan), but equal to or lower than the biopolymer when forming covalent or physical bonds (e.g., Xanthan Gum, Guar Gum, Chitosan), as excessive cross-link agent can disrupt the gel matrix and polymer network, alter water absorption capacity, increase brittleness, and lead to chemical precipitation, ultimately compromising mechanical stability [51–59]. In terms of biopolymer content, the literature indicates that the optimal ratio for different biopolymers and soil types generally ranges between 0.5% and 3% [32,48,50,60–63].

This study conducted unconfined compressive strength (UCS) tests on soil specimens containing different types and proportions of biopolymers. They were subjected to curing periods of 7, 28, 56,

and 90 days to determine their compressive strength. Additionally, direct shear tests (DST) were performed on specimens cured for 28 days to evaluate the effects of biopolymers and $CaCl_2$ on the internal friction angle, cohesion, and shear strength parameters compared to the reference soil specimen.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

2.1. Material (Materyal)

The materials used in this study can be categorized into three groups: soil, biopolymer, and stabilizing agent. The silty material used in this study was obtained from the Taşköprü district of Kastamonu province. It is a yellow-colored, low-plasticity silt (classified as ML). The graduation curve obtained by sieve analysis of the soil sample is shown in Figure 1 (The gradation curve of the biopolymers was drawn according to the information received from the manufacturer since the biopolymers gelled the mixture liquid during the hydrometer analysis).

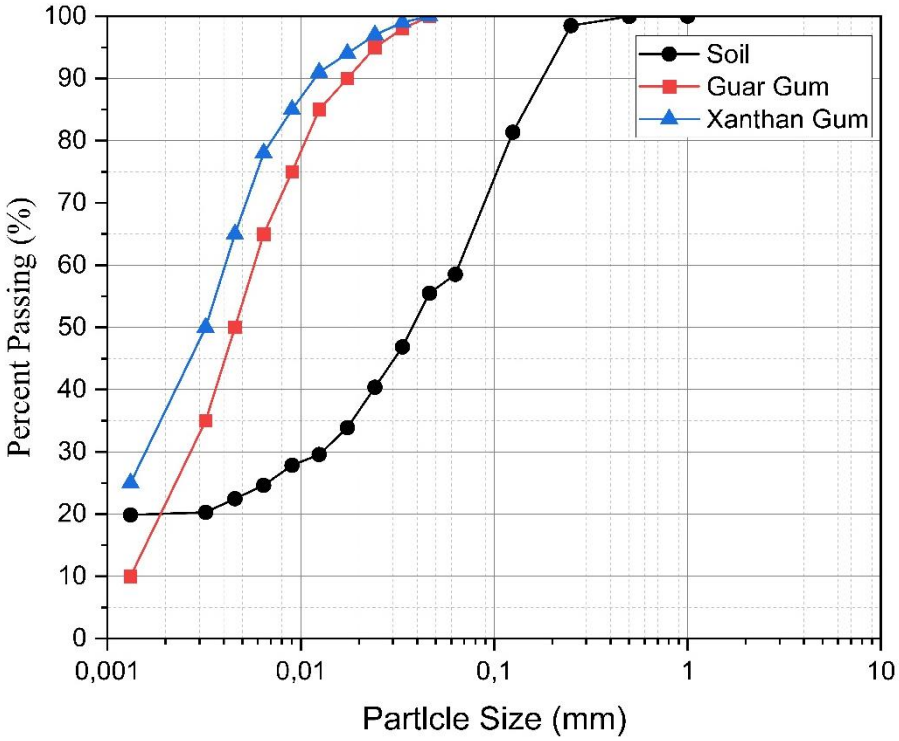


Figure 1. Grain size distribution curve (Dane boyutu dağılımı)

Other geotechnical properties of silt and the ASTM standards used to determine them are given in Table 1. After being brought to the laboratory, the silt was oven-dried at 105°C for 24 hours. The dried material was then ground and sieved through a No. 40 sieve (0.425 mm) before being used in the experiments. Casagrande apparatus was used to determine the Liquid Limit values.

Table 1. Properties of the ML (ML'nin özellikleri)

Property	Unit	Value	Relative Standard
Silt Content	%	46,6	ASTM D7928-17 [64]
Clay Content	%	19,9	ASTM D7928-17 [64]
Sand Content	%	33,5	ASTM D6913-04 [65]
Specific Gravity (G_s)	-	2,69	ASTM D854-14 [66]
Liquid Limit	%	31,84	ASTM D4318-17 [64]
Plastic Limit	%	22,54	ASTM D4318-17 [64]
Plasticity Index (PI)	%	9,3	ASTM D4318-17 [64]

Two different biopolymers were used in this study. The first is Xanthan Gum, coded as E415, which is natural biopolymer extracted from the bacterium Xanthomonas campestris, has a high water retention

capacity, a pH range of 6-8, and is white. The second biopolymer is Guar Gum, derived from the Guar plant, coded as E412, with a high water retention capacity, a pH range of 5.5-7, and is yellowish-white. Images of the biopolymers are shown in Figure 2.

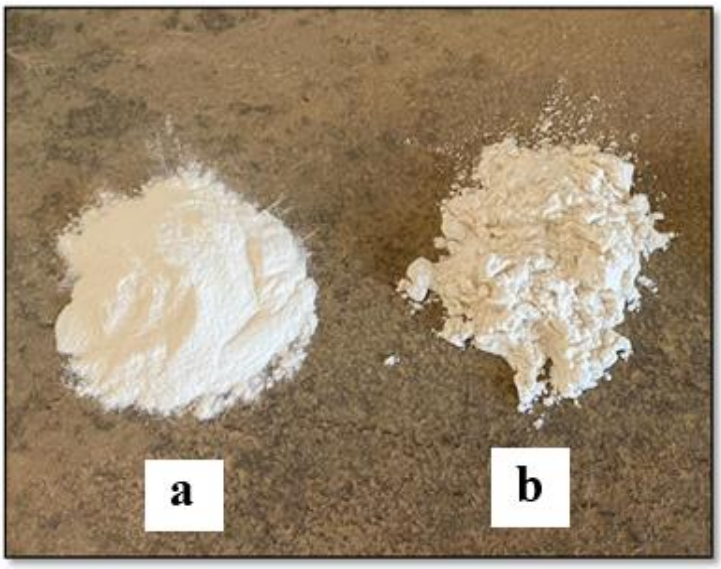


Figure 2. Biopolymers: Xanthan Gum (a) and Guar Gum (b) (Biyopolimerler: Xanthan Gum (a) ve Guar Gum (b))

Biopolymers transform into a gel form when in contact with water, filling soil voids and creating bonds between soil particles. This process reinforces the soil. Unlike previous research, this study investigated the behavior of biopolymers in the presence of calcium ions. Calcium ions interact with the carboxyl groups of biopolymers, such as xanthan gum and guar gum, forming cross-links. This process tightens the chemical bonds between biopolymers, forming a more robust gel matrix. Calcium-containing compounds, such as Calcium Chloride, create cross-links within the gel structures of biopolymers, enhancing the durability and stability of the gel [14,21,27,67,68].

This study used high-purity Calcium Chloride ($CaCl_2$), chemically coded as E509, to facilitate cross-linking with the biopolymers (Figure 3). Calcium Chloride was selected as the cross-linking agent due to its availability, low cost, and excellent solubility in water. When dissolved, Calcium Chloride undergoes an exothermic reaction, dissociating into calcium (Ca^{2+}) and chloride (Cl^-) ions. The free calcium ions form strong bonds with the carboxyl groups of the biopolymers, thereby reinforcing the bonds created by the biopolymers [46,68].

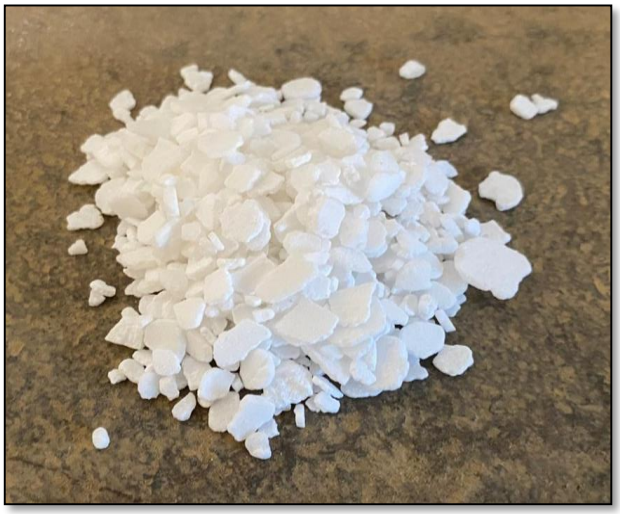


Figure 3. Calcium chloride (Kalsiyum klorür)

2.2. Method (Metod)

In soil improvement studies, the optimum biopolymer ratio typically ranges between 0.5% and 3%, depending on factors such as the type of biopolymer used and soil characteristics [48,60,61]. However, it has been reported that this ratio may decrease when a cross-linking agent is used [46]. Accordingly, in the experimental design of this study, Xanthan Gum (XG) and Guar Gum (GG) biopolymers were incorporated at 0.5%, 1%, and 1.5% by the dry weight of the soil. Based on the literature findings presented in the introduction and by the recommendation that the amount of cross-linking agent should be lower than the biopolymer content when using physically binding biopolymers such as Xanthan Gum and Guar Gum [28,51–56,69–71], the amount of $CaCl_2$, which was used as a cross-linking agent, was set at a constant 0.5% for all mixtures (except the Reference Mixture), equal to the lowest biopolymer percentage (Table 2).

All samples were prepared using the dry mixing method. CaCl2 was ground into powder and subsequently mixed with the biopolymer. The initial water content of the soil was determined as 1.16%. The optimum water content for each mixture used in the experiments was individually determined to ensure the most suitable conditions for UCS and DST tests (Figure 4 and Table 2). In this context, the Proctor test was conducted following the ASTM D698 [72] standard to determine the optimum moisture content for each mixture separately. This test identified the maximum dry unit weight and the corresponding optimum moisture content, and the samples were subsequently compacted into molds based on these values [14,25,42].

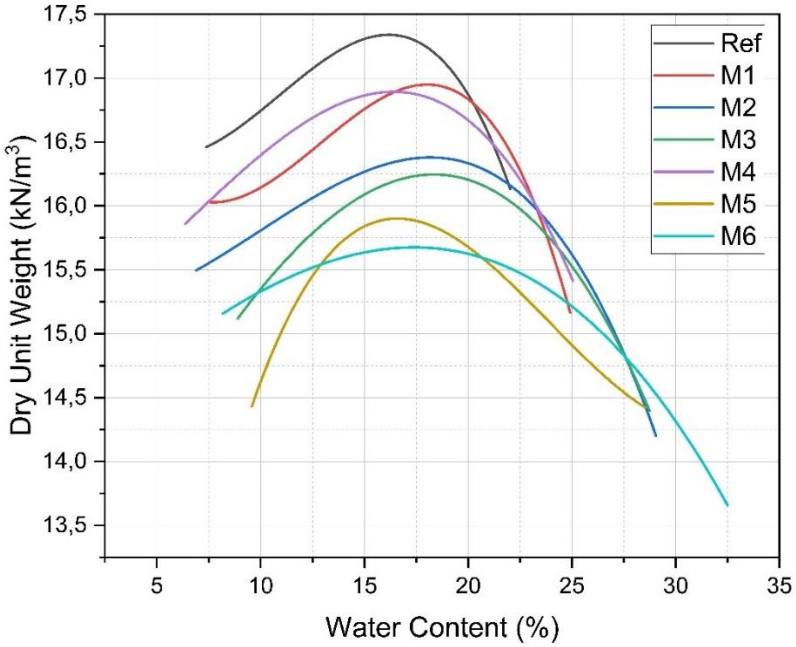


Figure 4. Optimum moisture content values of the mixtures (Karışımların optimum su muhtevası değerleri)

To ensure a homogeneous blend, the mixture was stirred first at low speed and then at high speed for an extended period before being promptly molded. Specimen preparation was carried out using a Harvard Miniature Proctor compaction mold. To achieve the equivalent compaction energy of the Standard Proctor test as specified in ASTM D698 [72], cylindrical specimens with a diameter of 5 cm and a height of 10 cm were compacted in three layers, with 15 blows applied. The compaction was performed using a 2.5 kg rammer dropped from a height of 30 cm. The samples were then wrapped in plastic film and placed in desiccators for 7, 28, 56 and 90 days. UCS test was performed on the samples at these curing times, and the DST test was also applied at the end of the 28-day curing period. All of these experiments were performed on two samples, and the average of the experimental results is shown in the graphs. The experimental design is summarized in Table 2.

Table 2. Experimental Scheme (Deney şablonu)

		Reference	M1	M2	M3	M4	M5	M6
$CaCl_2$ (%)*		0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Xanthan Gum (%)*		0	0,5	1	1,5	0	0	0
Guar Gum (%)*		0	0	0	0	0,5	1	1,5
Optimum Water Content (%)		17,34	16,95	16,38	16,25	16,89	15,95	15,68
Curing Durations	**UCS**	7, 28, 56, 90	7, 28, 56, 90	7, 28, 56, 90	7, 28, 56, 90	7, 28, 56, 90	7, 28, 56, 90	7, 28, 56, 90
	DST	28	28	28	28	28	28	28

***by dry weight of soil

UCS test was carried out on samples cured in a desiccator for 7, 28, 56, and 90 days (Figure 5). For the UCS test, cylindrical samples with a diameter of 50 mm and a height of 100 mm, free of hairline cracks, were prepared. During the test, to provide precise and accurate results, changes in sample height and applied load were measured using LVDTs with real-time data recorded by a computer (Figure 6.a). The load-displacement curve was drawn from the recorded data, and the peak values of this curve were taken as the unconfined compressive strength (ASTM D2166 / D2166M-16 [73]). The loading speed was set to 1 mm/min for the UCS test.

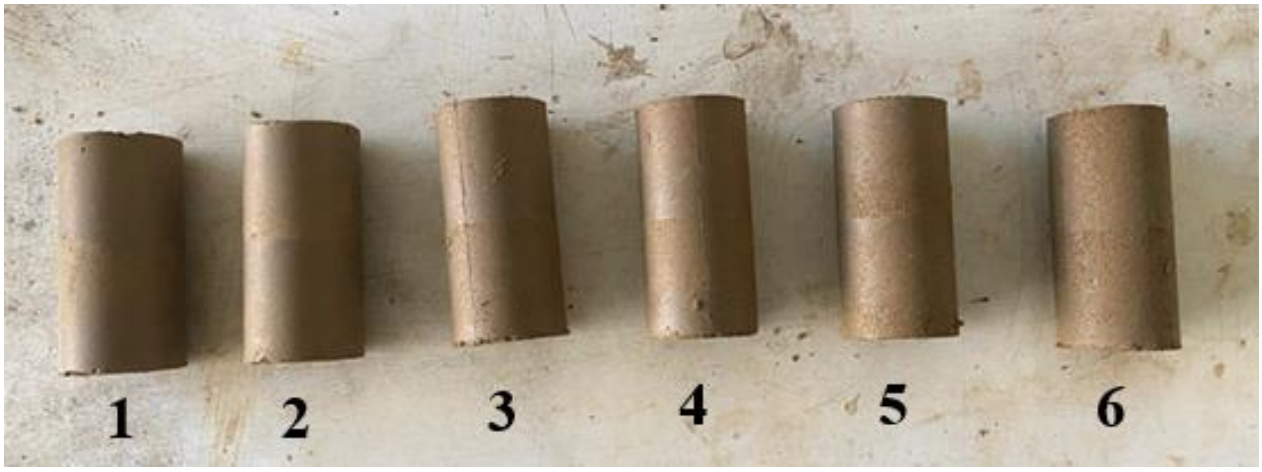


Figure 5. Specimens 1, 2, 3, 4, 5, and 6 from left to right (Soldan sağa doğru 1,2,3,4,5 ve 6 numaralı karışımlar)

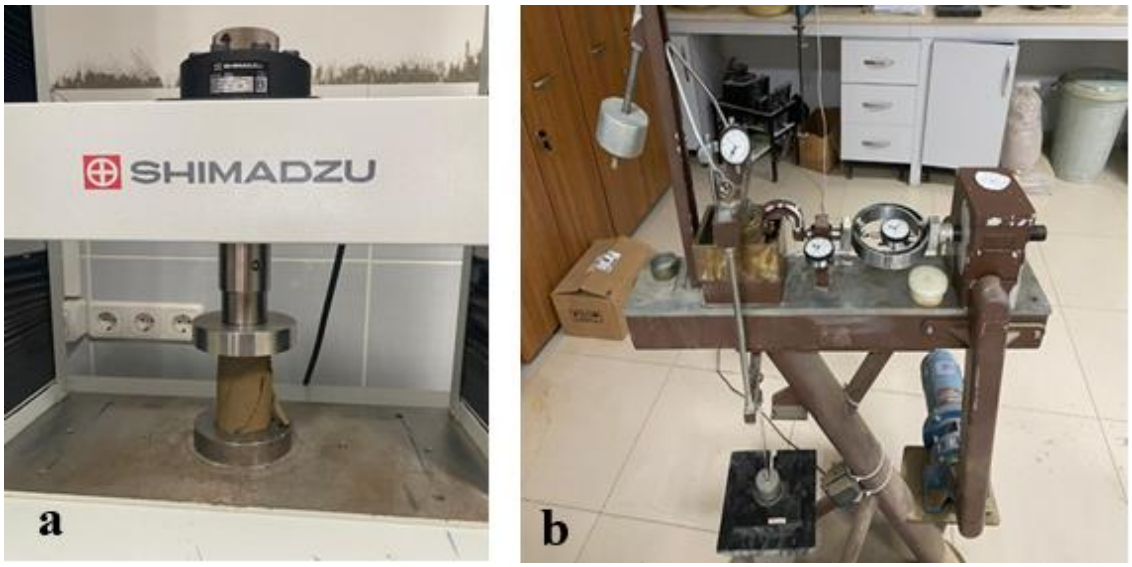


Figure 6. Unconfined compressive strength (UCS) test (a) and Direct Shear Test (b) (Serbest basınç (UCS) deneyi (a) ve kesme kutusu deneyi (b))

DST was performed on samples cured in a dryer for 28 days to determine cohesion (c), internal friction angle (ϕ), and shear strength by ASTM D3080/D3080M-11 [74]. During this test, 50, 100, and 150 kPa normal stresses were applied to the samples at a deformation speed of 0.8 mm/min (Figure 6.b).

3. RESULTS (BULGULAR)

3.1. Unconfined Compressive Strength (UCS) Results (Serbest Basınç Deneyi (UCS) Sonuçları)

The UCS values of the soil specimens prepared with 0.5%, 1%, and 1.5% Xanthan Gum and Guar Gum, along with 0.5% $CaCl_2$ by the dry weight of the soil, are presented in Figure 7. Figure 8 illustrates a graphical comparison of these values. For the reference soil specimens, UCS values at 7, 28, 56, and 90 days of curing were measured as 502, 508, 511.2, and 512.4 kPa, respectively. The increase in UCS for the reference soil specimens containing only $CaCl_2$ did not exceed 2%. Based on this, an average UCS value of 508.25 kPa was considered a baseline for comparison with other mixtures.

According to these results, M1 exhibited the highest compressive strength at 7 and 28 days, while M4 achieved the highest strength at 56 and 90 days of curing. The unconfined compressive strength of M1, which contains 0.5% Xanthan Gum, reached 790.92 kPa at 7 days and 987.57 kPa at 28 days. On the other hand, the UCS of M4, which contains 0.5% Guar Gum, was 2040.11 kPa at 56 days, making it the highest among all mixtures. However, M3 and M6, which contained 1.5% biopolymer, generally exhibited lower compressive strength values. This suggests that excessive gel formation negatively affects particle bonding, reducing strength [57–59]. At the end of the 90-day curing period, M4 achieved the highest UCS value of 3871.51 kPa, confirming the superior long-term performance of Guar Gum in soil stabilization.

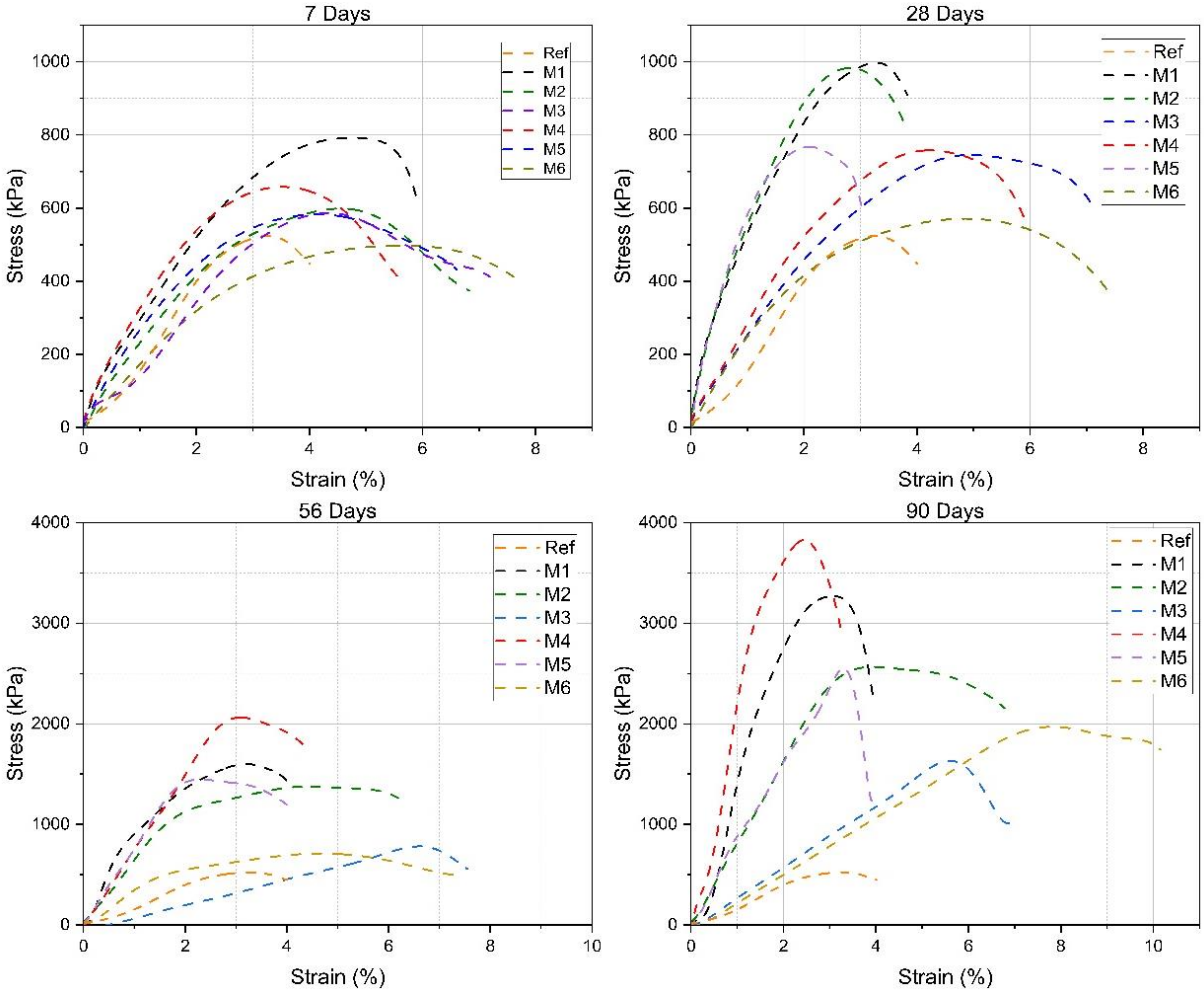


Figure 7. Stress-Strain values of mixtures depending on curing duration (Kür süresine göre numunelerin gerilme-gerinim değerleri)

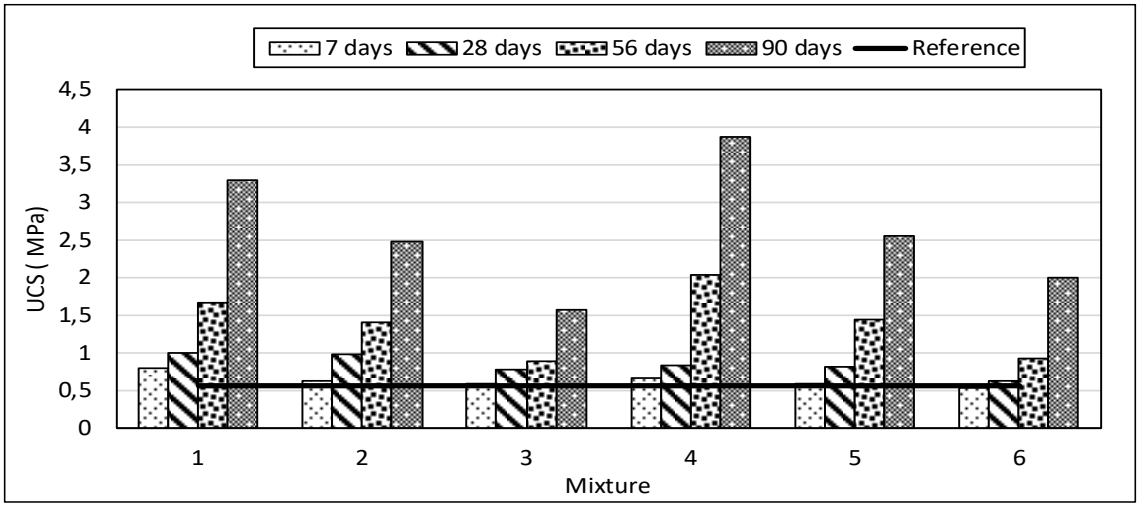


Figure 8. UCS values for 7, 28, 56 and 90 days of curing based on mixture numbers (7, 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerine göre numunelerin serbest basınç dayanım değerleri)

The percentage change in unconfined compressive strength (UCS) values of the mixtures compared to the reference sample, depending on the curing duration, is presented in Figure 9. The UCS increase percentages of Xanthan Gum-containing specimens (1, 2, and 3) compared to the reference sample were 43.75%, 13.89%, and 7.63% after 7 days of curing, and 79.49%, 76.04%, and 39.28% after 28 days of curing, respectively. For Guar Gum specimens (4, 5, and 6), the UCS increase percentages after 7 days of curing were 20.07% and 5.97%, while the UCS of specimen 6 decreased by 4.59% compared to the reference sample. After 28 days of curing, the UCS values of Guar Gum specimens increased by 50.29%, 47.74%, and 14.65%, respectively. When the 56-day and 90-day curing periods are examined, it can be observed that Guar Gum-containing mixtures exhibited a more significant long-term increase in UCS values compared to Xanthan Gum-containing mixtures. At the end of the 90-day curing period, the highest UCS improvement was recorded in Mixture 4, where UCS increased by approximately 604% compared to the reference sample. Additionally, it was noted that as the biopolymer content increased, the UCS improvement rate decreased for both biopolymers. Furthermore, as the curing duration increased, the rate of strength improvement in the mixtures also showed an increasing trend.

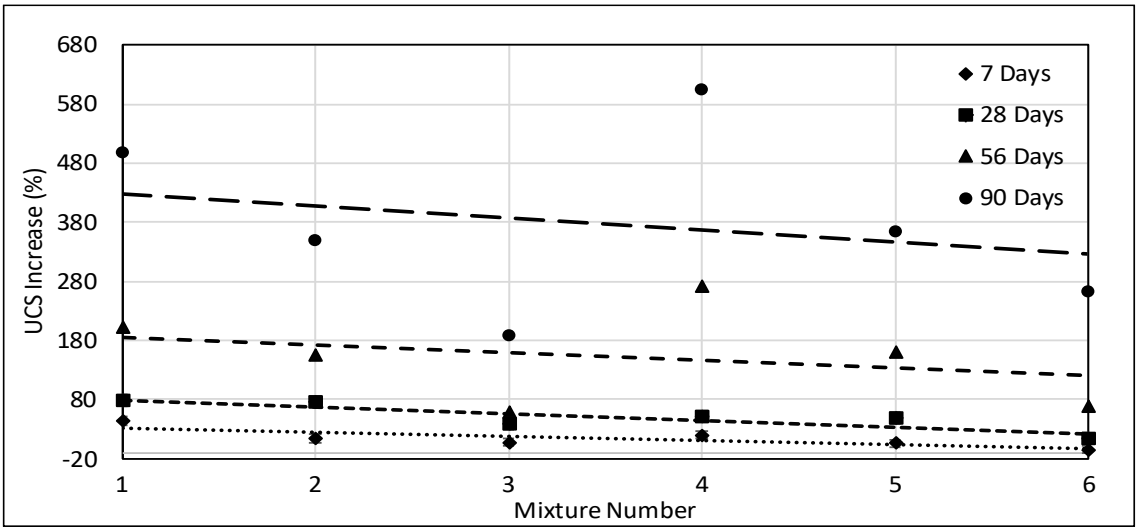


Figure 9. UCS value increase compared to the reference sample based on curing duration and mixture numbers (Karışım numaralarına göre serbest basınç dayanımı artış miktarları)

According to the UCS test results, all mixtures that achieved the highest UCS values contained 0.5% biopolymer. Additionally, the optimum biopolymer ratio remained at 0.5% for 7, 28, 56, and 90-day curing periods, suggesting that the presence of the cross-linking agent may have reduced the optimal biopolymer content. When the biopolymer ratio exceeded this threshold, excessive gel formation

tendencies negatively affected soil strength, reducing UCS [26]. This trend was particularly evident in the 90-day UCS results, where an inverse relationship between biopolymer content and strength was observed across all curing periods. As the biopolymer content increased, the overall strength of the soil specimens declined, confirming that 0.5% is the optimal biopolymer dosage for this soil type.

Soil specimens treated with Xanthan Gum achieved their maximum strength at 7 and 28 days of curing, while those treated with Guar Gum reached their highest strength at 56 and 90 days. The literature indicates that Guar Gum's hydrogen bonding and gelation properties exhibit long-term effectiveness compared to Xanthan Gum, which explains why Xanthan Gum primarily enhances short-term strength, whereas Guar Gum contributes more significantly to long-term strength development [46,49,75,76]. In this regard, the findings of this study are consistent with the literature.

Figure 10 presents the Secant Modulus (E_{50}) values for each mixture. The data indicate that all biopolymer-treated mixtures exhibited an increase in E_{50} compared to the reference sample, with the highest value of 221 MPa recorded in M4 at 90 days of curing. Additionally, M1, which exhibited the highest UCS at 7 and 28 days, and M4, which showed the highest UCS at 56 and 90 days, demonstrated a significant increase in Secant Modulus compared to the reference sample. The silt soil used in this study exhibited a particularly low Secant Modulus, with the reference sample recording only 18.2 MPa. This indicates that the soil is highly susceptible to large deformations under applied loads, exhibiting low stiffness and load-bearing capacity, making it more flexible and highly sensitive to deformation [79–81]. While biopolymer modification resulted in substantial improvements in Secant Modulus, this confirms that biopolymers contribute to increasing the rigidity and load-bearing capacity of the soil [23,80,81]. Although a higher Secant Modulus does not always correspond to the highest UCS value [77], it was observed in this study that mixtures exceeding the optimal biopolymer ratio of 0.5% exhibited relatively inconsistent Secant Modulus values, further emphasizing the importance of maintaining an optimal biopolymer dosage (Figure 9). The maximum increase in Secant Modulus was approximately 1200%, and previous studies have also reported that biopolymer stabilization can lead to similar improvements in Secant Modulus [47,48,77,78].

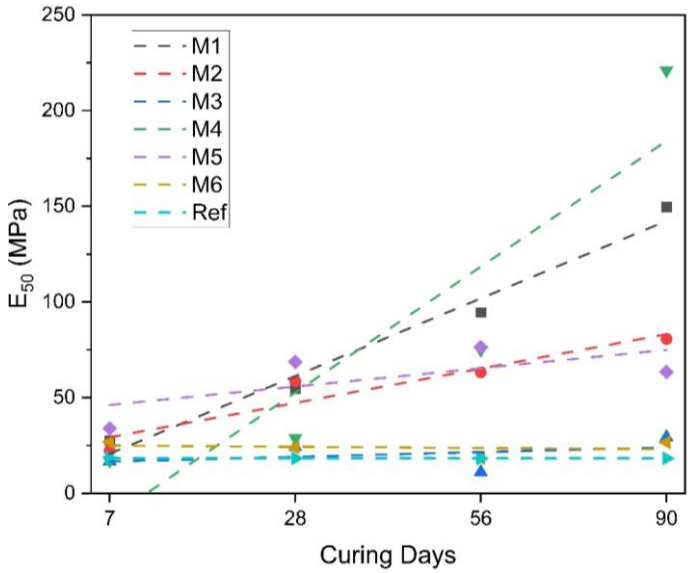


Figure 10. Secant Modulus (E_{50}) Values of the Mixtures Based on Curing Duration (Kür süresine bağlı Sekant Modülü (E_{50}) değerleri)

3.2. Direct Shear Test (DST) Results (Kesme Kutusu Deney Sonuçları)

The direct shear test results obtained in this study indicate that, under 50 kPa normal stress, the shear strength values for the reference sample and mixtures 1, 2, 3, 4, 5, and 6 were 44.02, 70.23, 66.77, 61.33, 88.03, 54.40, and 54.90 kPa, respectively. Under 100 kPa normal stress, these values increased to 68.25, 108.80, 91.49, 82.10, 96.93, 79.13, and 80.61 kPa, respectively. At 150 kPa normal stress, the shear strength values were measured as 93.97, 148.37, 122.16, 105.84, 112.76, 108.31, and 106.83 kPa, respectively. The experimental results are presented in Figure 11, while the corresponding graphical representations are provided in Figure 12.

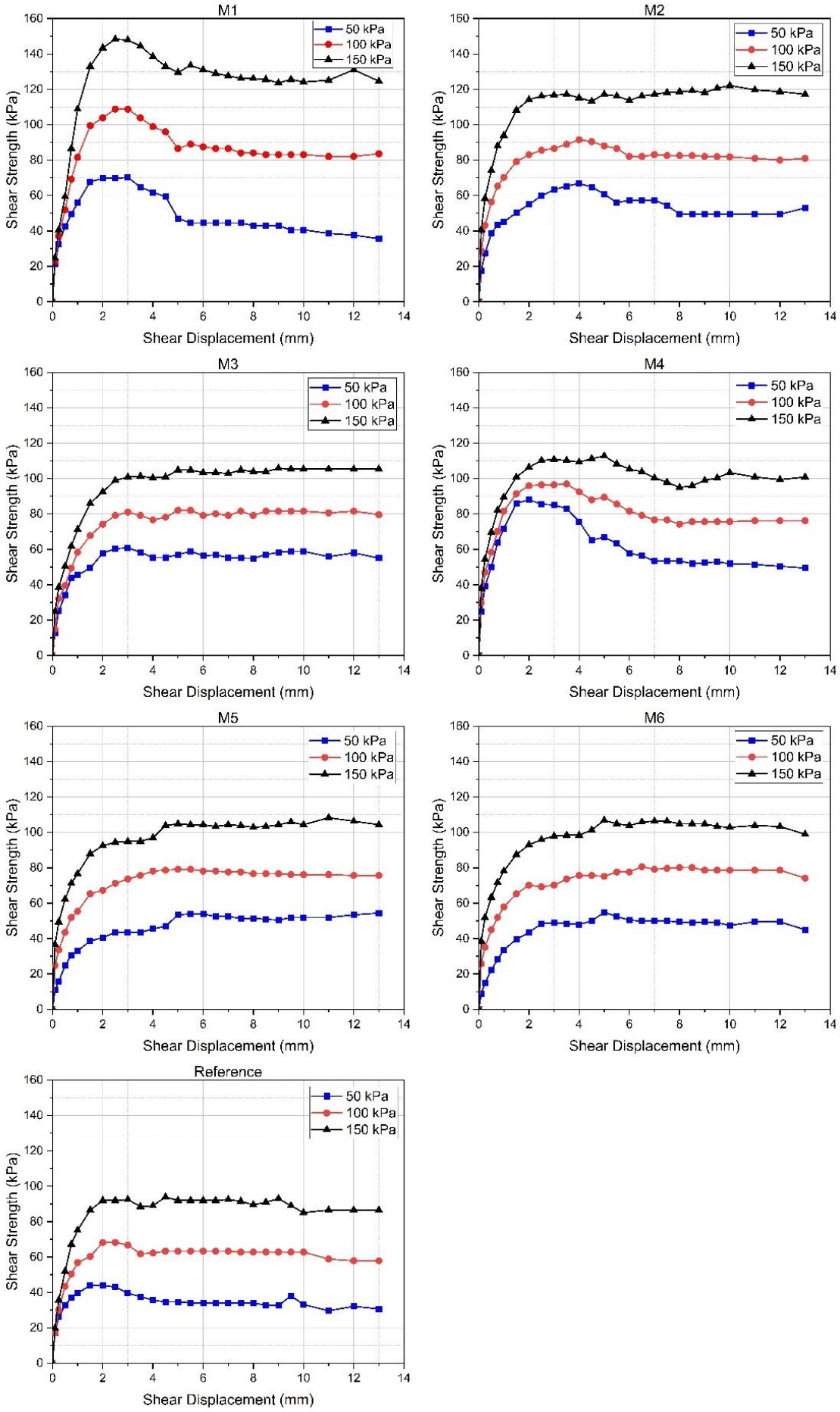


Figure 11. DST Test Results of the Mixtures (Karışımların kesme kutusu deney sonuçları)

Shear strength values were evaluated under 50, 100, and 150 kPa normal stresses. The highest shear strength under 50 kPa normal stress was measured as 88.03 kPa in Mixture 4. Under 100 kPa normal stress, the highest value was recorded in Mixture 1 at 108.80 kPa, whereas under 150 kPa normal stress, the maximum shear strength reached 148.37 kPa in Mixture 1. These results suggest that Xanthan Gum provides higher shear strength, particularly under higher normal stress conditions, whereas Guar Gum performs better at lower stress levels [24,83].

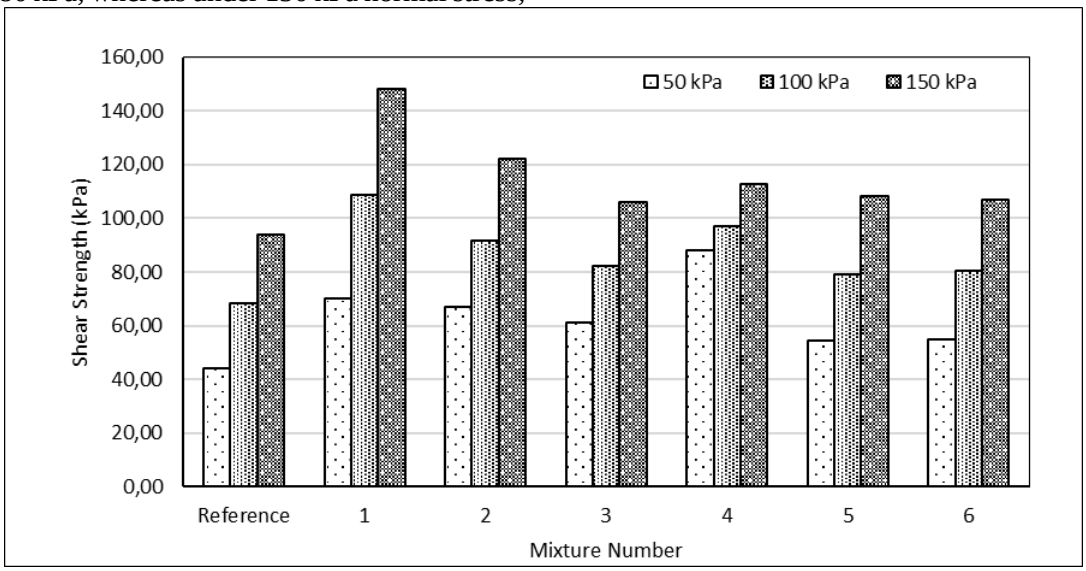


Figure 12. Variation of Shear Strength Based on Mixture Number (Karışım numarasına göre kayma mukavemeti değişimi)

Figure 13 and 14 illustrating the internal friction angle (ϕ) and cohesion values obtained from the direct shear test are presented in Figures 9 and 10. According to the results, the internal friction angle of the reference sample was 18.79°, while the internal friction angles of the other mixtures were measured as 26.5°, 38°, 29°, 12.5°, 13.9°, 28.3°, and 27.4°, respectively. Similarly, the cohesion value of the reference sample was 18.79 kPa, whereas the cohesion values for the other mixtures were 30.99 kPa, 38.01 kPa, 67.51 kPa, 74.51 kPa, 26.71 kPa, and 28.85 kPa, respectively. It is well known that the use of biopolymers in different proportions leads to varying integrated structures within the soil matrix, preventing a linear trend in their effects, and consequently, shear strength values do not always exhibit a consistent increase [46,48,84].

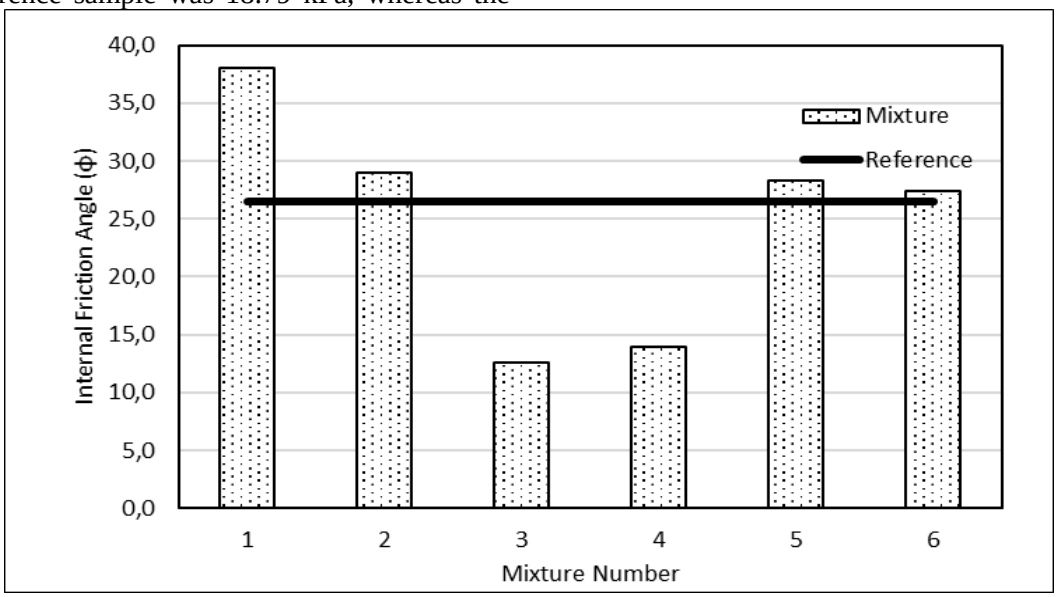


Figure 13. Variation of Internal Friction Angle Based on Mixture Numbers (Karışım numarasına göre içsel sürtünme açısı değişimi)

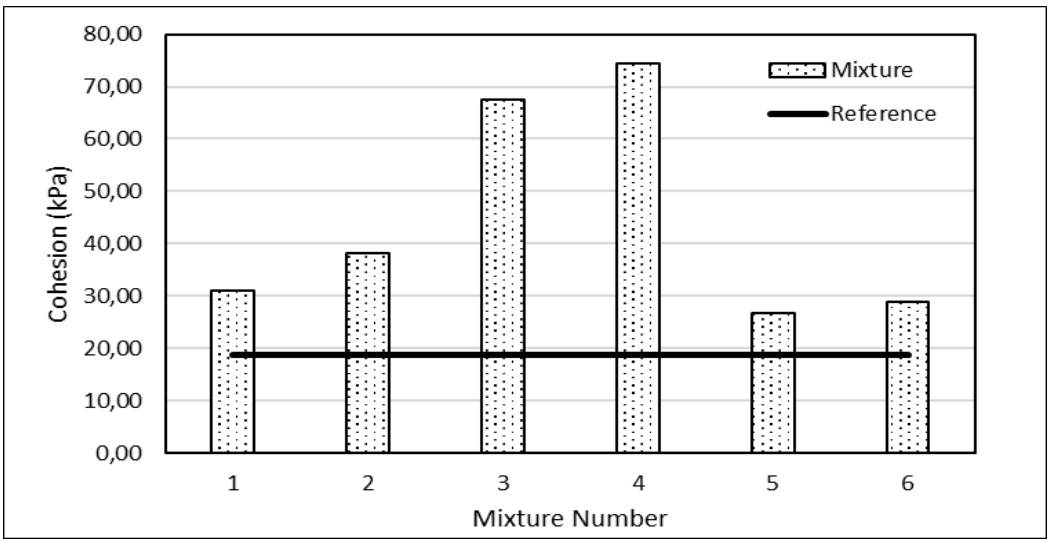


Figure 14. Variation of Cohesion Based on Mixture Numbers (Karışım numarasına göre kohezyon değişimi)

Regarding internal friction angle and cohesion, the reference sample exhibited an internal friction angle of 18.79° and a cohesion value of 18.79 kPa. The highest internal friction angle was observed in Mixture 1 at 38°, while the lowest value was recorded in Mixture 4 at 12.5°. Conversely, the highest cohesion value was obtained in Mixture 4 at 74.51 kPa, whereas the lowest was measured in Mixture 5 at 26.71 kPa. These findings indicate that Guar Gum improves cohesion by strengthening interparticle bonding, whereas Xanthan Gum enhances the internal friction angle, improving shear resistance. Similar to these results, previous studies have reported that the addition of Xanthan Gum and Guar Gum to the soil does not result in a linear increase or decrease in shear parameters; instead, variations in internal friction angle and cohesion values depend on the specific biopolymer mixture ratio [17,85].

Overall, mixtures containing 0.5% biopolymer provided optimal cohesion and shear strength stabilization. When the biopolymer content was increased to 1.5%, UCS values decreased by 7.63% to 39.28%, indicating that excessive biopolymer content led to over-gelation, which reduced soil strength [26,86]. These results highlight the importance of optimizing biopolymer dosage and emphasize the need for further investigation of its long-term effects on various soil types [87,88].

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

- This study evaluated the effects of Xanthan Gum and Guar Gum biopolymers on the strength parameters of silty soil in the presence of a constant $CaCl_2$ concentration (0.5%). The role of biopolymer additives in soil stabilization was analyzed by comparing unconfined compressive strength (UCS), shear strength, internal friction angle, and cohesion values.
- In terms of unconfined compressive strength (UCS), the highest values were obtained in Xanthan Gum mixtures at 7 and 28 days of curing (790.92 kPa and 987.57 kPa, respectively), while the highest values at 56 and 90 days were recorded in Guar Gum mixtures (2040.11 kPa and 3871.51 kPa, respectively). The biopolymer ratio in all mixtures with the highest strength is 0.5%. Additionally, biopolymer and CaCl2 increased the secant modulus (E50) values for all cure times and mixtures compared to the reference sample.
- For shear strength, the highest values under 50, 100, and 150 kPa normal stresses were measured as 88.03 kPa (Guar Gum), 108.80 kPa (Xanthan Gum), and 148.37 kPa (Xanthan Gum), respectively.
- When internal friction angle and cohesion values were compared, the highest internal friction angle was recorded as 38° (Xanthan Gum), while the lowest was 12.5° (Guar Gum). The highest cohesion value was 74.51 kPa (Guar Gum), while the lowest was 26.71 kPa (Guar Gum).
- When the biopolymer content was increased to 1.5%, UCS values decreased by 7.63% to 39.28%. Biopolymer additives can be considered an effective stabilization method for improving the strength of silty soils when applied at optimal ratios. While Xanthan Gum provides rapid, short-term stabilization, Guar Gum improves long-term strength.

5. FUTURE WORK AND RECOMMENDATIONS (GELECEK ÇALIŞMA VE ÖNERİLER)

Calcium Chloride was used at a fixed ratio of 0.5% in all mixtures (excluding the reference sample). Notably, the maximum strength was achieved when the amount of biopolymer matched the Calcium Chloride content at 0.5%. The behavior of these mixtures under varying Calcium Chloride ratios should be investigated. The effects of increasing Calcium Chloride and biopolymer contents on strength should also be examined. The influence of Calcium Chloride alone on the performance of biopolymers should be further studied. Therefore, future studies are recommended to investigate the effect of using Calcium Chloride at varying proportions or not using it at all on the strength properties.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

It was published in the abstract book presented at the 2nd International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technologies.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***Halil Oğuzhan KARA*:** He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

***Mehmet Uğur YILMAZOĞLU*:** He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Shokrani A, Dhokia V, Newman ST. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012; 57: 83–101.

[2] Doğan, N., Fırat, M.E., 2024. Uçucu kül, silis dumanı ve cam elyaf kullanılarak iyileştirilen kilin mühendislik performansının değerlendirilmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji 12(4): 784–98, Doi: 10.29109/gujsc.1393857.

[3] Mitchell, J.K., Soga, K., 2005. Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley & Sons, Hoboken.

[4] Bodur, B., Bayraktar, O.Y., Benli, A., Kaplan, G., Tobbala, D.E., Tayeh, B., 2023. Effect of using wastewater from the ready-mixed concrete plant on the performance of one-part alkali-activated GBFS/FA composites: Fresh, mechanical and durability properties. Journal of Building Engineering 76, Doi: 10.1016/j.jobe.2023.107167.

[5] Kaplan, G., Bayraktar, O.Y., Li, Z., Bodur, B., Yılmazoglu, M.U., Alcan, B.A., 2023. Improving the eco-efficiency of fiber reinforced composite by ultra-low cement content/high FA-GBFS addition for structural applications: Minimization of cost, CO2 emissions and embodied energy. Journal of Building Engineering 76, Doi: 10.1016/j.jobe.2023.107280.

[6] Gencel, O., Yavuz Bayraktar, O., Kaplan, G., Arslan, O., Nodehi, M., Benli, A., et al., 2022. Lightweight foam concrete containing expanded perlite and glass sand: Physico-mechanical, durability, and insulation properties. Construction and Building Materials 320, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126187.

[7] Bodur, B., Mecit Işık, M.A., Benli, A., Bayrak, B., Öz, A., Bayraktar, O.Y., et al., 2024. Durability of green rubberized 3D printed lightweight cement composites reinforced with micro attapulgite and micro steel fibers: Printability and environmental perspective. Journal of Building Engineering 90: 109447, Doi: 10.1016/j.jobe.2024.109447.

[8] Özkan, İ.G.M., Aldemir, K., Alhasan, O., Benli, A., Bayraktar, O.Y., Yılmazoğlu, M.U., et al., 2024. Investigation on the sustainable use of different sizes of sawdust aggregates in eco-friendly foam concretes: Physico-mechanical, thermal insulation and durability characteristics. Construction and Building Materials 438, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137100.

[9] Bozyigit, I., Javadi, A., Altun, S., 2021. Strength properties of xanthan gum and guar gum treated kaolin at different water contents. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 13(5): 1160–72, Doi: 10.1016/j.jrmge.2021.06.007.

[10] Bayraktar, O.Y., 2022. Usability of Organic Wastes in Concrete Production; Palm Leaf Sample. Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences, Doi: 10.55385/kastamonujes.1104531.

[11] Kaplan, G., Bayraktar, O.Y., Bayraktar, T., 2023. Optimization of without SCM concrete exposed to seawater according to minimum cost and CO2 emissions: Sustainable design with ABC algorithm. Materials Today Communications 35: 105657, Doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.105657.

[12] Bayraktar, O.Y., Benli, A., Bodur, B., Öz, A., Kaplan, G., 2024. Performance assessment and cost analysis of slag/metakaolin based rubberized semi-lightweight geopolymers with perlite aggregate: Sustainable reuse of waste tires. Construction and Building Materials 411, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134655.

[13] Ahıskalı, A., Ahıskalı, M., Bayraktar, O.Y., Kaplan, G., Assaad, J., 2024. Mechanical and durability properties of polymer fiber reinforced one-part foam geopolymer concrete: A sustainable strategy for the recycling of waste steel slag aggregate and fly ash. Construction and Building Materials 440, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137492.

[14] Dehghan, H., Tabarsa, A., Latifi, N., Bagheri, Y., 2019. Use of xanthan and guar gums in soil strengthening. Clean Technologies and Environmental Policy 21(1): 155–65, Doi: 10.1007/s10098-018-1625-0.

[15] Chang, I., Im, J., Cho, G.-C., 2016. Geotechnical engineering behaviors of gellan gum biopolymer treated sand. Canadian Geotechnical Journal 53(10): 1658–70, Doi: 10.1139/cgj-2015-0475.

[16] BOUAZZA, A., GATES, W.P., RANJITH, P.G., 2009. Hydraulic conductivity of biopolymer-treated silty sand. Géotechnique 59(1): 71–2, Doi: 10.1680/geot.2007.00137.

[17] Dora, N., Nanda, P., Reddy, N.G., 2021. Application of Biopolymers for Enhancing Engineering Properties of Problematic Soils and Industrial Wastes: A Review. p. 203–11.

[18] Kumar, S., Yadav, B.D., Raj, R., 2024. A review on the application of biopolymers (xanthan, agar and guar) for sustainable improvement of soil. Discover Applied Sciences, Doi: 10.1007/s42452-024-06087-7.

[19] Jang, J., 2020. A Review of the Application of Biopolymers on Geotechnical Engineering and the Strengthening Mechanisms between Typical Biopolymers and Soils. Advances in Materials Science and Engineering 2020(1), Doi: 10.1155/2020/1465709.

[20] Cabalar, A.F., Awraheem, M.H., Khalaf, M.M., 2018. Geotechnical Properties of a Low-Plasticity Clay with Biopolymer. Journal of Materials in Civil Engineering 30(8), Doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002380.

[21] Wiszniewski, M., Skutnik, Z., Biliniak, M., Çabalar, A.F., 2017. Some geomechanical properties of a biopolymer treated medium sand. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Land Reclamation 49(3): 201–12, Doi: 10.1515/sggw-2017-0016.

[22] Chang, I., Im, J., Prasidhi, A.K., Cho, G.-C., 2015. Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening. Construction and Building Materials 74: 65–72, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.026.

[23] Patwa, D., Dubey, A.A., Ravi, K., Sreedeep, S., 2024. Biopolymer Stabilization of Highly Plastic Silty Soil for Rammed Earth Construction Materials. p. 379–89.

[24] Gedela, R., Indraratna, B., Medawela, S., Nguyen, T.T., 2023. Effects Of Fines Content On The Strength And Stiffness Of Biopolymer Treated Low-Plasticity Soils. Australian Geomechanics Journal: 33–41, Doi: 10.56295/AGJ5811.

[25] Alassal, M.A., Sasar, M., Jaradat, K.A., Abdelaziz, S.L., 2024. The Role of Biopolymers in Enhancing Granular Media Shear Strength: A Comparative Analysis. IFCEE 2024, Reston, VA: American Society of Civil Engineers p. 108–18.

[26] Sujatha, E.R., Saisree, S., 2019. Geotechnical behaviour of guar gum-treated soil. Soils and Foundations 59(6): 2155–66, Doi: 10.1016/j.sandf.2019.11.012.

[27] Nair, L.P., Kannan, K., 2020. Effect of Biopolymers on Soil Strengthening. p. 65–71.

[28] Lee, M., Park, D.-Y., Kwon, Y.-M., Chang, I., Cho, G.-C., 2023. Study on Crosslink-Induced Gelation of Xanthan Gum Biopolymer and Its Soil Strengthening Behavior as Sustainable Grout Material. Geo-Congress 2023, Reston, VA: American Society of Civil Engineers p. 322–30.

[29] Muguda, S., Hughes, P.N., Augarde, C.E., Perlot, C., Walter Bruno, A., Gallipoli, D., 2022. Cross-linking of biopolymers for stabilizing earthen construction materials. Building Research & Information 50(5): 502–14, Doi: 10.1080/09613218.2021.2001304.

[30] Kavazanjian, E., Iglesias, E., Karatas, I., 2009. Biopolymer soil stabilization for wind erosion control. Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering, vol. 1. p. 881–4.

[31] Soldo, A., Miletić, M., Auad, M.L., 2020. Biopolymers as a sustainable solution for the enhancement of soil mechanical properties. Scientific Reports 10(1): 267, Doi: 10.1038/s41598-019-57135-x.

[32] Fatehi, H., Ong, D.E.L., Yu, J., Chang, I., 2023. The Effects of Particle Size Distribution and Moisture Variation on Mechanical Strength of Biopolymer-Treated Soil. Polymers 15(6): 1549, Doi: 10.3390/polym15061549.

[33] Çetin, M.Y., Bağrıaçık, B., Annagür, H.M., Topoliński, S., 2024. Improvement of Geotechnical Properties of Clayey Soil Using Biopolymer and Ferrochromium Slag Additives. Polymers 16(10): 1306, Doi: 10.3390/polym16101306.

[34] Caldeira, J.B., Correia, A.A., Branco, R., Morais, P. V., 2024. The effect of biopolymer stabilisation on biostimulated or bioaugmented mine residue for potential technosol production. Scientific Reports 14(1): 25583, Doi: 10.1038/s41598-024-75840-0.

[35] Bang, J.-U., Lee, M., Park, D.-Y., Chang, I., Cho, G.-C., 2024. Effects of soil composition and curing conditions on the strength and durability of Cr3+-crosslinked biopolymer-soil composites. Construction and Building Materials 449: 138440, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138440.

[36] Ren, F., Ding, H., Dong, B., Qian, X., Liu, J., Tan, J., 2024. Study on the improvement of soil properties using hydrophilic-hydrophobic biopolymer crosslinking. Construction and Building Materials 415: 135101, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135101.

[37] Lee, M., Chang, I., Cho, G.-C., 2023. Advanced Biopolymer–Based Soil Strengthening Binder with Trivalent Chromium–Xanthan Gum Crosslinking for Wet Strength and Durability Enhancement. Journal of Materials in Civil Engineering 35(10), Doi: 10.1061/JMCEE7.MTENG-16123.

[38] Jang, J., 2020. A Review of the Application of Biopolymers on Geotechnical Engineering and the Strengthening Mechanisms between Typical Biopolymers and Soils. Advances in Materials Science and Engineering 2020(1), Doi: 10.1155/2020/1465709.

[39] Biernat, M., Woźniak, A., Chraniuk, M., Panasiuk, M., Tymowicz-Grzyb, P., Pagacz, J., et al., 2023. Effect of Selected Crosslinking and Stabilization Methods on the Properties of Porous Chitosan Composites Dedicated for Medical Applications. Polymers 15(11): 2507, Doi: 10.3390/polym15112507.

[40] Ashok Kumar, M., Moghal, A.A.B., Bommisetty, J., Mohammad, N., 2024. Efficacy of Cross-Linking of Biopolymers in Soil—Stabilization. p. 163–75.

[41] Bagriacik, B., Ok, B., Kahiyah, M.T.M.A., 2021. An experimental study on improvement of cohesive soil with eco-friendly guar gum. Soils and Rocks 44(2): 1–9, Doi: 10.28927/SR.2021.060020.

[42] Soldo, A., Miletić, M., Auad, M.L., 2020. Biopolymers as a sustainable solution for the enhancement of soil mechanical properties. Scientific Reports 10(1), Doi: 10.1038/s41598-019-57135-x.

[43] Fatehi, H., Abtahi, S.M., Hashemolhosseini, H., Hejazi, S.M., 2018. A novel study on using protein based biopolymers in soil strengthening. Construction and Building Materials 167: 813–21, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.028.

[44] Azimi, M., Soltani, A., Mirzababaei, M., Jaksa, M.B., Ashwath, N., 2024. Biopolymer stabilization of clayey soil. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 16(7): 2801–12, Doi: 10.1016/j.jrmge.2023.12.020.

[45] Keshav, N., Prabhu, A., Kattimani, A., Dharwad, A., Kallatti, C., Mahalank, S., 2021. Enhancing the Properties of Expansive Soil Using Biopolymers—Xanthan Gum and Guar Gum. p. 129–35.

[46] Ayeldeen, M.K., Negm, A.M., El Sawwaf, M.A., 2016. Evaluating the physical characteristics of biopolymer/soil mixtures. Arabian Journal of Geosciences 9(5), Doi: 10.1007/s12517-016-2366-1.

[47] Moghal, A.A.B., Vydehi, K.V., 2021. State-of-the-art review on efficacy of xanthan gum and guar gum inclusion on the engineering behavior of soils. Innovative Infrastructure Solutions 6(2), Doi: 10.1007/s41062-021-00462-8.

[48] Babatunde, Q.O., Son, D.G., Kim, S.Y., Byun, Y.-H., 2023. Effect of Curing Condition and Solvent Content on Mechanical Properties of Zein-Biopolymer-Treated Soil. Sustainability 15(15): 12048, Doi: 10.3390/su151512048.

[49] Azimi, M., Soltani, A., Mirzababaei, M., Jaksa, M.B., Ashwath, N., 2024. Biopolymer stabilization of clayey soil. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering

16(7): 2801–12, Doi: 10.1016/j.jrmge.2023.12.020.

[50] Keshav, N., Prabhu, A., Kattimani, A., Dharwad, A., Kallatti, C., Mahalank, S., 2021. Enhancing the Properties of Expansive Soil Using Biopolymers—Xanthan Gum and Guar Gum. p. 129–35.

[51] Bagriacik, B., Ok, B., Kahiyah, M.T.M.A., 2021. An experimental study on improvement of cohesive soil with eco-friendly guar gum. Soils and Rocks 44(2): 1–9, Doi: 10.28927/SR.2021.060020.

[52] Sapuła, P., Bialik-Wąs, K., Malarz, K., 2023. Are Natural Compounds a Promising Alternative to Synthetic Cross-Linking Agents in the Preparation of Hydrogels? Pharmaceutics 15(1): 253, Doi: 10.3390/pharmaceutics15010253.

[53] Lee, K.Y., Mooney, D.J., 2012. Alginate: Properties and biomedical applications. Progress in Polymer Science 37(1): 106–26, Doi: 10.1016/j.progpolymsci.2011.06.003.

[54] Quan, H., Hu, Y., Huang, Z., Wenmeng, D., 2020. Preparation and property evaluation of a hydrophobically modified xanthan gum XG-C16. Journal of Dispersion Science and Technology 41(5): 656–66, Doi: 10.1080/01932691.2019.1610425.

[55] Maity, S., Sa, B., 2014. Development and Evaluation of Ca+ 2 Ion Cross-Linked Carboxymethyl Xanthan Gum Tablet Prepared by Wet Granulation Technique. AAPS PharmSciTech 15(4): 920–7, Doi: 10.1208/s12249-014-0123-x.

[56] Gao, C.H., 2016. Unique rheology of high acyl gellan gum and its potential applications in enhancement of petroleum production. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology 6(4): 743–7, Doi: 10.1007/s13202-015-0212-8.

[57] Wegrzynowska-Drzymalska, K., Grebicka, P., Mlynarczyk, D.T., Chelminiak-Dudkiewicz, D., Kaczmarek, H., Goslinski, T., et al., 2020. Crosslinking of Chitosan with Dialdehyde Chitosan as a New Approach for Biomedical Applications. Materials 13(15): 3413, Doi: 10.3390/ma13153413.

[58] Wei, X., Zhu, Q., Qian, J., Lin, Y., Shenoy, V.B., 2016. Response of biopolymer networks governed by the physical properties of cross-linking molecules. Soft Matter 12(9): 2537–41, Doi: 10.1039/C5SM02820E.

[59] Czakkel, O., Madsen, A., 2011. Evolution of dynamics and structure during formation of a cross-linked polymer gel. EPL (Europhysics Letters) 95(2): 28001, Doi: 10.1209/0295-5075/95/28001.

[60] Lin, Y., Liu, C., Tripathi, A.K., Tsavalas, J.G., 2023. Early bird gets the network: The relative importance of reactivity ratios, Ψ parameter, and crosslinker level on gel formation in <scp>FRP</scp>. The Canadian Journal of Chemical Engineering 101(9): 5382–94, Doi: 10.1002/cjce.25005.

[61] Raj, S., 2025. Stabilization of Soil Using Sodium Alginate Biopolymer. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology 13(1): 270–8, Doi: 10.22214/ijraset.2025.66257.

[62] Yogeshwar, K.C., Sonthwal, Er.V.K., 2023. Stabilization of Soil Using Guar Gum Biopolymer. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology 11(9): 1018–27, Doi: 10.22214/ijraset.2023.55796.

[63] Fradj, N., Török, Á., Kádár, I., 2024. Biopolymers in geotechnical engineering for soil improvement. Pollack Periodica 19(2): 82–6, Doi: 10.1556/606.2023.00937.

[64] Pydi, R., Yadu, L., Chouksey, S.K., 2024. Application of Biopolymers in Geotechnical Engineering Practices: An Eco-Friendly Approach. p. 127–36.

[65] ASTM D7928-17., 2017. Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis, ASTM West Conshohocken, PA. Doi: 10.1520/D7928-17.

[66] ASTM D6913-04., 2004. Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, ASTM West Conshohocken, PA. Doi: 10.1520/D6913-04.

[67] ASTM D854-14., 2014. Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM West Conshohocken, PA. Doi: 10.1520/D0854-14.

[68] Liu, Y., Chang, C.-W., Namdar, A., She, Y., Lin, C.-H., Yuan, X., et al., 2019. Stabilization of expansive soil using cementing material from rice husk ash and calcium carbide residue. Construction and Building Materials 221: 1–11, Doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.05.157.

[69] Wan, J., Ouyang, F., Xiao, H., Wang, L., Tao, G., 2024. Experimental Study on the Physical and Mechanical Properties of Modified Clay Using Xanthan Gum and Guar Gum Composite Materials. Sustainability 16(13): 5432, Doi: 10.3390/su16135432.

[70] Grabska-Zielińska, S., 2024. Cross-Linking Agents in Three-Component Materials Dedicated to Biomedical Applications: A Review. Polymers 16(18): 2679, Doi: 10.3390/polym16182679.

[71] Ishak, N.S., Thng, C.S., Marsilla, K.I.K., 2020. The effect of crosslinking agent on protein-based bioplastic from fish waste. AIP Conference Proceedings, vol. 2267. American Institute of Physics Inc.

[72] Neto, V.O. de S., Castro, A.J.R., Moura, C.P., Júnior, A.M., Portela, R.R., Saraiva, G.D., et al., 2021. Biopolymers for Eco-Safe Remediation. p. 41–68.

[73] ASTM D698-12., 2012. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM West Conshohocken, PA. Doi: 10.1520/D0698-12E02.

[74] ASTM D2166 / D2166M-16. 2016. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of International, www.astm.org. Cohesive Soil, ASTM West Conshohocken, PA.

[75] ASTM D3080/D3080M-11., 2011. Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM West Conshohocken, PA. Doi: 10.1520/D3080_D3080M-11.

[76] Ramani Sujatha, E., Sivaraman, S., Kumar Subramani, A., n.d. Impact of hydration and gelling properties of guar gum on the mechanism of soil modification, Doi: 10.1007/s12517-020-06258-x/Published.

[77] Rong, X., Deng, S., Liang, B., Zhuang, J., Yu, Y., Wu, Z., 2024. Mechanical behavior and strengthening mechanism of loess stabilized with xanthan gum and guar gum biopolymers. Materials Research Express 11(10): 105305, Doi: 10.1088/2053-1591/ad832c.

[78] James, J., Natesan, A., Manohar, A., Subramanian, V., 2021. Potential of Portland pozzolana cement in the stabilization of an expansive soil subjected to alternate cycles of wetting and drying. Gradjevinski Materijali i Konstrukcije 64(2): 81–91, Doi: 10.5937/grmk2102081j.

[79] Le, V.H., Glasenapp, R., Rackwitz, F., 2024. Cyclic Hysteretic Behavior and Development of the Secant Shear Modulus of Sand under Drained and Undrained Conditions. International Journal of Geomechanics 24(7), Doi: 10.1061/ijgnai.gmeng-9380.

[80] Tankiewicz, M., Strózyk, J., Zieba, Z., 2021. Undrained Shear Strength cuand Undrained Elastic Modulus Eu of Anthropogenic Soils from Laboratory Tests. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 906. IOP Publishing Ltd.

[81] Bai, Y., Liu, J., Cui, Y., Shi, X., Song, Z., Qi, C., 2021. Mechanical behavior of polymer stabilized sand under different temperatures. Construction and Building Materials 290, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123237.

[82] Ramachandran, A.L., Dubey, A.A., Dhami, N.K., Mukherjee, A., 2021. Multiscale Study of Soil Stabilization Using Bacterial Biopolymers. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 147(8), Doi: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002575.

[83] Bagherinia, M., 2024. Mechanical, durability, and microstructure of soft clay stabilised with anionic biopolymer. Construction and Building Materials 417: 135343, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135343.

[84] Whitcomb, P.J., Macosko, C.W., 1978. Rheology of Xanthan Gum. Journal of Rheology 22(5): 493–505, Doi: 10.1122/1.549485.

[85] Vydehi, K.V., Moghal, A.A.B., 2022. Effect of Biopolymeric Stabilization on the Strength and Compressibility Characteristics of Cohesive Soil. Journal of Materials in Civil Engineering 34(2), Doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004068.

[86] Banne, S.P., Dhawale, A.W., Patil, R.B., Kankarej, S., Naikare, K., Patil, B., et al., 2024. Effect of Xanthan Gum Biopolymer on Laterite Soil in Settlement Analysis Using Plaxis-2D. p. 831–45.

[87] Arabani, M., Shalchian, M.M., Baghbani, A., 2024. A state-of-the-art review on interactive mechanisms and multi-scale application of biopolymers (BPs) in geo-improvement and vegetation growth. Journal of Environmental Management 358: 120905, Doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120905.

[88] Larson, S.L., Newman, J.K., Griggs, C.S., Beverly, M., Nestler, C.C., 2012. ERDC TR-12-8 "Biopolymers as an Alternative to Petroleum-Based Polymers for Soil Modification: ESTCP ER-0920: Treatability Studies."

[89] Sujatha, E.R., O'Kelly, B.C., 2023. Biopolymer Based Soil Treatment for Geotechnical Engineering Applications. Handbook of Biopolymers, Singapore: Springer Nature Singapore p. 1–18.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1100-1112 (2025)

Elektrikli Araçların Hava Kalitesi Üzerine Etkisi: PM_{10}, NO_2, SO_2 ve CO Parametreleri Üzerinden Bir Değerlendirme

Aslıhan KURNUÇ SEYHAN [1*] Neşe ERTUGAY[2]

[1]*Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzincan, Türkiye*

[2]*Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzincan, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/04/2025
Düzeltme: 24/06/2025
Kabul: 18/07/2025

Anahtar Kelimeler

Elektrikli Araç
Hava Kirliliği
Hava Kalitesi Emisyonları

Article Info

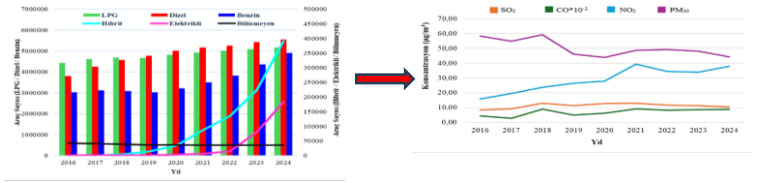
Research article
Received: 28/04/2025
Revision: 24/06/2025
Accepted: 18/07/2025

Keywords

Electric Vehicles
Air Pollution
Air Quality Emissions

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Çalışmada, 2016–2024 yılları arasında illere göre elektrikli ve hibrit araç sayısının hava kirliliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. / In the study, the effects of the number of electric and hybrid vehicles on air pollution by provinces between 2016-2024 were evaluated.



Şekil A: *Türkiye'de trafiğe kayıtlı otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı ve hava kirleticilerinin yıllık ortalama değişimi* (2016-2024) / ***Figure A:*** *Distribution of registered cars in Turkey by fuel type and annual average change in air pollutants (2016-2024)*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Elektrikli ve hibrit araçlar, diğer yakıt türlerine kıyasla yaklaşık 20 kat daha hızlı artış göstermiş; özellikle 2022–2023 döneminde elektrikli araçların artış oranı %450'ye ulaşmıştır. / Electric and hybrid vehicles have increased approximately 20 times faster than other fuel types; especially in the period 2022-2023, the increase rate of electric vehicles reached 450%.*
- *PM_{10} konsantrasyonu, 2016'da 58 µg/m³ seviyesinden 2024 yılında ise yaklaşık 44 µg/m³ düzeyine gerileyerek genel anlamda azalan bir eğilim sergilemiştir. / The concentration of PM_{10} showed an overall decreasing trend, decreasing from 58 µg/m³ in 2016 to approximately 44 µg/m³ in 2024.*
- *İstanbul, Ankara ve İzmir illeri için PM_{10}, SO_2 ve CO seviyelerinde iyileşmeler olmakla birlikte Ankara ve İzmir illerinde NO_2 emisyonunda artış görülmektedir. / Although there are improvements in PM_{10}, SO_2 and CO levels for Istanbul, Ankara and Izmir provinces, there is an increase in NO_2 emissions in Ankara and Izmir provinces.*

Amaç (Aim): *2016–2024 döneminde elektrikli ve hibrit araçlardaki artış, illere özgü PM_{10}, NO_2, SO_2 ve CO verileriyle ilişkilendirerek hava kalitesi üzerindeki etkilerinin uzun dönemli ve bütüncül olarak analiz edilmiştir. / The increase in electric and hybrid vehicles in the period 2016-2024 has been analysed in a long-term and holistic manner by associating it with province-specific PM_{10}, NO_2, SO_2 and CO data.*

Özgünlük (Originality): *Çalışmanın özgünlüğü, 2016–2024 döneminde elektrikli ve hibrit araçlardaki artışı, illere özgü PM_{10}, NO_2, SO_2 ve CO verileriyle ilişkilendirerek hava kalitesi üzerindeki etkileri uzun dönemli ve bütüncül olarak analiz etmesidir. / The originality of the study is that it analyzes the effects on air quality in a long-term and holistic manner by associating the increase in electric and hybrid vehicles with province-specific PM_{10}, NO_2, SO_2, and CO data in the period 2016-2024.*

Bulgular (Results): *2016–2024 döneminde Türkiye'deki hava kalitesi, PM_{10}, NO_2, SO_2 ve CO parametreleri açısından olumlu bir eğilim sergilemiştir. Elektrikli/hibrid taşıtların artan kullanımı, fosil yakıt türlerine yönelik azaltıcı politikalar ve pandemi gibi toplumsal olaylarla ilişkilidir. In the period 2016-2024, air quality in Turkey showed a positive trend in terms of PM_{10}, NO_2, SO_2 and CO parameters. The increasing use of electric/hybrid vehicles is associated with policies to reduce the use of fossil fuels and social events such as pandemics.*

Sonuç (Conclusion): *2016–2024 döneminde Türkiye'deki hava kalitesi azalan bir eğilim sergilemiştir. Ancak, PM_{10} ve NO_2 seviyeleri hâlâ DSÖ limitlerinin üzerindedir. / In the period 2016-2024, air quality in Turkey showed a decreasing trend. However, PM_{110} and NO_2 levels are still above WHO limits.*

*Corresponding author, e-mail: akurnuc@erzincan.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1685807

GU J Sci, Part C, 13(3): 1100-1112 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Elektrikli Araçların Hava Kalitesi Üzerine Etkisi: PM_{10}, NO_2, SO_2 ve CO Parametreleri Üzerinden Bir Değerlendirme

Aslıhan KURNUÇ SEYHAN [1*] Neşe ERTUGAY[2]

[1]*Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzincan, Türkiye*

[2]*Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzincan, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/04/2025
Düzeltme: 24/06/2025
Kabul: 18/07/2025

Anahtar Kelimeler

Elektrikli Araç
Hava Kirliliği
Hava Kalitesi Emisyonları

Öz

Hava kirliliği, küresel ölçekte halk sağlığını tehdit eden en önemli çevresel sorunlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu kirliliğin başlıca kaynaklarından biri olan ulaşım sektörü, artan motorlu taşıt sayısıyla birlikte atmosferdeki zararlı gaz konsantrasyonlarını belirgin şekilde yükseltmektedir. Son yıllarda elektrikli araç teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, düşük emisyon profilleri sayesinde hava kalitesinin iyileştirilmesinde etkili bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, 2016–2024 yılları arasında Türkiye'de trafiğe kayıtlı motorlu kara taşıtlarının illere göre dağılımı esas alınarak toplam araç sayısının %65'inden fazlasını oluşturan ve taşıt yoğunluğu bakımından en üst sıralarda yer alan iller (örneğin İstanbul, Ankara, İzmir vb.) seçilerek, bu illere ait 2016–2024 yılları arasındaki PM_{10}, NO_2, SO_2 ve CO hava kirletici parametrelerine ilişkin veriler analiz edilmiştir. Aynı dönemde elektrikli ve hibrit araç sayılarındaki değişim göz önünde bulundurularak, araç teknolojilerindeki dönüşümün hava kirliliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, özellikle PM_{10}, SO_2 ve CO konsantrasyonlarında yıllar içinde belirgin ve kademeli bir azalma olduğunu ortaya koymaktadır. Bu azalma, elektrikli araçların yaygınlaşması, fosil yakıt kullanımının sınırlandırılması, pandemi döneminde sanayi ve ulaşım faaliyetlerinin geçici olarak azalması gibi çok faktörlü yapısal değişimlerle ilişkilendirilmiştir. Ancak bazı illerde NO_2 seviyelerinin artmaya devam ettiği ve ulaşım kaynaklı emisyonların hâlen ciddi bir problem olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, elektrikli araçların hava kalitesini iyileştirmede önemli bir potansiyel taşıdığı; ancak bu etkinin sürdürülebilir çevre politikaları, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve toplu taşımanın güçlendirilmesi gibi çok boyutlu stratejilerle desteklenmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

Air Quality Changes Caused by Vehicles: An Assessment Based on PM_{10}, NO_2, SO_2 and CO Parameters

Article Info

Research article
Received: 28/04/2025
Revision: 24/06/2025
Accepted: 18/07/2025

Keywords

Electric Vehicles
Air Pollution
Air Quality Emissions

Abstract

Air pollution stands out as one of the most important environmental problems that threaten public health on a global scale. The transport sector, which is one of the main sources of this pollution, significantly increases harmful gas concentrations in the atmosphere with the increasing number of motor vehicles. In recent years, developments in electric vehicle technologies are considered as an effective solution to improve air quality owing to their low emission profiles. In this study, based on the provincial distribution of registered road traffic vehicles in Turkey between 2016-2024, the provinces (e.g. Istanbul, Ankara, Izmir, etc.), which account for more than 65% of the total number of vehicles and are at the top in terms of number of vehicles, are selected and the data on PM_{10}, NO_2, SO_2 and CO air pollutant parameters for these provinces between 2016-2024 are analysed. Considering the change in the number of electric and hybrid vehicles in the same period, the effects of the transformation in vehicle technologies on air pollution were evaluated. The findings reveal that there has been a significant and gradual decrease in PM_{10}, SO_2 and CO concentrations over the years. This decrease has been attributed to multifactorial structural changes such as the widespread use of electric vehicles, limitation of fossil fuel use, temporary reduction of industrial and transport activities during the pandemic period. However, NO_2 levels continued to increase in some provinces and transport emissions are still a serious problem. In conclusion, it is emphasised that electric vehicles have a significant potential to improve air quality, but this impact needs to be supported by multidimensional strategies such as sustainable environmental policies, renewable energy integration and strengthening public transport.

*Corresponding author, e-mail: akurnuc@erzincan.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1685807

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sürekli artış gösteren insan nüfusunun artan ihtiyaçlarını karşılamak için yapılan tüm faaliyetlerin her aşamasında ortaya çıkan atıklar (sıvı, katı ve gaz atıklar) çevre sorunlarını da beraberinde getirmiştir. Çevre sorunlarının başında yer alan hava kirliliği küresel boyutlara ulaşarak küresel iklim değişikliği gibi büyük bir felakete dönüşmüştür [1]. Küresel ısınmaya neden olan sera gazları evsel ısınma, enerji üretimi, sanayi, tarım ve trafik kaynaklı hava kirliliği gibi pek çok sektörden kaynaklanmaktadır. Bahsedilen sektörler arasında hızlı artış gösteren motorlu kara taşıtlarından kaynaklanan, hava kirliliği hem enerji tüketiminde hem de sera gazı kaynağı olarak çevre üzerinde önemli baskılara neden olmaktadır [2]. Trafik kaynaklı emisyonlar dünya genelinde hava kirliliğinin başlıca nedenlerinden biri olup; azot oksitlerin (NOx) %30'unu, partikül maddelerin (PM) %10'unu, karbon monoksitin (CO) %54'ünü ve karbon dioksitin (CO_2) %14'ünü oluşturmaktadır. Zararlı gazlar, yalnızca çevreye değil, aynı zamanda insan sağlığına ve ekonomik yapıya da ciddi zararlar vermektedir. Oluşan etkilerin artan şekilde sürdürülemez hale gelmesi, çevreci ve yenilikçi çözümlere olan ihtiyacı daha da artırmaktadır. Bu çerçevede, fosil yakıtlara alternatif olarak geliştirilen elektrikli araç teknolojisi; düşük emisyon profili ve sürdürülebilir yapısıyla geleceğin ulaşım sistemleri için güçlü bir çözüm olarak değerlendirilmektedir [3].

Uluslararası Enerji Ajansı, 1990'dan 2022'ye kadar ulaşım emisyonlarında yıllık %1,7'lik istikrarlı bir artış olduğunu ve bunun sanayi hariç diğer sektörleri geride bıraktığını bildirmiştir [4]. Enerji kaynağı olarak kullanılan fosil yakıtların çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin geldiği son noktadaki durumu için yapılan küresel çalışmalar hızla devam etmektedir. Paris İklim Anlaşması iklim kriziyle mücadele için devletlerin ortak hareket etmesini amaçlamaktadır. Birçok bilim insanı, iklim felaketlerinin önlenebilmesi için küresel sıcaklık artışının 1,5 °C ile sınırlandırılması gerektiğini vurgularken, ülkeler de bu hedef doğrultusunda sera gazı emisyonlarını azaltmak amacıyla ulusal katkı beyanlarını sunarak taahhütlerde bulunmaktadır. Türkiye'de sera gazlarının %72'si ulaşımı da içine alan enerji sektöründen kaynaklanmaktadır. Ulaşımın payı ise %20 düzeylerindedir [5]. Son yıllarda, elektrikli araçlar ve ilgili teknolojilerde önemli ilerlemeler kaydedilmektedir. Bu gelişmelerde hükümetlerin, yatırımcıların ve otomotiv üreticilerinin artan ilgisi ve iddialı hedefleri belirleyici rol oynamaktadır. Elektrikli araçların yaygınlaştırılması ise, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması, enerji ihtiyacının ulusal ve bölgesel düzeyde daha ekonomik ve sürdürülebilir biçimde karşılanması ile hava kirliliği kaynaklı emisyonların azaltılması açısından kritik bir öneme sahiptir [6-8]. Elektrikli araç kullanımının sürdürülebilir çevreye olan etkisi sadece hava kirletici emisyonlarını azaltmak değil aynı zamanda doğal kaynakların daha verimli kullanılmasına da olanak sağlar. Sonuçlar, elektrikli araç kullanımının yaygınlaştırılması 2050 yılına kadar ulaşımdan kaynaklanan toplam sera gazı emisyonlarını %34'e kadar azaltabileceğini göstermektedir [9]. Elektrikli araçlar, son yirmi yılda hem teknolojik gelişmeler hem de üretim kapasitesi açısından kayda değer bir ilerleme göstermiştir. 2021 yılında küresel elektrikli araç arzı 3,3 milyona ulaşarak, 2020 yılına göre %120 oranında artış göstermiştir [10,11].

Yapılan çalışmalar içten yanmalı motorlu araçlar yerine çevre dostu elektrikli araç kullanımının tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de yaygınlaştırılarak hava kirletici emisyonlarını azalttığını göstermektedir [12]. Binek araçlardan kaynaklı karbondioksit veya atmosferik kirletici emisyonları ile ilgili yapılan pek çok çalışma elektrikli araçların içten yanmalı motorlu araçlara göre önemli emisyon azaltıcı etkileri olduğunu göstermiştir [13]. Elektrikli araçlar, sıfır emisyonla çalıştığı için hava kalitesini iyileştirir, insan sağlığını korur ve iklim değişikliği ile mücadeleye katkıda bulunur. Ayrıca, elektrikli araçlar, enerjiyi daha verimli kullandıkları için sürücülere yakıt maliyetlerinde de tasarruf sağlar.

Çin'in Elektrikli Araç Tanıtım ve Teşvik Politikasının hava kirliliği üzerindeki etkisini ve altında yatan mekanizmaları incelemek üzere yapılan çalışma, kentsel hava kirliliğini önemli ölçüde azaltarak ince partikül madde ($PM_{2.5}$) emisyonlarında %3,1'lik bir azalma ile ölüm riskinde %0,28-1,12'lik ve kirlilik kontrolü için yapılan devlet harcamalarında ise 175,1 milyar Yuan'lık bir azalmaya eşdeğer olduğu belirlenmiştir [9].

Elektrikli araçlar ile içten yanmalı motorlu araçlar arasındaki hava kirletici ve sera gazı emisyonlarındaki farkı analiz etmek için yapılan diğer bir çalışmada Çin'de elektrikli araçların daha fazla teşvik edilmesinin çevresel faydaları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, elektrikli araçların içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla CO_2'nin yaşam döngüsü emisyonlarını %12, NO_x'i %69 ve uçucu organik bileşiklerin %9 oranında azalttığını ortaya koymaktadır [13]. Yapılan diğer bir çalışmada 2050 yılına kadar, elektrikli araçlara

geçişin yıllık CO_2eq emisyonlarını %98 ve kümülatif CO_2eq emisyonlarını %50'nin üzerinde azaltacağı tahmin edilmektedir [14]. Elektrikli araç kullanımı ile gelecekte CO_2 emisyon oranının değişiminin tahmin edilmesi üzerine yapılan Türkiye örnekli bir çalışmada CO_2 emisyonunun %2 ve üzerinde azalacağı tahmin edilmiştir.

Elektrikli araçların getirdiği faydaların belirlenmesi çevresel ve ekonomik açıdan önem taşımaktadır. Dolayısı ile elektrikli araç kullanımı ile gelen çevresel faydaların belirlenmesi gerekmektedir. Türkiye'de trafiğe kayıtlı elektrikli ve hibrit araç sayısı 2019 yılında ilk kez binin üzerine çıkarak (Tablo 1) 2020'de neredeyse üç kat artış göstermiştir. 2023 yılında bu oran 2022 senesinin yaklaşık 5,5 katına 2024 yılında ise araç sayısı 183776'ya yükselmiştir. 2023 yılında trafiğe çıkan her bin araçtan beşi elektrikli araç olarak belirlenmiştir [15]. Tablo 1 ve Tablo 2'de görüldüğü üzere 2023 yılında Türkiye'de üretilen elektrikli araç sayısı 2023 yılında Dünyada üretilen elektrikli araç sayısının ise %1'lik kısmını oluşturmaktadır. İngiltere merkezli araştırma şirketi Rho Motion'un elektrikli araç satışlarına ilişkin açıkladığı 2024 verilerine göre, küresel elektrikli araç satışlarının 2023'e göre yüzde 25 büyüdüğünü ve bu büyümeyle, dünyada 2024 yılında 17.1 milyon elektrikli araç satışıyla rekor kırıldığını açıklamıştır [16].

Tablo 1. Türkiye'de elektrikli ve hibrit araç sayısı (Number of electric and hybrid vehicles in Turkey)

Yıllar	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Elektrikli Araç	643	760	952	1176	2797	6267	14552	80.043	183776
Hibrit Araç	517	925	4415	13877	33690	86682	134662	222328	391296

Tablo 2. Dünyada elektrikli ve hibrit araç sayısı (Number of electric and hybrid vehicles in the World)

Yıllar	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Elektrikli Araç	490000	820000	1400000	1650000	2200000	4670000	7410000	7720000	17.1 Milyon
Hibrit Araç	280000	400000	630000	570000	980000	1940000	2840000	2920000	

Taşıt kaynaklı hava kirleticiler, şehir içi hava kalitesini belirleyen en kritik unsurlar arasındadır. Elektrikli araçların hava kirliliği, sağlık, ekonomi üzerindeki etkisini belirlemek üzere pek çok çalışma yapılmış ve olumlu sonuçlar alındığı ortaya çıkarılmıştır [17-22]. Böylece enerji tasarrufu, daha az emisyon ve çevreyi koruma, elektrikli araçların hızla yayılmasını sağlayan önemli nedenler arasında yerini almıştır [7].

Bu çalışmada, Türkiye genelindeki toplam araç sayısının %65'ini barındıran illerde, 2016-2024 yılları arasındaki hava kalitesi verileri incelenerek elektrikli araç kullanımının hava kalitesi üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, seçilen illerin 2016 ile 2024 yılları arasındaki PM_{10} (çapı 10 mikron veya daha az partikül madde), NO_2, SO_2 ve CO seviyelerinin değişimi, aynı dönemdeki araç sayılarındaki değişimle birlikte değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlu araçlara göre daha verimli enerji kullanımı sağlar. Geleneksel içten yanmalı motorlar genellikle %20-30 arasında verimlilikle çalışırken, elektrikli araçlar %90-95 arasında verimlilik oranına sahip olabilirler. Bu da aynı miktarda enerji ile daha uzun mesafeler kat edilmesini mümkün kılar. Bu verimlilik, doğal kaynakların daha az tükenmesine ve enerji tüketiminin azaltılmasına da yardımcı olur.

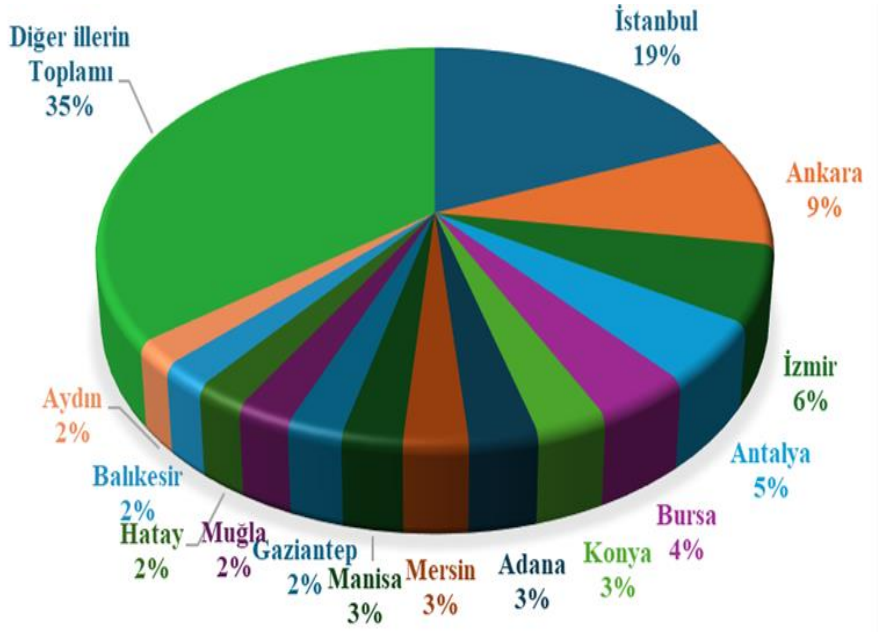
Fosil yakıtla çalışan içten yanmalı motorlu araçlar, atmosferdeki karbondioksit (CO_2) ve diğer sera gazlarını önemli ölçüde artırırken, elektrikli araçlar sıfır emisyona sahiptir. Elektrikli araçlar, doğrudan egzoz misyonu üretmedikleri için özellikle şehir içi trafik yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerde hava kalitesini iyileştirir. Ayrıca, bu araçların sessiz çalışma özelliği, gürültü kirliliğini de azaltarak yaşam kalitesini artırır.

2024 yılı itibarıyla Türkiye genelinde trafiğe kayıtlı 31301389 motorlu kara taşıtı bulunmaktadır. Bu çalışmada, iller araç sayısına göre sıralanmış ve toplam araç sayısının %65'ini kapsayan iller analiz kapsamına alınmıştır (Tablo 3). Seçilen illere ait hava kalitesi verileri Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'ndan elde edilmiştir. Bu yıllara ait elektrikli ve hibrit araç sayıları ise Türkiye İstatistik Kurumu'ndan alınmıştır (Tablo 1).

Tablo 3. İllere göre motorlu kara taşıtları sayısı, 2024 (Number of motor vehicles by province, 2024)

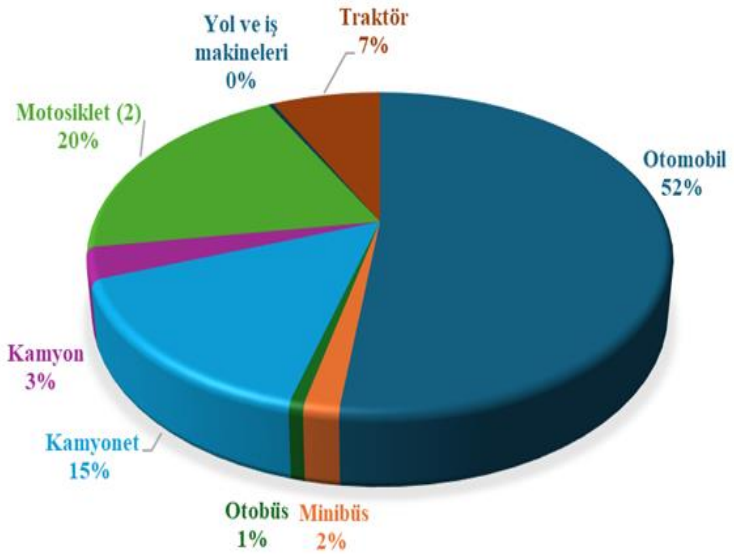
İller	**Araç Sayısı**
İstanbul	5840973
Ankara	2783571
İzmir	1954408
Antalya	1571626
Bursa	1243113
Konya	928837
Adana	896419
Mersin	836281
Manisa	789697
Gaziantep	725458
Muğla	717695
Hatay	667324
Balıkesir	641764
Aydın	624709
Diğer İller	11079514
Toplam	31301389

Hava kalitesi parametrelerinin de büyük kısmını etkileyen bu illere ait araç yüzdelikleri Şekil 1'de görülmektedir. Bu veriler kullanılarak seçilen illerin hava kalitesi parametrelerinin elektrikli ve hibrit araç sayılarındaki artış ile yıllara göre nasıl değiştiği tartışılmıştır.



Şekil 1. Motorlu kara taşıtların sayısının illere göre yüzdelik dağılımı, 2024 (Percentage distribution of the number of motor vehicles by provinces, 2024)

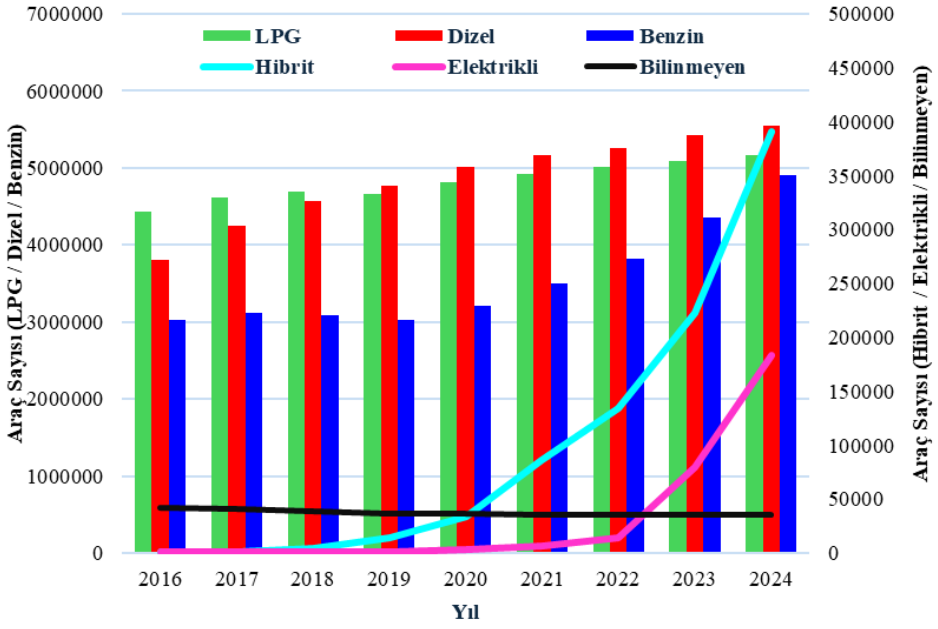
Mevcut çalışma, trafiğe kayıtlı otomobiller yönünden değerlendirileceği için 2024 yılı Türkiye motorlu kara taşıt sayıları içinde otomobillerin oranı %52'dir (Şekil 2). Çalışmada, seçilen illerin 2016 ile 2024 yılları arasındaki PM_{10}, NO_2, SO_2 ve CO seviyelerinin değişimi, aynı dönemdeki otomobil sayılarındaki değişimle birlikte değerlendirilmiştir.



Şekil 2. Motorlu kara taşıtlarının sayısı, 2024 (Number of motor vehicles, 2024)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Motorlu taşıtlarda kullanılan yakıt türleri hem enerji politikaları hem de çevresel etkiler açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle fosil yakıt tüketen araçların neden olduğu sera gazı emisyonları ve hava kirliliği, alternatif yakıtlı araçlara olan ilgiyi artırmaktadır. Bu bağlamda, Türkiye'deki otomobillerin yakıt türlerine göre dağılımının incelenmesi, sürdürülebilir ulaşım politikalarının geliştirilmesi açısından önemli bir veri kaynağı sunmaktadır. Türkiye'de trafiğe kayıtlı otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı Şekil 3'ten görüldüğü üzere yıllar içerisinde LPG, dizel ve benzinli araçların sayısındaki artışa oranla elektrikli, hibrit ve diğer araç türlerinde görülen yüksek artış miktarı umut verici olarak değerlendirilmektedir.

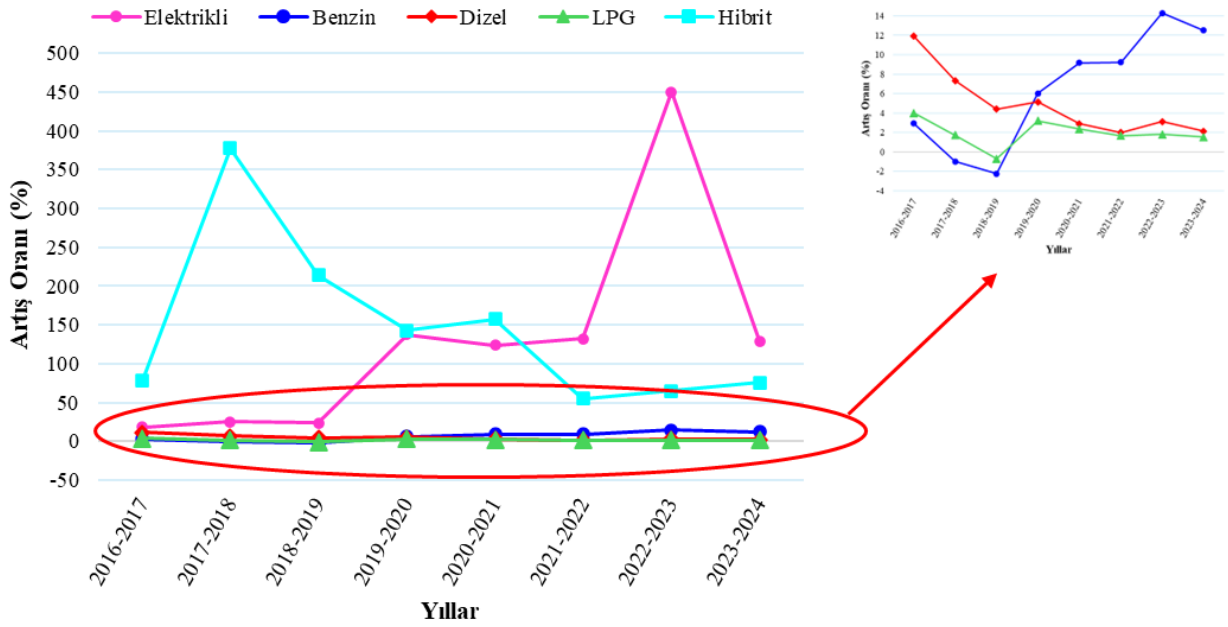


Şekil 3. Trafiğe kayıtlı otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı (Distribution of registered cars by fuel type)

Şekil 4'te sunulan veriler, Türkiye'de 2016–2024 yılları arasında motorlu taşıt türlerine göre yıllık artış oranlarını ortaya koymaktadır. Elektrikli ve hibrit araçların artış oranları, diğer yakıt türlerine kıyasla 20 kat daha hızlı büyüme göstermiştir. Özellikle 2022–2023 döneminde elektrikli araçların artış oranı yaklaşık %450'ye ulaşarak en yüksek artışı göstermiştir. Bu durum, elektrikli araçlara yönelik devlet destekleri, şarj altyapısındaki gelişmeler ve çevresel farkındalığın artmasıyla ilişkilendirilebilir.

Benzer şekilde, hibrit araçlar 2017–2018 döneminde %380 oranında artış göstermiş, ancak takip eden yıllarda bu oranlar düşüş eğilimine girmiştir. Buna karşılık benzinli, dizel ve LPG'li araçlar daha sınırlı artış oranları sergilemiş ve genel olarak durağan bir seyir izlemiştir. Benzinli araçlar yıllara göre %0 ila %12 arasında değişen artış oranları göstermiş, 2017–2018 döneminde kısa süreli bir azalma yaşasa da sonraki yıllarda artış trendine girmiştir. Dizel araçlar ise 2016–2017'de %13'e yakın bir artış yaşamış, ancak yıllar içinde bu oran istikrarlı bir şekilde azalarak son dönemde durağanlaşmıştır. Dizel araçlara yönelik çevresel kaygılar ve düzenleyici politikalar bu gerilemeyi açıklamaktadır. LPG'li araçların artış oranları ise genellikle %0–%4 seviyelerinde seyrederek düşük ve istikrarlı kalmıştır. Yakıt türüne göre araçların ortalama yıllık artış oranları (2016–2024) elektrikli %132, hibrit %147, benzinli %6, dizel %5 ve LPG de ise %2'dir. Elektrikli ve hibrit araçlar, Türkiye otomotiv sektöründe açık ara en hızlı büyüme oranına sahiptir.

Tüm bu veriler, Türkiye'de motorlu taşıt tercihlerinde önemli bir dönüşüm yaşandığını ve fosil yakıtlı araçların yerini giderek elektrikli ve hibrit araçlara bıraktığını göstermektedir. Bu dönüşüm, sürdürülebilir ulaşım politikalarının etkisini ve kullanıcı tercihlerindeki yapısal değişimi yansıtmaktadır.



Şekil 4. Türkiye'de araç türlerine göre yıllık artış oranları (Annual increase rates according to vehicle types in Turkey)

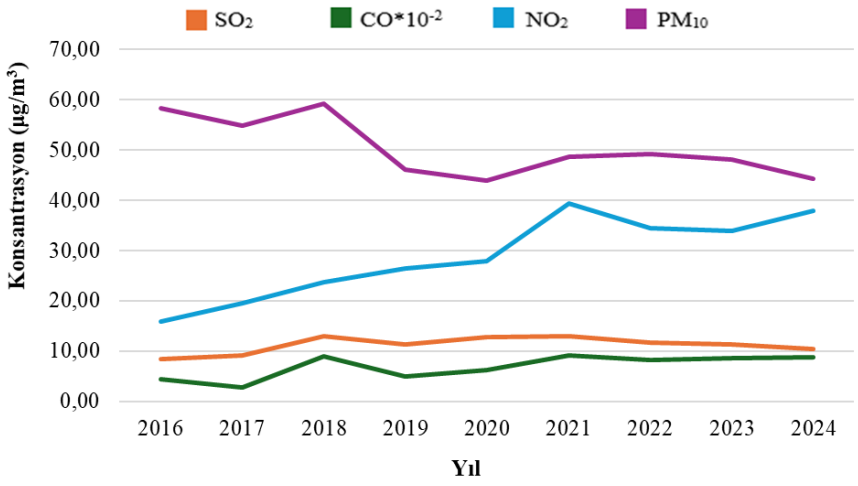
Kapsamlı bilimsel kanıtlara dayanarak dünya çapında halk sağlığını korumak için gerekli olan hava kalitesi seviyelerini belirleyen Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), hava kirliliğine neden olan bu maddelerin kılavuz değerlerini içeren DSÖ Küresel Hava Kalitesi Kılavuzu'nun 2021 yılında revize ederek daha da aşağıya çekmiştir. DSÖ'nün 2005 yılı hava kalitesi kılavuz değerleri, 2021 yılı Eylül ayında güncellenen değerleri ve Türkiye'nin güncel limitleri Tablo 4'te görülmektedir [23].

Tablo 4. Hava kalitesi kılavuz değerleri (Air quality guidance values)

Kirletici	DSÖ 2005 Yılı Kılavuz Değerleri (mg/m^3)	DSÖ 2021 Yılı Kılavuz Değerleri (mg/m^3)	Türkiye Güncel Limitler (mg/m^3)
PM_{10} (Yıllık Değer)	20	15	40
NO_2 (Yıllık Değer)	40	10	40
SO_2 (Günlük Değer)	20	40	20
CO (Günlük Değer)	-	4	10

2016-2024 yılları arasında seçilen illerdeki hava kalitesi parametrelerinin araç sayılarına göre değerlendirilmesi Tablo 4'te verilen hava kalitesi kılavuz değerleri baz alınarak yapılmıştır. 2016–2024 yılları arasında Türkiye'de hava kalitesini etkileyen temel kirleticiler olan SO_2, CO, NO_2 ve PM_{10}'nin yıllık ortalama konsantrasyon değerleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Genel eğilim incelendiğinde, hava kirliliğinde en baskın olan PM_{10} (partikül madde) parametresi 2016 yılında yaklaşık 58 µg/m³ iken 2020 yılında 45 µg/m³ seviyelerine kadar düşmüştür. Ancak takip eden yıllarda kısmi bir artış gösterdikten sonra 2024'te yaklaşık 44 µg/m³ düzeyine gerilemiştir. Bu değişim, PM_{10} kaynaklarının (inşaat faaliyetleri, ulaşım ve ısınma) dönemsel etkilerle çeşitlilik gösterdiğini düşündürmektedir. NO_2 (azot dioksit) konsantrasyonu, analiz edilen dönemde belirgin bir artış eğilimi sergilemiştir. 2016 yılında 15 µg/m³ düzeyindeyken, 2021 yılında yaklaşık 39 µg/m³ seviyesine kadar yükselmiş ve bu artış motorlu taşıt kullanımındaki artışla doğrudan ilişkilendirilebilir. 2022 ve 2023'te bir miktar düşüş yaşansa da 2024 yılı itibarıyla NO_2 seviyesi tekrar yükselme eğilimigöstermiştir. SO_2 (kükürt dioksit) konsantrasyonu 2016'da yaklaşık 8 µg/m³ iken, 2018'de kısa süreli bir artışla 12 µg/m³'e ulaşmış, ardından yeniden düşüş eğilimi göstererek 2024 yılında yaklaşık 10 µg/m³'e gerilemiştir. Bu eğilim, sanayi kaynaklı emisyonların ve kentsel ısınma yöntemlerinin zamanla daha çevreci yakıt türlerine yönelmesiyle açıklanabilir. CO (karbon monoksit) değerleri grafikte 10^{-2} katsayısı ile gösterilmiş olup oldukça düşük seviyelerde seyretmiştir. 2016 yılında yaklaşık 4×10^{-2} µg/m³ olan CO konsantrasyonu, 2018'de kısa süreli artış göstermiş ve 2021'de yeniden yükselerek 9×10^{-2} µg/m³ düzeyine ulaşmıştır. Bu durum, motorlu taşıt trafiği ve fosil yakıt kullanımına bağlı olarak CO emisyonlarının hâlen çevresel risk oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, PM_{10} ve NO_2 gibi ulaşım ve sanayi kaynaklı kirleticilerin hâlen DSÖ'nün limitlerinin üzerinde seyretmektedir. Buna karşın SO_2 ve CO değerlerindeki azalma, belirli alanlarda emisyon kontrol önlemlerinin etkili olmaya başladığını göstermektedir. Bu bağlamda, hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik elektrikli ve hibrit taşıtların gelişen teknolojisi ve artan kullanımı ile sürdürülebilir ulaşım politikaları, yakıt türlerine yönelik azaltıcı politikalar, sanayi kaynaklı emisyonların denetimi ve pandemi gibi toplumsal olaylarla ilişkilendirilebilir.

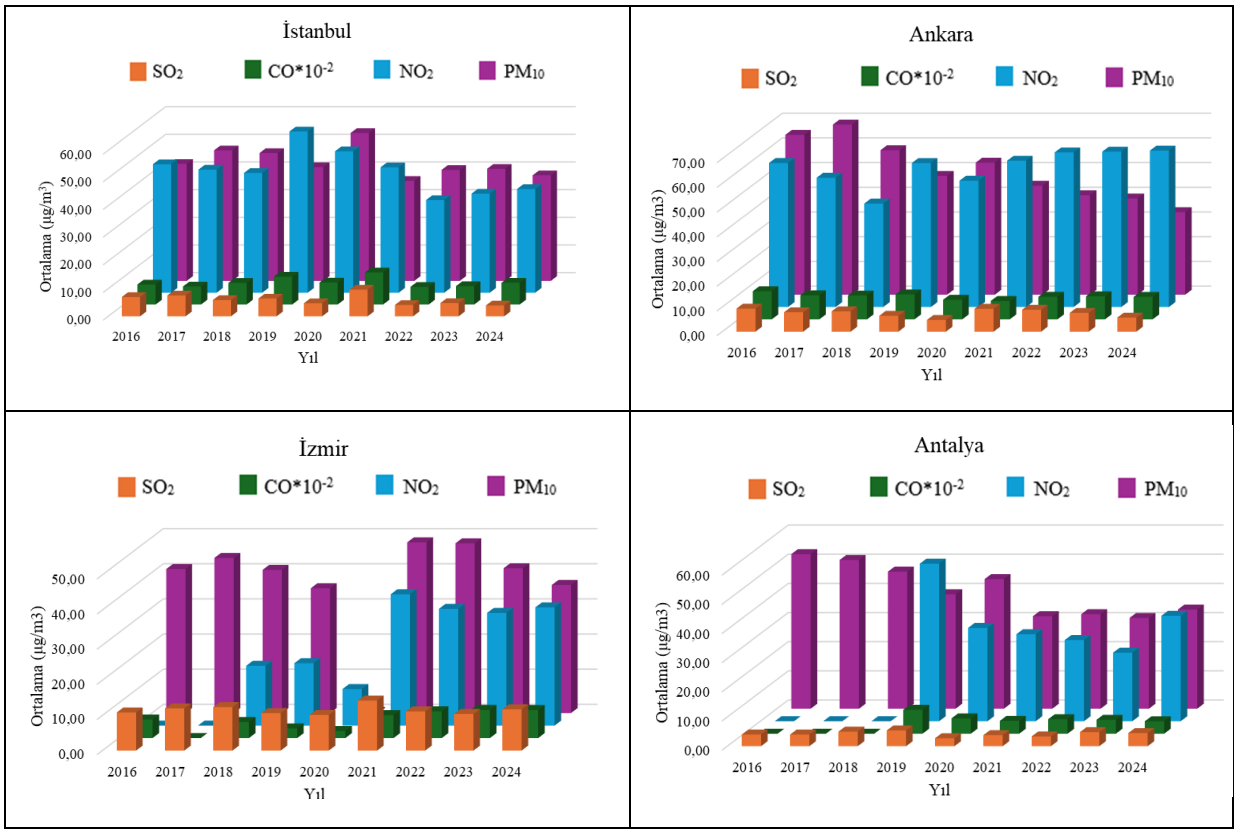


Şekil 5. Türkiye genelinde hava kirleticilerde yıllık ortalama değişim (2016-2024) (Average annual changes in air pollutants in Turkey (2016-2024))

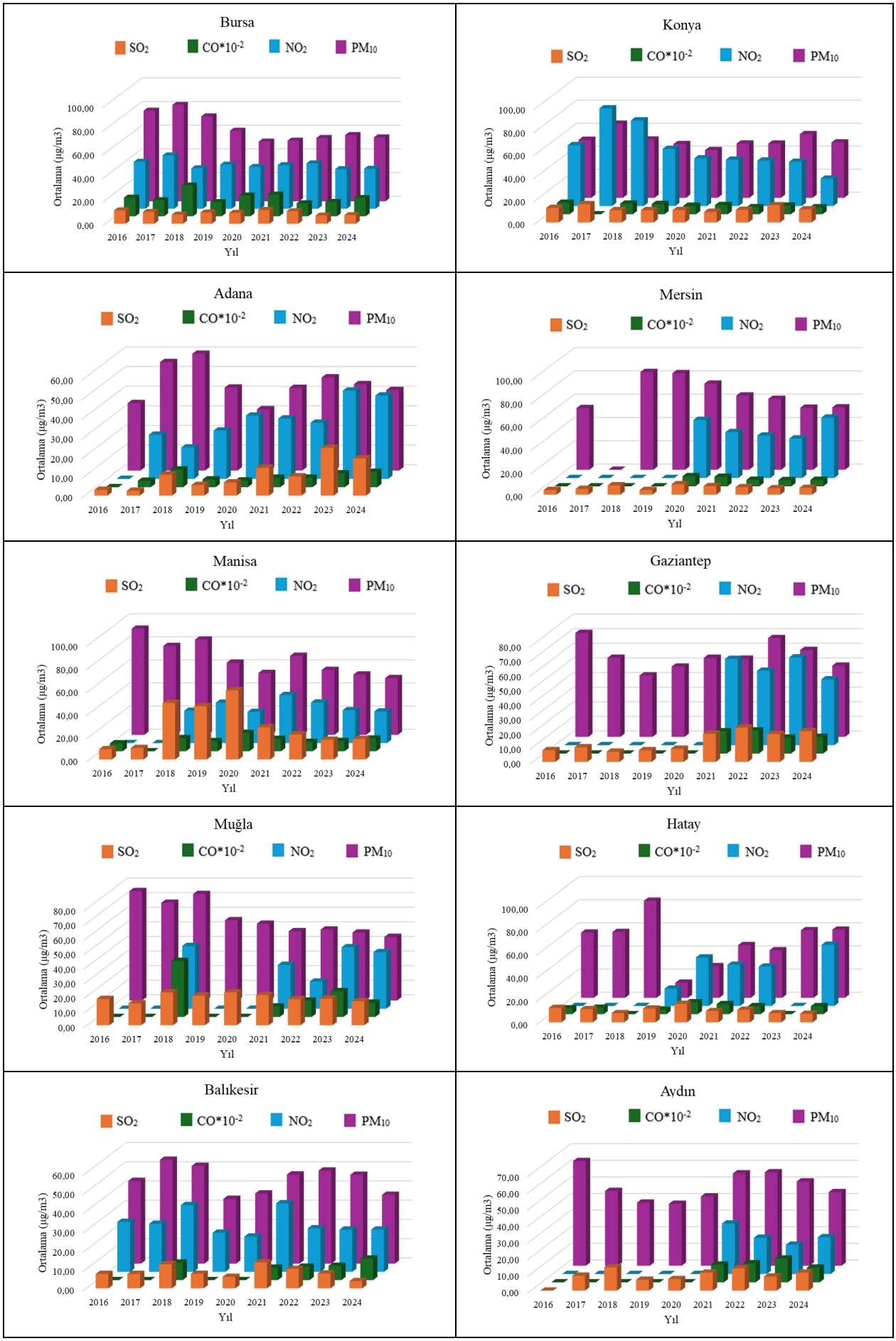
Hava kalitesi göstergelerinin zamana bağlı değişimi elektrikli araçlardaki artışla beraber, kentleşme düzeyi, sanayi yoğunluğu, ulaşım altyapısı ve yerel çevre politikaları gibi çeşitli etkenlere bağlı olarak farklılık gösterebilir. Çalışmada seçilen illere ait hava kalitesi parametrelerinin yıllara göre değişimi iyileşme göstermiş ancak tüm illerde eşit dağılım göstermemiştir (Şekil 6). PM_{10} konsantrasyonları, 2016 yılında birçok ilde 60–80 µg/m³ seviyelerinde iken, 2024 yılında 30–50 µg/m³ aralığına gerilemiştir. Özellikle Ankara, İzmir, Antalya, Muğla gibi şehirlerde belirgin iyileşme gözlemlenmiştir. 2016–2017 yıllarında birçok ilde PM_{10} seviyeleri 50–80 µg/m³ arasında yoğunlaşmış. 2020 sonrası birçok şehirde düşüş gözlemleniyor. 2024 yılı itibarıyla çoğu ilde değerler 30–50 µg/m³ aralığına düşmüş. 2016 ve 2024 yılları arasında, PM_{10} konsantrasyonları Türkiye'deki çoğu şehirde azalma eğilimi göstermiştir. Bu azalma, araç teknolojilerindeki gelişmelere, alternatif yakıtların daha fazla benimsenmesine ve yerel çevre düzenlemelerine bağlanabilir. Bununla birlikte, birçok bölgede PM_{10} seviyeleri hala DSÖ'nün önerdiği sınırların üzerinde kalmaktadır ve bu da halk sağlığını korumak için özellikle kentsel ve sanayileşmiş alanlarda daha fazla emisyon kontrol önlemine acilen ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

NO_2 seviyeleri özellikle büyük şehirlerde motorlu kara taşıtlarından kaynaklı emisyonları yansıtır. 2016'da İstanbul, Ankara gibi büyükşehirlerde NO_2 ortalamaları 50–60 µg/m³ iken, 2024 verileri çoğu ilde 30–40 µg/m³ aralığında seyretmektedir. Bazı şehirlerde (örneğin İzmir), 2018–2020 yılları arasında değerler 15–20 µg/m³ düzeyine kadar gerilemiştir. Bu düşüş, taşıt kaynaklı emisyonların azaldığının göstergesidir. Aynı dönemde hibrit ve elektrikli araçların artışı, içten yanmalı motorlu kara taşıtların toplam trafik içindeki ağırlığını azaltmış, bu da NO_2 konsantrasyonlarını olumlu yönde etkilemiştir.

SO_2 seviyesi, genellikle kömür ve düşük kaliteli dizel gibi yüksek kükürtlü yakıtların kullanımına bağlıdır. SO_2 seviyeleri, Bursa, Konya ve Manisa gibi illerde yüksek seyretmiştir. Ancak, 2016–2017 yıllarında 10–15 µg/m³ civarındaki değerler, 2024 yılında 5 µg/m³ altına gerilemiştir. 2016–2017 yıllarında bazı şehirlerde 10–15 µg/m³ düzeyinde olan SO_2, 2024'te birçok ilde 5 µg/m³'nin altına inmiştir. Bu azalma, motorin ve kömür gibi kükürt içeriği yüksek yakıtların kullanımının azaltılması ve taşıtlarda daha temiz yakıtların (LPG, elektrik) tercih edilmesiyle de ilişkilidir. En yüksek SO_2 değerleri geçmişte Bursa, Konya, Manisa gibi sanayi yoğun şehirlerde gözlenmiştir.



Şekil 6. İllere ait hava kalitesi parametreleri (Air quality parameters of provinces)

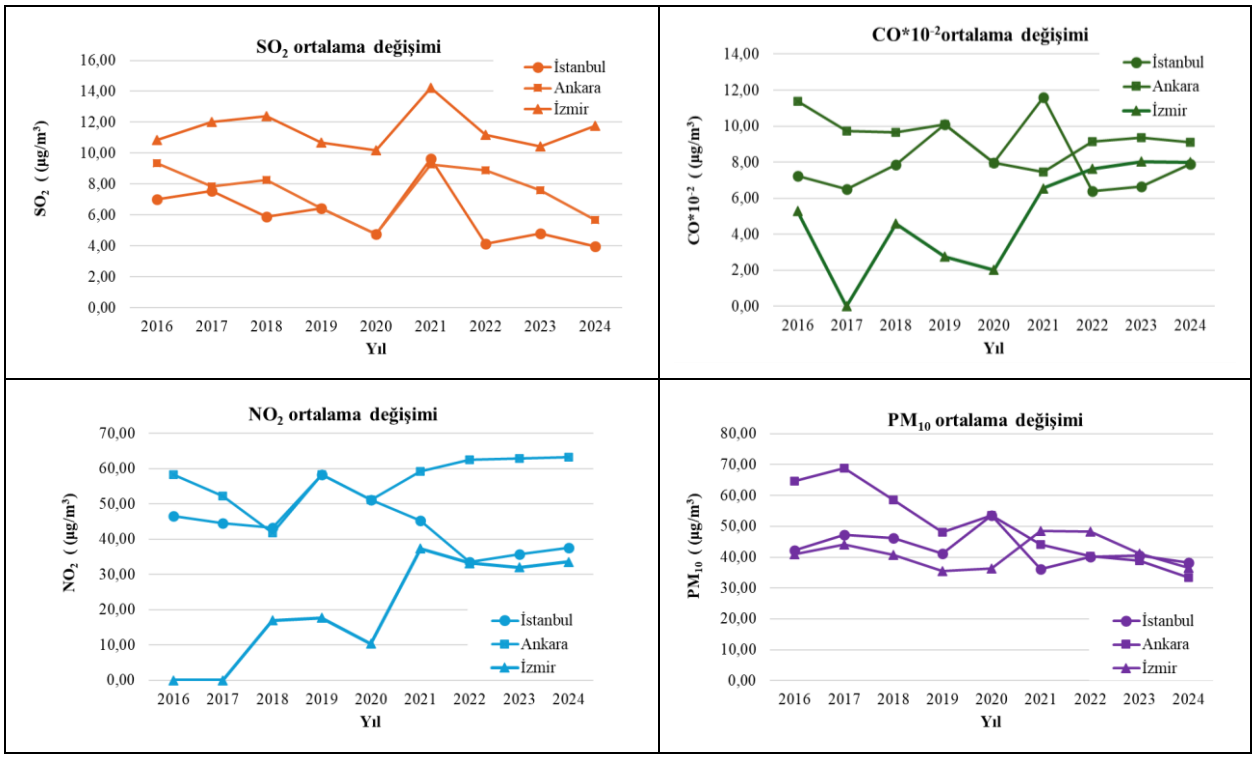


Şekil 6. İllere ait hava kalitesi parametreleri (devam) (Air quality parameters of provinces (continue))

CO seviyeleri, motorlu taşıt egzozlarından kaynaklanan önemli bir kirletici olarak dikkat çekmektedir. 2016–2019 arasında birçok şehirde CO seviyeleri 7–10 µg/m³ aralığında seyrederken, 2020 sonrasında özellikle elektrikli araç kullanımındaki artışla birlikte CO seviyelerinde düşüş gözlemlenmiştir. 2023 ve 2024 verileri, İstanbul, Antalya, Muğla ve Mersin gibi şehirlerde CO değerlerinin 4–6 µg/m³ seviyelerine gerilediğini göstermektedir.

Yakın zamanda yapılan araştırmalar Türkiye'de gözlemlenen eğilimleri desteklemektedir. Örneğin Li ve arkadaşlarının 2021 yılında yaptığı çalışmada [24], Çin'in büyük şehirlerinde elektrikli araçların yaygın olarak kullanılmasının NO_2 ve $PM_{2.5}$ konsantrasyonlarını önemli ölçüde azalttığını bildirmiştir. Benzer şekilde, Avrupa Çevre Ajansı [25], hibrit ve akülü elektrikli araçların daha yüksek oranda benimsendiği bölgelerde kentsel hava kalitesinde kayda değer iyileşmeler yaşandığını vurgulamıştır. Bu uluslararası bulgular, 2016-2024 döneminde Türkiye'deki şehirlerde gözlemlenen iyileşmelerle paralellik göstermektedir.

Türkiye'de son 9 yılda hava kalitesi göstergelerinde gözlenen iyileşme, özellikle araç teknolojilerindeki dönüşüm (elektrikli ve hibrit araç yaygınlaşması) ve enerji politikalarındaki düzenlemeler ile yakından ilişkilidir. Ancak PM_{10} ve NO_2 hâlâ DSÖ sınır değerlerinin üzerinde seyretmektedir.



Şekil 7. İstanbul, Ankara ve İzmir illerine ait yıllık hava kalitesi değişimi (Annual air quality change in Istanbul, Ankara and Izmir)

Nüfus yoğunluğu en fazla olan İstanbul, Ankara ve İzmir illerine ait 2016–2024 yılları arasındaki PM_{10}, CO, SO_2 ve NO_2 konsantrasyonlarının yıllık değişimini daha ayrıntılı bir şekilde gösteren Şekil 7, elektrikli araç sayısının artışının önemini daha iyi göstermektedir. Bu parametrelere ait verilere bakıldığında genel olarak olumlu ve farklı bir hava kalitesi eğilimi sergilemektedir.

İstanbul için PM_{10} seviyeleri daha istikrarlı olup 2016–2024 arası genelde 36–53 µg/m³ aralığındadır. 2016'da 42.3 µg/m³, 2024'te 38.2 µg/m³'e düşmüştür. Dalgalı bir seyir izlese de belirgin bir iyileşme vardır. CO değerleri 2016'da 7 µg/m³, 2021'de maksimum değeri olan 11,6 µg/m³ 'e çıkmış sonrasında düşüle 2024'te 8 µg/m³'e ulaşmıştır. SO_2 konsantrasyonu 7 µg/m³'den 4 µg/m³'e ciddi bir düşüş (%43) göstermiştir. NO_2 seviyelerinde ise genel anlamda düşüş mevcut olup maksimum değeri olan 58,3 µg/m³'e 2019 yılında çıkmıştır. 2016 yılındaki NO_2 değeri olan 46 µg/m³'den yaklaşık %19 oranında bir azalma ile 2024 yılında 37 µg/m³'e kadar azalmıştır. Genel olarak İstanbul'da hava kirleticilerde düşüş eğilimi hakimdir.

Ankara'da PM_{10} seviyelerinde çok daha belirgin bir iyileşme gözlenmiş olup, 65 µg/m³'den 33 µg/m³'e düşerek yaklaşık %48 oranında azalma kaydedilmiştir. CO konsantrasyonunda da %19,92'lik bir düşüş (11.39 µg/m³'den 9.12 µg/m³'e) meydana gelmiştir. SO_2 seviyelerinde ise 2021 yılı hariç genel anlamda düşüş mevcuttur. 2016 yılında SO_2 konsantrasyonu 9.33 µg/m³ değerinde iken yaklaşık %39'luk bir düşüş ile 2024 yılında 5.69 µg/m³'e gerilemiştir. Ancak dikkat çekici olarak, NO_2 konsantrasyonunda 2016-2018 yılları arasında ciddi bir azalma görülse de sonrasında artış tespit edilmiştir. 2016 yılında 58.33 µg/m³ olan seviye 2024 yılında 63.33 µg/m³'e çıkarak yaklaşık %8,57 oranında artmıştır. Ankara'da genel bir iyileşme eğilimi mevcut olmakla birlikte, NO_2 artışı taşıt kaynaklı emisyonların kontrolünde güçlükler olduğunu göstermektedir.

İzmir için ise PM_{10}, 2016–2019 arasında kademeli azalma ile 2021'den sonra tekrar yükselmiş ardından düşüş başlamış ve 2024 itibarıyla 41 µg/m³'den 36 µg/m³'e düşerek %11 oranında azalma göstermiştir. Muhtemel nedenler olarak dizel araç sayısının azalması, hibrit ve elektrikli araç sayısındaki artış ve pandemi sonrası azalan trafik yoğunluğu (özellikle 2020-2022 yılları arasında) sıralanabilir. Ancak nüfus ve araç yoğunluğu nedeniyle PM_{10} seviyesi hala Dünya Sağlık Örgütü'nün önerdiği sınırın (15 µg/m³) üzerindedir. Buna karşın CO konsantrasyon değerlerinde 2017-2019-2020 yıllarında düşüş olsa da genel olarak belirgin bir artış gözlenmiş ve 2016 yılında 5 µg/m³'den 2024 yılında 8 µg/m³'e yükselerek yaklaşık %51 oranında artmıştır. SO_2 konsantrasyonu da 11 µg/m³'den 12 µg/m³'e çıkarak %8'lik bir artış sergilemiştir. NO_2 için 2018 yılında 17 µg/m³ olan seviyenin 2024 yılında 34 µg/m³'e yükselerek dramatik bir artış yaşanmıştır. İzmir'de özellikle CO ve NO_2 konsantrasyonlarındaki bu ciddi artış, taşıt emisyonlarının ve kentsel hava kalitesi yönetiminin daha fazla dikkat gerektirdiğini ortaya koymaktadır.

Hava kirliliği göstergelerinde gözlemlenen azalma, çeşitli çevresel ve yapısal müdahalelere dayanmaktadır. Bu iyileşmede, elektrikli araç kullanımının yaygınlaşması, çevreye duyarlı politika ve yönetmeliklerin uygulanması, doğalgaz ve merkezi ısıtma sistemlerinin kullanım oranındaki artış, inşaat ve ulaşım kaynaklı partikül madde salımlarının kontrol altına alınması gibi faktörler önemli rol oynamaktadır. Özellikle 2020 yılında COVID-19 pandemisine bağlı olarak sanayi üretiminin ve ulaşım faaliyetlerinin geçici olarak durma noktasına gelmesi, hava kirleticilerin konsantrasyonlarında belirgin düşüşlere neden olmuştur. Ayrıca, ulaşım altyapısında yapılan düzenlemeler, hava kalitesi denetimlerinin sıkılaştırılması ve kükürt içeriği yüksek yakıtların (örneğin kömür ve fuel-oil) kullanımının sınırlandırılması da bu olumlu gelişmeleri destekleyen başlıca etkenler arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, bu çalışmada belirli hava kirleticilerde (özellikle NO_2 ve CO) gözlemlenen bölgesel artışlar; içten yanmalı motorlu araçların trafik içindeki yüksek oranı, toplu taşıma sistemlerinin yetersizliği, şehirleşme ve nüfus yoğunluğundaki artış, sanayi faaliyetlerinin bölgesel dağılımı ile liman ve havaalanı kaynaklı yoğun ulaşım hareketliliği gibi etmenlerle açıklanabilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Elektrikli araçlar, sürdürülebilir çevreye olan katkıları açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Karbon emisyonlarının azaltılması, hava kalitesinin iyileştirilmesi, doğal kaynakların verimli kullanılması ve yenilenebilir enerji ile entegrasyon gibi birçok avantaj, elektrikli araçların çevreye olumlu etkilerini ortaya koymaktadır.

2016–2024 döneminde Türkiye'deki hava kalitesi, özellikle PM_{10}, NO_2, SO_2 ve CO parametreleri açısından olumlu bir eğilim sergilemiştir. Bu eğilim, elektrikli/hibrid taşıtların artan kullanımı, fosil yakıt türlerine yönelik azaltıcı politikalar ve pandemi gibi toplumsal olaylarla ilişkilidir. Ancak, PM_{10} ve NO_2 seviyeleri hâlâ DSÖ limitlerinin üzerindedir. Hava kalitesindeki iyileşme tüm illerde eşit dağılım göstermemiştir. Özellikle İstanbul, Ankara ve İzmir illeri için PM_{10}, SO_2 ve CO seviyelerinde iyileşmeler olmakla birlikte Ankara ve İzmir illerinde NO_2 emisyonunda artış görülmektedir. Bu bulgular, hava kalitesinin korunması için elektrikli araç kullanımının daha da yaygınlaştırılması, toplu taşıma sistemlerinin güçlendirilmesi ve yerel emisyon yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Türkiye genelinde hava kalitesi parametrelerinde ölçülebilir iyileştirmeler elde edilmiş olsa da uzun vadeli halk sağlığı ve ekolojik dayanıklılığı sağlamak için sürdürülebilir çevre politikası çabaları esastır.

Sonuç olarak, elektrikli araçlar daha uzun vadede, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha düşük yaşam döngüsü emisyonlarına sahiptir. Bu da elektrikli araçların çevreye olan olumlu etkisinin uzun vadede daha belirgin hale gelmesini sağlar. Elektrikli araçların çevresel faydaları, kullanıldıkları enerji kaynağına da bağlıdır. Bu

araçlar temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla beslendiğinde (örneğin, güneş, rüzgâr veya hidroelektrik enerji) daha da çevre dostu hale gelir. Bu tür enerji kaynakları, elektrikli araçların karbon ayak izini daha da küçültür. Özellikle güneş panelleri ile donatılmış evlerde, araçların şarjı yenilenebilir enerji ile sağlanabilir ve bu durum hem sürdürülebilirlik hem de enerji verimliliği açısından büyük bir adım olur. Bu teknolojinin potansiyelinden tam olarak yararlanabilmek için çevresel etkilerinin yönetilmesi ve yaygınlaştırılarak daha fazla yatırım yapılması gerekmektedir. Geleceğin ulaşım sistemlerinin temel taşlarından biri olarak kabul edilen elektrikli araçların yaygınlaşması, yalnızca çevreye olan olumlu etkileri artırmakla kalmaz, aynı zamanda toplumların daha sürdürülebilir bir yaşam tarzına geçişini de hızlandıracaktır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı sağlamıştır.

The authors contributed equally to this study.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Demirbaş, M., & Aydın, R. (2020). 21. Yüzyılın en büyük tehdidi: küresel iklim değişikliği. Ecological Life Sciences, 15(4), 163-179.

[2] Ding, X., Gong, K., & Li, A. (2024). Electric vehicle adoption and counter-urbanization: Environmental impacts and promotional effects. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 132, 104260.

[3] Requia, W. J., Mohamed, M., Higgins, C. D., Arain, A., & Ferguson, M. (2018). How clean are electric vehicles? Evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, greenhouse gas emissions and human health. Atmospheric Environment, 185, 64-77.

[4] Chi, J. (2025). Impacts of electric vehicles and environmental policy stringency on transport CO2 emissions. Case Studies on Transport Policy, 19, 101330.

[5] Köksal, E., Ardiyok, S., & Ikiler, B. (2021). Elektrikli araçlar için şarj altyapısı–Türkiye için fırsatlar ve öneriler (Charging infrastructure for electric vehicles–opportunities and suggestions for Turkey). Baseak CORE Papers, (11).

[6] Ding, N., Prasad, K., & Lie, T. T. (2017). The electric vehicle: a review. International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, 9(1), 49-66.

[7] Wu, Y., & Zhang, L. (2017). Can the development of electric vehicles reduce the emission of air pollutants and greenhouse gases in developing countries? Transportation Research Part D: Transport and Environment, 51, 129-145.

[8] Tang, B., Jiang, H., Zhuge, W., & Sun, L. (2024). Adaptability and environmental impact of CO2/R41 mixture in heat pump air conditioning systems for electric vehicles. Applied Thermal Engineering, 250, 123463

[9] Lin, J. (2025). Effects of electric vehicle demonstration and promotion policy on air pollution: Evidence from China. Transport Policy, 162, 1-19.

[10] Suganya, R., Joseph, L. L., & Kollem, S. (2024). Understanding lithium-ion battery management systems in electric vehicles: Environmental and health impacts, comparative study, and future trends: A review. Results in Engineering, 24, 103047.

[11] Safarian, S. (2023). Environmental and energy impacts of battery electric and conventional vehicles: A study in Sweden under recycling scenarios. Fuel Communications, 14, 100083.

[12] Kang, H., Jung, S., Kim, H., An, J., Hong, J., Yeom, S., & Hong, T. (2025). Life-cycle environmental impacts of reused batteries of electric vehicles in buildings considering battery uncertainty. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 207, 114936.

[13] Shang, H., Sun, Y., Huang, D., & Meng, F. (2024). Life cycle assessment of atmospheric environmental impact on the large-scale promotion of electric vehicles in China. Resources, Environment and Sustainability, 15, 100148.

[14] Mehlig, D., Staffell, I., Stettler, M., & ApSimon, H. (2023). Accelerating electric vehicle uptake favours greenhouse gas over air pollutant emissions. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 124, 103954.

[15] Türkiye İstatistik Kurumu (TUİK). Motorlu Kara Taşıtları. [Veri Dosyası] https://data.tuik.gov.tr/Search/Search?text=motorlu%20kara%20ta%C5%9F%C4%B1tlar%C4%B1 (Son Erişim Tarihi: 25.04.2025)

[16] EV Production Quarterly Outlook rho motion. https://rhomotion.com/research/ev-production-quarterly-outlook/ (Son Erişim Tarihi: 31.07.2025)

[17] Franzò, S., & Nasca, A. (2021). The environmental impact of electric vehicles: A novel life cycle-based evaluation framework and its applications to multi-country scenarios. Journal of Cleaner Production, 315, 128005.

[18] Pipitone, E., Caltabellotta, S., & Occhipinti, L. (2021). A life cycle environmental impact comparison between traditional, hybrid, and electric vehicles in the European context. Sustainability, 13(19), 10992.

[19] Schmid, A. (2017). An analysis of the environmental impact of electric vehicles. Missouri S&T's Peer to Peer, 1(2), 2.

[20] Ferrero, E., Alessandrini, S., & Balanzino, A. (2016). Impact of the electric vehicles on the air pollution from a highway. Applied energy, 169, 450-459.

[21] Ercan, T., Onat, N. C., Keya, N., Tatari, O., Eluru, N., & Kucukvar, M. (2022). Autonomous electric vehicles can reduce carbon emissions and air pollution in cities. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 112, 103472.

[22] Sharma, A., Shiwang, J., Lee, A., & Peng, W. (2023). Equity implications of electric vehicles: A systematic review on the spatial distribution of emissions, air pollution and health impacts. Environmental Research Letters, 18(5), 053001.

[23] WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Helath Organization; 2021. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf

[24] Li, J. et al. (2021). The Role of Electric Vehicles in Reducing Urban Air Pollution in China. Environmental Science & Technology, 55(8), 5022–5030.

[25] European Environment Agency (EEA). (2022). Air quality in Europe — 2022 report. https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1113-1121 (2025)

Yüzey Dalgası Analizi ile Elde Edilen Kayma Dalgası Hızlarına Dayalı Zemin Tepki Analizleri ile Hesaplanan Transfer Fonksiyonlarının HVSR Eğrileri ile Karşılaştırılması

Onur EYİSÜREN[1*], Öznur KARACA[2], Sadık ÖZTOPRAK[3]

[1]Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 17100 Merkez ÇANAKKALE

[2]Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 17100 Merkez ÇANAKKALE

[3]İstanbul Ünversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320 Avcılar İSTANBUL

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/05/2025
Düzeltme: 04/06/2025
Kabul: 13/06/2025

Anahtar Kelimeler

Kayma Dalgası Hız profili
Lineer Zemin Tepki Analizi
Transfer Fonksiyonu
Yatay/Düşey Spektral Oran
Hakim Frekans

Article Info

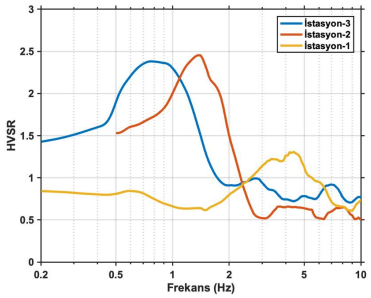
Research article
Received: 10/05/2025
Revision: 04/06/2025
Accepted: 13/06/2025

Keywords

Shear Wave Velocity Profile
Lineer Site Response Analysis
Transfer Function
Horizontal/Vertical Spectral Ratio
Dominant Frequency

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, yüzey dalgası yöntemleriyle elde edilen Vs profillerinden hesaplanan 1B lineer analizlere dayalı transfer fonksiyonları, üç sahada deprem ve çevresel gürültü kayıtlarından hesaplanan HVSR eğrileriyle karşılaştırılarak hakim frekansların uyumu değerlendirilmiştir. / In this study, transfer functions based on 1D linear analyses calculated from Vs profiles obtained through surface wave methods were compared with HVSR curves derived from earthquake and ambient noise records at three sites, and the consistency of the dominant frequencies was evaluated.



Şekil A: *Her istasyon için mikrotremor ölçümlerinden elde edilmiş HVSR eğrileri /* ***Figure A:*** *The HVSR curves obtained from microtremor measurements for each station*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Yüzey dalgası yöntemleri ve HVSR analizlerinin bütünleşik kullanımı saha karakterizasyon doğruluğunu arttırmaktadır. / Integrated use of surface wave methods and HVSR analysis enhances site characterization accuracy*
- *Deprem ve çevresel gürültü kayıtlarından elde edilen HVSR eğrileri arasında iyi bir uyum görülmektedir. / There is a good agreement between the HVSR curves obtained from earthquake and ambient noise records.*
- *Lineer tepki analizleri ve HVSR eğrilerinin karşılaştırılması zemin modelinin doğruluğunu arttırmaktadır. / The comparison of linear site response analyses and HVSR curvers improves the accuracy of the soil model.*

Amaç (Aim): *1B analizlerle hesaplanan transfer fonksiyonları ile HVSR eğrilerini karşılaştırmak. / Comparing transfer functions from 1D analyses with HVSR curves.*

Özgünlük (Originality): *Yüzey dalgası yöntemleriyle elde edilen Vs profilleri ve HVSR analizleri kullanılarak hesaplanan transfer fonksiyonları ile hakim frekansların doğruluğunun araştırılması. / Investigation of dominant frequency accuracy through transfer functions from Vs profiles and HVSR analyses.*

Bulgular (Results): *Vs profili ile Lineer tepki analizi kullanılarak hesaplanan transfer fokniyonları özellikle alüvyon sahalarda deprem kayıtları ve çevresel gürültü kayıtlarının sonuçları ile örtüşmektedir. / Transfer functions calculated by linear site response analysis using Vs profiles show good agreement with results from earthquake and ambient noise records, especially in alluvial sites.*

Sonuç (Conclusion): *1B lineer analizlerden elde edilen transfer fonksiyonları ile HVSR yöntemlerinin karşılaştırılması, saha koşullarına özgü rezonans davranışlarının daha doğru belirlenmesini sağlamaktadır. / Comparing transfer functions from 1D linear analyses with HVSR methods allows more accurate identification of site-specific resonance behavior.*

*Corresponding author, e-mail: onureyisuren@stu.comu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1696906

GU J Sci, Part C, 13(3): 1113-1121 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Yüzey Dalgası Analizi ile Elde Edilen Kayma Dalgası Hızlarına Dayalı Zemin Tepki Analizleri ile Hesaplanan Transfer Fonksiyonlarının HVSR Eğrileri ile Karşılaştırılması

Onur EYİSÜREN[1*], Öznur KARACA[2], Sadık ÖZTOPRAK[3]

[1] *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 17100 Merkez ÇANAKKALE*

[2]*Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Mühendislik FakültesiJeoloji Mühendisliği Bölümü, 17100 Merkez ÇANAKKALE*

[3]*İstanbul Ünversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320 Avcılar İSTANBUL*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/05/2025
Düzeltme: 04/06/2025
Kabul: 13/06/2025

Anahtar Kelimeler

Kayma Dalgası Hız profili
Lineer Zemin Tepki Analizi
Transfer Fonksiyonu
Yatay/Düşey Spektral Oran
Hakim Frekans

Öz

Bu çalışmada, yüzey dalgası analizi yöntemleri (MASW ve Remi) ile elde edilen kayma dalgası hızı (Vs) profillerine dayanılarak gerçekleştirilen bir boyutlu (1B) lineer zemin tepki analizlerinden elde edilen transfer fonksiyonlarının, aynı lokasyonda kaydedilmiş ivme ve gürültü kayıtlarından hesaplanan yatay/düşey spektral oran (HVSR) eğrileri ile frekans düzleminde karşılaştırılması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, zemin tepki analizinde girdi hareketi olarak bölgesel deprem kayıtlarının ivme değerlerine benzer özellikte yapay deprem kaydı kullanılarak zeminin frekans tepkisi belirlenmiş ve bu yolla rezonans özelliklerinin tanımlanması amaçlanmıştır. Elde edilen transfer fonksiyonları, sahada kaydedilen deprem kayıtları ve gürültü kayıtlarından hesaplanan HVSR eğrileri ile karşılaştırılmış; hakim frekans başta olmak üzere, spektral tepkilerin uyumu değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, yüzey dalgası yöntemleriyle belirlenen Vs profillerinin transfer fonksiyonu yaklaşımıyla birlikte değerlendirilmesinin, deprem ve gürültü kayıtlarından türetilen saha koşullarına özgü frekans karakteristiklerinin belirlenmesinde, özellikle 1B zemin davranışının hakim olduğu alanlarda güvenilir ve etkili bir yöntem sunduğunu ortaya koymaktadır.

Comparison of Transfer Functions Calculated from 1D Ground Response Analyses Based on Shear Wave Velocities Obtained by Surface Wave Methods with HVSR Curves

Article Info

Research article
Received: 10/05/2025
Revision: 04/06/2025
Accepted: 13/06/2025

Keywords

Shear Wave Velocity Profile
Lineer Site Response Analysis
Transfer Function
Horizontal/Vertical Spectral Ratio
Dominant Frequency

Abstract

In this study, the transfer functions derived from one-dimensional (1D) linear site response analyses based on shear wave velocity (Vs) profiles obtained through surface wave analysis methods (MASW and ReMi) are compared in the frequency domain with horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSR) curves computed from acceleration and ambient noise recordings acquired at the same locations. Within the scope of the study, synthetic earthquake records with characteristics similar to regional acceleration records were used as input motion in the ground response analyses to determine the frequency response of the soil and to identify resonance properties. The resulting transfer functions were compared with HVSR curves calculated from both seismic event and ambient noise recordings. The comparison focused primarily on dominant frequency and the agreement of spectral responses. The findings indicate that evaluating Vs profiles derived from combined surface wave methods using the transfer function approach offers a reliable method for identifying site-specific frequency characteristics, especially in locations where 1D soil behavior is dominant.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Zeminlerin dinamik yükler (sismik, makine titreşimi vb.) altında gerilme deformasyon davranışının belirlenmesi zemin saha tepkisinin belirlenmeye çalışıldığı geoteknik deprem mühendisliği bilim dalında kritik bir öneme sahiptir. Zeminlerin frekans tepkisini ve davranışını

*Corresponding author, e-mail: onureyisuren@stu.comu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1696906

belirlemek, özellikle yer hareketlerinin yapıların üzerindeki etkilerini doğru bir şekilde tahmin etmek açısından büyük bir rol oynamaktadır. Bu doğrultuda, yüzey dalgası yöntemleri (MASW ve ReMi), zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan ve özellikle Vs profillerinin elde edilmesinde yüksek güvenilirlik sağlayan yöntemler arasında yer almaktadır [1,2]. Ancak, elde edilen zemin profillerinin doğru bir şekilde yorumlanabilmesi için, zemin profilinin frekans tepkisininde ayrıntılı bir şekilde incelenmesi de gerekmektedir.

Zeminlerin frekans tepkisini değerlendirmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan biri, transfer fonksiyonu yaklaşımı olup, bu yaklaşım, zemine uygulanan bir giriş hareketine karşılık olarak yüzeydeki tepkiyi frekans ortamında analiz edilmesine olanak tanır [3]. Transfer fonksiyonu, genellikle ivme kaydının zemin kolonunun alt sınırından verilmesi ile belirlenir ve bu sayede zeminin hakim frekansları ve rezonans davranışı belirlenebilir. Bu analiz, özellikle zemin profillerinin dinamik özelliklerini ortaya koymada önemli bir araçtır [4].

Diğer bir yöntem ise, HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio – Yatay/Düşey Spektral Oran) yöntemi hem deprem kayıtları hem de çevresel gürültü kayıtları kullanılarak zemin hakim frekansının belirlenmesi ve zemin davranışının anlaşılması amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu yöntemde, yatay ve düşey ivme bileşenlerinin frekans spektrumları üzerinden hesaplanan spektral oran sayesinde rezonans frekansı hakkında bilgi edinilir [5]. HVSR eğrisinin, zemin profilinin doğruluğunun ve rezonans frekanslarının belirlenmesinde önemli bir rol oynadığı literatürde sıkça vurgulanmaktadır [6].

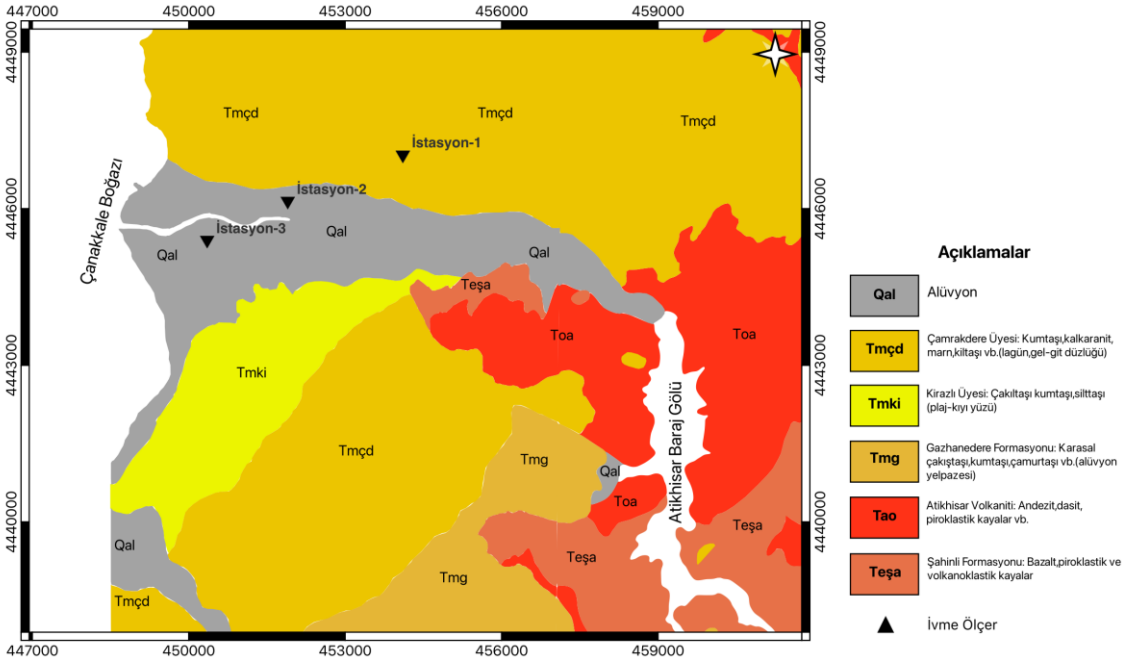
Literatürde, yüzey dalgası analizleri ile elde edilen Vs profillerinin ve HVSR analizlerinin karşılaştırılması üzerine bazı çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar genel sonuçlar sunmakta ve transfer fonksiyonu yaklaşımının zemin davranışı üzerindeki etkisi daha sınırlı bir biçimde ele alınmaktadır [7,8]. Bu nedenle bu çalışmanın amacı, sahada kurulmuş olan üç adet ivme istasyonunun bulunduğu alanda ölçülen Vs profilleri ile gerçekleştirilen 1B lineer zemin davranış analizleri ile hesaplanan transfer fonksiyonlarının, aynı lokasyonda kaydedilen ivme kayıtlarından ve çevresel gürültü ölçümlerinden elde edilen HVSR eğrileri ile karşılaştırılmasını yapmak ve uyumluluğunu tartışmaktır.

2. YÖNTEM (METHOD)

2.1. Çalışma Alanı ve Jeolojisi (Study Area and Geology)

Çalışma Sahası Çanakkale ili, Gelibolu Yarımadası ile Biga Yarımadası'nın büyük bir bölümünü içine almaktadır. Biga Yarımadası'nda farklı oluşumlara ve yaşlara sahip birçok farklı kaya grubu bulunmaktadır. Bu kaya gruplarının temeli Paleozoyik yaşlı metamorfik kayaçlardan (Kazdağ metamorfik kompleksi) oluşmaktadır. Mesozoyik Karakaya kompleksi ve meta-ofiyolitik kayaçlar bu temelin üzerinde tektonik bir temas üzerinde yer almaktadır. Senozoyik zamanlarda yaygın magmatik kayaçlar (plütonik, subvolkanik ve volkanik) ve sığ deniz ve göl kırıntılı tortulları gelişmiştir.

Çalışma alanında en altta Şahinli Formasyonu gözlenmektedir. Onun üstünde, andezit, dasit ve piroklastik kayaçlardan oluşan Atikhisar Volkaniti yer almaktadır. Çanakkale yerleşim alanı, Orta Miyosen-Pliyosen tortul birimleri "Çanakkale Grubu" [9], ve alüvyon birikintilerinden oluşan Çanakkale havzasında yer almaktadır. Çanakkale Grubu, alttan üste doğru Gazhanedere Formasyonu, Kirazlı Formasyonu, Çamrakdere Formasyonu ve Alçıtepe Formasyonundan oluşmaktadır (Şekil 1).



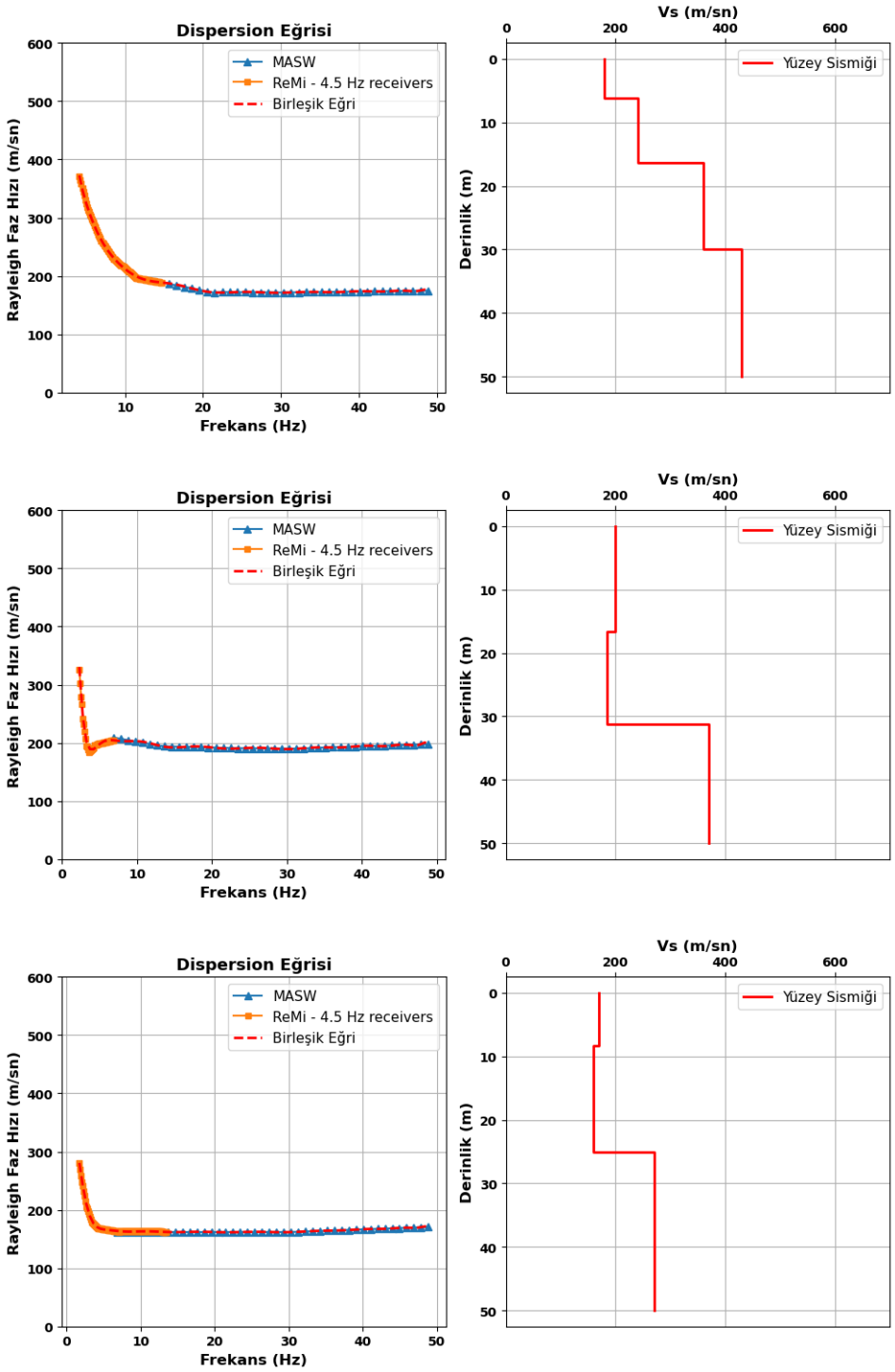
Şekil 1. Jeoloji haritası ([12]'den değiştirilerek) ve ivme istasyonlarının konumu (Geological map (adapted from [12]) and the locations of acceleration stations)

Gazhanedere Formasyonu inceleme alanının güneydoğu kesiminde yüzeylemektedir. Konglomera, kumtaşı ve kırmızımsı gri renkli çamurtaşından oluşur [10]. Çakıltaşı, kumtaşı ve silttaşından oluşan Kirazlı Formasyonu, yerleşim alanının güneyinde yüzeylemektedir. Çalışma alanının kuzey kesiminde yaygın olarak yüzeyleyen Çamrakdere Formasyonu, genellikle kumtaşı, kalkaranit, marn, kiltaşından oluşur [11]. Çanakkale yerleşim alanının büyük bir kısmı Sarıçay Nehri'nin oluşturduğu alüvyon çökelleri üzerinde yer almaktadır. Burada ivme istasyonları alüvyon kalınlığının farklı olduğu alanlar gözetilerek farklı hakim frekans değerlerine sahip olacağı düşüncesiyle üç sahada kurulmuştur.

2.2. Yüzey Dalgası Yöntemleri ile Vs Profilinin Elde Edilmesi (Deriving the Vs Profile Using Surface Wave Analysis Methods)

Yüzey dalgası yöntemlerinden Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW) ve Kırılma Mikrotremörü Yöntemi (ReMi) birlikte kullanılarak zeminlerin Vs profilleri elde edilmiştir. MASW yöntemi, sismik kaynak ile oluşturulan Rayleigh dalgalarının yayılma hızlarının analizine dayalı olarak yer altı tabakalarının Vs dağılımını belirlemektedir [1]. ReMi yöntemi ise çevresel ve rastgele kaynaklı mikrosismik gürültüleri kullanarak benzer şekilde yüzey dalgası yayılımına ilişkin dispersiyon eğrilerinin elde edilmesinde kullanılır [13].

Sahada veri toplama işleminde, 24 kanallı sismik kayıtçı ile 4.5 Hz merkezi frekansa sahip alıcılar ile MASW yöntemi için aktif sismik kaynak olarak balyoz kullanılmış, ReMi yönteminde ise aynı dizilimde çevresel gürültü belirli bir süre boyunca pasif olarak kaydedilmiştir. Her iki yöntem için elde edilen yüzey dalgası kayıtlarından, dispersiyon eğrileri çıkarılmış, ardından bu eğriler ters çözüm yöntemi ile Vs profiline dönüştürülmüştür. Ters çözümde başlangıç modeli olarak yerel jeolojik bilgiler ve literatürdeki ortalama zemin sınıflamaları dikkate alınmıştır. MASW ve ReMi yöntemlerinin birlikte kullanılması, aktif ve pasif kaynakların tamamlayıcılığından faydalanarak geniş bir derinlik aralığında Vs profilinin daha güvenilir bir şekilde elde edilmesini sağlamıştır. MASW yöntemi, özellikle yüzeye yakın tabakalarda yüksek çözünürlük sağlarken; ReMi yöntemi, çevresel gürültüleri kullanarak daha derin tabakalara ilişkin bilgi vermekte ve profilin derinliğini artırmaktadır [14]. Bu sayede, farklı dalga boylarının duyarlı olduğu derinlik aralıkları birleştirilerek daha kapsamlı bir yer altı modeli oluşturulabilmektedir [13,15]. Aynı zamanda iki farklı yöntemden elde edilen dispersiyon eğrilerinin birbiri ile uyuşumunu da kontrol etme imkanı vermektedir. İvme istasyonlarının bulunduğu sahalarda MASW ve ReMi ölçümleri ile elde edilen birleşik dispersiyon eğrileri ve ters çözüm ile elde edilmiş Vs profilleri sırasıyla Şekil 2'de verilmiştir.

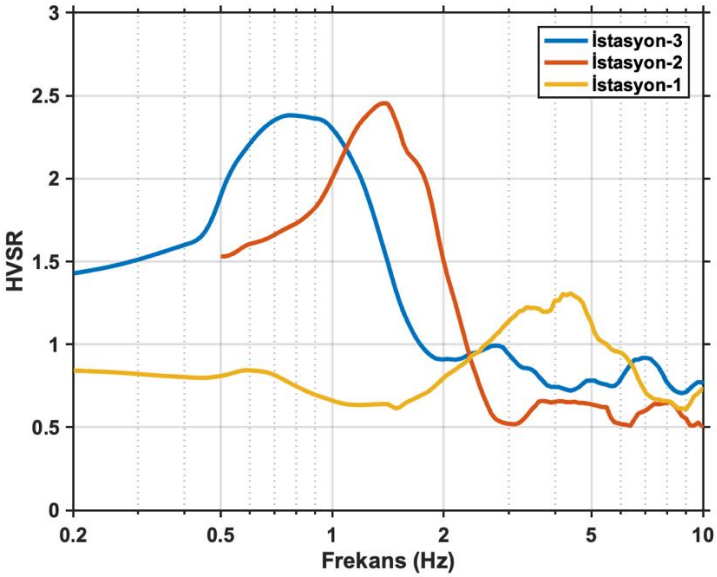


Şekil 2. Sırasıyla istasyonlarda elde edilen birleşik dispersiyon eğrisi ve Vs profilleri (The combined dispersion curves and Vs profiles obtained at the stations, respectively)

2.3. HVSR Eğrilerinin Hesaplanması (Calculation of HVSR Curves)

HVSR analizlerinde, ivme ve çevresel gürültü kayıtlarından elde edilen zaman serileri yatay ve düşey bileşenlerine ayrılarak, her bir bileşenin Fourier dönüşümleri hesaplanmış ve spektral oran yöntemi uygulanmıştır. Bu analizlerde veri işleme ve spektral oran hesaplamaları için açık kaynak kodlu Geopsy yazılımı [16] kullanılmıştır. Yatay bileşenlerin (H_E, H_N) genliğinin karesinin toplamının karekökü ile düşey H_V bileşenin genliği arasındaki oran alınarak her ivme istasyonunun bulunduğu alan için HVSR eğrileri elde edilmiştir (Eşitlik1). Şekil 3'te çevresel gürültü verilerinden elde edilen HVSR eğrileri verilmiştir.

$$HVSR(f) = \frac{\sqrt{|H_E(f)|^2 + |H_N(f)|^2}}{V(f)} \quad (1)$$



Şekil 3. Her istasyon için mikrotremor ölçümlerinden elde edilmiş HVSR eğrileri (The HVSR curves obtained from microtremor measurements for each station)

Çalışmada elde edilen hakim frekansı değerleri ayrıca, [17]'de çalışma alanı için önerilen bağıntı kullanılarak mühendislik kayası derinliklerinin tahmin edilmesi için kullanılmıştır. HVSR analizlerinden elde edilen rezonans frekansı *(fr)* ile mühendislik kayası derinliği *(h)* arasındaki ilişkiyi belirten ve Eşitlik (2)'de verilen ifade ile yer hareketinin 1B modele etkitileceği derinlik belirlenmiştir.

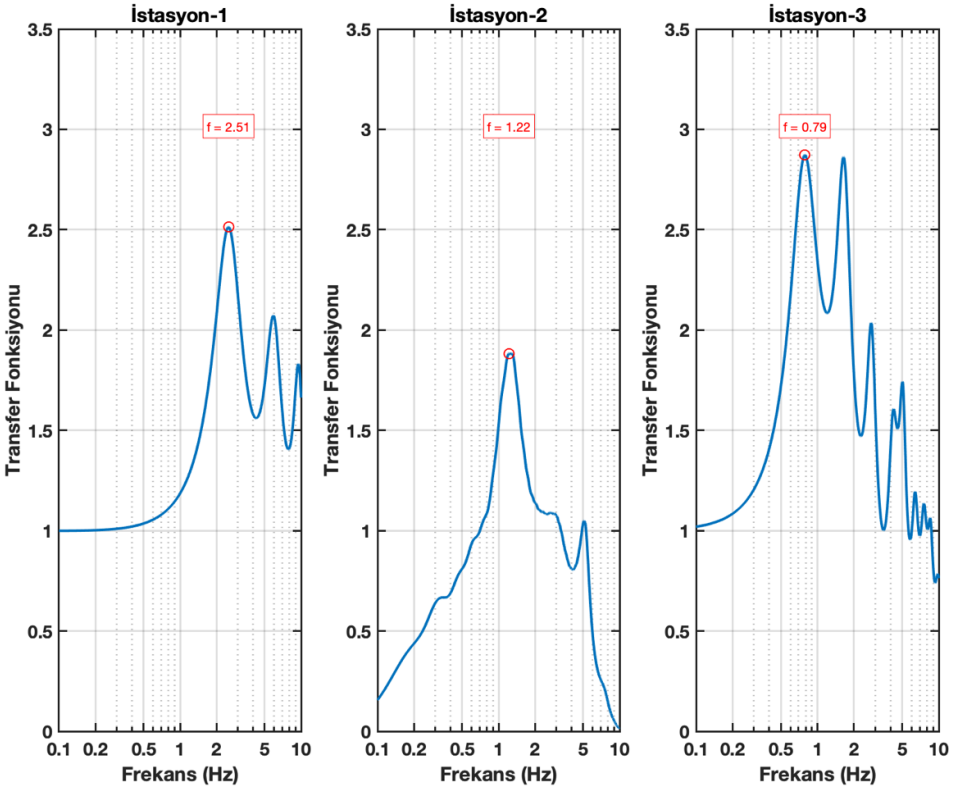
$$h = 86.176 x fr^{-1.063} \quad (2)$$

2.4. 1B Lineer Zemin Tepki Analizi ve Transfer Fonksiyonunun Hesaplanması (1D Linear Site Response Analysis and Calculation of the Transfer Function)

Çalışmada MASW ve ReMi yöntemleriyle elde edilen Vs profili kullanılarak 1 boyutlu lineer zemin davranış analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler, yaygın olarak kullanılan DEEPSOIL v7 yazılımı ile yapılmıştır [18]. Etki seviyesindeki ivme kaydını frekans ortamına taşımak için Fourier dönüşümü yapılarak zaman ortamındaki verilerin frekans ortamına aktarılması ve zeminin frekans tepkisinin ortaya konması sağlanmıştır.

Transfer fonksiyonu, sistemin giriş ve çıkış arasındaki frekans tabanlı ilişkiyi tanımlar ve bu çalışma kapsamında zemin profilinin dinamik davranışını değerlendirmek için kullanılmıştır. Analiz kapsamında, sönüm ve rijitlik özelliklerinin küçük genlikli deformasyonlar altında zemin tepkisinin lineer olduğu varsayılmıştır. Bu işlemde lineer elastik model kullanılmıştır. Zemin katmanlarının dinamik özellikleri, bu modelde sabit kabul edilen elastik parametrelerle belirlenmiştir. Bu bağlamda, zemin profili her biri sabit Vs, yoğunluk ve sönüm oranına sahip yatay tabakalardan oluşan bir model şeklinde tanımlanmıştır. Zemin profiline ait her tabaka için birim hacim ağırlıkları, literatürde gevşekten orta sıkıya değişen alüvyon zeminler için öneriye uygun olarak 17-20 kN/m3 arasında belirlenmiştir [4]. 1970'li yıllardan itibaren günümüze değin laboratuvarda gerçekleştirilen zemin dinamik özelliklerini belirlemeye yönelik deneyler, dinamik yükler altında zemin rijitliğinin (kayma modlünün) kayma birim deformasyonuna bağlı olarak azaldığı; buna bağlı olarak sönüm yeteneğinin arttığını göstermektedir [19,20]. Zemin profiline ait her tabaka için sönüm oranları buna uygun olarak, Vs değerlerine bağlı değişken şekilde tanımlanmıştır. Gevşek alüvyon birimler için %4-5, orta derecede sıkı zeminler için %3-4, sert zemin ve düşük dayanımlı kaya ortamları için ise %2 aralığında sönüm oranları seçilmiştir [4,19]. Yüzeye ulaşan hareketin frekans cevabını gözlemlemek amacıyla, analizlerde Gabor kaydı girdi hareketi olarak kullanılmıştır. Gabor kaydı, merkezi frekansı belirlenmiş geniş bantlı bir sinyal olup, özellikle transfer fonksiyonlarının belirlenmesinde etkili bir araçtır [14]. Zemin profilinin alt sınırı elastik yarı uzay olarak sınır koşulu olarak kabul edilmiştir. Bu yaklaşım, dalga alanında yapay yansımaların oluşmasını engelleyerek transfer fonksiyonunun

güvenilirliğinin arttırılması amaçlanmıştır. Elde edilen transfer fonksiyonları ve hakim frekans değerleri her istasyon için sırasıyla Şekil 4'te verilmiştir.

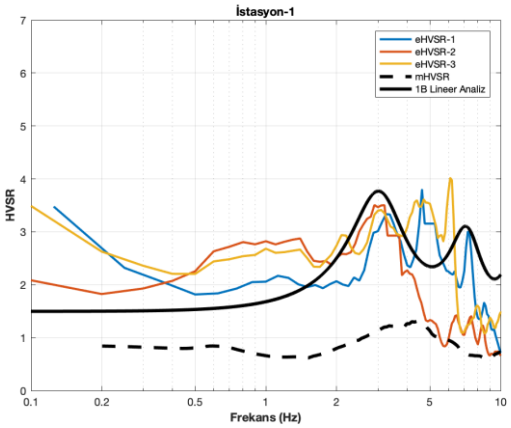


Şekil 4. İvme istasyonlarında hesaplanan transfer fonksiyonları ve hakim frekans değerleri (The transfer functions and dominant frequencies calculated at the acceleration stations)

3. BULGULAR (FINDINGS)

MASW ve ReMi yöntemleriyle elde edilen Vs profillerine dayanılarak DeepSoil yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilen 1B lineer zemin tepki analizlerinden elde edilen transfer fonksiyonları, aynı noktalarda kaydedilen deprem kayıtlarından hesaplanan HVSR eğrileriyle frekans düzleminde karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda, yüzeydeki hareketin temel kaya ortamına göre frekans karakteristikleri elde edilmiştir. Elde edilen transfer fonksiyonu, daha sonra aynı noktada kaydedilmiş bir ivme kaydından (eHVSR) ve çevresel gürültü kaydından (mHVSR) hesaplanan HVSR eğrileri ile karşılaştırılarak profilin doğrulanabilirliği tartışılmıştır.

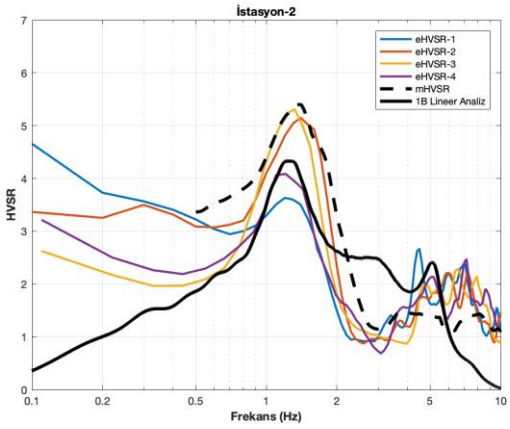
İstasyon-1'de yapılan analizlerde (Şekil 5), transfer fonksiyonu ile eHVSR kayıtlarının hakim frekans değerleri uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak mHVSR sonuçlarının belirgin bir pik görülmemekle beraber düze yakın bir eğri elde edilmiştir. Sığ sedimanter ortamlarda, düşük empedans kontrastının olduğu durumlarda belirgin bir pik frekansın bulunmadığı ve HVSR eğrisinin düzleştiği bilinmektedir [21,22]. Bu duruma karşı zemin hakim frekansının belirlenmesi için deprem kayıtlarının kullanılması önerilmiştir [23].



Şekil 5. İstasyon-1'de elde edilen transfer fonksiyonu ile deprem ve çevresel gürültü kayıtlarından elde edilmiş HVSR eğrilerinin karşılaştırılması (Comparison of the transfer function obtained at Station-1 with HVSR curves derived from earthquake and ambient noise recordings)

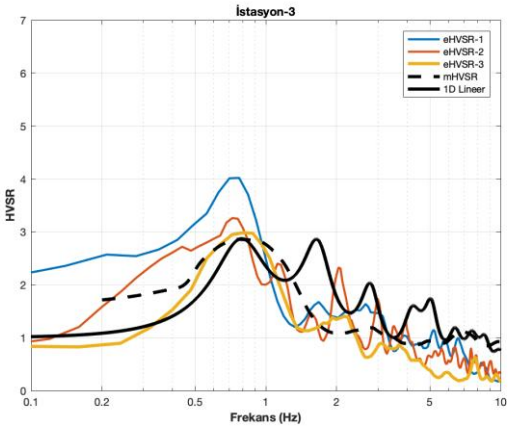
İstasyon-2'de elde edilen HVSR analiz sonuçları (Şekil-6), farklı deprem kayıtlarına dayalı dört ayrı eHVSR eğrisi, çevresel gürültü kayıtlarından hesaplanan ortalama HVSR (mHVSR) eğrisi ve 1B

lineer zemin tepki analizinden elde edilen transfer fonksiyonu ile karşılaştırılmıştır. Tüm eHVSR eğrileri ile mHVSR eğrisi arasında rezonans frekansı açısından genel bir uyum gözlenmektedir. Rezonans frekansı yaklaşık 1.7–1.8 Hz civarında belirlenmiştir. 1B lineer analiz ile elde edilen transfer fonksiyonu, rezonans frekansı bakımından eHVSR ve mHVSR eğrileriyle oldukça iyi örtüşmektedir. Ancak yüksek frekans bölgesinde (yaklaşık 4–6 Hz aralığı), transfer fonksiyonunun gösterdiği ikinci rezonans tepkisinin HVSR eğrilerinde belirgin şekilde gözlenmediği görülmektedir.



Şekil 6. İstasyon-2'de elde edilen transfer fonksiyonu ile deprem ve çevresel gürültü kayıtlarından elde edilmiş HVSR eğrilerinin karşılaştırılması (Comparison of the transfer function obtained at Station-2 with HVSR curves derived from earthquake and ambient noise recordings)

İstasyon-3'de elde edilen HVSR analiz sonuçları (Şekil-7), farklı deprem kayıtlarından elde edilen üç ayrı eHVSR eğrisi, çevresel gürültü kayıtlarından hesaplanan ortalama HVSR (mHVSR) eğrisi ve 1B lineer analiz sonucunda elde edilen transfer fonksiyonu ile karşılaştırılmıştır. Burada da eHVSR eğrileri ile mHVSR eğrisi arasında rezonans frekansı açısından genel bir uyum gözlenmektedir. Rezonans frekansı yaklaşık 0.8–0.9 Hz civarında belirlenmiştir. Yüksek frekans bileşenleri (1.5–7 Hz arası) incelendiğinde, transfer fonksiyonunda bu bölgede görülen diğer modlar HVSR eğrilerinde daha az belirgindir. Bu durum, üst zemin tabakalarının derinlik yönlü empedans farklarının zayıf olmasından kaynaklanıyor olabileceğini düşündürmektedir.



Şekil 7. İstasyon-3'de elde edilen transfer fonksiyonu ile deprem ve çevresel gürültü kayıtlarından elde edilmiş HVSR eğrilerinin karşılaştırılması (Comparison of the transfer function obtained at Station-3 with HVSR curves derived from earthquake and ambient noise recordings)

4. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Bu çalışmada, yüzey dalgası analizi yöntemleri kullanılarak elde edilen Vs profilleri ile gerçekleştirilen bir boyutlu (1B) lineer zemin tepki analizlerinden hesaplanan transfer fonksiyonları, aynı lokasyonlarda kaydedilen ivme ve çevresel gürültü kayıtlarından hesaplanan yatay/düşey spektral oran (HVSR) eğrileriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda zeminin hakim frekansı bakımından önemli düzeyde uyum sağlandığı gözlenmiştir. Transfer fonksiyonları, zeminlerin dinamik davranışını frekans bazlı olarak tanımlamada etkili ve güvenilir bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle eHVSR ve mHVSR eğrileri ile transfer fonksiyonlarının rezonans frekansları açısından uyum, sahanın hakim frekans özelliklerinin doğruluğunu pekiştirmektedir.

Ancak, bazı deprem kayıtlarından elde edilen eHVSR eğrileri ve transfer fonksiyonu arasında düşük frekans aralıklarında küçük farklılıklar gözlenmiştir. Bu farklılıkların temel nedenleri arasında kullanılan deprem kayıtlarının düşük genlikli olmasının neden olduğu düşünülmektedir.

Özellikle istasyon 1'de e HVSR analizinden düze yakın bir eğri elde edilmiştir. Bu durum, zemin tabakaları arasında önemli bir empedans kontrastının bulunmadığı durumlarda HVSR yönteminin, zemin hakim frekansını belirlemek için uygun olmadığını göstermektedir. Bu durumlarda hakim frekansı belirlemek için, mevcutsa deprem kayıtlarının kullanılması tercih edilmesi önerilir.

Zemin ve mühendislik kayası arasındaki empedans farkının bulunduğu durumlarda mHVSR yöntemiden başarılı sonuçlar elde edildiğini göstermektedir. Bu durum, deprem kayıtlarının mevcut olmadığı sahalarda mHVSR sonuçlarının kullanılabilirliğini ayrıca göstermektedir.

MASW ve ReMi yöntemlerinin bir arada kullanılması, Vs profillerinin etki derinliğinin ve doğruluğunun artırılmasında etkili olmuştur. ReMi yöntemi, daha derin tabakaların tespitinde avantajlar sunarken, MASW yöntemi ise özellikle yüzeye yakın tabakaların belirlenmesinde yüksek çözünürlük sağlamıştır. Bu iki yöntemin birbirini tamamlayıcı şekilde kullanılması, güvenilir yer altı modellerinin oluşturulmasına olanak sağlamıştır. Ancak mühendislik kayasının derinde yer alması bu yöntemler ile de derinliğinin tespit edilmemesine neden olmaktadır. Bu durumda daha derin sismik araştırmaların yapılması önerilmekle beraber saha için mevcut olması durumunda rezonans frekansı *(fr)* ile mühendislik kayası derinliği *(h)* ilişkilerinin alternatif olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Sonuç olarak, zeminlerin dinamik tepkisinin belirlenmesinde 1B lineer zemin tepki analizleri ile hesaplanan transfer fonksiyonlarının, HVSR yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, saha koşullarına özgü rezonans davranışlarının daha kesin ve güvenilir biçimde tanımlanmasını mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda, gelecekte yapılacak benzer araştırmalarda yüzey dalgası yöntemlerinin ve HVSR analizlerinin bütünleşik kullanımı ve transfer fonksiyonu ile karşılaştırılmasının model doğruluğunu arttırmak açısından önerilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Biriminin FDK-2021-3833 nolu projesi tarafından desteklenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

***Onur EYİSÜREN*:** Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Öznür KARACA: Sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She analyzed the results and performed the writing process.

Sadık ÖZTOPRAK: Sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] C. B. Park, R. D. Miller, and J. Xia, "Multichannel analysis of surface waves (MASW)," Geophysics, vol. 64, no. 3, pp. 800–808, 1999. doi:10.1190/1.1444590.

[2] J. Xia, R. D. Miller, C. B. Park, and G. Tian, "Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes," Journal of Applied Geophysics, vol. 52, no. 1, pp. 45–57, 2003. doi:10.1016/S0926-9851(02)00239-2

[3] J. Garcia-Suarez, J. González-Carbajal, and D. Asimaki, "Analytical 1D transfer functions for layered soils," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 163, p. 107532, 2022. doi: 10.1016/j.soildyn.2022.107532.

[4] S. L. Kramer, Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, 1996.

[5] Y. Nakamura, "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface," Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute, vol. 30, no. 1, pp. 25–33, 1989.

[6] J. Lermo, F. J. Chávez-García, "Site effect evaluation using spectral ratios with only one station," Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 83, no. 5, pp. 1574–1594, 1993.

[7] R. D. Borcherdt, "Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay," Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 60, no. 1, pp. 29–61, 1970.

[8] M. B. S. Yust, B. R. Cox, and T. Cheng, "Epistemic Uncertainty in Vs Profiles and Vs30 Values Derived from Joint Consideration of Surface Wave and H/V Data at the FW07 TexNet Station," in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V, GSP 291, pp. 387–396, 2018. doi:10.1061/9780784481462.038.

[9] M. Siyako, "Geology of the Çanakkale Region, NW Turkey," Journal of Asian Earth Sciences, vol. 27, no. 1, pp. 45–59, 2006. doi:10.1016/j.jseaes.2005.03.004.

[10] E. Atabey, K. Şentürk, Z. Karaköse, "Çanakkale-Altınkum Arasının Jeolojisi," Maden Tetkik ve Arama Dergisi, no. 129, pp. 47–65, 2004.

[11] K. Şentürk, Z. Karaköse, "Biga Yarımadası'nın jeolojisi ve tektonik evrimi," Maden Tetkik ve Arama Dergisi, no. 107, pp. 1–22, 1987.

[12] A. Ilgar, E. S. Demirci, M. Duru, Ş. Pehlivan, M. Dönmez, A. E. Akçay, H15-H16 Paftası Jeoloji Haritası. Ankara, Türkiye: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2008.

[13] J. N. Louie, "Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays," Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 91, no. 2, pp. 347–364, 2001. doi:10.1785/0120000098.

[14] Foti, C. G. Lai, G. J. Rix, C. Strobbia, Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization, CRC Press, 2017.

[15] L. V. Socco and C. Strobbia, "Surface-wave method for near-surface characterization: A tutorial," Near Surface Geophysics, vol. 2, no. 4, pp. 165–185, 2004. doi:10.3997/1873-0604.2004015.

[16] M. Wathelet, J.-L. Chatelain, C. Cornou, G. Di Giulio, B. Guillier, M. Ohrnberger, and A. Savvaidis, "Geopsy: A user-friendly open-source tool set for ambient vibration processing," Seismological Research Letters, vol. 91, no. 3, pp. 1878–1889, 2020. doi:10.1785/0220190313.

[17] A. Büyüksaraç, T. Bekler, A. Demirci, and O. Eyisüren, "New insights into the dynamic characteristics of alluvial media under the earthquake prone area: a case study for the Çanakkale city settlement (NW of Turkey)," Arabian Journal of Geosciences, vol. 14, no. 6, p. 562, 2021. doi:10.1007/s12517-021-06665-w.

[18] Y. M. A. Hashash, M. I. Musgrove, J. A. Harmon, D. R. Groholski, C. A. Phillips, and D. Park, DEEPSOIL 2016, User Manual and Tutorial. Urbana, IL: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2016.

[19] H. B. Seed and I. M. Idriss, Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses, Report No. EERC 70-10, University of California, Berkeley, 1970.

[20] Z. Huang, S. Cai, R. Hu, J. Wang, M. Jiang, and J. Gong, "Investigation of the effect of relative density on the dynamic modulus and damping ratio for coarse grained soil," Applied Sciences, vol. 14, no. 15, pp. 6847, 2024. doi:10.3390/app14156847

[21] A. Gosar, "Microtremor HVSR method – a passive geophysical tool to study site effects: Examples from Slovenia," Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 17, no. 6, pp. 925–937, 2017. doi:10.5194/nhess-17-925-2017.

[22] V. D'Amico, M. Picozzi, F. Baliva, and D. Albarello, "Ambient noise measurements for preliminary site-effects characterization in the urban area of Florence, Italy," Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 98, no. 3, pp. 1373–1388, 2008. doi:10.1785/0120070231.

[23] SESAME Project, Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations: Measurements, Processing and Interpretation, European Commission – Research General Directorate, Project No. EVG1-CT-2000-00026, December 2004.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1122-1136 (2025)

High-Resolution Direction Finding on Uniform Linear Arrays: A Comparative Evaluation of MUSIC Algorithm Derivatives

Emrah ONAT [1*]

[1]*TOBB University of Economics and Technology, Department of Electrical and Electronics Engineering, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 13/05/2025
Revision: 13/05/2025
Accepted: 27/07/2025

Keywords

Array Signal Processing
Direction of Arrival (DoA)
Uniform Linear Array
MUSIC

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/05/2025
Düzeltme: 13/05/2025
Kabul: 27/07/2025

Anahtar Kelimeler

Dizi Sinyal işleme
Yön Bulma
Düzgün Doğrusal Dizi
MUSIC

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study compares variants of the MUSIC algorithm for Direction of Arrival (DoA) estimation using a Uniform Linear Array (ULA) with different antenna numbers and spacings. Simulations with both coherent and non-coherent sources assess Traditional, Root, FBSS, and Improved MUSIC in terms of accuracy and efficiency. / Bu çalışma, farklı anten sayısı ve aralıklarına sahip uniform doğrusal dizilerde (ULA) DoA kestirimi için çeşitli MUSIC algoritması türevlerini karşılaştırmaktadır. Eşfazlı ve eşfazlı olmayan kaynaklarla yapılan benzetimler, Geleneksel, Root, FBSS ve İyileştirilmiş MUSIC yöntemlerini doğruluk ve verimlilik açısından değerlendirmektedir.

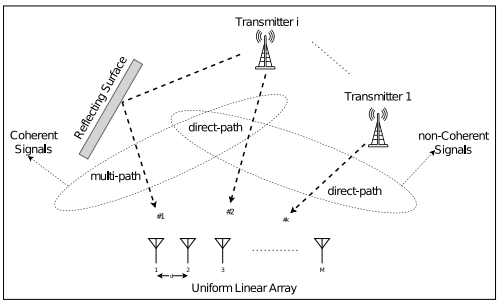


***Figure A**: DoA Scenario with ULA /**Şekil A:** Düzgün Doğrusal Dizilim ile Yön Bulma Senaryosu*

Highlights (Önemli noktalar)

- *Comprehensive comparison of four MUSIC algorithm variants under unified conditions / Dört farklı MUSIC algoritması türevinin ortak koşullar altında kapsamlı karşılaştırması*
- *Evaluation includes both accuracy (RMSE) and computational efficiency / Değerlendirme, hem doğruluk (RMSE) hem de hesaplama verimliliğini içermektedir*
- *Offers practical guidance for algorithm selection based on system needs / Sistem ihtiyaçlarına göre algoritma seçimi için pratik bir rehber sunmaktadır*

***Aim (Amaç):** The purpose of this study is to conduct a detailed comparative analysis of various MUSIC algorithm variants for DoA estimation in array signal processing. / Bu çalışmanın amacı, dizi işaret işleme alanında DoA (Geliş Yönü) kestirimi için çeşitli MUSIC algoritması türevlerinin ayrıntılı bir karşılaştırmalı analizini yapmaktır.*

***Originality (Özgünlük):** This study provides a unified comparison of four prominent MUSIC algorithm variants within a consistent simulation framework. Using extensive MATLAB-based Monte Carlo simulations under coherent and non-coherent conditions, it offers a deeper evaluation than most prior works. / Bu çalışma, dört önde gelen MUSIC algoritması türevinin tutarlı bir benzetim çerçevesinde karşılaştırmasını sunmaktadır. Eşfazlı ve eşfazlı olmayan koşullar altında kapsamlı MATLAB tabanlı Monte Carlo benzetimleri kullanılarak önceki çalışmalara göre daha derinlemesine bir değerlendirme sağlamaktadır.*

***Results (Bulgular):** The simulation results revealed that each algorithm has particular strengths: Traditional MUSIC provides a solid reference point, Root MUSIC excels in computational performance, FBSS MUSIC effectively handles coherent sources, and Improved MUSIC offers enhanced accuracy in complex conditions. / Simülasyon sonuçları, her bir algoritmanın kendine özgü güçlü yönleri olduğunu ortaya koymuştur: Geleneksel MUSIC sağlam bir referans noktası sunarken, Root MUSIC hesaplama performansında öne çıkmaktadır. FBSS MUSIC, eşfazlı kaynakları etkili bir şekilde işlerken, Geliştirilmiş MUSIC karmaşık koşullarda artırılmış doğruluk sağlamaktadır.*

***Conclusion (Sonuç):** In conclusion, this study has systematically explored and compared several MUSIC-based algorithms for DoA estimation, emphasizing their unique features, performance metrics, and practical suitability. / Sonuç olarak, bu çalışma DoA kestirimi için çeşitli MUSIC tabanlı algoritmaları sistematik bir şekilde incelemiş ve karşılaştırmış, onların kendine özgü özelliklerini, performans ölçütlerini ve pratik uygunluklarını vurgulamıştır.*

*Corresponding author, e-mail: eonat87@yahoo.com
DOI: 10.29109/gujsc.1696029

GU J Sci, Part C, 13(3): 1122-1136 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

High-Resolution Direction Finding on Uniform Linear Arrays: A Comparative Evaluation of MUSIC Algorithm Derivatives

Emrah ONAT [1*]

[1]*TOBB University of Economics and Technology, Department of Electrical and Electronics Engineering, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 13/05/2025
Revision: 13/05/2025
Accepted: 27/07/2025

Keywords

Array Signal Processing
Direction of Arrival (DoA)
Uniform Linear Array
MUSIC

Abstract

This paper investigates various Multiple Signal Classification (MUSIC) algorithms for Direction of Arrival (DoA) estimation, including 'Traditional MUSIC', 'Root MUSIC', 'Forward/Backward Spatial Smoothing (FBSS) MUSIC', and 'Improved/Modified MUSIC'. The study elaborates on the principles underlying each algorithm and explores the factors influencing the accuracy of DoA estimation, such as the number of array elements, antenna spacing, number of snapshots, Signal-to-Noise Ratio (SNR), and scanning angle resolution. Through extensive MATLAB simulations employing the Monte Carlo method, the performance of these algorithms is evaluated and compared in scenarios involving coherent, non-coherent, and single/dual-source incident signals. The Root Mean Square Error (RMSE) is calculated as a function of the aforementioned parameters to quantify estimation accuracy. Additionally, the computational efficiency of each algorithm is assessed by comparing their execution durations. The results provide valuable insights into the strengths and limitations of each MUSIC variant, offering guidance for their application in practical DoA estimation tasks.

Düzgün Doğrusal Dizilerde Yüksek Çözünürlüklü Yön Bulma: MUSIC Algoritması Türevlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/05/2025
Düzeltme: 13/05/2025
Kabul: 27/07/2025

Anahtar Kelimeler

Dizi Sinyal işleme
Yön Bulma
Düzgün Doğrusal Dizi
MUSIC

Öz

Bu çalışma, Geleneksel MUSIC, Kök MUSIC (Root MUSIC), İleri/Geri Uzaysal Yumuşatma (FBSS) MUSIC ve Geliştirilmiş/Değiştirilmiş MUSIC dahil olmak üzere, Geliş Açısı (DoA) kestirimi için çoklu sinyal sınıflandırma (MUSIC) algoritmalarını incelemektedir. Çalışma, her bir algoritmanın temel prensiplerini detaylandırmakta ve dizi eleman sayısı, anten aralığı, anlık görüntü sayısı, Sinyal-Gürültü Oranı (SNR) ve tarama açısı çözünürlüğü gibi DoA kestirimi doğruluğunu etkileyen faktörleri araştırmaktadır. Monte Carlo yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen kapsamlı MATLAB simülasyonları aracılığıyla, bu algoritmaların performansı, eşfazlı (koherent), eşfazlı olmayan (non-koherent) ve tek/çift kaynaklı gelen sinyal senaryolarında değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Kestirim doğruluğunu nicelendirmek için, bahsedilen parametrelerin bir fonksiyonu olarak Ortalama Karekök Hata (RMSE) hesaplanmıştır. Ek olarak, her bir algoritmanın hesaplama verimliliği, yürütme süreleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, her bir MUSIC varyantının güçlü ve zayıf yönlerine dair değerli bilgiler sunarak, pratik DoA kestirimi uygulamalarında kullanımlarına yönelik rehberlik sağlamaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Direction of Arrival (DoA) estimation is a fundamental problem in array signal processing, with wide-ranging applications in radar, sonar, wireless communications, and acoustic sensing. Accurate DoA estimation enables the localization of signal sources [1], which is critical for tasks such as target tracking [2], beamforming, and spatial filtering. From past to present, numerous parametric algorithms [3]-[6] and deep learning-based methods [7]-[10] have been developed for direction-of-arrival estimation. Among the various techniques developed for DoA estimation, the Multiple Signal Classification (MUSIC) algorithm has emerged as one of the most prominent and widely used methods due to its high resolution and robustness in resolving closely spaced sources.

*Corresponding author, e-mail: eonat87@yahoo.com
DOI: 10.29109/gujsc.1696029

The MUSIC algorithm [11], introduced by Schmidt in 1986, leverages the eigenstructure of the covariance matrix of received signals to estimate the DoA of multiple sources. Its ability to achieve super-resolution capabilities has made it a cornerstone in array signal processing. However, the performance of MUSIC is influenced by several factors, including the array configuration, signal coherence, and environmental noise. Over the years, numerous variants of the MUSIC algorithm have been proposed to address these challenges and enhance its applicability in diverse scenarios. These include 'Root MUSIC' [12], which improves estimation accuracy by transforming the spectral search into a polynomial rooting problem; 'Forward/Backward Spatial Smoothing (FBSS) MUSIC' [13]-[14], which mitigates the degradation caused by coherent signals; and 'Improved/Modified MUSIC' [15], which incorporates advanced techniques to further refine estimation performance.

In the literature, numerous studies are available related to the traditional MUSIC algorithm [16]-[19], the Root MUSIC algorithm [20]-[23], the FBSS MUSIC algorithm [24]-[27], and the Improved/Modified MUSIC algorithm [28]-[31]. Despite the advancements in MUSIC-based algorithms, a comprehensive comparison of their performance under varying conditions remains an area of active research. Factors such as the number of array elements, antenna spacing, number of snapshots, Signal-to-Noise Ratio (SNR), and scanning angle resolution significantly impact the accuracy and efficiency of DoA estimation. Understanding the interplay between these factors is essential for optimizing the design and deployment of array systems in practical applications.

This paper aims to provide a detailed analysis of four MUSIC algorithms—Traditional MUSIC, Root MUSIC, FBSS MUSIC, and Improved/Modified MUSIC—in the context of DoA estimation. Through extensive MATLAB simulations employing the Monte Carlo method, the performance of these algorithms is evaluated and compared under scenarios involving coherent, non-coherent, and single/dual-source incident signals. The Root Mean Square Error (RMSE) is used as a metric to quantify estimation accuracy, while computational efficiency is assessed by comparing algorithm durations. By examining the strengths and limitations of each algorithm, this study seeks to offer valuable insights for researchers and practitioners in selecting and implementing the most suitable MUSIC variant for their specific application needs.

The main contributions of this paper are summarized as follows:

1. Comprehensive Evaluation of MUSIC Variants: It is performed a detailed comparative analysis of four key MUSIC algorithm derivatives—Traditional MUSIC, Root MUSIC, FBSS MUSIC, and Improved/Modified MUSIC—highlighting their operational principles and performance trade-offs.

2. Performance Assessment under Diverse Signal Conditions: It is systematically evaluated each algorithm's accuracy in estimating Direction of Arrival (DoA) for coherent, non-coherent, and single/dual-source signal scenarios, addressing practical challenges in real-world signal environments.

3. Impact Analysis of System Parameters: It is investigated how various system-level factors—including number of array elements, inter-element spacing, snapshot count, SNR, and angle scanning resolution—affect the DoA estimation performance, using Root Mean Square Error (RMSE) as a performance metric.

4. Computational Efficiency Comparison: The study includes an execution time analysis to assess the computational demands of each algorithm, providing insights into their suitability for real-time applications.

5. Simulation-Driven Insights via Monte Carlo Analysis: Extensive MATLAB-based Monte Carlo simulations support our findings, ensuring statistical robustness and offering practical guidance for algorithm selection based on performance and complexity.

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 provides a brief overview of the theoretical foundation underlying Direction of Arrival (DoA) estimation using Uniform Linear Arrays (ULAs), with a particular focus on the subspace-based MUSIC family of algorithms. Section 3 details the specific formulations and processing steps of each MUSIC variant studied in this work. In Section 0, it is presented and discussed the comparative performance results based on RMSE and computational time metrics. Finally, Section 5 concludes the paper with a summary of key findings and recommendations for future research directions in high-resolution DoA estimation.

2. MATHEMATICAL MODEL (MATEMATİKSEL MODEL)

A uniform linear array with *M* elements is considered for capturing *L* narrowband coherent and/or non-coherent signals. Here, each source impinges on the array from a distinct direction, denoted as θ_k for $k = 1, 2, \ldots, L$; where the index k distinguishes each individual source. Moreover, the spacing between adjacent elements is bounded by $d \leq \lambda/2$, where λ represents the wavelength of the incoming signals [32]-[33].

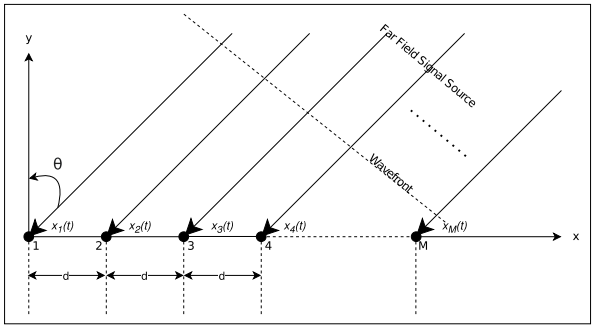


Figure 1. Structure of a uniform linear antenna array (Düzgün doğrusal anten dizisinin yapısı)

Figure 1. illustrates the configuration of the antenna array, where both the array and the incoming signals are assumed to lie within the same plane.

Here, the matrix representation of the L incident signal sources on the array elements can be formulated in terms of the signal vector as:

$$S(t) = [S^1(t), S^2(t), \ldots, \mathrm{S_L(t)}]^{\mathrm{T}} \quad (1)$$

By selecting the first element of the antenna array as the reference, the received signals across the *M* array elements can be arranged into the following matrix form:

$$R(t) = AS(t) + N(t) \quad (2)$$

$$R(t) = [R_1(t) \cdot R_2(t) \cdots R_M(t)]^T \quad (3)$$

In this formulation, $N(t)$ is defined as the noise vector representing the total noise across all array elements, while A denotes the steering vector matrix, which can be expressed as:

$$A = [\alpha(\theta_1) \cdot \alpha(\theta_2) \cdots \alpha(\theta_L)] \quad (4)$$

and

$$\alpha(\theta_k) = \left[1 e^{-j\frac{2\pi d_1}{\lambda}\sin(\theta_k)} \cdots e^{-j(M-1)\frac{2\pi d_{\mathrm{M\text{-}1}}}{\lambda}\sin(\theta_k)}\right]^T \quad (5)$$

3. THE MUSIC ALGORITHMS (MUSIC ALGORİTMALARI)

3.1. Traditional MUSIC Algorithm (Geleneksel MUSIC Algoritması)

MUSIC algorithm is an advanced spectral estimation technique that employs eigenvalue decomposition to determine the direction of arrival (DOA) of incoming signals. Using the orthogonality principle, the method decomposes the received signals correlation matrix into signal and noise subspaces, where the DOA is estimated by identifying steering vectors that are orthogonal to the noise subspace. This approach ensures the accuracy of the DOA estimation [11].

The covariance matrix V_C is defined as:

$$V_C = E[RR^H] \quad (6)$$

Since the signal and noise are independent, the data covariance matrix can be separated into distinct signal and noise components:

$$V_C = AV_SA^H + V_N \quad (7)$$

Here, $\mathrm{V_S}$ represents the signal correlation matrix, while $\mathrm{AV_SA^H}$ corresponds to the signal component. A corresponds to the steering vector matrix, which characterizes the directional response of the array to incoming signals from different angles and $\mathrm{V_N}$ is the noise correlation matrix and can be expressed as:

$$V_C = P_{S\sum P_S^H} + P_N \sum P_N^H \quad (9)$$

The correlation matrix can be decomposed into components associated with the signal and noise subspaces, where $\mathrm{P_S}$ and $\mathrm{P_N}$ serve as the respective bases, as illustrated below:

$$V_C = P_{S\sum P_S^H} + P_N \sum P_N^H \quad (9)$$

The DOA can be estimated through a minimal optimization search, as:

$$\alpha^H(\theta)P_N = 0 \quad (10)$$

$$\theta_{MUSIC} = argmin.\,\alpha^H(\theta)P_N P_N^H \alpha(\theta) \quad (11)$$

By reformulating the above equation in inverse form, a spectral function is obtained, with peaks detected using spectral peak search to estimate the DOA signals, as demonstrated below:

$$P_{MUSIC} = \frac{1}{\alpha^H(\theta)P_N P_N^H \alpha(\theta)} \quad (12)$$

3.2. Improved/Modified MUSIC Algorithm
(Geliştirilmiş/Değiştirilmiş MUSIC Algoritması)

Traditional MUSIC struggles with coherent signals. To enhance performance, a transformation matrix F and the complex conjugate of R are applied, yielding the received signal matrix W and its covariance V_W [15]:

$$V_W = E[WW^H] = FV_c^*F \quad (13)$$

The matrices V_C and V_W are integrated to construct V:

$$V = AV_SA^H + F[AV_SA^H]^*F + 2\sigma^2 I \quad (14)$$

The noise subspace derived from the eigen-decomposition of V is used to construct the spatial spectrum and detect its peaks.

3.3. Root MUSIC Algorithm (Kök MUSIC Algoritması)

The Root MUSIC algorithm recasts conventional spectral peak search into a polynomial root-finding approach via a defined polynomial [12], [20] -[22].

Here, the signal angles are determined by selecting steering vectors that, due to their orthogonality with the noise subspace, yield a null response, thereby facilitating the formulation of a corresponding polynomial [12]:

$$P(y) = A^H P_N P_N^H A \quad (15)$$

where K × K correlation matrix is assumed and the steering vector A is represented as:

$$A = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda}\sin(\theta)\cdot 0} \\ e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda}\sin(\theta)\cdot 1} \\ e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda}\sin(\theta)\cdot 2} \\ \vdots \\ e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda}\sin(\theta)\cdot (K-1)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Due to noise, the L roots of $P(y)$ closest to the unit circle are selected and the corresponding signal angles are calculated using:

$$y = e^{j\frac{2\pi d}{\lambda}\sin(\theta)} \quad (17)$$

$$\theta_k = \arcsin\left[\frac{\lambda}{2\pi d} arg(y_k)\right] \quad (18)$$

3.4. FBSS MUSIC Algorithm (FBSS MUSIC Algoritması)

Considering the ULA defined in the mathematical model section, spatial smoothing is applied to obtain the average covariance matrices for the forward and backward subarrays, denoted as V_f and V_b, respectively, as in [13]-[14]:

$$V_f = \frac{1}{U}\sum_{i=1}^{U} E\left[R_x^f(t) R_x^{f^H}(t)\right] \quad (19)$$

$$V_b = \frac{1}{U}\sum_{i=1}^{U} E\left[R_x^b(t) R_x^{b^H}(t)\right] \quad (20)$$

Here, U denotes the total number of subarrays, with the x^{th} forward and backward subarrays represented by $R_x^f(t)$ and $R_x^b(t)$, respectively. The corresponding covariance matrices for spatial smoothing are formulated in:

$$V_{fb} = \frac{V_f + V_b}{2} \quad (21)$$

After constructing the covariance matrix and obtaining the noise subspace P_N via eigenvalue decomposition, the DOAs are estimated from the peaks of the following pseudo-spectrum:

$$P_{FBSS}(\theta) = \frac{1}{\alpha^H(\theta) P_N P_N^H \alpha(\theta)} \quad (22)$$

4. SIMULATION RESULTS AND ANALYSIS
(BENZETİM SONUÇLARI VE ANALİZLER)

Simulations were conducted in different scenarios to compare the performances of MUSIC algorithms. Direction-finding estimations of the algorithms were obtained, and errors were calculated by generating coherent and noncoherent signals for single source and dual sources cases.

4.1. Single Source Incident Signal (Tek Kaynaktan Gelen Sinyal)

The results of single source direction of arrival estimation include 'RMSE-Number of Array Elements', 'RMSE-Spacing between Array Elements', 'RMSE-Number of Snapshot' and 'RMSE-SNR' graphs obtained via the Monte Carlo method. Lastly, the effect of the scanning angle resolution on the error has been observed and the duration of the traditional MUSIC algorithm for different scanning angle resolution has been calculated. For each iteration of each scenario, the direction of arrival is randomly generated between $-80°$ and $80°$. The angle of arrival of the generated signal is not an integer, and calculations are

performed up to the fourth decimal place. Besides, the noise is assumed to be Additive White Gaussian noise for all these experiments. The simulation parameters are provided in Table 1.

Table 1. Simulation parameters for single source experiments (Tek kaynaklı deneyler için simülasyon parametreleri)

Parameters	Values
Number of sources (non-coherent)	1
Number of sources (coherent)	0
Direction of arrival (azimuth)	Randomly between $-80°$ and $80°$. (e.g., $-73{,}6139°$)
Direction of arrival (elevation)	Fixed at $90{,}0000°$
Noise type	Gaussian

4.1.1. Number of Array Elements (Dizi Elemanlarının Sayısı)

Simulations were performed for thirteen different numbers of array elements (M) from 8 to 32 using the parameters given in Table 2 to examine the effect of SNR on direction-finding performance.

Table 2. Simulation parameters for different number of array elements (M) (Farklı sayıda dizi elemanı (M) için simülasyon parametreleri)

Parameters	Fig 2a	Fig 2b	Fig 2c
Number of array elements (M)	8:2:32	8:2:32	8:2:32
Spacing between array elements (d)	$\lambda/10$, $\lambda/2$	$\lambda/10$	$\lambda/10$
Number of snapshots (N)	100	10, 1000	100
Signal to noise ratio (SNR)	-15 dB	-15 dB	-15 dB, 25 dB
Number of iterations per M	1000	1000	1000

Based on these simulations, it can be observed that an increase in number of antennas M reduces the RMSE for all algorithms. In all graphs of Figure 2; Traditional MUSIC, FBSS MUSIC, and Improved MUSIC algorithms provide nearly identical results as expected since there is no second coherent/non-coherent source. The ROOT MUSIC algorithm yields the best results among the algorithms. As can be seen in Figure 2(a), as expected, lower RMSE values are obtained with a half-wavelength ($\lambda/2$) antenna spacing (d), compared to a one-tenth wavelength ($\lambda/10$) antenna spacing. Besides, using more snapshots (N), and higher SNR levels results in lower RMSE values as can be seen in Figure 2(b) and Figure 2(c), as expected.

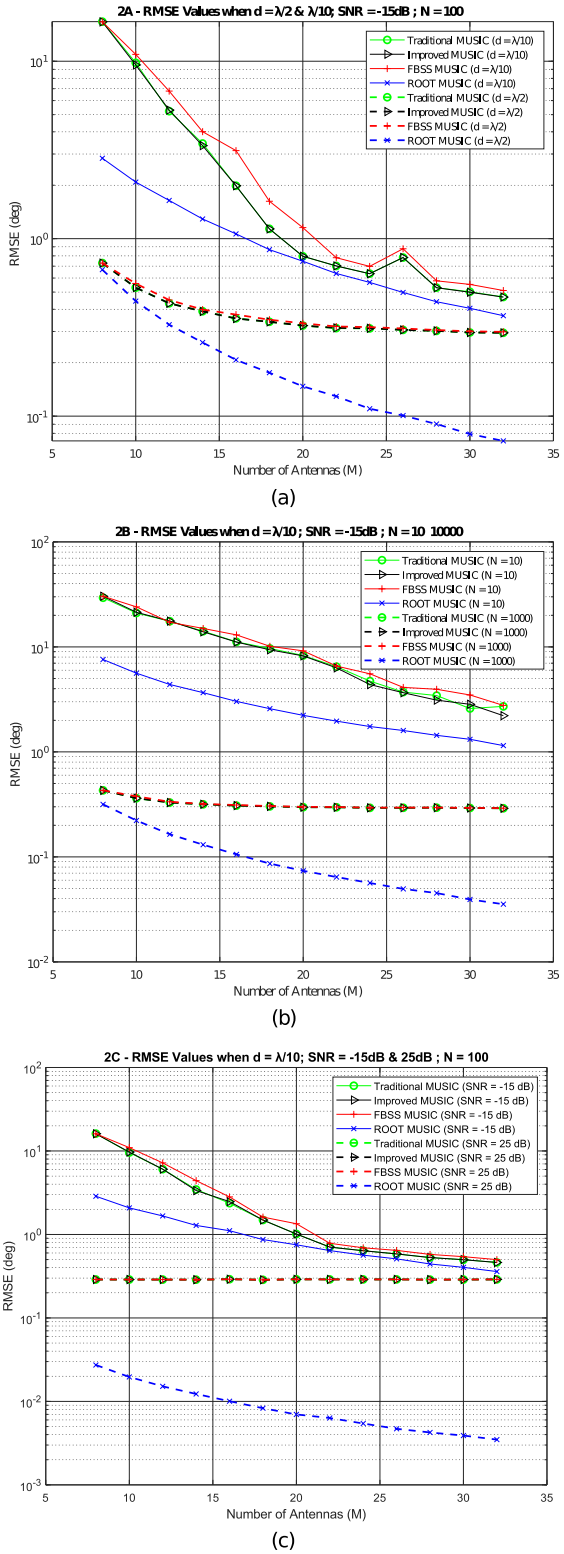


Figure 2. RMSE vs. number of array elements (M) graphs for a) 2 different spacing between array elements (d), b) 2 different number of snapshot (N), c) 2 different SNR levels (a) Dizi elemanları arasında 2 farklı uzunluk (d), b) 2 farklı örnek sayısı (N), c) 2 farklı SNR seviyesi için RMSE ve dizi elemanları sayısı (M) grafikleri)

The number of array elements plays a critical role in determining the resolution and accuracy of MUSIC-based DoA estimation algorithms. Increasing the number of elements in a Uniform Linear Array enhances the array aperture, thereby improving angular resolution and enabling the detection of closely spaced sources. For all MUSIC variants studied, performance generally improves with more array elements, as the signal and noise subspaces become more distinguishable, leading to sharper spatial spectra and reduced estimation errors. Notably, algorithms like Root MUSIC and FBSS MUSIC particularly benefit from a higher number of elements, with FBSS MUSIC leveraging the increased spatial diversity to mitigate the effects of signal coherence. However, this performance gain comes at the cost of increased computational complexity, particularly for methods involving matrix eigendecomposition and root solving.

4.1.2. **Spacing Between Array Elements** (Dizi Elemanları Arasındaki Boşluk)

Simulations were performed for ten different spacing values between array elements (d), from ($\lambda/10$) to ($\lambda/2$) using the parameters given in Table 3 to examine the effect of SNR on DoA performance.

Table 3. Simulation parameters for different space values between array elements (d) (Farklı sayıda antenler arasi uzaklik (d) için simülasyon parametreleri)

Parameters	Fig 3a	Fig 3b	Fig 3c
Number of array elements (M)	8, 24	8	8
Spacing between array elements (d)	λ/k; k = 2: 1: 10	λ/k; k = 2: 1: 10	λ/k; k = 2: 1: 10
Number of snapshots (N)	100	10, 1000	100
Signal to noise ratio (SNR)	-15 dB	-15 dB	-15 dB, 25 dB
Number of iterations per d	1000	1000	1000

Based on these simulations, it can be observed that an increase in spacing between array elements (d) reduces the RMSE for all algorithms. In all graphs of Figure 3; Traditional MUSIC, FBSS MUSIC, and Improved MUSIC algorithms provide nearly identical results. The ROOT MUSIC algorithm yields the best results among the algorithms. Besides, as can be seen in all graphs of Figure 3, using more antennas (M) or using more snapshots (N) or higher SNR levels result in lower RMSE values as expected.

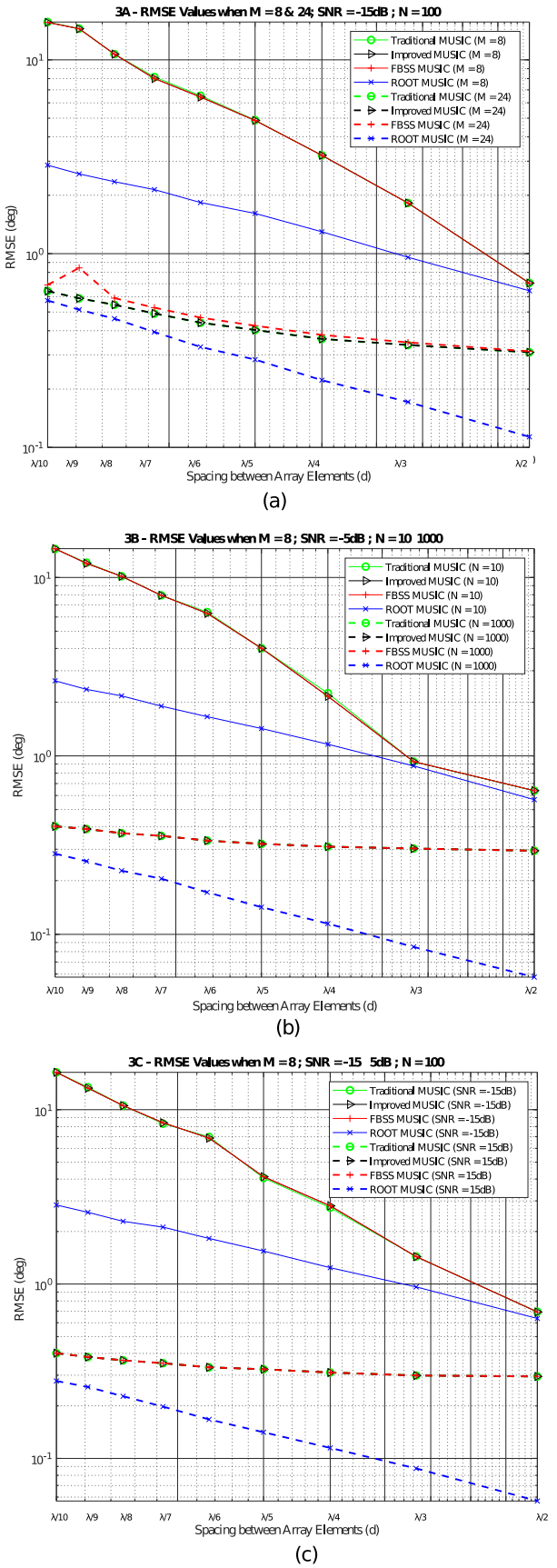


Figure 3. RMSE vs. spacing (d) graphs for a) 2 different number of array elements (M), b) 2 different number of snapshot (N), c) 2 different SNR levels (a) 2 farklı sayıda dizi elemanı (M), b) 2 farklı sayıda örnek sayısı (N), c) 2 farklı SNR seviyesi için RMSE ve antenler arasi uzunluk (d) grafikleri)

The spacing between array elements significantly influences the performance of MUSIC and its variants in DoA estimation. Ideally, the inter-element spacing should be set to half the signal wavelength ($\lambda/2$) to prevent spatial aliasing and ensure unambiguous angle detection. If the spacing exceeds $\lambda/2$, grating lobes may appear in the spatial spectrum, leading to incorrect DoA estimates, especially in Traditional and Root MUSIC. Conversely, spacing less than $\lambda/2$ results in reduced array aperture, which degrades angular resolution and limits the ability to distinguish closely spaced sources. Across all MUSIC variants, optimal spacing helps maintain a well-conditioned array manifold and improves subspace separation, thereby enhancing estimation accuracy. Variants like FBSS MUSIC are particularly sensitive to element spacing, as their smoothing operations assume a uniform and alias-free array geometry.

4.1.3. **Number of Snapshots** (Anlık Örnek Sayısı)

Simulations were performed for ten different numbers of snapshots (N) 10 to 10.000 using the parameters given in Table 4 to examine the effect of SNR on direction-finding performance.

Table 4. Simulation parameters for different number of snapshots (N) (Farklı sayıda Örnek Sayısı (N) için simülasyon parametreleri)

Parameters	Fig 4a	Fig 4b	Fig 4c
Number of array elements (M)	8, 24	8	8
Spacing between array elements (d)	$\lambda/10$	$\lambda/10$, $\lambda/2$	$\lambda/10$
Number of snapshots (N)	10:10000	10:10000	10:10000
Signal to noise ratio (SNR)	-15 dB	-15 dB	-15 dB, 25 dB
Number of iterations per d	1000	1000	1000

Based on these simulations, it can be observed that an increase in number of snapshots (N) reduces the RMSE for all algorithms. In all graphs of Figure 4; Traditional MUSIC, FBSS MUSIC, and Improved MUSIC algorithms provide nearly identical results. The ROOT MUSIC algorithm yields the best results among the algorithms. As can be seen in Figure 4(b), as expected, lower RMSE values are obtained with a half-wavelength ($\lambda/2$) antenna spacing (d) compared to a one-tenth wavelength ($\lambda/10$) antenna spacing. Besides, using more array elements (M) or higher SNR levels results in lower RMSE values as can be seen in Figure 4(a) and Figure 4(c), as expected.

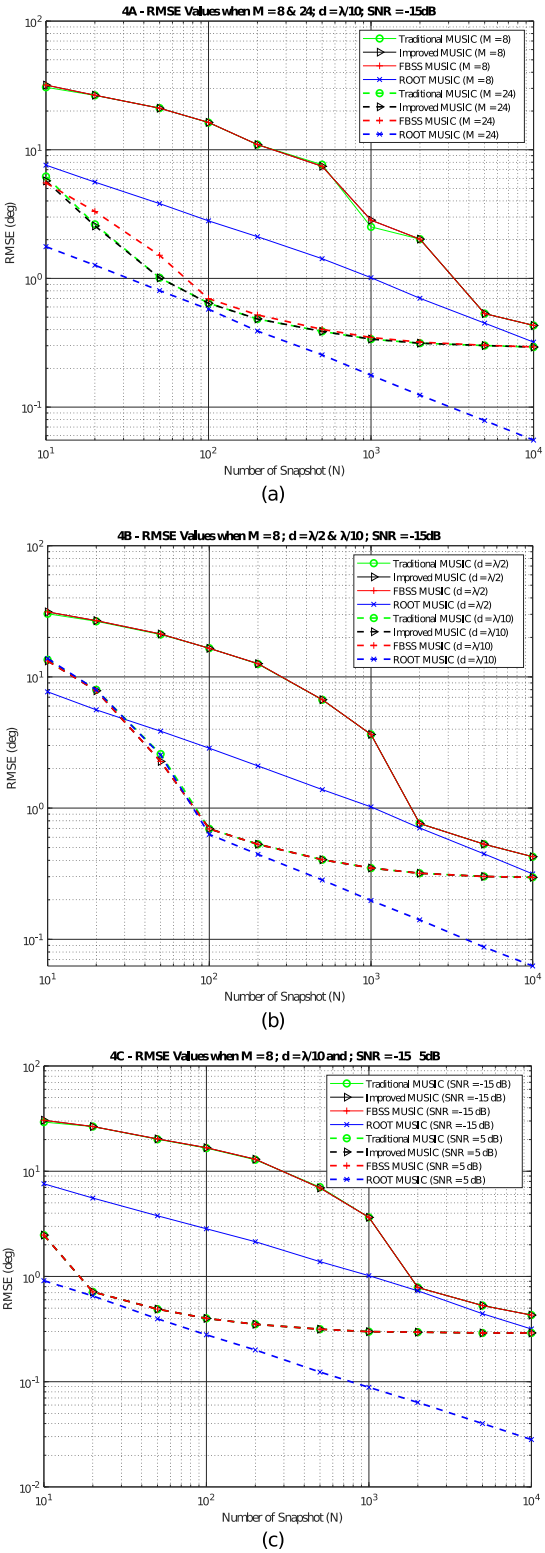


Figure 4. RMSE vs. number of snapshoot (N) graphs for a) 2 different number of array elements (M), b) 2 different spacing between array elements (d), c) 2 different SNR levels (a) 2 farklı dizi elemanı sayısı (M), b) dizi elemanları arasında 2 farklı uzunluk (d), c) 2 farklı SNR seviyesi için RMSE ve anlık örnek sayısı (N) grafikleri)

The number of snapshots (N), representing the temporal samples collected during signal observation, directly affects the estimation accuracy of MUSIC-based algorithms. A higher number of snapshots leads to a more accurate estimation of the sample covariance matrix, resulting in improved separation between the signal and noise subspaces. This, in turn, enhances the resolution and robustness of all MUSIC variants, particularly in low SNR environments. Traditional MUSIC and Root MUSIC show noticeable improvements in peak sharpness and stability with increased snapshots, while FBSS MUSIC benefits from more reliable smoothing operations. However, in practical scenarios where real-time processing or limited observation time is required, the number of snapshots may be constrained, which can degrade performance and increase sensitivity to noise and source correlation.

4.1.4. **Signal to Noise Ratio** (Sinyal Gürültü Oranı)

Simulations were performed for eleven different levels of SNR from -20 dB to 30 dB using the parameters given in Table 5 to examine the effect of SNR on direction-finding performance.

Table 5. Simulation parameters for different SNR Levels (Farklı Sinyal Gürültü Oranı için simülasyon parametreleri)

Parameters	Fig 5a	Fig 5b	Fig 5c
Number of array elements (M)	8, 24	8	8
Spacing between array elements (d)	$\lambda/10$	$\lambda/10$, $\lambda/2$	$\lambda/10$
Number of snapshots (N)	100	100	10, 1000
Signal to noise ratio (SNR)	-20:5:30 dB	-20:5:30 dB	-20:5:30 dB
Number of iterations per d	1000	1000	1000

Based on these simulations, it can be observed that an increase in SNR level reduces the RMSE for all algorithms. In all graphs of Figure 5; Traditional MUSIC, FBSS MUSIC, and Improved MUSIC algorithms provide nearly identical results. The ROOT MUSIC algorithm yields the best results among the algorithms. As can be seen in Figure 5(b), as expected, lower RMSE values are obtained with a half-wavelength ($\lambda/2$) antenna spacing (d) compared to a one-tenth wavelength ($\lambda/10$) antenna spacing. Besides, using more array elements (M) or using more snapshots (N) results in lower RMSE values as can be seen in Figure 5(a) and Figure 5(c), as expected.

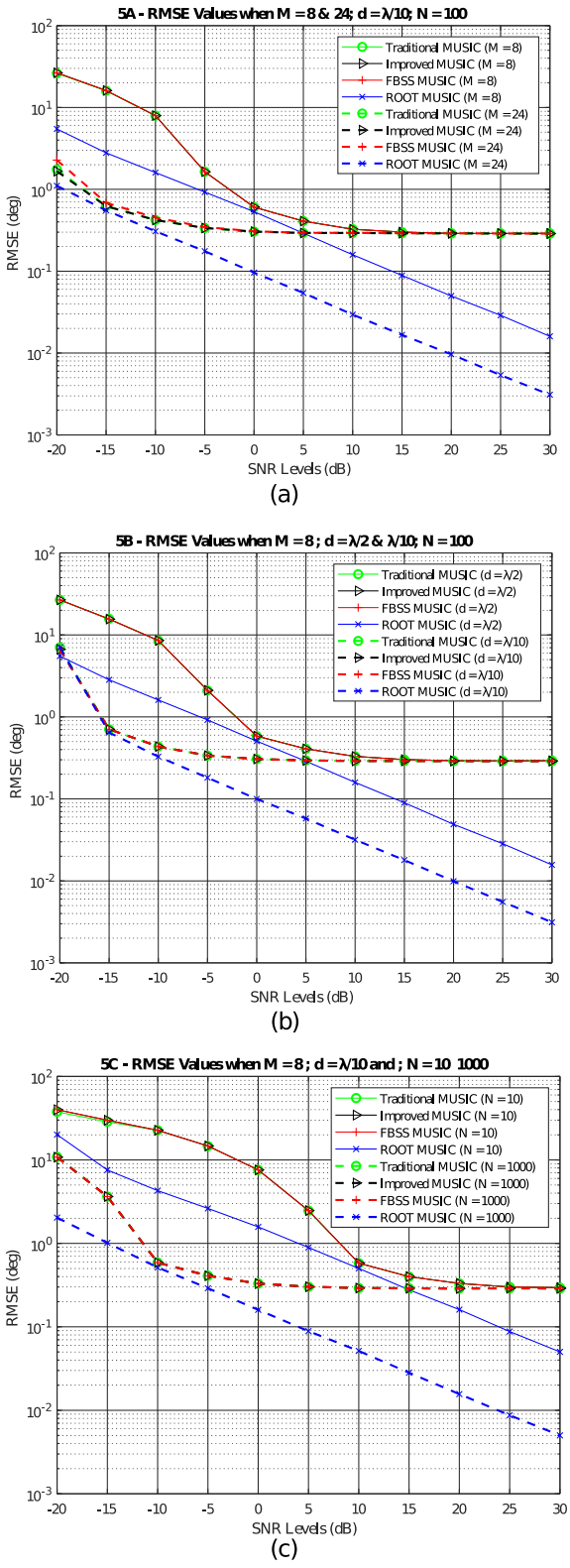


Figure 5. RMSE vs. SNR graphs for a) 2 different number of array elements (M), b) 2 different spacing between array elements (d), c) 2 different number of snapshot (N) (a) 2 farklı sayıda dizi elemanı (M), b) dizi elemanları arasında 2 farklı uzunluk (d), c) 2 farklı sayıda anlık örnek (N) için RMSE ve SNR grafikleri)

Signal-to-Noise Ratio (SNR) is a critical factor influencing the accuracy and reliability of DoA estimation in MUSIC-based algorithms. At higher SNR levels, the distinction between the signal and noise subspaces becomes clearer, resulting in well-defined spectral peaks and more accurate angle estimation across all MUSIC variants. Root MUSIC exhibits strong performance in high-SNR conditions. However, all variants' performance deteriorates significantly as SNR decreases, leading to blurred or misplaced peaks. Extremely low SNR conditions remain challenging for all variants, underscoring the need for careful algorithm selection based on the expected noise environment.

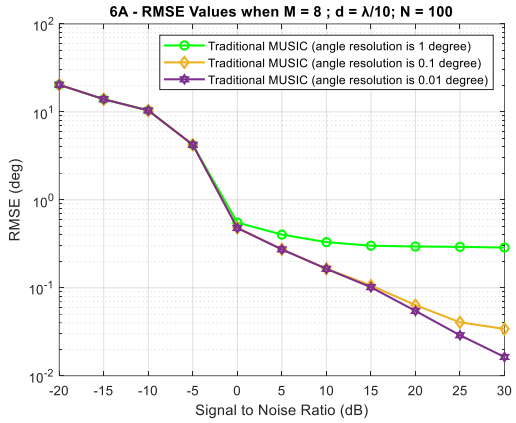
4.1.5. Scanning Angle / Angle Resolution
(Tarama Açısı / Açı Çözünürlüğü)

Simulations were conducted for three different resolutions from 1° to 0.01° using the parameters given in the Table 6 to examine the effect of scan angle resolution on direction-finding performance.

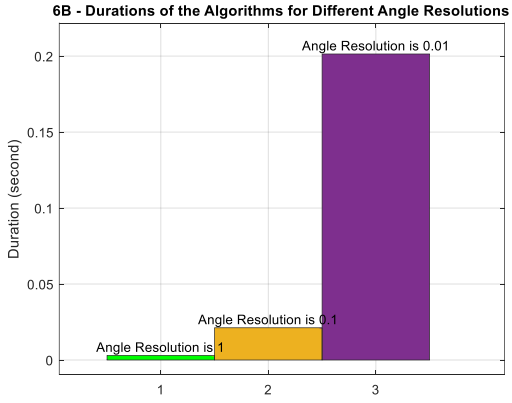
Table 6. Simulation parameters for different angle resolutions (Farklı açı çözünürlükleri için simülasyon parametreleri)

Parameters	Fig 6a
Number of array elements (M)	8
Spacing between array elements (d)	$\lambda/10$
Number of snapshots (N)	100
Signal to noise ratio (SNR)	-20:5:30 dB
Scanning angle resolution	$-90°:1°:90°$ $-90°:0.1°:90°$ $-90°:0.01°:90°$
Number of iterations per N	1000

As can be understood from the simulation results in Figure 6(a), the error decreases as the SNR level increases but never reaches zero. This is because the required angle resolution to determine the exact arrival angle of the signal is extremely small. As seen in the graph, reducing the scan angle resolution leads to lower RMSE values at high SNR levels, but it produces similar results at low SNR levels. Additionally, reducing the angle resolution by a factor of 10 increases the number of scanned angles by the same factor, which proportionally extends the algorithm's runtime as seen in Figure 6(b). Therefore, a trade-off exists in this scenario. In a real system, this trade-off should be optimized appropriately.



(a)



(b)

Figure 6. a) RMSE vs. SNR graph and b) Durations of the algorithms for 3 different scanning angle resolutions (3 farklı tarama açısı çözünürlüğü için a) RMSE ve SNR grafiği ve b) algoritmaların süreleri)

The scanning angle resolution, which defines the angular step size used when evaluating the MUSIC spatial spectrum, significantly impacts the performance and accuracy of the Traditional MUSIC algorithm. Finer resolution allows for more precise localization of the spectral peaks corresponding to the Direction of Arrival (DoA), leading to improved estimation accuracy—especially when sources are closely spaced. However, this comes at the cost of increased computational burden, as more angle points must be evaluated during the search. Conversely, a coarser resolution reduces computational load but may result in peak broadening or missed detections, particularly under challenging conditions such as low SNR or limited snapshots. Therefore, selecting an appropriate scanning resolution involves a trade-off between accuracy and processing efficiency, and should be guided by the application's performance requirements and available computational resources.

4.2. Dual Source Non-Coherent Incident Signal
(Çift Kaynaktan Gelen Eşfazlı Olmayan Sinyaller)

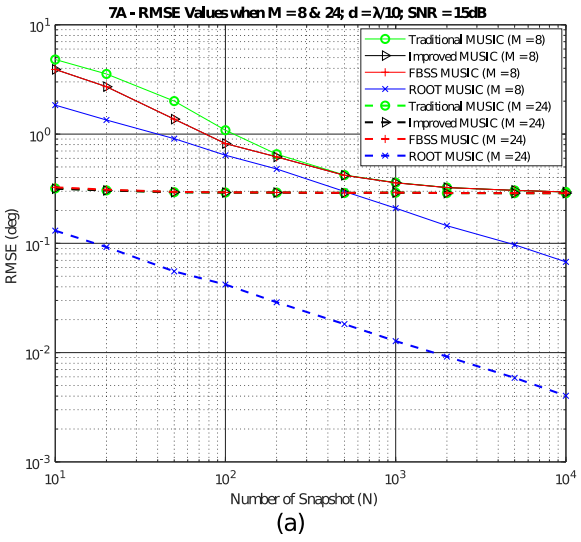
The results of dual non-coherent source direction of arrival estimation include 'RMSE-Number of Snapshot' and 'RMSE-SNR' graphs obtained via the Monte Carlo method. For each iteration of each scenario, the direction of arrival of first source is randomly generated between $-\mathbf{80}^\circ$ and $\mathbf{80}^\circ$. The angle of the second source is plus/minus $\mathbf{20}^\circ$ of first source. The angles of the generated signals are not integers, and calculations are performed up to the fourth decimal place. Besides, the noise is assumed to be Additive White Gaussian noise for all these experiments. The simulation parameters are provided in Table 7.

Table 7. Simulation parameters for dual non-coherent sources experiments (Çift kaynak eşfazlı olmayan sinyallerle yapilan deneyler için simülasyon parametreleri)

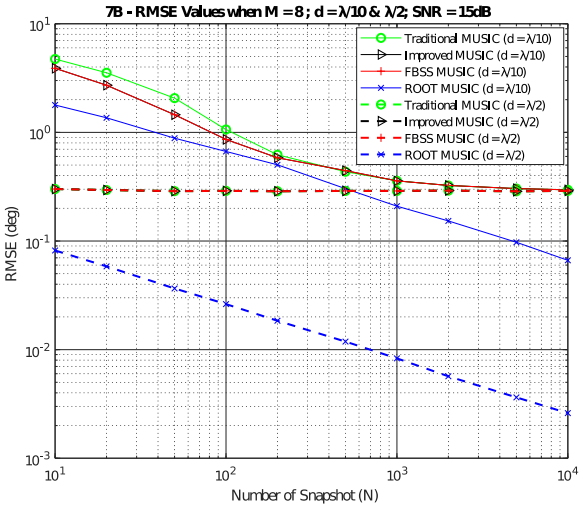
Parameters	Values
Number of sources (non-coherent)	2
Number of sources (coherent)	0
Direction of arrival (azimuth)	Randomly between -80° and 80°. (e.g., $-73{,}6139^\circ, -53{,}6139^\circ$))
Direction of arrival (elevation)	Fixed at 90,0000°
Noise type	Gaussian

Based on these simulations, it can be observed that an increase in number of snapshots (N) and an increase in SNR reduce the RMSE for all algorithms. In all graphs of Figure 7 and Figure 8; Traditional MUSIC, FBSS MUSIC, and Improved MUSIC algorithms provide nearly identical results. The ROOT MUSIC algorithm yields the best results among the algorithms. As can be seen in Figure 7(b), as expected, lower RMSE values are obtained with a half-wavelength ($\lambda/2$) antenna spacing (d) compared to a one-tenth wavelength ($\lambda/10$) antenna spacing. Besides, using more array elements (M) or higher SNR levels results in lower RMSE values as can be seen in Figure 7(a) and Figure 7(c), as expected.

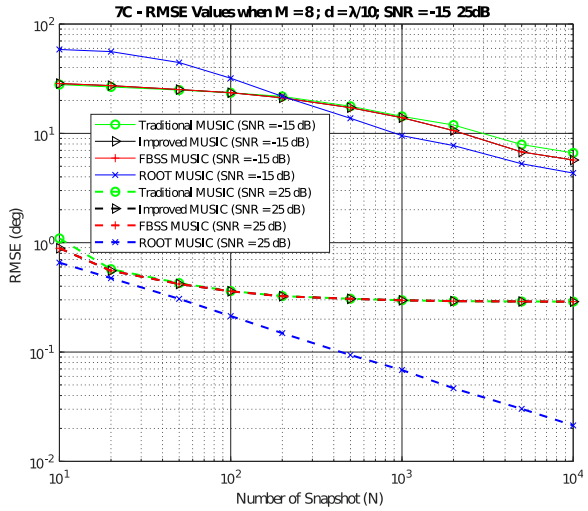
As can be seen in Figure 8(b), as expected, lower RMSE values are obtained with a half-wavelength ($\lambda/2$) antenna spacing (d) compared to a one-tenth wavelength ($\lambda/10$) antenna spacing. Besides, using more array elements (M) or using more snapshots (N) results in lower RMSE values as can be seen in Figure 8(a) and Figure 8(c), as expected.



(a)

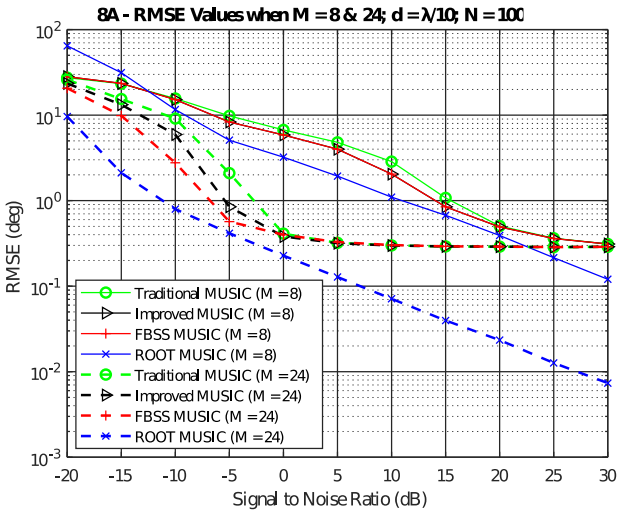


(b)

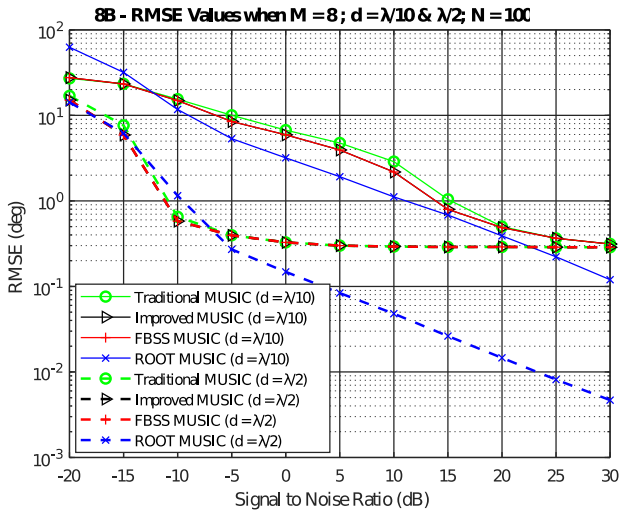


(c)

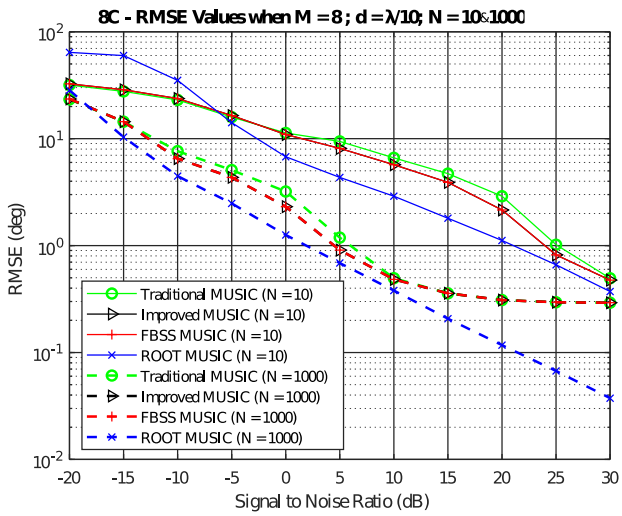
Figure 7. RMSE vs. number of snapshoot ($\boldsymbol{N}$) graphs for a) 2 different number of array elements ($\boldsymbol{M}$), b) 2 different spacing between array elements ($\boldsymbol{d}$), c) 2 different SNR levels (a) 2 farklı dizi elemanı sayısı (M), b) dizi elemanları arasında 2 farklı uzunluk (d), c) 2 farklı SNR seviyesi için RMSE ve anlık örnek sayısı (N) grafikleri)



(a)



(b)



(c)

Figure 8. RMSE vs. SNR graphs for a) 2 different number of array elements ($\boldsymbol{M}$), b) 2 different spacing between array elements ($\boldsymbol{d}$), c) 2 different number of snapshot ($\boldsymbol{N}$) (a) 2 farklı sayıda dizi elemanı (M), b) dizi elemanları arasında 2 farklı uzunluk (d), c) 2 farklı sayıda anlık örnek (N) için RMSE ve SNR grafikleri)

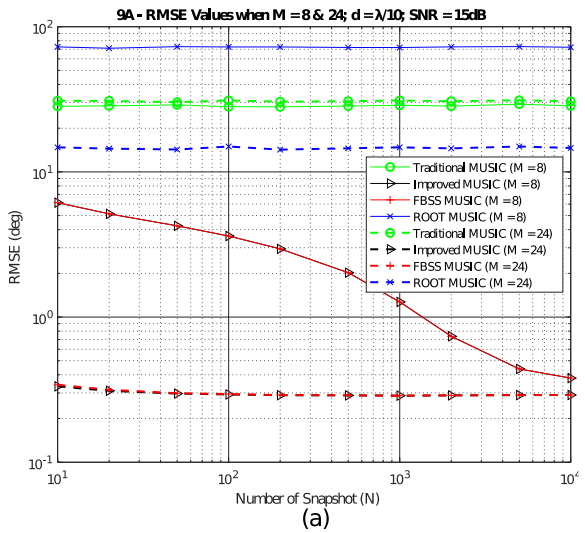
4.3. Dual Source Coherent Incident Signal
(Çift Kaynaktan Gelen Eşfazlı Sinyaller)

The results of dual coherent source direction of arrival estimation include 'RMSE-Number of Snapshot' and 'RMSE-SNR' graphs obtained via the Monte Carlo method. For each iteration of each scenario, the direction of arrival of first source is randomly generated between $-\mathbf{80}^\circ$ and $\mathbf{80}^\circ$. The angle of the second (coherent) source is plus/minus $\mathbf{20}^\circ$of first source. The angles of the generated signals are not integers, and calculations are performed up to the fourth decimal place. Besides, the noise is assumed to be Additive White Gaussian noise for all these experiments. The simulation parameters are provided in Table 8.

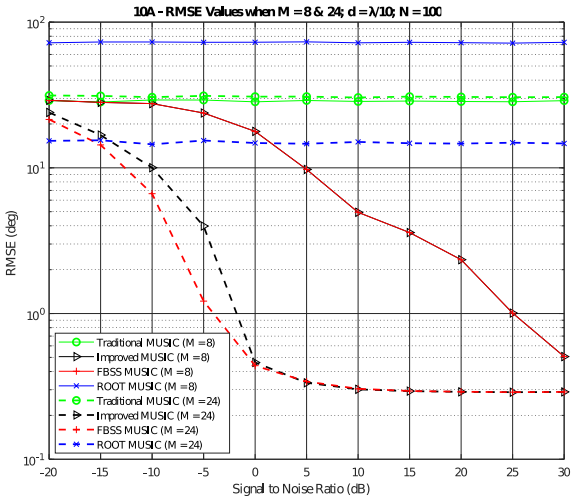
Table 8. Simulation parameters for dual coherent sources experiments (Çift kaynak eşfazlı sinyallerle yapilan deneyler için simülasyon parametreleri)

Parameters	Values
Number of sources (non-coherent)	1
Number of sources (coherent)	1
Direction of arrival (azimuth)	Randomly between -80° and 80°. (e.g., $-73{,}6139^\circ, -53{,}6139^\circ$)
Direction of arrival (elevation)	Fixed at $90{,}0000^\circ$
Noise type	Gaussian

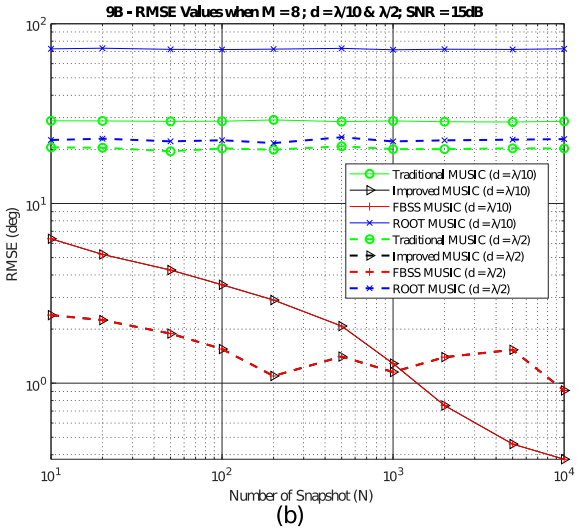
It can be observed that Traditional MUSIC and ROOT MUSIC algorithms cannot work for all SNR and Number of Snapshot values as expected because of the coherent signal. Besides, it is seen that an increase in number of snapshots (N) and an increase in SNR reduce the RMSE for FBSS MUSIC and Improved/Modified MUSIC algorithms. In all graphs of Figure 9 and Figure 10 FBSS MUSIC, and Improved MUSIC algorithms provide nearly identical results. As can be seen in Figure 9(b), as expected, lower RMSE values are obtained with a half-wavelength ($\boldsymbol{\lambda/2}$) antenna spacing ($\boldsymbol{d}$) compared to a one-tenth wavelength ($\boldsymbol{\lambda/10}$) antenna spacing. Besides, using more array elements ($\boldsymbol{M}$) or higher SNR levels results in lower RMSE values for FBSS MUSIC and Improved/Modified MUSIC algorithms as can be seen in Figure 9(a) and Figure 9(c), as expected. In Figure 10(b), as expected for FBSS MUSIC and Improved/Modified MUSIC algorithms, lower RMSE values are obtained with a half-wavelength ($\boldsymbol{\lambda/2}$) antenna spacing ($\boldsymbol{d}$) compared to a one-tenth wavelength ($\boldsymbol{\lambda/10}$) antenna spacing. Besides, using more array elements ($\boldsymbol{M}$) or using more snapshots ($\boldsymbol{N}$) results in lower RMSE values as can be seen in Figure 10(a) and Figure 10(c), as expected.



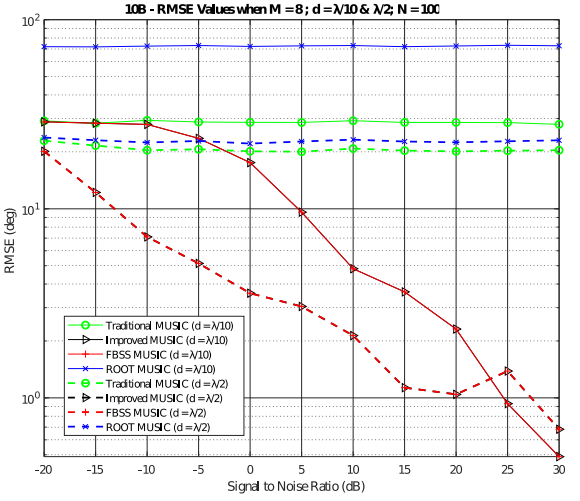
(a)



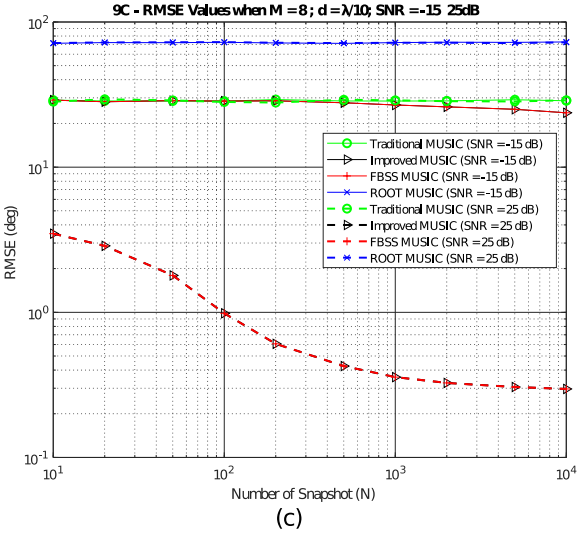
(a)



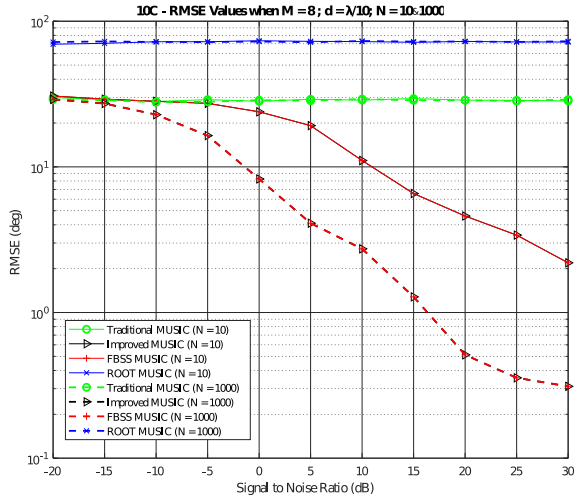
(b)



(b)



(c)



(c)

Figure 9. RMSE vs. number of snapshoot (*N*) graphs for a) 2 different number of array elements (*M*), b) 2 different spacing between array elements (*d*), c) 2 different SNR levels (a) 2 farklı dizi elemanı sayısı (*M*), b) dizi elemanları arasında 2 farklı uzunluk (*d*), c) 2 farklı SNR seviyesi için RMSE ve anlık örnek sayısı (*N*) grafikleri)

Figure 10. RMSE vs. SNR graphs for a) 2 different number of array elements (*M*), b) 2 different spacing between array elements (*d*), c) 2 different number of snapshot (*N*) (a) 2 farklı sayıda dizi elemanı (*M*), b) dizi elemanları arasında 2 farklı uzunluk (*d*), c) 2 farklı sayıda anlık örnek (*N*) için RMSE ve SNR grafikleri)

4.4. Duration of the Algorithms (Algoritma Süreleri)

As can be seen from the Figure 11, the ROOT MUSIC algorithm is the fastest-performing algorithm. The second fastest algorithm is FBSS MUSIC. Improved MUSIC and Traditional MUSIC algorithms are the slowest-performing algorithms, and they have nearly identical execution times.

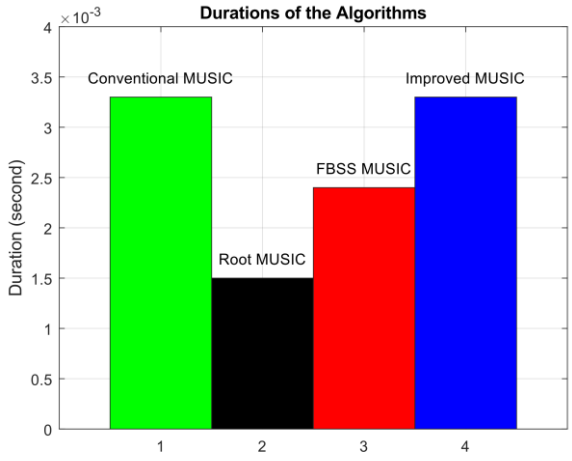


Figure 11. Durations of all MUSIC algorithms (Tüm MUSIC algoritmalarının süreleri)

5. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK (SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR)

This paper has provided a comprehensive investigation of various Multiple Signal Classification (MUSIC) algorithms for Direction of Arrival (DoA) estimation, including Traditional MUSIC, Root MUSIC, Forward/Backward Spatial Smoothing (FBSS) MUSIC, and Improved/Modified MUSIC. By elucidating the underlying principles of each algorithm and examining the factors that influence their performance—such as the number of array elements, antenna spacing, number of snapshots, Signal-to-Noise Ratio (SNR), and scanning angle resolution—this study has highlighted the critical parameters that impact the accuracy and efficiency of DoA estimation. Through extensive MATLAB simulations utilizing the Monte Carlo method, the performance of these algorithms was evaluated and compared under scenarios involving coherent, non-coherent, and single/dual-source(s) incident signals. The Root Mean Square Error (RMSE) was employed as a metric to quantify estimation accuracy, while computational efficiency was assessed through comparisons of execution times and variances.

The results demonstrate that each MUSIC variant has distinct strengths and limitations, making them suitable for different practical applications. Traditional MUSIC serves as a robust baseline, while Root MUSIC offers improved computational efficiency and accuracy for uniform linear arrays. FBSS MUSIC effectively addresses the challenges posed by coherent signals, and Improved/Modified MUSIC provides enhanced performance in complex environments through advanced preprocessing and noise reduction techniques. These findings offer valuable guidance for selecting the most appropriate MUSIC algorithm based on specific application requirements, such as array configuration, signal environment, and computational constraints.

Future research could explore the multiple sources, including multiple coherent and non-coherent signals with different amplitudes from different angles. Besides, the integration of these algorithms with emerging technologies, such as deep learning or compressed sensing, to further enhance their performance in challenging scenarios can be a new area of exploration. Additionally, the development of hybrid approaches that combine the strengths of multiple MUSIC variants could provide a pathway for achieving even greater accuracy and efficiency in DoA estimation tasks. Overall, this study contributes to the ongoing advancement of array signal processing by providing a detailed analysis of MUSIC algorithms and their practical implications for real-world applications.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***Emrah ONAT*:** He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

CODE (KOD)

www.github.com/emrahonat/MUSICs

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] S. Bicakcı, and S. A. Sis, "Rf Uygulamalarda Genel Amaçlı Tınlama Frekansı Takip Edici Sistem Tasarımı, " *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, vol. 5, no. 2, pp. 211-221, 2017.

[2] H. Dilmen, and M. F. Talu, "Yapisal Özellikleri Kullanan Parcacik Filtresi ile Uzun Sureli Nesne Takibi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, vol. 5, no. 1, pp. 107-118, 2017.

[3] H. Krim and M. Viberg, "Two decades of array signal processing research: the parametric approach," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 67-94, July 1996, doi: 10.1109/79.526899.

[4] E. Nurbaş, E. Onat, and T. E. Tuncer, "Collaborative Direction of Arrival estimation by using Alternating Direction Method of Multipliers in distributed sensor array networks employing Sparse Bayesian Learning framework", *Digital Signal Processing*, vol. 130, p. 103739, 2022.

[5] B. Porat and B. Friedlander, "Direction finding algorithms based on high-order statistics," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 39, no. 9, pp. 2016-2024, Sept. 1991, doi: 10.1109/78.134434.

[6] P. Chevalier, A. Ferreol and L. Albera, "High-Resolution Direction Finding From Higher Order Statistics: The2rmq-MUSIC Algorithm," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 54, no. 8, pp. 2986-2997, Aug. 2006, doi: 10.1109/TSP.2006.877661.

[7] F. A. Uçkun, H. Özer, E. Nurbaş and E. Onat, "Direction Finding Using Convolutional Neural Networks and Convolutional Recurrent Neural Networks," *2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Gaziantep, Turkey, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIU49456.2020.9302448.

[8] W. Zhu and M. Zhang, "A Deep Learning Architecture for Broadband DOA Estimation," *2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, Xi'an, China, 2019, pp. 244-247, doi: 10.1109/ICCT46805.2019.8947053.

[9] A. M. Elbir, "DeepMUSIC: Multiple Signal Classification via Deep Learning," in *IEEE Sensors Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 1-4, April 2020, Art no. 7001004, doi: 10.1109/LSENS.2020.2980384.

[10] E. Nurbaş and E. Onat, "Direction of Arrival Estimation by Using Deep Autoencoder Network," *2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Gaziantep, Turkey, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIU49456.2020.9302422.

[11] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, March 1986, doi: 10.1109/TAP.1986.1143830.

[12] A. Barabell, "Improving the resolution performance of eigenstructure-based direction-finding algorithms," ICASSP '83. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Boston, MA, USA, 1983, pp. 336-339, doi: 10.1109/ICASSP.1983.1172124.

[13] A. Paulraj, et al., "Performance analysis of the music algorithm with spatial smoothing in the presence of coherent sources," in: *MILCOM 1986 -IEEE Military Communications Conference: Communications-Computers: Teamed for the 90's*, vol.3, 1986, pp.41.5.1–41.5.5.

[14] Pillai, S. U., Kwon, B., H., "Forward/Backward Spatial Smoothing Techniques for Coherent Signal Identification," *IEEE Trans. On Acoustics, Speech and Signal Processing*, DOI: 10.1109/29.17496, Vol. 37, No. 1, 1989.

[15] D. Kundu, 'Modified MUSIC algorithm for estimating DOA of signals', *Signal Processing*, vol. 48, no. 1, pp. 85–90, 1996. doi:10.1016/0165-1684(95)00126-3.

[16] Xinying Li, Guiqin Yang and Yaoke Gu, "Simulation analysis of MUSIC algorithm of array signal proccessing DOA," *International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI 2012)*, Xiamen, 2012, pp. 1838-1841, doi: 10.1049/cp.2012.1349.

[17] M. Mahamed, N. Sheikh and D. Dikarov, "Direction of Arrival (DOA) Estimation for Radars in Near-Field Regions," *2024 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas, Biomedical Engineering and Electronic Systems (COMCAS)*, Tel Aviv, Israel, 2024, pp. 1-5, doi:10.1109/COMCAS58210.2024.10666232.

[18] X. Zhou, F. Zhu, Y. Jiang, X. Zhou, W. Tan and M. Huang, "The Simulation Analysis of DOA Estimation Based on MUSIC Algorithm," *2020 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE*), Harbin, China, 2020, pp. 1483-1486, doi: 10.1109/ICMCCE51767.2020.00325.

[19] A. Dell'Aversano, A. Natale, A. Cuccaro and R. Solimene, "Linear Array Antenna

Diagnostics Through a MUSIC Algorithm," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 176952-176959, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2956680.

[20] Hwang, H. K., Zekeriya Aliyazicioglu, Marshall Grice and Anatoly Yakovlev. "Direction of Arrival Estimation using a Root-MUSIC Algorithm." *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2008 Vol IIIMECS 2008*, 19-21 March, 2008, Hong Kong

[21] Xinying Li, Guiqin Yang and Yaoke Gu, "Simulation analysis of MUSIC algorithm of array signal proccessing DOA," *International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI 2012)*, Xiamen, 2012, pp. 1838-1841, doi: 10.1049/cp.2012.1349.

[22] P. Wang, G. -j. Zhang, J. -j. Xiong, C. -y. Xue and W. -d. Zhang, "Root-MUSIC Algorithm with Real-Valued Eigendecomposition for Acoustic Vector Sensor Array," *2010 First International Conference on Pervasive Computing, Signal Processing and Applications*, Harbin, China, 2010, pp. 652-656, doi: 10.1109/PCSPA.2010.163.

[23] A. Liu, X. Zhang, J. Zhang and Q. Yang, "Enhanced root-MUSIC for coherent signals with multi-resolution composite arrays," *2019 IEEE Radar Conference (RadarConf*), Boston, MA, USA, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/RADAR.2019.8835637.

[24] H. Paaso and M. Hirvonen, "Angular Resolution Improvement by Using Multi-Radar and FBSS MUSIC DoA Estimation Algorithm," *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Paris, France, 2019, pp. 730-735, doi: 10.1109/IVS.2019.8813780.

[25] C. Liu, W. Feng, H. Li and H. Zhu, "Single Snapshot DOA Estimation Based on Spatial Smoothing MUSIC and CNN," *2021 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, Xi'an, China, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICSPCC52875.2021.9564893.

[26] R. Zhagypar, K. Zhagyparova and M. T. Akhtar, "Spatially Smoothed TF-Root-MUSIC for DOA Estimation of Coherent and Non-Stationary Sources Under Noisy Conditions," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 95754-95766, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3095345

[27] Y. Wu, Y. Sun, W. Ge and W. Hong, "An improved forward-backward spatial smoothing MUSIC algorithm for coherent signal direction finding," *IET International Radar Conference (IRC 2023)*, Chongqing, China, 2023, pp. 2009-2012, doi: 10.1049/icp.2024.1394.

[28] Pooja Gupta, Vijay Verma, "Optimization of MUSIC and Improved MUSIC Algorithm to Estimate Direction of Arrival", *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing (IJIGSP*), Vol.8, No.12, pp.30-37, 2016. DOI: 10.5815/ijigsp.2016.12.04

[29] Z. Xiaofei, L. Wen, S. Ying, Z. Ruina and X. Dazhuan, "A Novel DOA estimation Algorithm Based on Eigen Space," *2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, Hangzhou, China, 2007, pp. 551-554, doi: 10.1109/MAPE.2007.4393677.

[30] P. Gupta and S. P. Kar, "MUSIC and improved MUSIC algorithm to estimate direction of arrival," *2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)*, Melmaruvathur, India, 2015, pp. 0757-0761, doi: 10.1109/ICCSP.2015.7322593.

[31] Z. Wang, Z. Yang, S. Wu, H. Li, S. Tian and X. Chen, "An Improved Multiple Signal Classification for Nonuniform Sampling in Blade Tip Timing," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 10, pp. 7941-7952, Oct. 2020, doi: 10.1109/TIM.2020.2980912.

[32] Tuncer, T. E., Friedlander, B., "Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation," San Diego, CA, USA: Academic, 2009.

[33] Stoica, P., Moses, R., "Spectral Analysis of Signals," Prentice Hall, 2005.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1137-1156 (2025)

Evaluating AI-Based Energy Management Strategies for Electric Vehicles using SWARA - weighted Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA

Gözde BAKİOĞLU[1*]

[1]*Marmara University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, İstanbul, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 24/04/2025
Revision: 28/07/2025
Accepted: 03/08/2025

Keywords

Energy Management
Electric Vehicles
Artificial Intelligence
Multi-Criteria Decision-Making
Pythagorean Fuzzy Sets

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/04/2025
Düzeltme: 28/07/2025
Kabul: 03/08/2025

Anahtar Kelimeler

Enerji Yönetimi
Elektrikli Araçlar
Yapay Zeka
Çok Kriterli Karar Verme
Pisagor Bulanık Kümeler

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study applies a SWARA–weighted Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA framework to evaluate AI-based energy management strategies for electric vehicles, with the results validated through sensitivity and comparative analyses. / Bu çalışmada, elektrikli araçlar için yapay zekâ tabanlı enerji yönetim stratejilerini değerlendirmek amacıyla SWARA–ağırlıklı Pisagor Bulanık MULTIMOORA yöntemi uygulanmakta ve elde edilen sonuçlar, duyarlılık ve karşılaştırmalı analizler ile doğrulanmaktadır.

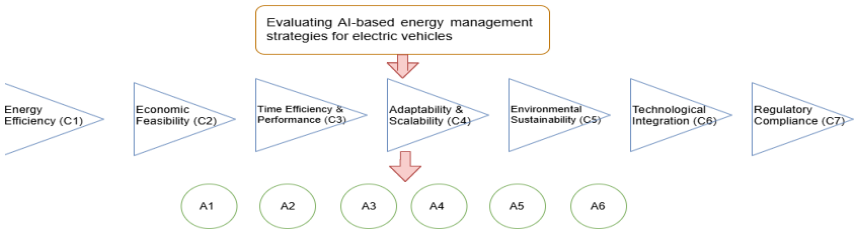


***Figure A**:Hierarchical Structure /**Şekil A:**.Hiyerarşi Yapısı*

Highlights (Önemli noktalar)

- *Development of a SWARA–weighted Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA framework for evaluating AI-based energy management strategies in electric vehicles. / Yapay zekâ tabanlı EV enerji stratejileri için SWARA–ağırlıklı Pisagor Bulanık MULTIMOORA yönteminin geliştirilmesi*
- *Top strategies: Smart Battery Management, Predictive Energy Optimization, AI-Enabled Smart Charging / En iyi stratejiler: Akıllı Batarya Yönetimi, Tahmine Dayalı Enerji Optimizasyonu, Yapay Zekâ Tabanlı Akıllı Şarj*
- *Validation of results through 21-scenario sensitivity analysis and comparative analysis with the Pythagorean Fuzzy TOPSIS method. / Sonuçlar 21 senaryolu duyarlılık analizi ve Pisagor Bulanık TOPSIS kullanılarak yapılan karşılaştırma analizi ile doğrulanmıştır.*

***Aim (Amaç):** The aim of this study is to comprehensively evaluate AI-based energy management strategies for electric vehicles to enhance efficiency, extend battery life, and promote the use of sustainable energy sources. / Bu çalışmanın amacı, elektrikli araçlarda yapay zekâ tabanlı enerji yönetim stratejilerini değerlendirerek verimliliği artırmak, batarya ömrünü uzatmak ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmektir.*

***Originality (Özgünlük):** This study is original in providing a comprehensive framework that prioritizes AI-based energy management strategies for electric vehicles using a structured hybrid method, addressing the gap left by most studies that focus only on isolated aspects without in-depth AI strategy evaluation. / Bu çalışma, yapay zekâ tabanlı enerji yönetimi stratejilerini önceliklendiren yapılandırılmış bir hibrit yöntem sunarak, çoğu çalışmanın yalnızca tekil alanlara odaklanıp AI stratejilerini derinlemesine değerlendirmemesi nedeniyle oluşan boşluğu doldurmaktadır.*

***Results (Bulgular):** Smart Battery Management Systems emerged as the top AI-based energy strategy, followed by Predictive Energy Optimization and AI-Enabled Smart Charging, with 21-scenario sensitivity analysis and PF-TOPSIS comparison confirming the robustness, stability, and reliability of the proposed hybrid framework. / Akıllı Batarya Yönetimi ilk sırada öne çıkarken, Tahmine Dayalı Enerji Optimizasyonu ve Yapay Zekâ Tabanlı Akıllı Şarj ikinci ve üçüncü sırada yer almakta; 21 senaryolu duyarlılık analizi ve PF-TOPSIS karşılaştırması, önerilen hibrit yöntemin sağlamlığını ve güvenilirliğini doğrulamaktadır.*

***Conclusion (Sonuç):** This study provides actionable insights to guide engineering professionals and promote the adoption of sustainable energy solutions. / Bu çalışma, mühendislik profesyonellerine yol gösteren ve sürdürülebilir enerji çözümlerinin benimsenmesini destekleyen uygulanabilir bilgiler sunmaktadır.*

*Corresponding author, e-mail: gozde.bakioglu@marmara.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1566197

GU J Sci, Part C, 13(3): 1137-1156 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Evaluating AI-Based Energy Management Strategies for Electric Vehicles using SWARA - weighted Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA

Gözde BAKİOĞLU[1*]

[1]*Marmara University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, İstanbul, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 24/04/2025
Revision: 28/07/2025
Accepted: 03/08/2025

Keywords

Energy Management
Electric Vehicles
Artificial Intelligence
Multi-Criteria Decision-Making
Pythagorean Fuzzy Sets

Abstract

The growing adoption of electric vehicles (EVs) has formed a pressing need for intelligent energy management systems to extend battery life, improve efficiency and encourage the use of sustainable energy sources. As the complexity of energy optimization increases, the integration of artificial intelligence (AI) has become essential for enabling real-time decision-making and adaptive control. However, a significant gap remains in the literature regarding the comprehensive evaluation and prioritization of AI-based energy management strategies for EVs. This study addresses this gap by developing a multi-criteria decision-making (MCDM) framework that combines the Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) method to determine the importance of evaluation criteria with the Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA method to rank alternative strategies. The results show that Smart Battery Management Systems is the most critical strategy, followed by Predictive Energy Optimization and AI-Enabled Smart Charging and Grid Integration. A sensitivity analysis involving 21 weight variation scenarios confirms the robustness and stability of the suggested model. The findings offer practical insights for policymakers and professionals in engineering and present a flexible methodological framework that can be applied to other complex decision-making problems in sustainable energy and transportation systems.

Elektrikli Araçlar için Yapay Zekâ Tabanlı Enerji Yönetim Stratejilerinin SWARA Ağırlıklı Pisagor Bulanık MULTIMOORA Yöntemi ile Değerlendirilmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/04/2025
Düzeltme: 28/07/2025
Kabul: 03/08/2025

Anahtar Kelimeler

Enerji Yönetimi
Elektrikli Araçlar
Yapay Zeka
Çok Kriterli Karar Verme
Pisagor Bulanık Kümeler

Öz

Elektrikli araçların yaygınlaşması, verimliliği artırmak, batarya ömrünü uzatmak ve yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre etmek amacıyla akıllı enerji yönetim sistemlerine olan ihtiyacı artırmıştır. Artan karmaşıklık karşısında, yapay zekâ entegrasyonu gerçek zamanlı karar verme ve uyarlanabilir kontrol açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak literatürde, elektrikli araçlar için yapay zekâ tabanlı enerji yönetim stratejilerinin kapsamlı şekilde değerlendirilmesine yönelik sınırlı çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, değerlendirme kriterlerinin önemini belirlemek için SWARA, stratejileri önceliklendirmek için Pisagor Bulanık MULTIMOORA yöntemlerinin entegre edildiği çok kriterli karar verme tabanlı bir model geliştirilmiştir. Bulgulara göre, "Akıllı Batarya Yönetim Sistemleri" en öncelikli strateji olarak belirlenmiş, ardından "Tahmine Dayalı Enerji Optimizasyonu" ve "Yapay Zekâ Tabanlı Akıllı Şarj ve Şebeke Entegrasyonu" gelmiştir. Yirmi bir senaryoda yapılan duyarlılık analizi, modelin sağlamlığını ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, politika yapıcılar ve mühendislik uzmanları için stratejik karar alma süreçlerinde yol gösterici niteliktedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The transportation sector remains one of the largest consumers of energy globally, with a significant portion of this demand being met by fossil fuels such as natural gas, oil, coal. This substantial fossil fuel dependence is a major contributor to greenhouse gas emissions, air pollution, and the acceleration of climate change. The growing scarcity of fossil fuels has led to increased energy costs and raised concerns about long-term economic stability, particularly for nations heavily dependent on energy imports [1]. In response to these challenges, the global focus has shifted toward cleaner, more energy-efficient alternatives, with

*Corresponding author, e-mail: gozde.bakioglu@marmara.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1566197

electric vehicles (EVs) emerging as a key solution. By decreasing the release of carbon and making possible to include sources of clean energy, EVs play a vital role in reshaping the future of transportation toward greater sustainability and energy independence.

According to recent data from Eurostat (2025) [2], the transportation industry accounted for 31.0% of the EU's ultimate energy usage in 2022, highlighting its significant role in overall energy demand. Within this sector, road transport alone consumed 73.6% of the total energy used, with the vast majority—90.6%—originating from fossil fuels such as motor oil with gasoline or diesel. As shown in Figure 1, the dominance of gas/diesel oil has steadily increased since 1990, overtaking motor gasoline as the primary energy source in road transport. Although electricity usage remains marginal at just 0.3% in 2022, it has seen a noticeable upward trend, increasing more than six-fold between 2018 and 2022. This modest but promising growth indicates a gradual shift toward electrification in transport. Simultaneously, electricity prices across the EU have shown mixed trends—with some countries like Ireland experiencing steep increases, while others, such as the Netherlands, have seen notable reductions. For non-household consumers, the average electricity price dropped by 13% in the first half of 2024 compared to the same period in 2023, signaling improved conditions for commercial and industrial electric vehicle usage [3].

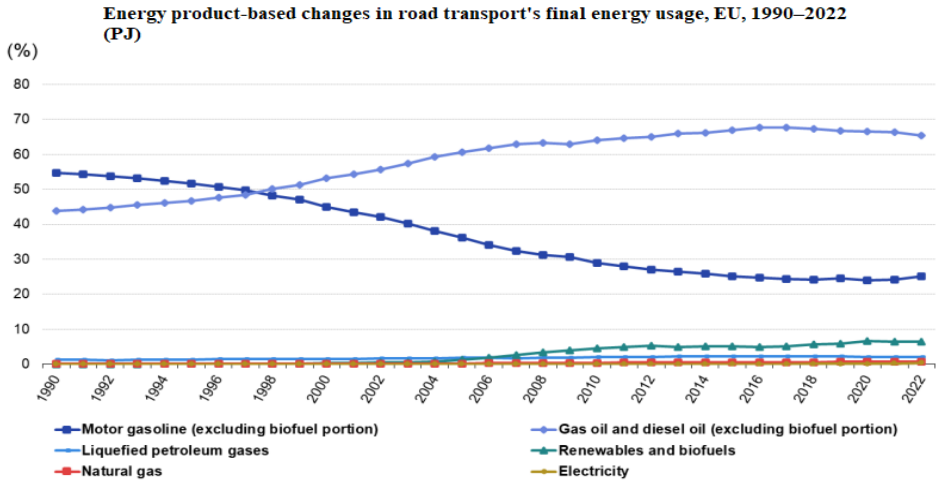


Figure 1. Energy product-based changes in road transport's final energy usage, EU, 1990–2022 (PJ)
(Karayolu taşımacılığında nihai enerji kullanımındaki enerji ürününe dayalı değişimler, AB, 1990–2022 (PJ)) [4]

These statistics clearly demonstrate the urgent need to accelerate the transition toward electric vehicles as a means to minimize environmental effects and dependence on fossil fuels. However, the benefits of electrification can only be fully realized through the implementation of intelligent energy management systems. As electricity becomes a more central energy source in transport, optimizing its use through AI-based strategies is essential—not only to ensure energy efficiency and cost-effectiveness, but also to support the stability of the electricity grid. In this context, the development and evaluation of advanced energy management solutions for electric vehicles becomes a critical step toward achieving sustainable, resilient, and future-ready transportation systems.

Recent studies have underscored the increasing significance of intelligent energy management strategies for electric vehicles, particularly with the integration of artificial intelligence. Lin et al. [5] emphasize the advantages of hybrid energy storage systems—such as combinations of batteries and supercapacitors—in addressing key challenges like vehicle autonomy, battery degradation, and performance optimization. In broader energy networks, Shakeel and Malik [6] explore the application of artificial intelligence in energy microgrids, demonstrating its role in improving energy production and demand management when electric vehicles are integrated into distributed systems. Energy management optimization with the use of reinforced learning and machine learning, as discussed by Pardhasaradhi and Shilaja [7], offers potential for real-time control, operational cost reduction, and enhanced system responsiveness. Similarly, Badran and Toha [8] highlights artificial intelligence in battery management systems for monitoring, cell balancing, and state estimation—critical functions for maintaining battery health and extending lifespan.

Additional advancements have expanded the scope of artificial intelligence across other critical areas of

energy management in electric vehicles. Ghalkhani and Habibi [9] investigate its impact on thermal regulation and lithium-ion battery performance, while other studies highlight the role of edge computing in enabling faster, vehicle-level decision-making. Research has also addressed intelligent regenerative braking and the use of harvesting energy mechanically in traffic settings. The transition toward autonomous, connected and shared vehicles has further accelerated the adoption of artificial intelligence in mobility systems. Deep learning, artificial neural networks, and reinforcement learning have been effectively applied in microgrids to optimize energy dispatch and integrate renewable sources. Moreover, genetic optimization algorithms have been developed to manage energy storage in residential solar-powered systems, minimizing costs and increasing self-consumption. Integrated models for forecasting photovoltaic energy and EV charging platforms have also been proposed, aiming to support carbon neutrality and sustainable energy transitions [9].

Given the complexity and multi-dimensional nature of energy management in electric vehicles, evaluating and prioritizing AI-based strategies requires a structured and comprehensive approach. These strategies often involve trade-offs between technical performance, economic feasibility, environmental impact, and integration challenges, making simple decision rules insufficient. In this context, multi-criteria decision-making (MCDM) methods have proven to be highly effective, particularly when used in combination with fuzzy set theory to deal with ambiguity and subjectivity in expert evaluations. The integration of fuzzy logic allows for more realistic modeling of human judgment, which is especially valuable in complex engineering and energy systems. For instance, Alrifaie et al. [10] employed a hybrid Fuzzy Analytical Hierarchical Process and Multi-Attribute Decision-Making approach to support user-centric electric vehicle charging station selection. Similarly, Ghoushchi et al. [11] applied an integrated MCDM model to improve effectiveness in networked self-driving vehicles by incorporating artificial intelligence and IoT-based criteria. Stecyk and Miciuła [12] utilized fuzzy AHP and TOPSIS to evaluate collaborative AI-based platforms for energy optimization, while Imran et al. [13] leveraged fuzzy decision-making techniques to formulate strategies aimed at maximizing electric vehicle utility.

Despite growing interest in electric vehicle technologies and energy optimization, a notable gap exists in the literature concerning the comprehensive identification and evaluation of AI-based energy management strategies specifically for electric vehicles. Most existing studies have focused on isolated aspects, such as selecting optimal charging stations, enhancing the efficiency of autonomous or connected vehicles, or reviewing general energy management systems, without providing an in-depth prioritization of AI-driven strategies. Furthermore, the integration of SWARA-weighted MULTIMOORA methods has not been explored within the electric vehicle industry, particularly in the context of evaluating complex, AI-enabled decision alternatives. This study fills that methodological and thematic gap by introducing a novel framework that combines these decision-making tools with Pythagorean Fuzzy Sets, enabling more accurate and flexible modeling of expert judgment under uncertainty. This integrated approach offers a significant advancement in supporting strategic decision-making for intelligent, sustainable energy management in electric vehicles.

This study aims to bridge the current research gap by establishing a broad evaluation framework for AI-based energy management strategies in electric vehicles. Specifically, the study defines key evaluation criteria and introduces a structured multi-criteria decision-making approach by integrating the Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) and Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis plus Full Multiplicative Form (MULTIMOORA) methods within a Pythagorean Fuzzy set environment. This integrated framework enables a more robust and uncertainty-aware assessment of AI-driven energy strategies. The primary contributions of this research are summarized as follows:

- Conducting a thorough expert consultation and literature review to identify and define the main AI-based energy management strategies relevant to electric vehicles.
- Employing the SWARA method ascertain the proportional significance of evaluation criteria based on expert judgment.
- Implementing the Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA method to rank and prioritize the identified strategies under conditions of uncertainty.
- Performing a sensitivity analysis by systematically altering the weights derived from the SWARA method and recalculating the Ratio System (RS) scores. A total of 21 distinct scenarios are examined to test the robustness of the results.

The findings of this study offer valuable guidance for policy makers and professionals in computer engineering and electrical and electronics fields. For policy makers, the prioritization of AI-based energy management strategies provides a data-driven foundation for shaping supportive policies, investment plans, and infrastructure development aimed at accelerating the transition to sustainable electric mobility. Meanwhile, professionals and researchers in technical fields can benefit from the study's insights to guide the design, development, and implementation of advanced AI algorithms, battery systems, and smart charging technologies—ultimately contributing to more efficient, reliable, and intelligent electric vehicle ecosystems.

2. METHODOLOGY (YÖNTEM)

The evaluation of AI-based energy management strategies for electric vehicles involves multiple, often conflicting factors like cost, flexibility, and energy efficiency, and technological integration. These factors require a multi-criteria decision-making (MCDM) approach to ensure a balanced and systematic assessment. In this research, an integrated methodology combining the SWARA and Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA methods is employed to address the complexity and uncertainty inherent in strategic evaluations. The SWARA method is utilized to specify the relative importance of evaluation criteria based on expert judgments. Its strength lies in its simplicity, efficiency, and reduced number of pairwise comparisons, making it especially suitable for expert-driven weighting processes. On the other hand, the MULTIMOORA method, known for its robustness and stability, offers a comprehensive evaluation framework by incorporating three distinct models—Ratio System, Reference Point, and Full Multiplicative Form—to ensure consistency and reliability in ranking alternatives. By embedding these methods in a Pythagorean fuzzy environment, the approach effectively captures the ambiguity and vagueness present in human assessments, thus enhancing decision quality. For this study, SWARA and Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA were selected because of their capacity to combine mathematical precision with expert knowledge, offering a flexible and reliable framework for ranking AI-based tactics in the electric vehicle industry.

There are three primary phases to the methodology used in this study. In the first stage, a comprehensive set of evaluation criteria and AI-based energy management strategies for electric vehicles is identified through an extensive literature review and expert consultation. These components are then organized into a hierarchical decision framework. In the second stage, a hybrid multi-criteria decision-making (MCDM) approach is applied. The Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) method is used to determine the relative importance (weights) of each criterion based on expert evaluations. These weights are then utilized in the single-valued Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA method, which evaluates and ranks the identified strategies by incorporating the Ratio System, Reference Point, and Full Multiplicative Form models to ensure a robust and comprehensive prioritization. In the third stage, a sensitivity analysis is conducted to test the robustness of the model. This is achieved by systematically altering the criterion weights derived from the SWARA method and recalculating the Ratio System scores across 21 distinct scenarios. The results highlight the ranking stability of top-performing strategies and provide insight into how changes in evaluation perspectives affect the overall decision. The schematic figure shown in Figure 2 depicts the specific procedures and integration of the suggested methodology.

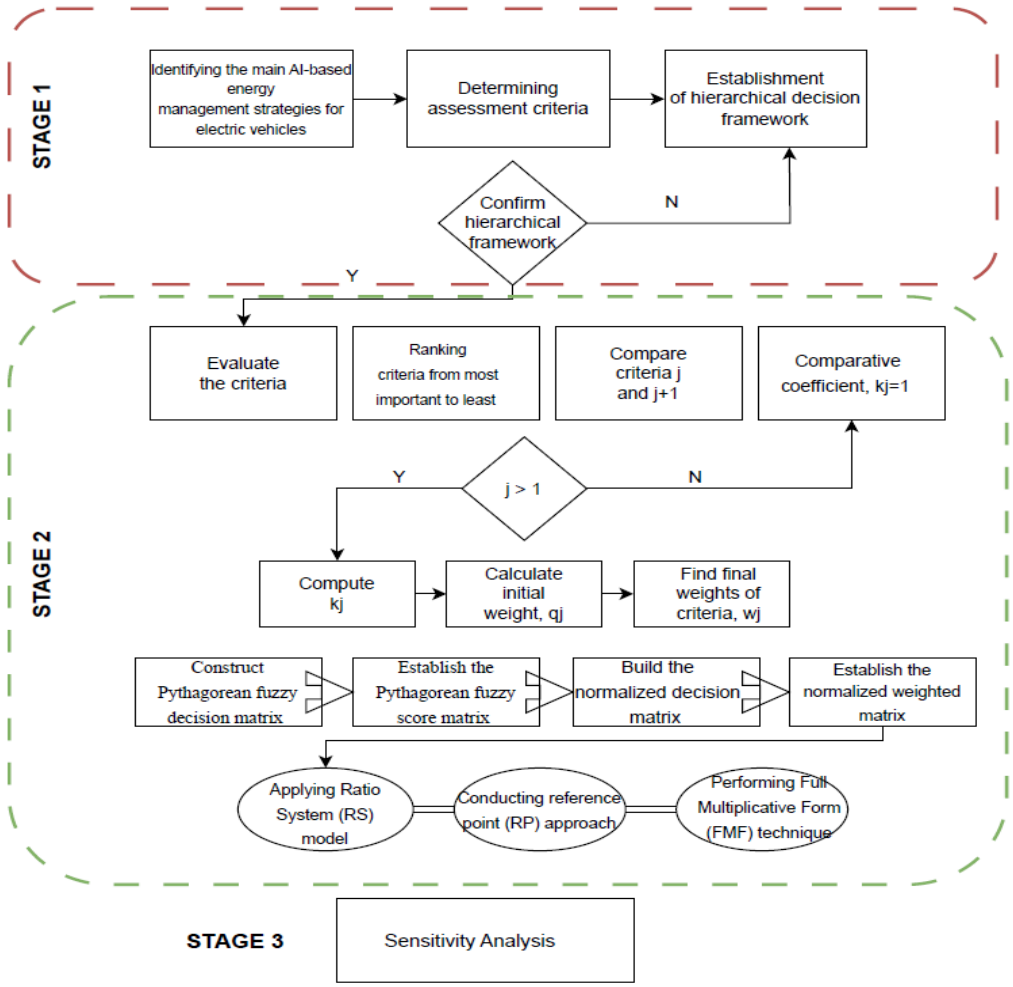


Figure 2. Schematic diagram of methodology (Yöntemin şematik gösterimi)

2.1. Pythagorean Fuzzy Sets (Pisagor Bulanık Kümeler)

Decision-makers evaluating energy management strategies face various uncertainties and subjective judgments, making the analysis of such problems more complex. To handle uncertain information and derive specific outcomes, Zadeh [14] introduced fuzzy set theory and linguistic variables. Recent studies in the literature have expanded on these concepts by incorporating extended fuzzy sets, such as Pythagorean fuzzy sets and intuitionistic fuzzy sets, to more accurately reflect the ambiguity in decision-makers' perspective.

Developed by Atanassov, intuitionistic fuzzy sets (IFSs) incorporate membership, non-membership, and hesitation degrees, with the constraint that degrees of membership and non-membership added together cannot be greater than one. However, since IFSs sometimes fail to adequately model complex uncertainty in practical applications, generalized fuzzy sets such as Pythagorean fuzzy sets (PFSs) have been introduced [15]. The total of the membership and non-membership degrees in PFSs may be greater than one, but the sum of their squares cannot. A geometric comparison between the Pythagorean fuzzy set space and the intuitionistic fuzzy set space reveals that the latter has a wider coverage. As a result, Pythagorean fuzzy sets are more effective in representing uncertainty and imprecision than intuitionistic fuzzy sets.

Definition 1: Let x be an element of the universal set X. A Pythagorean fuzzy set $\tilde{P}$ in X is defined as follows [15]:

$$\tilde{P} = \{\langle x, P(\mu_P(x), v_P(x))\rangle | x \in X\} \quad (1)$$

where $\mu_P(x) \in [0,1]$ represents the membership degree, and $v_P(x) \in [0,1]$ denotes the non-membership degree. These membership degrees must satisfy the following condition, given in Equation (2):

$$0 \leq (\mu_P(x))^2 + (v_P(x))^2 \leq 1. \quad (2)$$

The hesitation degree of a Pythagorean fuzzy number in $\tilde{P}$ is identified in Equation (3) as follows:

$$\pi_P(x) = \sqrt{1 - \left(\mu_P(x)\right)^2 - \left(v_P(x)\right)^2} \quad (3)$$

Definition 2: Let $\tilde{P}_1 = P\left(\mu_{P_1}, v_{P_1}\right)$ and $\tilde{P}_2 = P\left(\mu_{P_2}, v_{P_2}\right)$ be two Pythagorean fuzzy numbers, and let λ be a positive number. The fundamental operations in Pythagorean fuzzy sets are shown below:

$$\tilde{P}_1 \otimes \tilde{P}_2 = \mathrm{P}\left(\mu_{P_1}\mu_{P_2}, \sqrt{\left(v_{P_1}\right)^2 + \left(v_{P_2}\right)^2 - \left(v_{P_1}\right)^2\left(v_{P_2}\right)^2}\right) \quad (4)$$

$$\lambda\tilde{P}_1 = \left(\sqrt{1 - (1 - \left(\mu_{P_1}\right)^2)^{\lambda}}, (v_{P_1})^{\lambda}\right), \quad \lambda > 0, \quad (5)$$

$$\left(\tilde{P}_1\right)^{\lambda} = \left((\mu_{P_1})^{\lambda}, \sqrt{1 - (1 - \left(v_{P_1}\right)^2)^{\lambda}}\right), \quad \lambda > 0. \quad (6)$$

$$\tilde{P}_1 \,\Theta\, \tilde{P}_2 = \left(\sqrt{\frac{\mu_1^2 - \mu_2^2}{1 - \mu_2^2}}, \frac{v_1}{v_2}\right) \quad \text{if } \mu_{P_1} \geq \mu_{P_2},\ v_{P_1} \leq \min\left\{v_{P_2}, \frac{v_{P_2}\pi_{P_1}}{\pi_{P_2}}\right\} \quad (7)$$

$$\frac{\tilde{P}_1}{\tilde{P}_2} = \left(\frac{\mu_1}{\mu_2}, \sqrt{\frac{v_1^2 - v_2^2}{1 - v_2^2}}\right) \quad \text{if } \mu_{P_1} \leq \min\left\{\mu_{P_2}, \frac{\mu_{P_2}\pi_{P_1}}{\pi_{P_2}}\right\},\ v_{P_1} \geq v_{P_2} \quad (8)$$

Definition 3: Let $\tilde{P}_i = P(\mu_i, v_i),\ i = (1,2,\ldots,n)$ be a group of Pythagorean fuzzy sets. The Pythagorean fuzzy weighted averaging (PFWA) formula, given in Equation (9), is used to aggregate this set.

$$\mathrm{PFWA}\left(\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \ldots . \tilde{P}_n\right) = \left(\left(1 - \prod_{i=1}^{n}\left(1 - \mu_i^2\right)^{w_i}\right)^{1/2}, \left(\prod_{i=1}^{n}(v_i)^{w_i}\right)\right) \quad (9)$$

where w_i = (w_1, w_2, …,w_n) be the weight vector of $\tilde{P}_i,\ i = (1,2,\ldots,n)$ with $w_i \in [0, 1]$ and $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$.

Definition 4: Let $\tilde{P}_1 = P\left(\mu_{P_1}, v_{P_1}\right)$ and $\tilde{P}_2 = P\left(\mu_{P_2}, v_{P_2}\right)$ be two Pythagorean fuzzy numbers. To compare and rank these two numbers, score functions are used. The formula for the score function is shown in Equation (10):

$$s(\tilde{P}_1) = \left(\mu_{P_1}\right)^2 - \left(v_{P_1}\right)^2. \quad (10)$$

2.2. SWARA Method (SWARA Yöntemi)

The Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) method was introduced by Kersuliene et al. [16] to determine subjective criterion weights. One key advantage of SWARA is its simplicity, as it involves fewer computational steps and requires a minimal number of pairwise comparisons compared to other weighting techniques like Analytic Hierarchy Process (AHP). Another strength of SWARA lies in its reliance on decision-makers' judgments, where initial prioritization and relative importance are established based on expert opinions. The following are the steps involved in the SWARA method's process:

Step 1: Identify alternatives $(i = 1,2,\ldots,m)$ and criteria $(j = 1,2,\ldots,n)$.

Step 2: Experts' preferences are used to rank the criteria from most to least important.

Step 3: Criteria are compared with each other to determine their relative importance levels. The (j)th criterion is compared to the (j-1)th criterion, and a value (S_j) is assigned within the 0-1 range.

Step 4: Compute the proportional significance of every criterion (S_j) by comparing it with the previous criterion, and calculate the comparative coefficient (k_j) using Equation (11).

$$k_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ S_j + 1, & j > 1 \end{cases} \quad (11)$$

Step 5: The initial weight for every factors (q_j) is determined utilizing the Equation (12).

$$q_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ \frac{q_{j-1}}{k_j}, & j > 1 \end{cases} \quad (12)$$

Step 6: Final criterion weight (ω_i) is computed with Equation (13).

$$\omega_i = \frac{q_j}{\sum_{j=1}^{n} q_j} \quad (13)$$

2.3. Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA (Pisagor Bulanık MULTIMOORA)

In this study, the MULTIMOORA (Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis plus Full Multiplicative Form) method is employed to evaluate and rank AI-based energy management strategies for electric vehicles. Initially, Brauers and Zavadskas [17] introduced as an enhancement of the MOORA method, MULTIMOORA combines

three distinct approaches—Ratio System (RS), Reference Point (RP), and Full Multiplicative Form (FMF)—to improve the robustness and accuracy of multi-criteria decision-making (MCDM). This integrated framework is recognized for its ability to address conflicting objectives, handle a wide range of criteria, and provide consistent evaluations even in complex decision environments. To further strengthen its capacity to cope with vagueness and imprecise expert judgments often encountered in real-world evaluations, the method is extended using Pythagorean Fuzzy Sets, resulting in the Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA (PF-MULTIMOORA) approach. This extension enhances the model's ability to represent uncertainty more flexibly, thereby offering a more reliable and realistic framework for prioritizing energy management strategies in electric vehicle systems. The steps of PF-MULTIMOORA are as follows:

Step 1: Construct Pythagorean fuzzy decision matrix $D = \left(C_j(x_i)\right)_{m\times n}$ using Equation (14), where $C_j(j = 1,2,\dots,n)$ and $x_i(i = 1,2,\dots,m)$ be the criteria and alternatives respectively.

$$D = \left(C_j(x_i)\right)_{m\times n} = \begin{matrix} \\ x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{matrix} \begin{matrix} \begin{matrix} C_1 & \cdots & C_n \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & \cdots & P_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (14)$$

Step 2: Combine the Pythagorean fuzzy decision matrix by applying the Pythagorean Fuzzy Weighted Averaging (PFWA) method, as outlined in Equation (9).

Step 3: Construct the Pythagorean fuzzy score matrix S = $\left(X_{ij}\right)_{m\times n}$ using Equation (10).

Step 4: Build the normalized decision matrix N = $\left(n_{ij}\right)_{m\times n}$, where the normalization is performed using Equation (15). In this step, $X_{ij}{}^{+}$ and $X_{ij}{}^{-}$ represent the maximum and minimum values of each criterion across all alternatives, respectively.

$$n_{ij} = \begin{cases} \frac{X_{ij}-X_{ij}{}^{-}}{X_{ij}{}^{+}-X_{ij}{}^{-}} & if\ j \in C_b, \\ \frac{X_{ij}{}^{+}-X_{ij}}{X_{ij}{}^{+}-X_{ij}{}^{-}} & if j \in C_c \end{cases} \quad (15)$$

where C_b and C_c show the benefit criteria and cost criteria.

Step 5: Establish the normalized weighted matrix using Equation (16):

$$n_{ij}^{\cdot} = n_{ij} \times \omega_j \quad (16)$$

Step 6: Determine the ranking of the alternatives using the Ratio System (RS) model. In the MULTIMOORA method, the RS model is applied to establish the relative priority of each alternative and identify the most appropriate option. The scores for the alternatives within the ratio system framework are computed using Equation (17):

$$y_i = y_i^{+} - y_i^{-} = \sum_{j=1}^{g} n_{ij}^{\cdot} - \sum_{j=g+1}^{n} n_{ij}^{\cdot} \quad (17)$$

In this case, y_i is the normalized value of the *i-th* choice across all criteria, g is the number of criteria to be maximized, and n is the number of criteria to be minimized. The optimal option is the one with the highest rating after the y_i values are arranged in descending order.

Step 7: Assess the alternatives using the reference point (RP) approach. The Tchebycheff Min-Max metric is computed using Equation (18).

$$D_i = \min_{(i)} \left\{ \max_j \left| n_j - n_{ij}^{\cdot} \right| \right\} \quad (18)$$

The reference point (n_j) for each criterion is chosen from the greatest values of the alternatives in the case of maximizing and the lowest values in the case of minimization. For every option, the greatest value (D_i) is computed. Next, the options are arranged in ascending order of preference.

Step 8: Determine the ranking of the alternatives by applying the Full Multiplicative Form (FMF) technique. The overall utility score for each alternative is calculated using Equation (19):

$$U_i = \prod_{j=1}^{g} n_{ij}^{\cdot} \,/\, \prod_{j=g+1}^{n} n_{ij}^{\cdot} \quad (19)$$

In this context, the benefit criteria are indexed from j = 1 to g, while the cost criteria are represented from j = g + 1 to n.

Step 9: Rank the alternatives and compare the outcomes derived from the Reference Point (RP) approach, Ratio System (RS) model, and the Full Multiplicative Form (FMF) technique.

3. CASE STUDY (VAKA ÇALIŞMASI)

As electric vehicles become more widespread, efficient energy management is essential for maximizing performance and sustainability. AI-based strategies offer innovative solutions by enabling smart, adaptive control of energy use. However, due to the complexity of these approaches, a structured evaluation is needed. This

study is important as it provides a comprehensive assessment of key AI-driven energy management strategies, helping stakeholders identify the most effective and practical solutions for advancing intelligent and sustainable mobility.

This study aims to evaluate and prioritize AI-based energy management strategies for electric vehicles using multi-criteria decision-making approaches. By assessing their energy efficiency, economic viability, environmental impact, and technological adaptability, the research offers a structured framework to guide stakeholders in identifying and adopting the most effective strategies. The primary AI-based energy management strategies are determined through a comprehensive literature review and expert consultations as follows:

Predictive Energy Optimization (A1): AI-driven predictive models analyze real-time traffic, weather conditions, and historical driving patterns to optimize energy consumption [7]. Machine learning algorithms anticipate energy needs and dynamically adjust power distribution between the battery, motor, and auxiliary systems, ensuring extended range and reduced energy waste.

Smart Battery Management Systems (A2): AI enhances battery performance by continuously monitoring charge levels, temperature, and health indicators. It predicts battery degradation, optimizes charging cycles, and balances cell voltages to extend battery lifespan while ensuring efficiency and safety [8]. Advanced deep learning techniques help prevent overcharging and overheating issues.

AI-Optimized Route and Driving Assistance (A3): AI integrates GPS, traffic data, and energy consumption models to suggest the most energy-efficient routes. By considering road gradients, congestion, and charging station availability, AI-powered navigation helps EVs minimize energy use [5]. Additionally, AI-based driving assistants adjust acceleration and braking patterns to improve efficiency.

AI-Powered Regenerative Braking Optimization (A4): Regenerative braking systems use AI to maximize energy recovery by adapting braking intensity based on road conditions and driver behavior [7]. AI optimally distributes the recovered energy back to the battery, reducing reliance on external charging and improving overall efficiency.

AI-Enabled Smart Charging and Grid Integration (A5): AI synchronizes EV charging with smart grids by analyzing electricity demand, price fluctuations, and grid stability. It schedules charging during low-demand hours to reduce costs and enables Vehicle-to-Grid (V2G) technology, where EVs improve grid resilience by returning power to the grid during periods of peak demand [9].

AI-Driven Thermal Management (A6): AI regulates the vehicle's thermal systems, optimizing battery cooling and cabin climate control to minimize unnecessary energy usage [18]. By predicting external temperature changes and driver preferences, AI efficiently distributes energy between the ventilation, heating and air conditioning (HVAC) system and other power needs, increasing overall vehicle efficiency.

The evaluation of AI-based energy management strategies for electric vehicles requires a comprehensive and multidimensional approach, as these strategies directly affect the performance, sustainability, and practicality of electric vehicles. To ensure a thorough assessment, seven critical criteria are identified, capturing the most essential aspects of energy management in EVs. These criteria encompass technical, economic, environmental, and regulatory dimensions, enabling decision-makers to objectively compare and prioritize different AI-based strategies. The selected criteria and their detailed explanations are provided below:

Energy Efficiency (C1): This criterion assesses how well the AI-based strategy optimizes energy consumption to extend the driving range. It considers intelligent power distribution, regenerative braking efficiency, and predictive energy management to minimize waste and improve overall vehicle performance.

Economic Feasibility (C2): This evaluates the financial viability of the strategy, including implementation costs, operational expenses, and potential long-term savings. AI-driven solutions that reduce electricity consumption, optimize charging costs, and provide a favorable return on investment rank higher in this category.

Time Efficiency & Performance (C3): This aspect considers how AI strategies impact charging time, route optimization, and overall operational efficiency. Strategies that reduce charging duration, minimize energy loss during transmission, and optimize real-time power management are rated more favorably.

Adaptability & Scalability (C4): This measures the flexibility of AI strategies in handling different driving environments, vehicle models, and traffic conditions. AI systems that can be easily integrated into diverse EV fleets, adjust to dynamic energy demands, and scale with technological advancements receive a higher score.

Environmental Sustainability (C5): This criterion evaluates the extent to which the AI strategy reduces greenhouse gas emissions, promotes renewable energy integration, and minimizes environmental impact. AI solutions that enable smart grid interactions, prioritize clean energy sources, and support eco-friendly driving behavior perform better in this category.

Technological Integration (C6): This assesses the compatibility of AI-based energy management with existing EV infrastructures, including smart charging systems, IoT devices, and cloud-based platforms. Solutions that ensure seamless integration with vehicle control systems, maintain high reliability, and minimize disruptions are prioritized.

Regulatory Compliance (C7): This criterion examines whether the AI strategy aligns with government regulations, safety standards, and energy policies. Strategies that adhere to evolving legal frameworks, data privacy laws, and electric mobility regulations while ensuring cybersecurity are considered more effective.

In this study, a hierarchical framework is developed to clearly structure the decision-making process for evaluating AI-based energy management strategies for electric vehicles. At the top level of the hierarchy lies the main objective—to prioritize and evaluate the most effective AI-driven strategies in the context of electric vehicle energy management. The second level comprises the evaluation criteria, which reflect key factors such as energy efficiency, economic feasibility, technological integration, and environmental sustainability. At the final level, the specific AI-based strategies identified through literature review and expert input are positioned as the alternatives to be assessed. This hierarchical structure provides a transparent and logical foundation for applying the integrated SWARA and Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA methodology. The complete hierarchical decision model is visually represented in Figure 3.

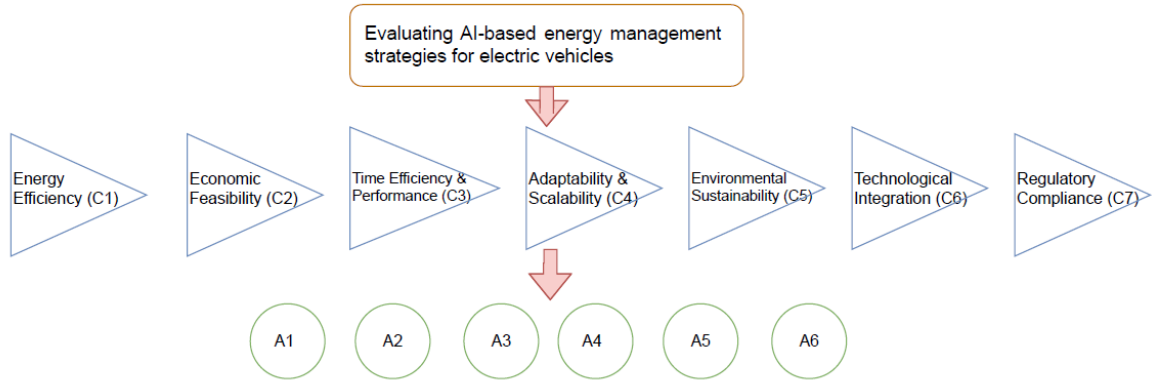


Figure 3. Hierarchical decision model of this study (Çalışmanın hiyerarşi karar modeli)

3.1. Application (Uygulama)

This study applies SWARA-weighted MULTIMOORA methodology under Pythagorean fuzzy environment to evaluate artificial intelligence-driven energy optimization strategies for electric vehicles. By reviewing the literature and consulting with academic and industry decision-makers, evaluation criteria and strategies are established.

In the initial stage of the methodology, the expert team evaluated and compared the criteria to determine their relative importance. In the third step of the SWARA method, each criterion is compared with the preceding one to determine its relative importance. The (S_j) values in Table 1 reflect the comparison of criterion j with criterion (j–1). For example, Technological Integration (C6) is compared with Energy Efficiency (C1), and Regulatory Compliance (C7) is evaluated against Environmental Sustainability (C5). This sequential structure is consistent with the standard SWARA procedure, where each criterion is assessed relative to the one ranked just before it. Subsequently, the comparative coefficient (k_j) was calculated using Equation (11), followed by the computation of the initial weight for each criterion (q_j) using Equation (12). Finally, the final weights of the criteria (ω_i) were obtained using Equation (13). The results of the SWARA approach are presented in Table 1.

Table 1. SWARA Method Results (SWARA yöntemi sonuçları)

Criteria	S_j	K_j	q_j	w_j
Energy Efficiency (C1)	-	1.000	1.000	0.379
Technological Integration (C6)	0.650	1.650	0.606	0.229
Economic Feasibility (C2)	0.450	1.450	0.418	0.158
Adaptability & Scalability (C4)	0.700	1.700	0.246	0.093
Time Efficiency & Performance (C3)	0.350	1.350	0.182	0.069
Environmental Sustainability (C5)	0.650	1.650	0.110	0.042
Regulatory Compliance (C7)	0.400	1.400	0.079	0.030

The results of the SWARA method reveal that Energy Efficiency (C1) is the most critical criterion in evaluating AI-based energy management strategies for electric vehicles, holding the highest weight of 0.379. This is followed by Technological Integration (C6) with a weight of 0.229, and Economic Feasibility (C2) with 0.158, reflecting their strong influence on decision-making. Adaptability & Scalability (C4) ranks fourth with 0.093, while Time Efficiency & Performance (C3) holds a moderate importance at 0.069. Environmental Sustainability (C5) and Regulatory Compliance (C7) are considered less significant, with weights of 0.042 and 0.030, respectively. These results indicate a clear emphasis on technical performance and cost-effectiveness over regulatory or environmental aspects in the context of electric vehicle energy strategies.

In the second phase, the single-valued Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA method is applied using the criterion weights obtained from the first phase. To implement this approach, a decision matrix is established on the basis of linguistic variables represented by Pythagorean fuzzy numbers, as outlined in Table 2.

Table 2. Pythagorean fuzzy number linguistic variables (Pisagor bulanık sayıların dilsel terimleri)

Linguistic term	Corresponding Pythagorean Fuzzy Member (u,v)
Very Low (VL)	(0.15, 0.85)
Low (L)	(0.25, 0.75)
Moderately Low (ML)	(0.35, 0.65)
Medium (M)	(0.50, 0.45)
Moderately High (MH)	(0.65, 0.35)
High (H)	(0.75, 0.25)
Very High (VH)	(0.85, 0.15)

The decision matrix, presented in Table 3, was developed based on evaluations provided by a panel of three experts, comprising one academic and two professionals from the automotive industry. During the evaluation process, the experts reached a consensus through direct discussion, eliminating the need for aggregating differing opinions using operators such as the Pythagorean Fuzzy Weighted Averaging (PFWA). Nevertheless, the PFWA operator is introduced conceptually in Section 2.1 to inform readers and support future studies that may require the integration of diverse expert judgments.

After constructing the Pythagorean fuzzy decision matrix, a Pythagorean fuzzy score matrix was established using Equation (10) to transform fuzzy sets into crisp values. This transformation was carried out by applying a score function that quantifies each Pythagorean fuzzy number into a real number between 0 and 1, thereby enabling numerical comparison between alternatives. The resulting crisp values reflect the relative performance of each strategy under each criterion and are essential for subsequent normalization and aggregation steps.

Table 3. Decision matrix (Karar matrisi)

Alternative/Criteria	Energy Efficiency (C1)	Economic Feasibility (C2)	Time Efficiency & Performance (C3)	Adaptability & Scalability (C4)	Environmental Sustainability (C5)	Technological Integration (C6)	Regulatory Compliance (C7)
Predictive Energy Optimization (A1)	VH	ML	M	H	H	H	H
Smart Battery Management Systems (A2)	VH	L	ML	VH	VH	VH	H
AI-Optimized Route and Driving Assistance (A3)	H	ML	MH	MH	MH	H	MH
AI-Powered Regenerative Braking Optimization (A4)	MH	M	M	M	MH	MH	M
AI-Enabled Smart Charging and Grid Integration (A5)	H	ML	ML	H	VH	H	MH
AI-Driven Thermal Management (A6)	M	ML	H	M	MH	M	ML

Following the transformation of expert evaluations into crisp values using the score function, the normalization process is carried out using Equation (15), followed by the construction of the normalized weighted decision matrix using Equation (16). As part of the normalization step, benefit-type criteria—such as Energy Efficiency (C1), Adaptability & Scalability (C4), Environmental Sustainability (C5), Technological Integration (C6), and Regulatory Compliance (C7)—are normalized by assigning higher scores to better-performing alternatives. Conversely, for cost-type criteria—namely Economic Feasibility (C2) and Time Efficiency & Performance (C3)—lower values are preferred and scored accordingly. This approach ensures that all criteria, regardless of their nature, are brought onto a unified scale between 0 and 1, where 1 represents the most favorable performance and 0 the least. As a result, the normalized decision matrix presented in Table 4 enables a fair and consistent comparison among the alternative strategies prior to applying the MULTIMOORA method. To enhance the robustness and accuracy of the multi-criteria decision-making process, the three distinct components of the MULTIMOORA method—Ratio System (RS), Reference Point (RP), and Full Multiplicative Form (FMF)—are applied independently. This comprehensive approach ensures a more reliable and consistent evaluation of the alternatives.

Table 4. Normalized decision matrix (Normalize karar matrisi)

Alternative/Criteria	Energy Efficiency (C1)	Economic Feasibility (C2)	Time Efficiency & Performance (C3)	Adaptability & Scalability (C4)	Environmental Sustainability (C5)	Technological Integration (C6)	Regulatory Compliance (C7)
Predictive Energy Optimization (A1)	1.00	0.63	0.57	0.69	0.50	0.69	1.00
Smart Battery Management Systems (A2)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

AI-Optimized Route and Driving Assistance (A3)	0.69	0.63	0.25	0.39	0.00	0.69	0.75
AI-Powered Regenerative Braking Optimization (A4)	0.39	0.00	0.57	0.00	0.00	0.39	0.43
AI-Enabled Smart Charging and Grid Integration (A5)	0.69	0.63	1.00	0.75	1.00	0.69	0.75
AI-Driven Thermal Management (A6)	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

The RS model is first applied to determine the relative priority of each alternative using Equation (17). Subsequently, the Tchebycheff Min-Max metric is calculated to evaluate the alternatives through the RP approach, as defined by Equation (18). Finally, the overall utility score for each alternative is computed by applying the FMF technique using Equation (19) to establish their final rankings. The results obtained from the Ratio System (RS), Reference Point (RP), and Full Multiplicative Form (FMF) approaches are presented in Table 5. In the RS model, the y_i values are ranked in descending order, where a higher value indicates a more preferable alternative. For the RP approach, the maximum distance value D_i is calculated for each alternative, and the alternatives are ranked in ascending order, with lower values indicating better performance. In the FMF technique, the utility scores U_i are also ranked in descending order, where the highest score reflects the most ideal alternative.

Table 5. The results obtained from the RS, RP, and FMF approaches (RS, RP ve FMF yaklaşımlarından elde edilen sonuçlar)

Alternative	**y_i**	**D_i**	**U_i**
Predictive Energy Optimization (A1)	0.51	0.10	4.68
Smart Battery Management Systems (A2)	0.55	0.12	6.37
AI-Optimized Route and Driving Assistance (A3)	0.36	0.12	4.08
AI-Powered Regenerative Braking Optimization (A4)	0.21	0.23	3.40
AI-Enabled Smart Charging and Grid Integration (A5)	0.39	0.12	3.28
AI-Driven Thermal Management (A6)	-0.10	0.38	0.00

Figure 4 indicates the ranking results of three approaches. Smart Battery Management Systems (A2) consistently rank as the top-performing strategy across all three methods, highlighting its critical role in optimizing energy use and prolonging battery life. Similarly, AI-Driven Thermal Management (A6) ranks lowest in all methods, suggesting it may currently offer less impact or maturity compared to other strategies. AI-Optimized Route and Driving Assistance (A3) and AI-Powered Regenerative Braking Optimization (A4) occupy middle-tier rankings, indicating moderate yet stable performance. Minor variances across methods, such as the relative positions of Predictive Energy Optimization (A1) and AI-Enabled Smart Charging and Grid Integration (A5), suggest that while the overall hierarchy remains stable, method-specific criteria can influence the finer details of strategy prioritization.

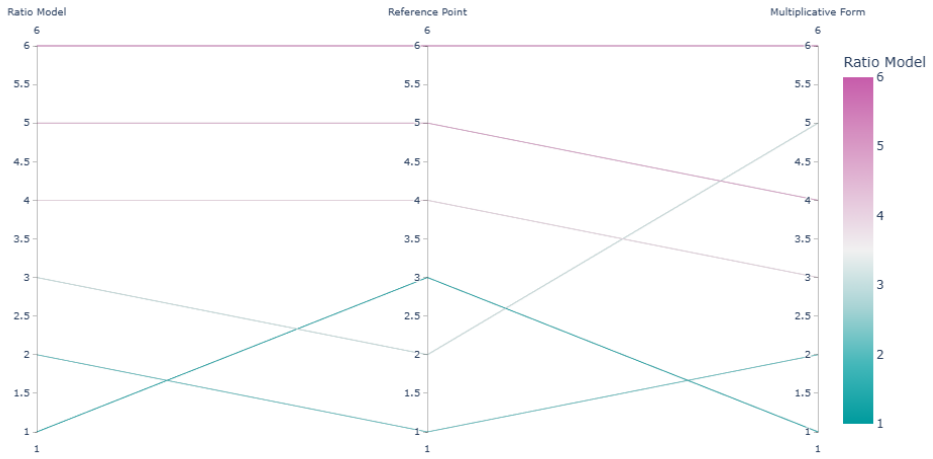


Figure 4. Ranking results of three approaches (Üç yaklaşıma ait sıralama sonuçları)

3.2. Sensitivity Analysis (Duyarlılık Analizi)

Sensitivity analysis is a valuable tool employed to evaluate the reliability of a decision-making framework by observing how fluctuations in input parameters—particularly criteria weights—affect the final rankings of alternatives. In this study, sensitivity analysis is conducted to investigate the impact of changes in the importance levels assigned to evaluation criteria on the prioritization of AI-based energy management strategies for electric vehicles. By systematically interchanging the weights of each criterion, the analysis reveals whether the ranking of strategies remains consistent or is significantly altered. A change in the ranking order following the modification of a criterion's weight indicates that the model is sensitive to that specific parameter, highlighting its influence on the decision outcome. On the other hand, if the rankings remain stable despite weight adjustments, it suggests a robust decision-making model. This process ensures the consistency and credibility of the applied methodology under varying assumptions, reinforcing the dependability of the results in diverse decision environments.

In this research, sensitivity analysis is carried out by modifying the criterion weights obtained through the SWARA method and recalculating the Ratio System (RS) scores using the Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA approach. A total of 21 distinct scenarios are analyzed, each involving a pairwise swap of weight values between two criteria. For instance, the notation $y_{i1\text{-}2}$ indicates a scenario where the weight of Criterion 1 is exchanged with that of Criterion 2. Figure 5 shows the heatmap of RS model scores (y_i values) for six alternatives (A1–A6) across 21 different sensitivity scenarios, each representing a weight swap between a pair of evaluation criteria. The heatmap highlights how each alternative's performance fluctuates under different weighting conditions. Alternative A2 (Smart Battery Management Systems) consistently scores high across all scenarios, indicating strong robustness and insensitivity to weight variations. In contrast, "AI-Driven Thermal Management (A6)" remains consistently low or negative in all cases, suggesting weak overall performance and possibly unfavorable evaluation under all weighting schemes. Alternatives A1, A3, and A5 show moderate variability, with A1 and A5 reaching relatively high scores in several scenarios, indicating they are sensitive but potentially competitive depending on the criteria emphasis. A4 tends to stay on the lower end but shows some resilience in select scenarios.

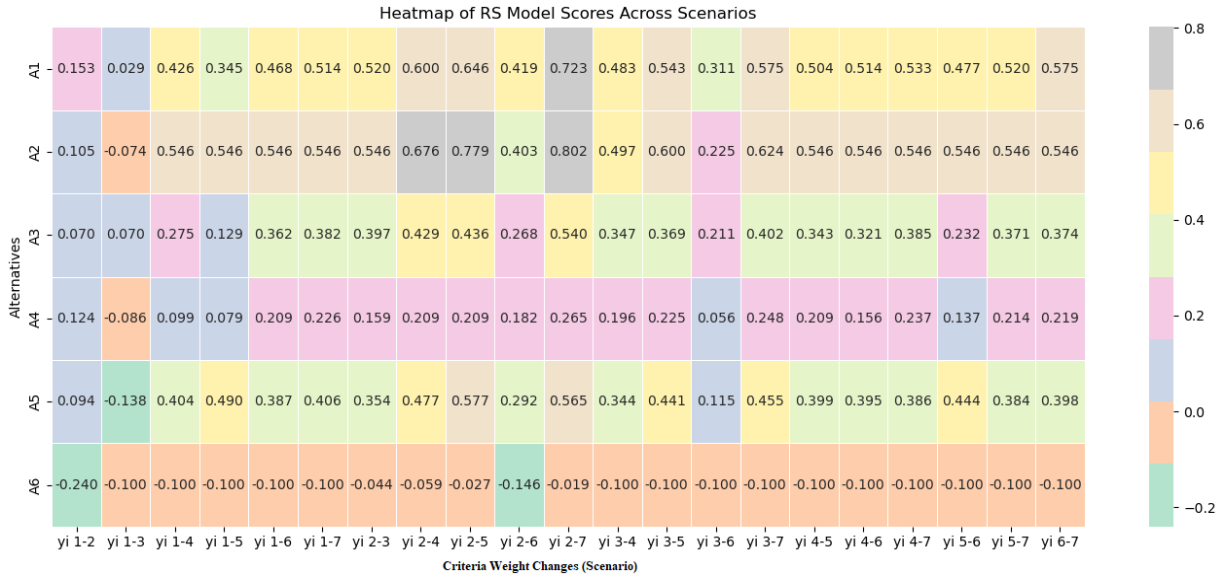


Figure 5. RS Model results across 21 scenarios (RS Modeli sonuçlarının 21 senaryo karşısındaki dağılımı)

Figure 6 shows the ranking results of the alternatives across all 21 sensitivity analysis scenarios, clearly visualizing the dynamic shifts in ranking positions and highlighting the stability of top-performing strategies under different evaluation perspectives. As observed in the data, Alternatives A1 and A2 consistently outperform others, frequently securing the 1st and 2nd ranks in most scenarios, indicating their robustness and reliability under changing priority conditions. In contrast, Alternative A6 remains fixed at the 6th position across all scenarios, suggesting its relatively poor performance regardless of weight variation. Alternatives A3, A4, and A5 exhibit more variability, occasionally reaching middle-tier rankings, but never achieving top ranks consistently. This variability indicates that their effectiveness is more sensitive to the weight distribution of the criteria.

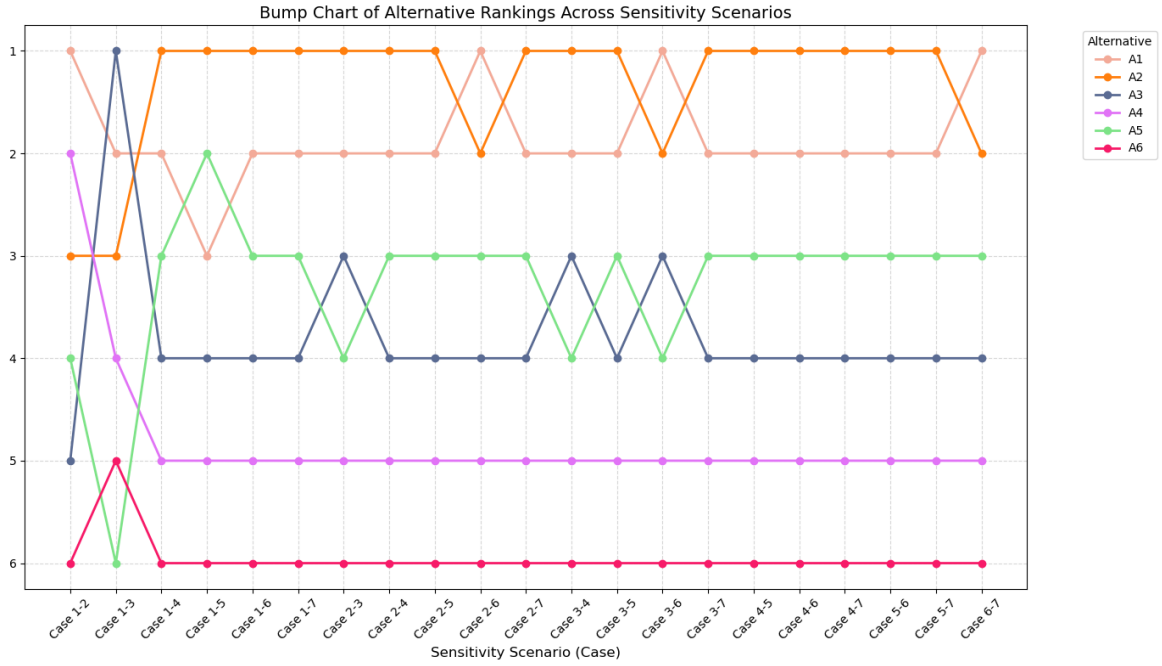


Figure 6. Ranking results of the alternatives across all 21 scenarios (Alternatiflerin 21 senaryo boyunca sıralama sonuçları)

3.3. Comparative Analysis (Karşılaştırma Analizi)

To validate the robustness and reliability of the proposed SWARA–Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA framework, a comparative analysis was performed using the Pythagorean Fuzzy TOPSIS (PF-TOPSIS) method. Such comparative evaluations are essential in multi-criteria decision-making (MCDM) studies, as they provide a benchmark for assessing the consistency of results and the practical applicability of alternative approaches under different decision environments.

The Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), originally proposed by Hwang and Yoon [19], is a widely adopted MCDM method that selects the optimal alternative based on its geometric proximity to a positive ideal solution (PIS) and its distance from a negative ideal solution (NIS). To effectively manage uncertainty in decision-making, this method has been extended into the Pythagorean fuzzy domain, resulting in the Pythagorean Fuzzy TOPSIS (PF-TOPSIS) approach.

This method was selected for comparison due to its popularity in the literature, ease of interpretation, and ability to offer a reliable ranking mechanism in fuzzy environments. On the basis of definition above, the procedural steps of the PF-TOPSIS method are outlined below:

Step 10: Calculate Pythagorean fuzzy positive ideal solution (PIS) and negative ideal solution (NIS) using Equations (20) and (21):

$$x^+ = \left\{\max_i \langle s((x_i))\rangle \middle| j = 1,2,\cdots,n\right\} = \{\langle P(u_1^+, v_1^+)\rangle, \langle P(u_2^+, v_2^+)\rangle, \cdots, \langle P(u_n^+, v_n^+)\rangle\}, \quad (20)$$

$$x^- = \left\{\min_i \langle s((x_i))\rangle \middle| j = 1,2,\cdots,n\right\} = \{\langle P(u_1^-, v_1^-)\rangle, \langle P(u_2^-, v_2^-)\rangle, \cdots, \langle P(u_n^-, v_n^-)\rangle\}. \quad (21)$$

Step 11: Compute distances from Pythagorean fuzzy PIS and NIS using Equations (22) and (23):

$$D(x_i, x^+) = \sum_{j=1}^{n} w_j d\left(C_j(x_i), C_j(x^+)\right) = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n} w_j \left(\left|(\mu_{ij})^2 - (\mu_j^+)^2\right| + \left|(v_{ij})^2 - (v_j^+)^2\right| + \left|(\pi_{ij})^2 - (\pi_j^+)^2\right|\right), i = 1,2,\cdots,m, \quad (22)$$

$$D(x_i, x^-) = \sum_{j=1}^{n} w_j d\left(C_j(x_i), C_j(x^-)\right) = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n} w_j \left(\left|(\mu_{ij})^2 - (\mu_j^-)^2\right| + \left|(v_{ij})^2 - (v_j^-)^2\right| + \left|(\pi_{ij})^2 - (\pi_j^-)^2\right|\right), i = 1,2,\cdots,m. \quad (23)$$

Step 12: Determine the revised closeness $\xi(x_i)$ of the alternative x_i using Eq. (24):

$$\xi(x_i) = \frac{D(x_i,x^-)}{D_{max}(x_i,x^-)} - \frac{D(x_i,x^+)}{D_{min}(x_i,x^+)} \quad (24)$$

Step 13: Determine the best ranking order of alternatives in which the best alternative is the one that has the largest revised closeness $\xi(x_i)$.

The implementation of the PF-TOPSIS method begins with the calculation of the Pythagorean Fuzzy Positive Ideal Solution (PIS) and Negative Ideal Solution (NIS) using Equations (20) and (21). These reference points represent the best and worst possible performance across all criteria, respectively. The results of these calculations are presented as follows:

x^+ = {P(0.85, 0.15), P(0.50, 0.45), P(0.75, 0.25), P(0.85, 0.15), P(0.85, 0.15), P(0.85, 0.15), P(0.75, 0.25)}

x^- = {P(0.50, 0.45), P(0.25, 0.75), P(0.35, 0.65), P(0.50, 0.45), P(0.65, 0.35), P(0.50, 0.45), P(0.35, 0.65)}.

Next, the distances of each alternative from the Pythagorean Fuzzy PIS and NIS are determined using Equations (22) and (23). Based on these distances, the revised closeness coefficient $\xi(x_i)$ for each alternative is computed using Equation (24). This coefficient indicates how close each alternative is to the ideal solution, with higher values signifying better performance. Table 6 provides a comparison between the PF-TOPSIS method and the proposed SWARA–Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA framework. It includes the calculated distances from the PIS and NIS, as well as the resulting closeness coefficients and rankings for each alternative.

Table 6. Comparative results between the PF-TOPSIS method and the proposed approach (PF-TOPSIS yöntemi ile önerilen yaklaşım arasındaki karşılaştırmalı sonuçlar)

Alternative	PF-TOPSIS				Proposed method	
	Distances from fuzzy PIS	Distances from fuzzy NIS	Revised closeness	Ranking	y_i	Ranking
Predictive Energy Optimization (A1)	0.047	0.086	-0.205	3	0.514	2
Smart Battery Management Systems (A2)	0.041	0.080	-0.133	1	0.546	1
AI-Optimized Route and Driving Assistance (A3)	0.067	0.092	-0.643	4	0.362	4
AI-Powered Regenerative Braking Optimization (A4)	0.072	0.069	-1.019	5	0.209	5
AI-Enabled Smart Charging and Grid Integration (A5)	0.044	0.082	-0.179	2	0.387	3
AI-Driven Thermal Management (A6)	0.083	0.071	-1.253	6	-0.100	6

The comparative results presented in Table 6 demonstrate a high degree of consistency between the PF-TOPSIS method and the proposed SWARA–Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA framework. In both approaches, Smart Battery Management Systems (A2) is ranked as the most critical AI-based energy management strategy for electric vehicles, highlighting its universal importance across different evaluation techniques.

Additionally, AI-Driven Thermal Management (A6) consistently appears in the last position, indicating its relatively lower priority among the evaluated strategies in both methods. The positions of other alternatives, such as Predictive Energy Optimization (A1) and AI-Enabled Smart Charging and Grid Integration (A5), show slight variations (e.g., A1 is ranked second in the proposed method but third in PF-TOPSIS), yet the overall trend and grouping of alternatives remain largely aligned.

This alignment validates the robustness and reliability of the proposed methodology. The similarity in rankings across two distinct Pythagorean fuzzy MCDM techniques strengthens the credibility of the decision-making framework and validates the reliability of the weighting and ranking procedures employed in this study.

4. DISCUSSION (TARTIŞMA)

This study addresses a critical challenge in the transition toward sustainable transportation by evaluating AI-based energy management strategies for electric vehicles. As electric vehicles continue to gain prominence in global markets, optimizing their energy use through intelligent systems becomes increasingly essential for improving efficiency, performance, and environmental impact. The methodological strength of this study lies in the integration of the SWARA method and the Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA approach. SWARA effectively captures expert judgment to assign meaningful weights to evaluation criteria, while the Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA method offers a robust framework for handling uncertainty and imprecision in multi-criteria decision-making [20]. By combining these approaches, the study ensures both the reliability of the input data and the robustness of the final rankings, providing valuable insights for stakeholders aiming to adopt the most effective AI-based solutions in EV energy management.

As a result of the comprehensive evaluation, “Smart Battery Management Systems” emerged as the highest-ranked strategy among AI-based energy management solutions for electric vehicles. This outcome is largely due to the vital role these systems play in enhancing energy efficiency, prolonging

battery life, increasing safety, and optimizing the overall operational performance of electric vehicles. Predictive maintenance, intelligent charging and discharging cycle control, and real-time monitoring are all made possible by smart battery management systems, and these features immediately reduce energy waste and long-term operating expenses. According to Ali et al. [21], a smart battery management system is one of the main parts of electric vehicles (EVs). It not only accurately assesses the battery's status but also ensures safe operation and prolongs its lifespan. For policy makers, these findings emphasize the importance of supporting initiatives and investments that facilitate the development and deployment of advanced battery technologies. Meanwhile, professionals in computer engineering and electrical and electronics fields can use this insight to guide innovation in AI algorithms, embedded systems, and battery health analytics. Focusing on this strategy can significantly accelerate the transition toward smarter, more sustainable, and user-friendly electric mobility solutions.

Following the computational analysis, "Predictive Energy Optimization" and "AI-Enabled Smart Charging and Grid Integration" rank as the second and third most critical AI-based energy management strategies for electric vehicles. Predictive energy optimization stands out for its ability to anticipate energy consumption based on dynamic factors such as driving behavior, road characteristics, and environmental conditions, allowing for proactive and efficient energy use. This strategy has been shown to significantly improve route planning and reduce energy consumption through data-driven models that combine machine learning and statistical approaches for real-world application [22]. Meanwhile, AI-enabled smart charging and grid integration play a vital role in aligning EV charging patterns with grid demands, enabling efficient load distribution and supporting the integration of renewable energy sources. These capabilities contribute to both operational cost reduction and enhanced grid stability, making this strategy indispensable in scaling EV infrastructure [23]. For policy makers, these findings offer a roadmap for prioritizing investments in predictive and intelligent charging technologies to enhance EV performance and sustainability. Professionals in engineering can strengthen these insights to drive innovation in AI models, smart infrastructure systems, and intelligent energy forecasting tools.

In the process of weighting the criteria for evaluating AI-based energy management strategies for electric vehicles, "Energy Efficiency" emerged as the most important criterion, followed by "Technological Integration" and "Economic Feasibility". "Energy efficiency" ranks first because it directly impacts the core goal of energy management—reducing consumption and maximizing the driving range of electric vehicles. As electric mobility continues to expand, ensuring optimal energy use is essential for both sustainability and performance. The importance of AI technologies in efficiently integrating with infrastructure, sensors, and vehicle systems is the reason "technological integration" is rated second. Without effective integration, even the most advanced AI models cannot be fully utilized. "Economic feasibility" takes the third spot, reflecting the practical necessity for cost-effective solutions that can be scaled and adopted by manufacturers and consumers alike. These insights are particularly valuable for policy-makers, as they highlight the need to support strategies that balance performance with technological innovation and cost. By prioritizing investments and incentives in areas that maximize energy savings and enable advanced technology deployment at a reasonable cost, policy-makers can drive the widespread adoption of efficient and intelligent energy solutions in the electric vehicle sector.

These findings offer valuable insights for both policy-makers and stakeholders in the electric vehicle industry by highlighting which AI-based energy management strategies and evaluation criteria are most critical for advancing sustainable and intelligent mobility. The prioritization of strategies such as smart battery management, predictive energy optimization, and intelligent charging systems underscores the need for supportive policies that encourage innovation in AI technologies and infrastructure development. Additionally, the emphasis on energy efficiency, technological integration, and economic feasibility as top evaluation criteria provides a clear framework for aligning regulatory actions, investment decisions, and research initiatives. For the electric vehicle industry, these insights help guide the development of next-generation energy management solutions that are not only technically effective but also economically viable and scalable.

5. CONCLUSION (SONUÇ)

This study holds significant importance as it addresses a critical and underexplored area in the field of electric vehicle development—the systematic evaluation and prioritization of AI-based energy management strategies. While existing literature has focused on individual components such as battery management, charging infrastructure, or general energy optimization, there

remains a lack of comprehensive frameworks that assess these strategies in an integrated, comparative manner.

This study addresses that gap by integrating the SWARA method for determining the importance of evaluation criteria with the Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA method for ranking alternative strategies. This hybrid approach enables a robust, flexible, and uncertainty-aware evaluation framework. The findings offer actionable insights for policy-makers, helping them prioritize investments and regulatory efforts that support sustainable and intelligent mobility solutions. Additionally, professionals in computer engineering and electrical and electronic engineering can use the results to guide the development of AI-driven technologies, including smart battery systems, predictive control algorithms, and intelligent charging infrastructure, all aimed at enhancing the performance and sustainability of electric vehicles.

The findings of this study reveal that among the evaluated strategies, “Smart Battery Management Systems” emerged as the most critical AI-based energy management solution for electric vehicles. This highlights the fundamental importance of intelligent battery control in enhancing energy efficiency, extending battery life, and ensuring overall system reliability. “Predictive Energy Optimization” ranked second, underscoring the value of AI-driven forecasting in managing energy consumption based on real-time driving conditions and user behavior. “AI-Enabled Smart Charging and Grid Integration” ranked third, reflecting the growing relevance of intelligent charging solutions that optimize load distribution and support the stability of the power grid. These results provide decision-makers with a data-driven framework for identifying the most impactful areas for policy development, research investment, and technological deployment. By prioritizing strategies with the highest potential for improving energy efficiency and system integration, stakeholders can make informed decisions that accelerate the transition toward intelligent and sustainable electric vehicle ecosystems.

Sensitivity analysis was also conducted to examine the robustness of the proposed decision-making framework. This involved modifying the criterion weights initially determined by the SWARA method and recalculating the Ratio System (RS) scores within the Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA approach. A total of 21 distinct scenarios were created, each involving a pairwise exchange of weight values between two criteria to observe the resulting changes in strategy rankings. The findings of the sensitivity analysis demonstrate that, despite the weight alterations, the overall ranking of AI-based energy management strategies remained largely consistent. This stability confirms the reliability and robustness of the evaluation model, reinforcing confidence in the prioritization outcomes and supporting its application in real-world decision-making contexts related to electric vehicle energy strategy development.

This study provides a solid foundation for evaluating AI-based energy management strategies for electric vehicles; however, there are several promising directions for future research. Upcoming studies can be expanded by incorporating additional evaluation criteria to capture broader technical, economic, and social dimensions. Moreover, increasing the number and diversity of expert participants would enhance the reliability and generalizability of the results. The proposed methodology can also be applied to other decision-making problems within the transportation and energy sectors, such as evaluating smart grid technologies, sustainable mobility solutions, or alternative fuel systems. Methodologically, the framework can be enhanced by integrating alternative fuzzy set theories, such as Fermatean fuzzy sets or Spherical fuzzy sets, to better represent uncertainty in complex environments. Additionally, other multi-criteria decision-making (MCDM) methods, including CRITIC (CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation) for objective weighting and MARCOS (Measurement of Alternatives and Ranking according to the Compromise Solution) for ranking alternatives, can be explored to further strengthen the decision-making process. Expanding the application of the proposed methodology across different regional or country-specific EV ecosystems could also offer valuable comparative insights for policymakers and practitioners. Moreover, scenario-based or dynamic decision-making frameworks can be incorporated to reflect real-world fluctuations in energy demand, battery performance, and grid interactions. These extensions would provide greater flexibility and depth in evaluating technological solutions in the evolving landscape of electric vehicle innovation.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS
(ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***Gözde BAKİOĞLU*:** She conducted the processes of literature review, methodology, analysis, visualization, discussion, and writing of the article.

Literatür, yöntem, analiz, görselleştirme, tartışma ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Khan, S. U., Mehmood K. K., Haider, Z. M., Rafique M. K., Khan M. O., & Kim, C. H., 2021. Coordination of multiple electric vehicle aggregators for peak shaving and valley filling in distribution feeders. Energies, 14(2), 352.

[2] Eurostat. Final energy consumption in transport. 2025. Available on https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final_energy_consumption_in_transport_-_detailed_statistics.

[3] Eurostat. Electricity price statistics. 2025. Available on https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics.

[4] Eurostat. Complete energy balances. Online data code: nrg_bal_c. https://doi.org/10.2908/NRG_BAL_C

[5] Lin, Y., Chu, L., Hu, J., Hou, Z., Li, J., Jiang J. & Zhang, Y., 2024. Progress and summary of reinforcement learning on energy management of MPS-EV. Heliyon, 10(1).

[6] Shakeel, F. M. and Malik, O. P., 2022. ANFIS based energy management system for V2G integrated micro-grids. Electric Power Components and Systems, 50(11-12), 584-599.

[7] Pardhasaradhi, B. and Shilaja, C., 2023. A deep reinforced markov action learning based hybridized energy management strategy for electric vehicle application. Journal of Energy Storage, 74, 109373.

[8] Badran, M. A. and Toha, S. F., 2024. Employment of Artificial Intelligence (AI) Techniques in Battery Management System (BMS) for Electric Vehicles (EV): Issues and Challenges. Pertanika Journal of Science & Technology, 32(2).

[9] Ghalkhani, M. and Habibi, S., 2022. Review of the Li-ion battery, thermal management, and AI-based battery management system for EV application. Energies, 16(1), 185.

[10] Alrifaie, M. F., Habbal, A. and Kim, B. S., 2024. A fuzzy-multi attribute decision making scheme for efficient user-centric EV charging station selection. IEEE Access.

[11] Ghoushchi, S. J., Haghshenas, S. S., Vahabzadeh, S., Guido, G. and Geem, Z. W., 2024. An integrated MCDM approach for enhancing efficiency in connected autonomous vehicles through augmented intelligence and IoT integration. Results in Engineering, 23, 102626.

[12] Stecyk, A. and Miciuła, I., 2023. Harnessing the power of artificial intelligence for collaborative energy optimization platforms. Energies, 16(13), 5210.

[13] Imran, S. M., Rameshan, N. M., Anand, C. J., Martin, Tiwari, N. M. and Mohan, V., 2024. Fuzzy Decision-Making on Strategies for Maximizing the Utility of Electric Vehicles. In 2024 IEEE Third International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES) (pp. 347-352). IEEE.

[14] Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets, Inf. Control 8 (3), 338–353.

[15] Yager R.R., 2013. Pythagorean fuzzy subsets, in: IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting (IFSA/NAFIPS), IEEE, pp. 57–61.

[16] Keršuliene, V., Zavadskas, E. K. and Turskis, Z., 2010. Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA). Journal of business economics and management, 11(2), 243-258.

[17] Brauers, W. K. M. and Zavadskas, E. K., 2010. Project management by MULTIMOORA as an instrument for transition economies. Technological and economic development of economy, 16(1), 5-24.

[18] Xia, G., Cao, L. and Bi, G., 2017. A review on battery thermal management in electric vehicle application. Journal of power sources, 367, 90-105.

[19] Hwang, C. L., Yoon, K. 1981. Methods for multiple attribute decision making. In Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 58-191.

[20] Bakioglu, G. 2025. Enhancing efficiency in railway freight logistics using a two-stage decision support technique with Q-rung

orthopair fuzzy sets. Canadian Journal of Civil Engineering, 52(5), 770-795.

[21] Ali, M. U., Zafar, A., Nengroo, S. H., Hussain, S., Junaid Alvi, M. & Kim, H. J., 2019. Towards a smarter battery management system for electric vehicle applications: A critical review of lithium-ion battery state of charge estimation. Energies, 12(3), 446.

[22] Cauwer, C. De, Coosemans, W. T., Faid, S., and Van Mierlo, J. 2017. A data-driven method for energy consumption prediction and energy-efficient routing of electric vehicles in real-world conditions. Energies, 10(5), 608.

[23] Bakioğlu, G., Silgu, M. A., Özcanan, S., Gökaşar, I., Büyük, M., Çelikoğlu, H. B., Osman, A. 2015, September. Incident detection algorithms: A literature review. In Proceedings of the 1st IRF Europe & Central Asia Regional Congress & Exhibition, Istanbul, Turkey, 15-18.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1157-1172 (2025)

Akıllı Sayaç Verilerinde Derin Zaman Serisi Analizi ve Olasılık Tabanlı Kümeleme ile Enerji Tüketicisi Esneklik Tespiti

Zühre AYDIN[1*]

[1]*Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Research article
Received: 31/05/2025
Revision: 29/07/2025
Accepted: 31/07/2025

Anahtar Kelimeler

Dönüştürücü Tabanlı Zaman Serisi,
Akıllı Sayaç,
Enerji Talebi Yönetimi,
Gaussian Karışım Modellemesi,
Tüketici Grupları,
Talep Tarafı Esnekliği

Article Info

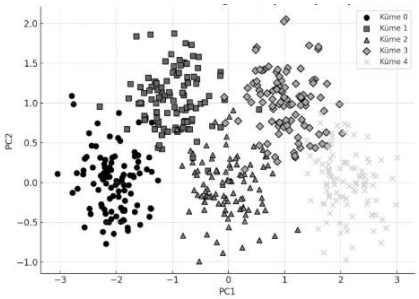
Araştırma makalesi
Başvuru: 31/05/2025
Düzeltme: 29/07/2025
Kabul: 31/07/2025

Keywords

Transformer Based Time Series,
Smart Meter,
Energy Demand Management,
Gaussian Mixture Modeling,
Consumer Segmentation,
Demand Side Flexibility

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Çalışmanın amacı, akıllı sayaçlardan elde edilen yüksek çözünürlüklü zaman serisi verilerini dönüştürücü tabanlı derin öğrenme ile analiz edip, Gaussian Karışım Modellemesi (GMM) temelli olasılık kümeleme ile mesken tipi enerji tüketicilerini tüketim davranışlarına ve yük kaydırma potansiyeline göre doğru şekilde segmentlere ayırmaktır. Böylece, enerji talep yönetimi ve esneklik piyasalarına veri odaklı, güvenilir ve davranışa duyarlı planlama altyapısı sunulmaktadır. / The aim of this study is to analyze high-resolution time series data from smart meters using transformer-based deep learning and to accurately segment residential energy consumers according to consumption behavior and load shifting potential through Gaussian Mixture Model (GMM) probabilistic clustering. This provides a data-driven, reliable, and behavior-sensitive planning framework for energy demand management and flexibility markets.



***Şekil A**: Dönüştürücü modelden elde edilen gömülü vektörler PCA ile 2 boyuta indirgenip GMM ile kümelenmiştir. / Figure A: Consumer clusters from PCA-reduced transformer embeddings clustered by GMM.*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Transformer modeli, uzun dönemli zamansal ilişkileri yakalayarak tahmin doğruluğunu artırır. / The transformer model enhances forecasting by capturing long-term temporal dependencies.*
- *GMM kümeleme, tüketici belirsizliklerini dikkate alarak esneklik temelli segmentasyon sağlar. / GMM clustering enables flexibility-based segmentation by considering consumer uncertainties.*
- *Metodoloji, yük kaydırma potansiyeli olan grupları anlamlı ve tutarlı şekilde ayırır. / The methodology effectively differentiates groups with load shifting potential*

***Amaç (Aim):** Bu çalışma, dönüştürücü tabanlı derin öğrenme ile mesken tüketim örüntülerini modelleyerek yük kaydırma potansiyeli taşıyan kullanıcıları belirlemeyi amaçlamaktadır. / This study uses transformer-based deep learning to model residential consumption and identify load shifting user groups.*

Özgünlük (Originality):
Metodoloji, dönüştürücü gömülü temsiller ve olasılıksal kümelemeyi ilk kez açık akıllı sayaç verilerinde birleştirerek segmentasyon doğruluğunu artırmaktadır. / The methodology uniquely integrates transformer embeddings and probabilistic clustering on open smart meter data to improve segmentation accuracy.

***Bulgular (Results):** Farklı yük profilleri ve esneklik potansiyellerine sahip belirgin tüketici kümeleri, güçlü doğrulama metrikleriyle ortaya konmuştur. / Distinct consumer clusters with varying load profiles and flexibility potentials are identified, supported by robust validation metrics.*

***Sonuç (Conclusion):** Yöntem, veri odaklı talep yönetimi ve esneklik piyasası stratejileri için ölçeklenebilir ve güvenilir bir araç sunmaktadır. / The approach offers a scalable and reliable tool for data-driven demand management and flexibility market strategies.*

*Corresponding author, e-mail: zaydin@epdk.gov.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1710629

GU J Sci, Part C, 13(3): 1157-1172 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Akıllı Sayaç Verilerinde Derin Zaman Serisi Analizi ve Olasılık Tabanlı Kümeleme ile Enerji Tüketicisi Esneklik Tespiti

Zühre AYDIN[1*]

[1]*Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Research article
Received: 31/05/2025
Revision: 29/07/2025
Accepted: 31/07/2025

Anahtar Kelimeler

Dönüştürücü Tabanlı Zaman Serisi,
Akıllı Sayaç,
Enerji Talebi Yönetimi,
Gaussian Karışım Modellemesi,
Tüketici Grupları,
Talep Tarafı Esnekliği

Öz

Yüksek zaman çözünürlüklü akıllı sayaç verileri, elektrik tüketicilerinin zamana bağlı davranış örüntülerini ortaya koyarak talep tarafı esnekliği analizinde önemli bir veri kaynağı sunmaktadır. Derin zaman serisi öğrenme yöntemleri ile tüketim desenlerindeki uzun vadeli bağımlılıkların modellenmesi ve olasılık tabanlı kümeleme algoritmalarıyla esnek tüketici gruplarının ayrıştırılması, enerji sistemlerinin esnekliğe dayalı yeniden yapılandırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda çalışmanın temel amacı; mesken tipi tüketicilerin zaman serisi tabanlı tüketim davranışlarını derin öğrenme yaklaşımlarıyla analiz ederek, yük kaydırma potansiyeli taşıyan grupları doğru biçimde tanımlayabilmektir. Modelleme sonucunda elde edilen tüketici kümeleri, yük profili eğilimleri, davranışsal benzerlik düzeyleri ve potansiyel esneklik katkıları açısından değerlendirilmiş, böylece dağıtık esneklik piyasalarına yönelik veri temelli planlama çıktıları üretilmiştir. Elde edilen segmentasyon sonuçlarının güvenilirliği için yapılan ölçümler hem küme içi tutarlılığın hem de kümeler arası ayrışmanın yüksek olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, tüketici segmentasyonunun yalnızca görsel ve sezgisel değil, aynı zamanda nicel olarak da güçlü bir yapı sunduğunu ortaya koymakta, geliştirilen yaklaşımın klasik yöntemlere göre daha anlamlı, ayrıştırılabilir ve esneklik odaklı gruplar üretme kapasitesini kanıtlamaktadır. Literatürde yaygın olarak kullanılan geleneksel segmentasyon yöntemlerinin aksine, önerilen yöntem zaman serilerindeki yapısal örüntüleri daha isabetli biçimde ayrıştırarak enerji sistemleri için hedefli talep tarafı stratejileri geliştirilmesini desteklemektedir.

Flexibility Detection of Energy Consumers Using Deep Time Series Analysis and Probabilistic Clustering in Smart Meter Data

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 31/05/2025
Düzeltme: 29/07/2025
Kabul: 31/07/2025

Keywords

Transformer Based Time Series,
Smart Meter,
Energy Demand Management,
Gaussian Mixture Modeling,
Consumer Segmentation,
Demand Side Flexibility

Abstract

High resolution smart meter data provides valuable insights into the time dependent behavioral patterns of electricity consumers, making it a critical input for demand-side flexibility analysis. By leveraging deep time series learning techniques to capture long term consumption dependencies, and applying probabilistic clustering algorithms, it is possible to extract flexible consumer groups that can inform the restructuring of energy systems based on demand side dynamics. This study aims to identify residential consumer segments with load shifting potential accurately by analyzing their time series-based consumption behaviors using deep learning methods. The resulting consumer clusters were evaluated in terms of their load profiles, behavioral similarities, and potential contributions to flexibility, generating data-driven outputs for distributed flexibility market planning. The robustness validation of the segmentation demonstrates both strong intra-cluster cohesion and distinct inter cluster separation. These findings demonstrate that the proposed segmentation approach offers not only visually and intuitively distinct groups but also quantitatively validated and flexibility oriented consumer profiles, outperforming conventional clustering techniques. Unlike traditional segmentation methods in the literature, the proposed approach more effectively captures structural patterns within time series data, thereby supporting the design of targeted demand response strategies for power systems.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisi sistemlerinde esneklik, yenilenebilir kaynakların giderek artan entegrasyonu ile birlikte arz-talep dengesinin sürdürülebilir biçimde sağlanmasında stratejik bir unsur haline gelmiştir. Son yıllarda akıllı sayaç teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, mesken tipi elektrik tüketicilerine ilişkin yüksek çözünürlüklü zaman serisi verileri elde

*Corresponding author, e-mail: zaydin@epdk.gov.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1710629

edilebilmekte ve bu veriler tüketici davranışlarının ayrıntılı olarak analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Ancak literatürde yaygın olarak kullanılan geleneksel segmentasyon yaklaşımları, bu verilerin zamansal bağımlılıklarını ve yapısal örüntülerini yeterince yakalayamamakta, dolayısıyla tüketici gruplarının esneklik potansiyeline dayalı olarak anlamlı biçimde ayrıştırılmasında yetersiz kalmaktadır. Bu durum, hedefli talep tarafı stratejilerinin geliştirilmesi ve dağıtık enerji sistemlerinin etkin şekilde yapılandırılması önünde önemli bir engel teşkil etmektedir.

Bu çalışmanın temel problemi, yüksek çözünürlüklü zaman serisi verilerindeki karmaşık ve uzun vadeli tüketim örüntülerini dikkate almayan mevcut kümeleme yöntemlerinin, esnek tüketici gruplarını yeterince doğru ve anlamlı biçimde belirleyememesidir. Bu durum, enerji sistemlerinde veri güdümlü talep yönetimi ve esneklik planlamasında sorun oluşturmaktadır.

Bu bağlamda çalışmanın amacı, dönüştürücü/transformatör (transformer) tabanlı zaman serisi modelleme ile olasılık temelli kümeleme yöntemlerini entegre eden özgün bir tüketici segmentasyon çerçevesi geliştirerek, mesken tipi elektrik kullanıcılarının yük kaydırma potansiyeline dayalı gruplandırılmasını sağlamaktır. Çalışma kapsamında, (i) tüketici davranışlarının zamansal bağımlılıklarını yüksek doğrulukla modellemek, (ii) esnekliğe katkı sağlayabilecek tüketici kümelerini ayırt edebilmek ve (iii) bu kümeleri yük profili, davranış benzerliği ve esneklik kapasitesi açısından değerlendirmek hedeflenmektedir. Bu sayede, dağıtık esneklik piyasalarının daha verimli ve veri temelli biçimde yapılandırılmasına katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

Bu araştırmanın bulguları, enerji talebi modelleme ve yönetimi alanında öz dikkat mekanizmasına dayalı dönüştürücü modellerin potansiyelini vurgulamaktadır. Çalışma, dönüştürücü modellerinde bulunan öz dikkat mekanizmalarından yararlanarak, akıllı sayaç verilerindeki karmaşık, doğrusal olmayan ve uzun vadeli zamansal bağımlılıkları yakalamada belirgin bir iyileştirme göstererek, geleneksel zaman serisi tahmin yöntemlerinin karşılaştığı sınırlamaları ele almaktadır. Bu gelişmiş modelleme yeteneği, hedeflenen talep yanıt stratejilerini uygulamak ve akıllı şebeke ortamlarında dağıtılmış enerji kaynaklarını optimize etmek için kritik öneme sahip olan doğru tüketici sınıflandırması ve yük profili oluşturmayı kolaylaştırır. Gömülü öğrenme tekniklerinin entegrasyonu, dalgalanan tüketim modellerine dinamik olarak yanıt verebilen gerçek zamanlı, uyarlanabilir tahmin sağlayarak bu modellerin pratikliğini daha da artırır. Ek olarak, tüketicilerin yük profillerine göre esnek gruplara ayrılması, daha kişiselleştirilmiş ve verimli enerji yönetimi yaklaşımlarının önünü açar.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Elektrik enerjisi sistemlerinde talep tarafı yönetiminin etkinliği, tüketici davranışlarının doğr modellenmesine ve gruplandırılmasına bağlıdır. Bu kapsamda, Figueiredo ve arkadaşları [1], veri madenciliği tekniklerine dayalı bir karakterizasyon çerçevesi geliştirerek elektrik tüketicilerinin yük profillerine göre analiz edilmesini sağlamıştır. Çalışmada, örüntü tanıma ve istatistiksel modelleme yöntemleri kullanılarak çeşitli tüketici sınıflarının belirlenmesi amaçlanmış ve geliştirilen çerçevenin %87 oranında doğru sınıflandırma yaptığı raporlanmıştır. Bu yaklaşım, tüketici türlerine özel tarife, yük dengeleme ve esneklik programlarının yapılandırılması için temel bir araç sunmuştur. Elektrik sistemlerinin karbonsuzlaşması sürecinde, bu tür segmentasyon yöntemleri, akıllı sayaç verilerinin daha verimli kullanılması ve veri güdümlü enerji politikalarının tasarımı açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Chicco ve arkadaşları [2], elektrik müşterilerinin sınıflandırılmasında farklı kümeleme tekniklerini karşılaştırmak amacıyla kapsamlı bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada hiyerarşik kümeleme, k-means, kendini organize eden haritalar (SOM) ve bulanık k-means gibi yöntemler değerlendirilmiş ve her birinin avantajları detaylı biçimde analiz edilmiştir. Müşteri günlük yük profillerinin benzerliğine dayalı olarak sınıflandırılması, enerji dağıtım şirketleri için stratejik bir segmentasyon sağlamaktadır. Bulgular, k-means algoritmasının %92.3 oranında doğruluk sağlayarak en yüksek performansı gösterdiğini ortaya koymuştur, bu da bu yöntemin uygulamada tercih edilebilirliğini artırmaktadır.

Commission for Energy Regulation (CER) [3], İrlanda'da 5000 haneye ait akıllı sayaç verilerini kullanarak geniş çaplı bir tüketici analiz projesi gerçekleştirmiştir. Bu proje, farklı zaman dilimlerine ait tüketim davranışlarını ölçerek 6 temel tüketici grubu belirlemeyi başarmıştır. Çalışma kapsamında çeşitli bilgilendirme ve fiyatlandırma stratejilerinin tüketim alışkanlıkları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu veri seti, enerji politikalarının geliştirilmesinde ve tüketici odaklı talep yanıtı stratejilerinin tasarlanmasında

temel bir kaynak olarak kullanılmaktadır. Palensky ve Dietrich [4], talep tarafı yönetimi sistemlerinin enerji şebekelerindeki esneklik potansiyelini artırmadaki rolünü detaylı olarak incelemiştir. Çalışmada, ev içi akıllı yüklerin ve otomatikleştirilmiş talep yanıtı sistemlerinin hem enerji tüketiminde verimliliği sağladığı hem de yenilenebilir enerji entegrasyonunu desteklediği ortaya konmuştur. Elde edilen bulgulara göre, talep tarafı yönetimi sistemleri şebeke esnekliğini %15 ile %20 oranında artırabilmektedir, bu durum enerji dönüşümünde kilit bir katkı sağlamaktadır.

Chen ve arkadaşları [5], binalarda enerji talebi esnekliğini artırmak için uygulanan 17 farklı talep yanıtı stratejisini değerlendirmiştir. Bu çalışmada özellikle dinamik fiyatlandırma uygulamalarının etkisi ön plana çıkarılmış, enerji tüketiminde %24'e varan tasarruf sağlanabildiği ortaya konmuştur. Sonuçlar, özellikle bina düzeyinde enerji yönetimi çözümlerinin iklim dostu politikalarla entegrasyonunda bu stratejilerin kritik rol oynadığını göstermektedir. Mannion (2010), İrlanda'daki Akıllı Sayaç Projesi'nin uygulama detaylarını belgelemiştir. Bu proje kapsamında, farklı tarifelerin ve bilgilendirme stratejilerinin tüketim alışkanlıkları üzerindeki etkileri incelenmiş ve elde edilen veriler, enerji tasarrufu ve talep yönetimi stratejilerinin geliştirilmesinde temel bir kaynak olmuştur. Bu çalışma, enerji politikalarının şekillendirilmesi ve müşteri davranışlarının yönlendirilmesi açısından önemli katkılar sağlamıştır [6]. Albert ve Rajagopal [7], akıllı sayaçlardan elde edilen zaman serisi verileriyle tüketici segmentasyonu gerçekleştirmiş ve tüketim desenlerinin mevsimsel olarak %35 oranında değiştiğini tespit ederek dinamik analiz gerekliliğine dikkat çekmiştir. Beckel ve arkadaşları [8], yalnızca akıllı sayaç verilerini kullanarak hane halkı büyüklüğü, cihaz kullanımı ve yaşam tarzı gibi özellikleri %79 doğrulukla tahmin eden bir model geliştirmiştir. CER (2009-2010) kapsamında yürütülen Akıllı Sayaç Pilot Projesi ise İrlanda'da 5.000 haneden toplanan verilerle altı temel tüketici grubunu tanımlamış ve bu grupların davranışlarının farklı tarife stratejilerine nasıl tepki verdiğini analiz etmiştir. Bu veriler, enerji tasarrufu ve müşteri odaklı politikaların geliştirilmesi açısından stratejik bir referans noktası oluşturmuştur. Kwac ve arkadaşları (2014), saatlik enerji tüketim verilerini kullanarak hanehalkı enerji tüketimi segmentasyonu yapmıştır. Çalışmada, tüketicilerin enerji kullanım desenleri analiz edilmiş ve benzer tüketim alışkanlıklarına sahip gruplar belirlenmiştir. Bu segmentasyon, enerji şirketlerinin müşteri ilişkilerini geliştirmesi ve hedefli pazarlama stratejileri oluşturması açısından değerli bilgiler sunmuştur. Ayrıca, enerji hizmetlerinin kişiselleştirilmesi ve müşteri memnuniyetinin artırılması açısından önemlidir [9]. Siano (2014), talep yanıtı sistemlerinin kapsamlı bir incelemesini sunmuştur. Çalışmada, talep yanıtı programlarının enerji verimliliği ve şebeke esnekliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve bu programların enerji sistemlerinin daha verimli ve sürdürülebilir hale gelmesine katkı sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, tüketici davranışlarının analiz edilmesi ve yönlendirilmesi, enerji talebinin daha iyi yönetilmesine olanak tanımaktadır [10]. Chen ve arkadaşları (2015), Çin'de rüzgar enerjisi entegrasyonu için ısı enerji birleşim sistemlerinin esnekliğini artırmıştır. Çalışmada, birleşik ısı ve güç sistemlerinin esnekliğini artırmak için çeşitli stratejiler analiz edilmiş ve bu stratejilerin rüzgar enerjisi entegrasyonunu kolaylaştırdığı belirtilmiştir. Bu çalışma, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji sistemlerine entegrasyonunu artırmak için önemli katkılar sağlamaktadır [11]. Cominola ve arkadaşları (2015), akıllı su sayaçları verilerinin yönetimindeki zorlukları analiz etmiştir. Çalışmada, akıllı su sayaçlarından elde edilen verilerin analiz edilmesi ve bu verilerin su talebi modelleme ve yönetiminde kullanılması incelenmiştir. Bu çalışma, su kaynaklarının daha verimli ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesine katkı sağlamaktadır [12]. McLoughlin ve arkadaşları (2015), elektrik yük profili karakterizasyonu için kümeleme yaklaşımı geliştirmiştir. Çalışmada, akıllı sayaç verileri kullanılarak tüketicilerin elektrik kullanım desenleri analiz edilmiş ve benzer tüketim alışkanlıklarına sahip gruplar belirlenmiştir. Bu segmentasyon, enerji şirketlerinin müşteri ilişkilerini geliştirmesi ve hedefli pazarlama stratejileri oluşturması açısından değerli bilgiler sunmuştur. Ayrıca, enerji hizmetlerinin kişiselleştirilmesi ve müşteri memnuniyetinin artırılması açısından önemlidir [13]. Parag ve Sovacool (2016), üretici tüketici tabanlı elektrik piyasalarının karbon emisyonlarını %17 ile %22 oranında azaltabileceğini göstermiştir. Çalışmada, üretici tüketicilerin enerji üretimi ve tüketimi üzerindeki etkileri analiz edilmiş ve bu etkilerin enerji sistemlerinin daha sürdürülebilir hale gelmesine katkı sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, üretici tüketicilerin enerji piyasalarındaki rolü ve bu rolün enerji sistemlerinin esnekliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir [14]. Haben ve arkadaşları (2016), hane düzeyinde enerji tüketim tahmini için yeni bir hata ölçütü önermiştir. Çalışmada, yüksek çözünürlüklü elektrik tüketim verileri kullanılarak enerji tüketim tahminlerinin doğruluğunu artırmak için yeni bir hata ölçütü geliştirilmiştir. Bu ölçüt, enerji tüketim tahminlerinin daha doğru ve güvenilir olmasına

katkı sağlamaktadır [15]. Wang ve arkadaşları (2016), elektrik tüketim davranışlarının büyük veri uygulamaları için kümelemesini yapmıştır. Çalışmada, büyük ölçekli akıllı sayaç verileri kullanılarak tüketicilerin elektrik kullanım desenleri analiz edilmiş ve benzer tüketim alışkanlıklarına sahip gruplar belirlenmiştir. Bu segmentasyon, enerji şirketlerinin müşteri ilişkilerini geliştirmesi ve hedefli pazarlama stratejileri oluşturması açısından değerli bilgiler sunmuştur [16]. Zhou ve arkadaşları (2016), akıllı ev enerji yönetim sistemlerinin kapsamlı bir incelemesini sunmuştur. Çalışmada, akıllı mesken enerji yönetim sistemlerinin konsepti, yapılandırmaları ve programlama stratejileri analiz edilmiştir. Bu sistemlerin enerji verimliliği ve kullanıcı konforu üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve bu sistemlerin enerji sistemlerinin daha verimli ve sürdürülebilir hale gelmesine katkı sağladığı belirtilmiştir [17]. Al-Wakeel ve arkadaşları (2017), k-means tabanlı yük tahmini yöntemi geliştirmiştir. Çalışmada, akıllı sayaç verileri kullanılarak tüketicilerin elektrik kullanım desenleri analiz edilmiş ve benzer tüketim alışkanlıklarına sahip gruplar belirlenmiştir. Bu segmentasyon, enerji şirketlerinin müşteri ilişkilerini geliştirmesi ve hedefli pazarlama stratejileri oluşturması açısından değerli bilgiler sunmuştur. Ayrıca, enerji hizmetlerinin kişiselleştirilmesi ve müşteri memnuniyetinin artırılması açısından önemlidir [18]. Mesken tipi yük tahminine yönelik derin öğrenme tabanlı modeller, akıllı şebekelerin optimizasyonunda yüksek doğruluk sağlamaktadır. Shi ve arkadaşları [19], evsel elektrik tüketimini tahmin etmek amacıyla, havuzlama mekanizması entegre edilmiş özgün bir Derin Yinelenen Sinir Ağı (Recurrent Neural Network, RNN) yapısı önermiştir. Model, geleneksel RNN mimarilerinden farklı olarak çoklu havuzlama katmanlarıyla doğruluk artışı sağlamış ve yüksek çözünürlüklü zaman serisi verileriyle test edildiğinde anlamlı tahmin başarısı göstermiştir. Benzer şekilde Zheng ve arkadaşları [20], uzun-kısa vadeli bellek (Long Short-Term Memory, LSTM) tabanlı yinelenen sinir ağları ile akıllı şebekelerde yük tahminini ele almış ve LSTM'nin, yük verilerindeki uzun süreli bağımlılıkları öğrenme konusundaki üstünlüğünü vurgulamıştır. Bu çalışmaların ardından Chen ve arkadaşları [21], talep yanıtı uygulamaları bağlamında binalarda enerji talebi esnekliğini artırma yollarını sistematik olarak incelemiş; veri tabanlı kontrol stratejileri, kullanıcı davranışlarının modellenmesi ve bina otomasyon sistemleri gibi çok boyutlu çözümler sunmuştur. Bu üçlü katkı, bir yandan tahmin doğruluğunu artırırken diğer yandan enerji esnekliği potansiyelini maksimize eden yapay zeka destekli çözümlerin enerji sistemlerine entegrasyonunu temellendirmektedir. Wang ve arkadaşları [22], senkronize desen eşleştirme algoritmasıyla zaman serilerini sınıflandırarak %91.2 doğrulukla talep yanıtı uygulamaları için etkili kümeleme gerçekleştirmiştir. Zhang ve arkadaşları [23] ise mikro şebekelerde eşler arası enerji ticareti uygulamalarını incelemiş ve bu sistemin genel şebeke verimliliğini %18 oranında artırdığını ifade etmiştir. Bu tür yaklaşımlar, elektrikli araçların şebekeye entegre edilmesi için teknik ve operasyonel açıdan uygulanabilir çözümler sunmaktadır. Akıllı şebekelerde yapay zekâ uygulamalarının gelişimi, özellikle derin öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme tekniklerinin yaygınlaşmasıyla önemli ivme kazanmıştır. Zhang ve arkadaşları [24], derin öğrenme ve pekiştirmeli öğrenmenin enerji sistemlerinde kullanımına dair kapsamlı bir literatür incelemesi sunarak, bu yöntemlerin şebeke dengeleme, yük tahmini ve enerji ticareti gibi alanlardaki uygulama örneklerini değerlendirmiştir. Vercamer ve arkadaşları [25], akıllı sayaç verilerini kullanarak elektrik tüketicilerini kümelendirmek amacıyla dönüştürücü temelli bir model geliştirmiş ve bu yöntemin geleneksel kümeleme tekniklerine kıyasla daha anlamlı müşteri segmentasyonları sunduğunu göstermiştir. Zhang ve arkadaşları [26] ise, yük tahmini için kuantil regresyon sinir ağı yapısını iyileştirerek olasılıksal tahmin doğruluğunu artırmış ve farklı kuantil seviyelerinde daha güvenilir öngörüler elde etmiştir. Bununla birlikte, Kong ve arkadaşları [27], kısa vadeli mesken yükü tahmini amacıyla LSTM tabanlı bir RNN modeli tasarlamış ve zaman serisi verilerinde doğruluk, stabilite ve genelleme açısından başarılı sonuçlar raporlamıştır. Bu çalışmaları tamamlayıcı nitelikte olan Li ve arkadaşları [28], zaman serisi tahmininde dönüştürücü modellerinin yerellik avantajını artırmak ve bellek darboğazını aşmak için geliştirilmiş bir mimari önermiştir. Bu çok yönlü çalışmalar, hem müşteri davranışlarının daha hassas biçimde modellenmesini hem de yüksek çözünürlüklü enerji verilerinin işlenmesinde yapay zekâ tabanlı yaklaşımların etkinliğini ortaya koymaktadır. Elektrikli araç (EV) şarj yükü tahmini ve esnek enerji yönetimi, akıllı şebekelerin sürdürülebilirliğinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Zhu ve arkadaşları [29], EV şarj yükü tahmini için çeşitli derin öğrenme modellerini karşılaştırarak, LSTM ve evrişimli sinir ağı (Convolutional Neural Network, CNN) tabanlı mimarilerin doğruluk ve genelleme başarısını analiz etmiştir. Meteorolojik verilerin etkisini göstermek amacıyla, Irish Meteorological Service [30] gibi iklim veri kaynakları destekleyici unsur olarak kullanılmıştır. Zhang ve arkadaşları [31], enerji tahmini için zaman serisi dönüştürücü modelini

geliştirerek akıllı binalarda yüksek doğrulukla yük tahmini yapılabileceğini göstermiştir. Tüfekci ve Torriti [32], akıllı sayaç verileriyle hanelerin enerji esneklik potansiyelini nicel olarak değerlendirmiş ve tüketici segmentasyonu ile talep yanıtı etkileşimini ortaya koymuştur. Gao ve arkadaşları [33], evsel yük tahmini için dönüştürücü tabanlı bir derin öğrenme modeli önererek klasik yöntemleri önemli ölçüde geride bırakmıştır. Li ve arkadaşları [34], Gaussian Karışım Modellemesi (Gaussian Mixture Model, GMM) kullanarak sayaç verilerini kümelendirmiş ve veri desenlerine göre esnek segmentasyon sağlamıştır. Niu ve arkadaşları [35], entegre enerji sistemleri için kısa vadeli yük tahmininde dikkat mekanizmasıyla optimize edilmiş CNN çift yönlü kapılı tekrarlayan birim (Bidirectional Gated Recurrent Unit, Bi-GRU) modeli geliştirmiştir. Wang ve Wang [36], kısa vadeli güneş enerjisi tahmini için hibrit bir derin öğrenme modeli ile yenilenebilir kaynakların entegrasyonuna katkı sunmuştur. Zhou ve arkadaşları [37], dönüştürücü tabanlı uzun dizili zaman serisi (Long Sequence Time Series Forecasting, LSTF) tahmininde daha verimli bir dönüştürücü mimarisi olan 'Informer'ı önermiştir. Kudarihal ve arkadaşları [38], talep yanıtı uygulamaları için zaman serisi dönüştürücü modelinin performansını değerlendirmiştir. Akıllı sayaç verileri zaman serisi analizine tabi tutulmuş ve farklı derin öğrenme modelleri (LSTM, GRU, CNN vb.) kullanılarak enerji talebi tahmini yapılmıştır. Çalışma, modellerin doğruluk ve genelleme yeteneklerini karşılaştırarak, akıllı şebeke senaryosunda en uygun tahmin yöntemini belirlemeyi amaçlamıştır. Son olarak, Pentsos ve arkadaşları [39], mesken yük tahmini için dönüştürücü tabanlı hibrit bir çerçeve geliştirerek enerji verimliliğini artırıcı yönde güçlü sonuçlar elde etmiştir.

Bu çalışmalar, akıllı şebekelerde ileri seviye yapay zeka modellerinin hem operasyonel optimizasyon hem de sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sunduğunu ortaya koymaktadır. Yukarıda belirtilen literatür taramasına dayalı olarak, araştırmacıların elektrik yük profillerinin sınıflandırılması ve kısa vadeli enerji talep tahmini konularında önemli ilerlemeler kaydettiği görülmektedir. Öncelikle, k-means, bulanık k-means ve GMM gibi geleneksel kümeleme algoritmaları ile [13, 18, 34] tüketici yük profilleri ayrıştırılarak, esneklik potansiyelinin belirlenmesine katkı sağlanmıştır. Bununla birlikte, derin öğrenme tabanlı modellerin, özellikle kısa vadeli tahmin performansını artırmak için kullanıldığı ve yüksek doğruluk oranları sunduğu tespit edilmiştir [26, 27, 29, 35]. Dönüştürücü temelli modeller [25, 31, 33, 37-39] zaman serilerinde uzun bağımlılıkları modellemedeki üstünlüğüyle öne çıkarken, bu modellerin hata toleransı ve esneklik potansiyeli hesaplamaları açısından özellikle akıllı sayaç verileriyle başarılı sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür. Ayrıca, enerji talep esnekliğini artırmaya yönelik karar destek sistemlerinin geliştirilmesinde yapay zekâ tabanlı segmentasyon ve tahminleme yaklaşımlarının [21, 22, 24, 32, 38] veri güdümlü enerji politikalarının şekillenmesine katkı sunduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmalar, elektrik sistemlerinin dijitalleşmesi ve karbonsuzlaşma süreçleriyle bütünleşik olarak esnek, tahmine dayalı ve kullanıcı odaklı enerji yönetim modellerinin oluşturulmasında teknik ve metodolojik bir temel teşkil etmektedir.

Bu kapsamda bu çalışmanın temel amacı, akıllı sayaçlardan elde edilen zaman serisi verilerini kullanarak tüketici yük profillerini dönüştürücü tabanlı derin öğrenme modelleri ve olasılıksal kümeleme yöntemleriyle yüksek doğrulukla gruplandırmak, böylece talep tarafı yönetimi ve enerji esneklik potansiyeli analizleri için karar destek sağlayan, veri güdümlü bir segmentasyon yaklaşımı geliştirmektir.

3. DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN ENERJİ TÜKETİMİNDEKİ KARMAŞIK ZAMANSAL BAĞIMLILIKLARI YAKALAMADA ÖNEMİ (THE IMPORTANCE OF TRANSFORMERS TO CAPTURE COMPLEX TEMPORAL DEPENDENCIES IN ENERGY CONSUMPTION)

Dönüştürücü modeller, enerji tüketim verilerinde zaman içinde oluşan karmaşık bağımlılıkları yakalamada önemli bir rol oynamaktadır. Bu durum, özellikle modelin farklı zaman dilimleri arasındaki ilişkileri değerlendirmesine olanak tanıyan kendi kendine dikkat (self-attention) mekanizması sayesinde sağlanmaktadır. Kudarihal ve arkadaşları (2025) çalışması dikkate alındığında, dönüştürücü tabanlı modellerin özellikle uzun vadeli bağımlılıkları yakalama konusundaki üstünlüğü daha da belirginleşmektedir. Bu çalışmada, akıllı sayaç verilerine dayalı zaman serisi tahmini için LSTM, GRU ve CNN gibi çeşitli derin öğrenme mimarileri karşılaştırılmış, dönüştürücü tabanlı yapıların, tüketici talebindeki karmaşık örüntüleri daha başarılı biçimde modelleyerek tahmin doğruluğunu artırdığı gösterilmiştir. Dolayısıyla Ghasemi ve Tomsovic (2022) tarafından önerilen dönüştürücü yaklaşımı, Kudarihal ve arkadaşları (2025) tarafından yapılan kapsamlı karşılaştırmalı analizlerle desteklenmekte ve özellikle yüksek çözünürlüklü enerji tüketim tahmini bağlamında geleneksel modellere kıyasla

önemli bir performans avantajı sunduğu görülmektedir. Bu yaklaşım, dönüştürücülerin geleneksel modellerin gözden kaçırabileceği uzun vadeli bağımlılıkları ve ince tüketim eğilimlerini belirleyebilmesiyle talep tahmini doğruluğunu önemli ölçüde arttırmıştır. Genellikle doğrusal olmayan desenler ve yüksek değişkenlikle karakterize edilen büyük ölçekli akıllı sayaç verilerindeki karmaşık zamansal bağımlılıkları yakalamada başarılıdır. Ayrıca, dönüştürücü çerçeveleri içinde gömülü öğrenme tekniklerinin entegrasyonu, gerçek zamanlı performansı optimize ederek uyarlanabilir enerji yönetimi stratejilerini kolaylaştırmaktadır [37-39]. Geleneksel yöntemlerin aksine, dönüştürücüler, altta yatan tüketim davranışlarını otomatik olarak tanımlayan ve daha doğru ve sağlam tahminler sağlayan gömülü öğrenme tekniklerini kullanmaktadır. Tahminin ötesinde, dönüştürücü modelleri, esnek tüketici gruplarını belirlemek için akıllı sayaçlar tarafından yakalanan zengin, ayrıntılı verilerden yararlanan GMM gibi kümeleme yöntemleri aracılığıyla tüketici sınıflandırmasında da etkili olmuştur. Bu gruplar, enerji fiyatlarına yönelik değişen tüketim davranışlarını ve hassasiyetleri yansıtır ve böylece özel talep tarafı yönetimini destekler ve dağıtılmış enerji sistemlerinin genel verimliliğini arttırmıştır [34]. Dönüştürücülerin temel bileşenleri, özellikle öz dikkat mekanizmaları, hane halkı enerji verilerindeki tüketim dinamiklerini anlamak amacıyla gerekli olan uzun vadeli bağımlılıkların modellenmesini sağlamaktadır. Dönüştürücü mimarileri, yük profillerini sınıflandırarak esnek tüketici gruplarının belirlenmesini ve talep yanıt stratejilerinin hedeflenmesini sağlar. Bu yapı, hane düzeyinde enerji talebi esneklik analizini geliştirerek daha doğru tahminler ve özel talep tarafı yönetimi programları oluşturulmasına katkı sunar. Böylece dönüştürücüler, geleneksel yöntemlerin ötesine geçerek dağıtılmış enerji sistemlerinde verimliliği ve politika yapım süreçlerini güçlendirir [31, 33, 39].

Bu kapsamda çalışmada, akıllı sayaç verilerine dayalı zaman serisi analizlerinin uygulanabilirliğini ve modelin performansını test etmek amacıyla kullanılan açık kaynak Goiener veri seti, zaman serisi temelli elektrik tüketimi analizleri için oldukça kapsamlı ve yüksek nitelikli bir kaynak olup, akıllı sayaç verilerinin uzun dönemli ve detaylı biçimde kayıt altına alındığı ender çalışmalardan biridir. Türkiye'deki akademik çalışmalar açısından değerlendirildiğinde, bu veri setinin en önemli özelliği, 2014-2022 yıllarını kapsayan saatlik çözünürlükte farklı elektrik tüketim noktasına ait veriyi kapsamasıdır. Bu uzun zaman aralığı sayesinde, hem dönemsel tüketim örüntülerinin analizine olanak sağlanmakta hem de tarifelerdeki düzenleyici değişimlere karşı tüketici tepkilerinin incelenmesine elverişli doğal deney ortamları sunulmaktadır [5,6].

4. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

Derin öğrenmedeki son gelişmeler, özellikle de başlangıçta doğal dil işleme için geliştirilen dönüştürücü mimarileri, uzun menzilli bağımlılıkları ve karmaşık dizileri modellemede etkili ve verimlidir. Dönüştürücüler, öz dikkat mekanizmalarından yararlanarak akıllı sayaç verilerindeki zamansal ilişkileri etkili bir şekilde yakalamakta ve daha hassas talep tahmini ve enerji yönetimi stratejilerine olanak tanımaktadır [31,34,38]. GMM ise zaman serisi verilerindeki doğrusal olmayan dinamikleri modelleyebilmesi ve her veri noktasının bir kümeye ait olma olasılığını hesaplayabilmesi sayesinde, özellikle esnek tüketici grupları arasındaki zamansal varyasyonları ve davranışsal farklılıkları ayrıştırmada etkili bir yumuşak kümeleme yöntemidir. Bu çalışma bu metodoljilere dayanarak açık kaynak akıllı sayaç verileri ile tüketici davranışlarının anlaşılması ve enerji tüketim modellerinin belirlenmesi için farklı tüketici gruplarının enerji kullanım alışkanlıklarını ve tarifelendirme stratejilerine verdikleri tepkileri ortaya koymaktadır.

4.1. Veri Seti ve Ön İşleme (Dataset and Preprocessing)

Bu çalışmada, İspanya merkezli Goiener enerji kooperatifi tarafından sağlanan, açık erişimli yüksek çözünürlüklü elektrik tüketim verileri kullanılmıştır [5, 6]. Goiener açık veri havuzunda yer alan bu veri seti, 2014–2022 yılları arasında İspanya'nın farklı bölgelerindeki konutlardan akıllı sayaçlar aracılığıyla toplanan tüketim verilerinden oluşmaktadır. Veri seti, farklı mesken abonelerine ait 15 dakikalık aralıklarla ölçülmüş zaman serisi formatında bir yıllık tüketim değerlerini içermekte olup, tüketici davranışlarının dönemsel analizine anonimleştirilmiş kullanıcı kimlikleri ile olanak tanımaktadır. Zaman serisi modellemesi için Goiener veri havuzundan elde edilen dört ana veri seti kullanılmıştır: Ön işlem görmüş ham sayaç verileri (imp-pre. tzst), ara işlem çıktıları (imp-in.tzst), nihai işlenmiş veri kümesi (imp-post.tzst) ve abonelere ait demografik ve kontrat bilgilerini içeren meta veri kümesi (metadata.csv). Her kullanıcı için mesken tipi, konum bilgisi, abone tipi gibi ek bilgiler meta veri olarak sunulmuştur.

Ön işleme sürecinde, eksik veriler zamana duyarlı veri tamamlama (temporal imputation) yöntemiyle doldurulmuştur. Bu teknik, zaman serilerindeki eksik değerleri, önceki ve sonraki gözlemler arasındaki zamansal bağıntılara dayanarak istatistiksel veya makine öğrenmesi tabanlı modellerle tahmin ederek tamamlamayı amaçlamaktadır. Bu sayede, günlük ve haftalık tüketim örüntülerine uygun şekilde eksik değerlerin etkisi minimize edilmiş, ardından tüketim değerleri normalize edilmiştir. Ham verilerdeki eksik gözlemler doğrusal interpolasyon yöntemiyle giderilmiş ardından tüm zaman serileri, her bir abone için sabit zaman eksenine göre hizalanarak yeniden yapılandırılmıştır. Bu işlem sonrasında, z-puan normalizasyonu uygulanarak veri setindeki istatistiksel sapmalar dengelenmiş ve tüm örnekler eşit uzunlukta segmentlere ayrılmıştır.

Veri ön işleme sürecinin son aşamasında, her tüketiciye ait saatlik tüketim serisi üzerinden, gün içi ve hafta içi/hafta sonu ayrımında maksimum, minimum, ortalama, standart sapma, medyan, çeyrek değerler, talebin yoğun olduğu dönem, gece/gündüz tüketim oranı, yük eğimi gibi temel istatistiksel öznitelikler hesaplanmıştır. Bu öznitelikler hem tüketim örüntülerinin dağılım özelliklerini hem de davranışsal farklılıklarını temsil etmek üzere kullanılmış, ardından dönüştürücü modeline girdi olarak verilmiştir.

Veri seti, bölgesel coğrafi kapsayıcılık ve sektörel çeşitlilik açısından da yüksek nitelik taşımaktadır. İspanya'nın farklı eyaletlerinden toplanan veriler, kentsel ve kırsal bölgeleri temsil ederken, sektörel olarak ise mesken, kamu, ulaşım, ticaret, konaklama ve sanayi gibi tüm temel ekonomik faaliyet sınıfları yer almaktadır. Bu durum, hem mesken hem de ticari ve sanayi kullanıcılarının tüketim davranışlarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmek için güçlü bir temel oluşturmaktadır. Ayrıca, düşük, orta ve yüksek güç sözleşmeleri arasında dağılım gösteren abonelik türleriyle, tüketim düzeylerinin güç talebiyle olan ilişkisi ayrıntılı şekilde analiz edilebilmektedir. Anonimleştirilmiş ve yasal erişim izinleri çerçevesinde araştırma amacıyla sunulan bu veri seti, akıllı sayaç uygulamaları, zaman serisi sınıflandırma, enerji talep tahmini, politika etkisi analizi ve talep tarafı yönetimi çalışmaları için yüksek potansiyel sunmaktadır [6,7]. Ayrıca, veri seti enerji miktarları (günlük ortalama tüketim) ve enerji kullanım biçimleri (normalize edilmiş günlük yük eğrileri) olmak üzere iki boyutta ayrıştırılarak, önerilen dönüştürücü tabanlı gömülü öğrenme modeli ve GMM ile segmentasyon analizine uygun hale getirilmiştir.

4.2. Metot ve Parametreler (Method and Parameters)

Modelleme süreci Python programlama dili kullanılarak yürütülmüş ve zaman serisi verilerini temsil etmek amacıyla dönüştürücü tabanlı bir kodlayıcı (encoder) mimarisi yapılandırılmıştır. Kurulan mimari, zaman bağımlılığını dikkate almak üzere pozisyonel gömme (positional embedding), 8 başlı çoklu dikkat mekanizması (multi-head attention), 4 katmanlı kodlayıcı yapısı ve her katmanda 256 boyutlu gizil katmanlardan oluşmaktadır. Modelin eğitimi, Adam optimizasyon algoritması ile gerçekleştirilmiş olup, öğrenme oranı (learning rate) 0.0001, toplu işlem boyutu (batch size) 64 ve toplam eğitim döngüsü (epoch) sayısı 150 olarak belirlenmiştir. Eğitim sonucunda her kullanıcı için 128 boyutlu sabit uzunlukta gömülü vektör temsilleri elde edilmiştir. Bu temsiller, tüketici davranışlarını yüksek boyutlu temsiller aracılığıyla örüntüsel olarak ayırt etmeyi amaçlamaktadır.

Elde edilen bu temsiller, tam kovaryans matrisli ve beş bileşenli ($k = 5$) bir GMM ile olasılık temelli olarak kümelenmiştir. Kümeleme süreci, hem küme içi bütünlüğü artırmak hem de kümeler arası ayrışmayı maksimize etmek amacıyla parametrik olarak optimize edilmiştir. Segmentasyon sonuçları, sklearn. metrics modülünden elde edilen Silhouette skorlarıyla değerlendirilmiş ve yüksek doğruluk düzeyi doğrulanmıştır. Model eğitimi ve hesaplamalar, PyTorch ve Scikit-learn kütüphaneleri kullanılarak, yüksek işlem kapasiteli grafik işlemci (GPU) altyapısında yürütülmüştür.

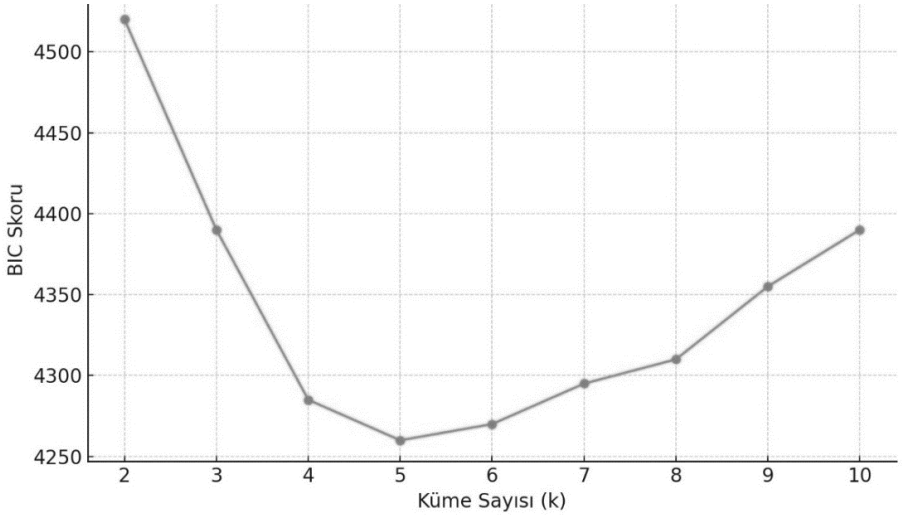
Bu bütüncül yöntemsel çerçeve, yalnızca geçmiş tüketim desenlerini analiz etmekle kalmayıp, aynı zamanda uzun dönemli davranışsal kalıpların istatistiksel olarak yakalanmasına da olanak tanımaktadır. Böylece, dağıtık enerji sistemlerinde müşteri segmentasyonu, bölgesel talep yanıtı planlamaları ve veri temelli dinamik fiyatlandırma stratejileri gibi enerji dönüşümünü destekleyen uygulamalar için ölçeklenebilir ve karar verici destekli çözümler sunmaktadır.

5. BULGULAR (FINDINGS)

Bu bölümde, dönüştürücü tabanlı zaman serisi modeli ile GMM'nin entegrasyonu sonucunda elde edilen analiz bulguları sunulmakta ve önerilen yöntemin tüketici segmentasyonu ve enerji tüketim örüntülerinin belirlenmesindeki başarımı değerlendirilmektedir.

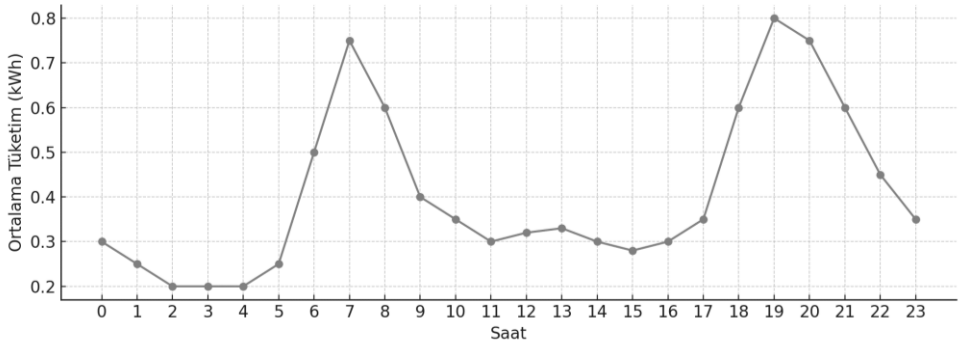
5.1. Ortalama Günlük Tüketim Profili (Average Daily Consumption Profile)

Bu çalışmada, davranışsal segmentasyon modeli kapsamında optimum küme sayısının belirlenmesinde Bayes Bilgi Kriteri (Bayesian Information Criterion, BIC) metriği kullanılmıştır. Farklı küme sayıları (k = 2-10) için hesaplanan BIC skorları karşılaştırılmış, en düşük BIC değerine sahip olan k = 5 modeli, aşırı uyum (overfitting) riskini minimize ederken modelin açıklayıcılığını da en üst düzeye çıkardığı için nihai segmentasyon yapısı olarak seçilmiştir. Bu doğrultuda, hem BIC hem de Silhouette metriklerine göre k=5 optimal küme sayısı olarak belirlenmiş ve GMM bu yapı ile nihai kümeleme modeli olarak uygulanmıştır. Sonuç olarak, en düşük BIC değerine sahip model, 5 küme ile en uygun yapı olarak seçilmiştir (Şekil 1). Bu yaklaşım, olasılık temelli GMM kümeleme sürecinin parametrik doğruluğunu ve yapısal tutarlılığını güçlendirmiştir. Böylece enerji tüketimi örüntülerinin beş temel davranış kümesinde toplandığı ve modelin bu segmentasyonla en iyi açıklamayı sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, küme içi homojenliğin ölçülmesinde Silhouette skoru da değerlendirilmiş ve elde edilen ortalama Silhouette değeri 0.65 ile yüksek ayrışma performansı doğrulanmıştır.



Şekil 1: GMM küme sayısına göre BIC skorları (BIC scores according to the number of GMM clusters.)

Şekil 2'de, Goiener açık veri setinden elde edilen mesken tipi kullanıcıların dönüştürücü tabanlı zaman serisi modeliyle analiz edilen ortalama saatlik elektrik tüketim profili sunulmaktadır. Sabah ve akşam saatlerinde belirgin tüketim tepe noktaları gözlemlenmekte olup, bu saat aralıkları enerji esnekliği açısından kritik yük kaydırma fırsatlarını işaret etmektedir.



Şekil 2: Mesken tipi tüketiciler için saatlik ortalama elektrik tüketim profili (Hourly average electricity consumption profile for residential consumers.)

Şekil 2'de görüldüğü gibi, ortalama günlük tüketim eğrisinde sabah saatlerinde (özellikle 06:00–09:00 arası) ve akşam saatlerinde (18:00–22:00) belirgin tepe noktaları gözlemlenmiştir. Talep yoğununluğunun sabah saatlerinde 07:00–08:00 saat aralığında, akşam saatlerinde ise özellikle 19:00–20:00 saatleri arasında yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Bu eğilim, mesken tipi kullanıcıların gündelik yaşam rutinleriyle yakından ilişkilidir. Gece 01:00–05:00 saatleri arasında ise tüketimin baz yük seviyesinde seyrettiği görülmektedir.

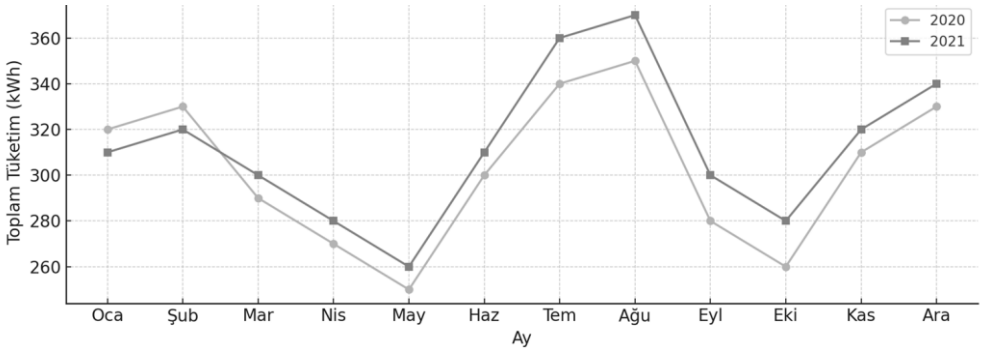
Bu bulgu, hem mesken kullanıcılarının davranışsal örüntülerini yansıtan önemli bir gösterge hem de

talep tarafı yönetimi stratejileri açısından yüksek öneme sahiptir. Sabah ve akşam olmak üzere iki ayrı yoğun tüketim periyodunun bulunduğu çift tepe yük karakteristiği, yük kaydırma (demand shifting) potansiyelinin en yüksek olduğu zaman aralıklarının sabah ve akşam saatlerine karşılık geldiğini göstermektedir. Bu saat dilimlerinin enerji esnekliği stratejilerinde hedeflenmesi, şebeke üzerindeki talep yoğunluğu baskısının azaltılmasına katkı sağlayabilir [27, 32, 40].

Dönüştürücü modelinin sağladığı uzun menzilli bağımlılıkları öğrenme kabiliyeti sayesinde bu eğrinin hassas biçimde yakalanabildiği, GMM'nin esnek kümeleme yapısıyla ise bu eğilimlerin farklı tüketici segmentlerinde değişkenlik gösterebildiği diğer grafiklerle birlikte değerlendirilmiştir. Silhouette skoru analizleri de bu ayrışımın yapay olarak değil, veri içi örüntülere dayalı olduğunu göstermiştir.

5.2. Yıllık Tüketim Eğilimleri (Annual Consumption Trends)

Şekil 3'te sunulan yıllık tüketim profili, Goiener açık veri setinden elde edilen mesken tipi tüketicilere/hanehalkına ait 2020 ve 2021 yıllarını kapsayan saatlik elektrik tüketim verilerinin aylık ortalamalara dönüştürülmesiyle oluşturulmuştur.



Şekil 3. 2020 ve 2021 yıllarında aylık bazda ortalama mesken tipi elektrik tüketim eğilimleri (Monthly average residential electricity consumption trends for 2020 and 2021.)

Şekil 3'te de görüldüğü gibi soğutma ihtiyacına bağlı olarak yaz (Temmuz-Ağustos) ve ısıtma ihtiyacına bağlı olarak kış (Aralık-Şubat) aylarında belirgin tüketim artışları görülmekte, tarife değişikliklerinin etkileri karşılaştırmalı biçimde izlenebilmektedir. Zaman serisi analizine konu olan bu veriler, önerilen veri ön işleme prosedürü kapsamında eksik veri tamamlama, temizleme ve z-norm normalizasyon adımlarından geçirilmiştir. Her bir zaman serisi, tüketim miktarı ve kullanım biçimi açısından sabit boyutlu vektör temsillerine dönüştürülmüş ve dönüştürücü mimarisi ile zaman içi örüntüler çıkarılmıştır.

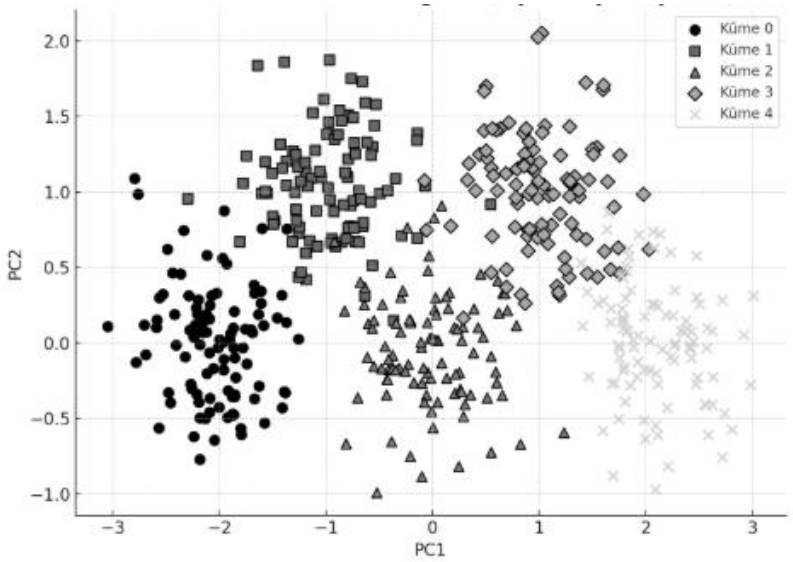
Özellikle 2020 yılına ait verilerde, pandemi etkisiyle hane içi enerji kullanımının artması sonucu mesken tüketiminde yaklaşık %8 oranında bir artış tespit edilmiştir. 2021 yılında ise tarifelerdeki düzenleyici değişikliklere bağlı olarak, yılın ikinci yarısında tüketime dair farklılaşmalar (Ağustos ve Kasım aylarında artış eğilimleri) gözlemlenmiştir. Grafik üzerinde de görüldüğü üzere, 2021 yaz aylarında 2020'ye kıyasla daha yüksek tüketim değerlerine ulaşılmıştır.

Bu bulgular, yalnızca davranışsal değil aynı zamanda çevresel/dışsal (pandemi, fiyat düzenlemesi/tarifeler) faktörlerin de tüketim örüntüleri üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu yönüyle, önerilen dönüştürücü tabanlı modelin yalnızca tüketim temelli dinamikleri değil, aynı zamanda çevresel etkenleri de öğrenme kapasitesi sunduğu anlaşılmaktadır. GMM kümeleme ile bütünleştirilen segmentasyon, bu dönemsel varyasyonlara farklı kullanıcı kümelerinde nasıl tepkiler verildiğini ayrıştırmada da etkin biçimde kullanılmıştır.

5.3. Gaussian Karışım Modeli Kümeleme Sonuçları (Gaussian Mixture Model Clustering Results)

Bu çalışmada uygulanan gözetimsiz öğrenme mimarisi kapsamında, her bir tüketiciye ait zaman serisi verileri daha önce belirtildiği gibi çok aşamalı ön işleme sürecinden geçirilmiş, ardından zaman tabanlı istatistiksel öznitelikler ve stokastik göstergeler çıkarılarak sabit boyutlu vektör temsillere dönüştürülmüştür. Bu temsiller, dönüştürücü modelinin dikkat mekanizmasına dayalı olarak öğrenilmiş, ardından elde edilen

yüksek boyutlu gömülü vektörler, Temel Bileşen Analizi (Principal Component Analysis, PCA) yöntemiyle iki boyuta indirgenmiştir. Son aşamada, GMM ile kümelere ayrılmıştır.



Şekil 4. Dönüştürücü modelinden elde edilen gömülü tüketici vektörlerinin PCA ile 2 boyuta indirgenmesi ve GMM ile kümelenmesi sonucu oluşan tüketici kümeleri (Consumer clusters formed by reducing embedded consumer vectors obtained from the transformer model to two dimensions using PCA and clustering them with GMM.)

Şekil 4'te sunulan dağılım grafiğinde, beş farklı tüketici kümesinin PCA düzlemindeki konumları görselleştirilmiştir. Kümeler, PC1 ve PC2 düzlemlerinde birbirinden ayırt edilebilir bölgelere dağılmış olup, bu da gömülü temsillerin tüketici davranışlarındaki varyasyonları başarılı şekilde yansıttığını göstermektedir. Gözlemler, küme içi yoğunlaşmanın yüksek, kümeler arası ayrışmanın ise belirgin olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, GMM'nin yumuşak sınırlı yapısı sayesinde, sınırda konumlanan bireylerin melez tüketim özellikleriyle modellenmesini de mümkün kılmıştır. PCA düzleminde bazı kümelerin (Küme 2 ve Küme 4) örtüşmesi, bu kullanıcı gruplarının benzer saatlik tüketim desenlerine sahip olduğunu ve aralarında davranışsal geçişkenlik bulunduğunu göstermektedir. Bu durum, GMM'nin olasılık temelli yapısı gereği kullanıcıların birden fazla kümeye ait olabilme olasılığını yansıtmakta ve yük profili tabanlı segmentasyonun zamansal belirsizliklerini doğal biçimde modellemektedir.

GMM kümeleme yöntemiyle belirlenen bu grupların karakteristikleri ve enerji esnekliği potansiyelleri Tablo 1'de detaylı biçimde özetlenmiştir. PCA düzleminde belirgin şekilde ayrışan bu kümeler, dönüştürücü modelinden elde edilen gömülü temsillerin farklı tüketim profillerini yüksek başarıyla yansıttığını göstermektedir.

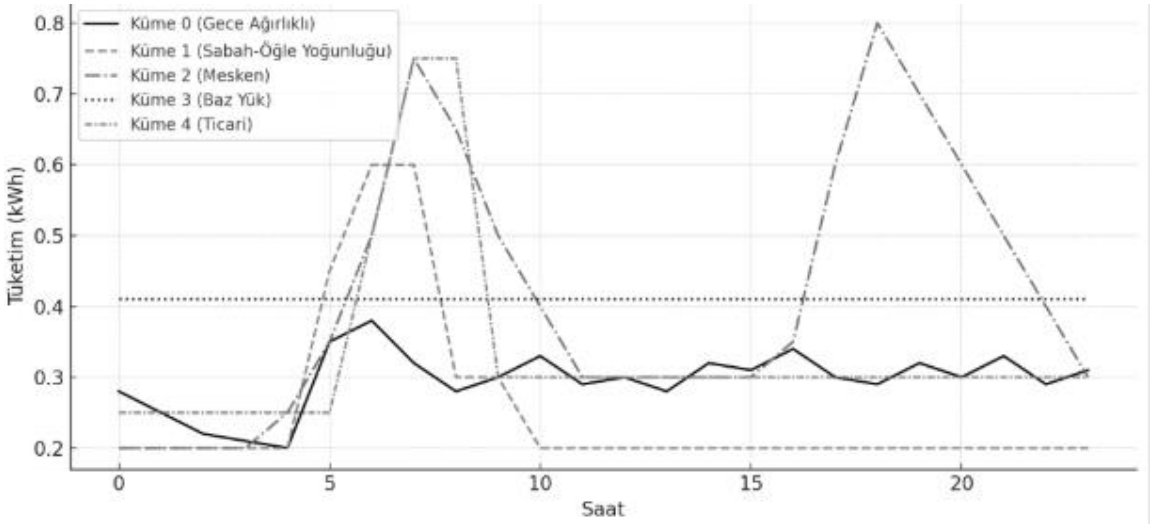
Tablo 1, Şekil 4 ve Şekil 5'teki kümelere karşılık gelen kullanıcı gruplarının davranışsal özelliklerini ve talep tarafı yönetimi bağlamındaki potansiyel esnekliklerini sınıflandırarak, her bir grubun enerji yönetimi stratejilerinde nasıl konumlandırılabileceğine dair temel bir rehber sunmaktadır.

Tablo 1. Enerji Tüketicisi Esneklik Küme Tanımları, Davranışsal Özellikleri ve Esneklik Potansiyelleri
(Energy consumer flexibility cluster definitions, behavioral characteristics, and flexibility potentials)

Küme	Davranışsal Özellikler	Esneklik Potansiyeli
Küme 0	Geceleri artan, gündüzleri düşük tüketim düzeyine sahip profil. Olasılıkla sanayi dışı, gece açık olan ticari işletmelere ait.	**Düşük** -Tüketim deseninin sabit olmayışı ve geceye kaymış olması nedeniyle esnekliğe uygun değildir.
Küme 1	Gündüz saatlerinde yoğun tüketim gösteren, sabah ve öğle arasında belirgin çift talep yoğunluğu oluşturan kullanıcı profili. Genellikle kamu ve hizmet sektörü ile ilişkilidir.	**Orta-**Talebin yoğun olduğu saatler öngörülebilir olup, belirli senaryolarda esneklik sağlanabilir.
Küme 2	Tipik mesken tipi kullanıcı profili. Sabah (07:00–09:00) ve akşam (18:00–22:00) saatlerinde belirgin çift tepe yük göstermektedir.	**Yüksek-**Talebin yoğun olduğu saatler dışında tüketimin düşük olması, yük kaydırma potansiyelini artırmaktadır.
Küme 3	Gün boyu sabit ve yüksek tüketim düzeyine sahip baz yük profili. 24 saat çalışan endüstriyel tesisleri temsil etmektedir.	**Düşük-**Sürekli yüksek tüketim nedeniyle esneklik kapasitesi sınırlıdır.
Küme 4	Öğle saatlerinde belirgin tüketim artışı gösteren kullanıcı grubu. Büyük ihtimalle restoran, kafe gibi gündüz açık ticari işletmeleri kapsamaktadır.	**Orta/Yüksek-**Talebin yoğun olduğu saatlerin kısa süreli ve zamana duyarlı oluşu, müdahale edilerek esneklik elde edilmesini mümkün kılar.

5.4. Küme Bazlı Ortalama Tüketim Profilleri
(Cluster Based Average Consumption Profiles)

Zaman serisi analizine dayalı olarak oluşturulan Şekil 5, GMM ile segmentasyonu yapılan beş farklı tüketici kümesinin ortalama saatlik tüketim profillerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Şekil 5, Goiener veri havuzundan elde edilen ve zaman serisi modeline entegre edilen vektör temsillerden GMM ile elde edilen kümeler üzerinden üretilmiştir. Her bir küme için tüketici profilleri, saatlik bazda normalize edilmiş yük eğrileri kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. GMM ile kümelenmiş tüketici gruplarına ait ortalama saatlik elektrik tüketim profilleri (Average hourly electricity consumption profiles for consumer groups clustered by GMM)

Bulgular, kümeler arasında belirgin davranışsal farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur:

- **Küme 0 (Gece Ağırlıklı)**: Gün boyunca düşük seyreden tüketim, gece saatlerinde belirgin bir yükseliş göstermektedir. Bu profil, muhtemelen gece çalışan ticari kullanıcıları veya sanayi dışı özel işletmeleri temsil etmektedir.
- **Küme 1 (Sabah-Öğle Çift Talep Yoğunluğu)**: Sabah 07:00–10:00 ve öğle 11:00–13:00 saatlerinde çift talep yoğunluğu oluşturan, günün diğer saatlerinde ise görece durağan bir tüketime sahip kullanıcıları içermektedir.

Genellikle kamu ve özel sektör/hizmet sektörü ile ilişkilidir.

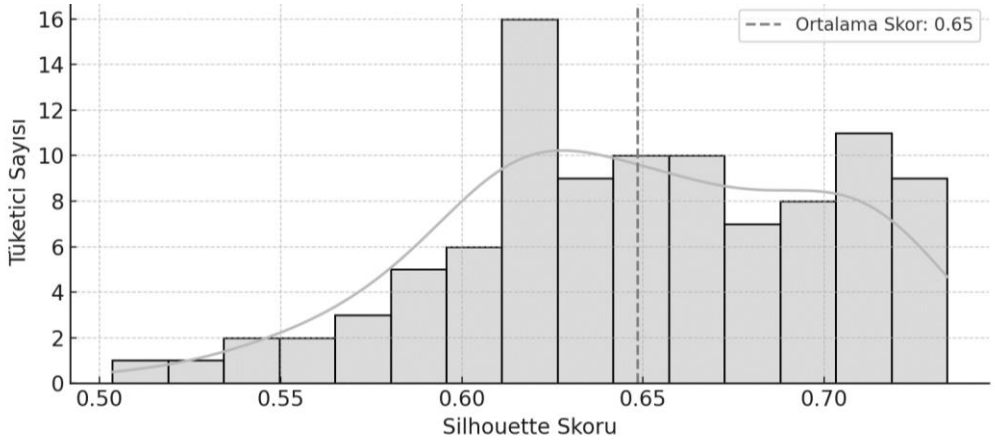
- **Küme 2 (Mesken Profili)**: Sabah ve akşam saatlerinde (07:00–09:00, 18:00–22:00) belirgin çift tepe yapan klasik mesken tüketici profili. Gündüz ve gece tüketimi düşüktür.
- **Küme 3 (Baz Yük - 24 Saat Çalışan Tesisler)**: Tüm gün boyunca sabit ve yüksek tüketim düzeyine sahip, esneklik potansiyeli sınırlı olan kullanıcıları temsil eder. Bu kümede değişkenlik çok azdır.
- **Küme 4 (Öğle Talep Yoğunluğu- Ticari Profil)**: Özellikle 10:00–14:00 saatleri arasında yoğunlaşan talep yoğunluğuyla karakterize edilmiştir. Restoran, kafe gibi gündüz aktif ticari işletmelerden oluşmaktadır.

Özetle, bu davranışsal ayrımlar, klasik ortalama tüketim eğrisinin gizleyebileceği önemli farklılıkları açığa çıkarmaktadır. Ayrıca, sabah ve akşam saatlerinde çift talep yoğunluğu yapısına sahip gruplar, yük kaydırma potansiyelinin en yüksek olduğu kümeler arasında yer almaktadır. Esnek zaman pencereleri tanımlanabilir ve talep tarafı yönetimi açısından hedeflenebilir hale getirilebilir. Öte yandan, gün boyunca sabit ve yüksek tüketim gösteren kullanıcılar, baz yük karakteristiği taşıdığından düşük esneklik potansiyeline sahiptir. Elde edilen bu segmentasyon yapısı, enerji verimliliği politikalarının kullanıcı bazlı tasarlanmasına, dinamik fiyatlandırma stratejilerinin ise daha isabetli ve kişiselleştirilmiş senaryolarla şekillendirilmesine imkân tanımaktadır.

Bu bağlamda, zaman serisi temelli vektör temsillerin kullanıcı davranışlarını istatistiksel olarak doğru şekilde yansıttığı; GMM algoritması ile gerçekleştirilen olasılık temelli kümelenmenin ise bu temsilleri tutarlı ve anlamlı gruplara ayrıştırmada etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

5.5. Silhouette Skoru Dağılımı (Silhouette Score Distribution)

Segmentasyon kalitesini değerlendirmek amacıyla, GMM ile oluşturulan her bir tüketici kümesi için Silhouette skorları hesaplanmış ve bu skorların dağılımı Şekil 6'da sunulmuştur. Silhouette skoru, her bir bireyin ait olduğu kümeye olan yakınlığı ile diğer kümelere olan uzaklığını kıyaslayarak, küme içi tutarlılığı ve kümeler arası ayrışmayı değerlendiren bir metriktir. Skorlar -1 ile +1 arasında değişmekte olup, pozitif değerlere yakın sonuçlar başarılı bir kümelenmeyi temsil eder. Tüketici Sayısı ekseni, her bir Silhouette skoru aralığında kaç tüketicinin yer aldığını göstermektedir.



Şekil 6. GMM kümeleri için bireysel tüketicilere ait Silhouette skorlarının dağılımı (Ortalama Skor = 0.65) (Silhouette score distribution for individual consumers within GMM clusters (Average Score = 0.65))

Şekilde görüldüğü üzere, tüm kullanıcılar için hesaplanan Silhouette skorlarının dağılımı genel olarak pozitif ve sağa çarpık bir yapı sergilemektedir. Ortalama Silhouette skoru 0.65 olarak hesaplanmış, bu değer, kümelerin hem iç tutarlılığa sahip olduğunu hem de aralarında anlamlı farklar olduğunu göstermektedir. Kullanıcıların büyük çoğunluğu 0.60-0.75 aralığında skorlar almış olup, bu aralık yüksek kaliteli kümelenmenin göstergesi kabul edilmektedir.

Özellikle Küme 2 (mesken profili) ve Küme 4 (öğle saatlerinde yoğunlaşan ticari kullanıcılar) yüksek ortalama skorlar sergilemiştir. Bu durum, bu kümelerin davranışsal olarak hem net ayrıştığını hem de içsel olarak homojen olduğunu

göstermektedir. Sınırda konumlanan az sayıdaki bireyin ise melez davranış sergilemesi veya farklı kümelere benzerlik taşıması olasıdır.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmanın ortaya koyduğu bulgular, dönüştürücü tabanlı zaman serisi modellemesi ile GMM temelli olasılık kümeleme yönteminin entegrasyonunun, enerji tüketim verilerinde davranışsal segmentasyon açısından yalnızca sezgisel değil, aynı zamanda istatistiksel olarak da güçlü bir yapı sunmaktadır. Özellikle, dönüştürücü mimarisinin uzun dönemli zamansal bağımlılıkları modelleyebilme kapasitesi sayesinde elde edilen yüksek boyutlu gömülü tüketici temsilleri, GMM'nin olasılıksal sınıflama yapısıyla birleştiğinde, klasik kümeleme yaklaşımlarının ötesinde çok boyutlu ve davranışa duyarlı segmentasyonlar üretilebilmiştir. Bu durum, Silhouette skorlarının dağılımında da net bir şekilde gözlenmiş; yüksek ortalama skor (0.65) ve pozitif yığılma, kümelerin hem içsel tutarlılığa sahip olduğunu hem de ayrıştırıcı nitelikte segmentler ortaya koyduğunu kanıtlamıştır. Böylece, önerilen metodoloji yalnızca literatürdeki teknik boşlukları doldurmakla kalmamış, aynı zamanda tüketici örüntülerinin modellenmesinde yüksek doğruluk ve temsil gücü sağlamıştır.

Elde edilen bu bütüncül analiz çerçevesi, enerji talep yönetimi, esneklik piyasası tasarımı ve dinamik tarifelendirme stratejileri açısından önemli pratik çıkarımlar sunmaktadır. Özellikle çift talep yoğunluklu tüketim karakterine sahip grupların (Küme 2) hedeflenmesi, yük kaydırma müdahalelerinin etkisini maksimize edebilirken, sabit ve yüksek baz yüke sahip grupların (Küme 3) esneklik dışında tutulması şebeke planlaması açısından daha uygun olabilir. Ayrıca bu metodoloji, yalnızca geçmiş tüketime dayalı segmentasyon sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda uzun dönemli izleme ve politika etkisi analizleri için de uygulanabilir bir altyapı sunmaktadır. Literatürde ilk kez, açık kaynaklı Goiener veri seti ile dönüştürücü ve GMM birleşimi kullanılarak davranışsal modelleme gerçekleştirilmiş olup, bu yaklaşımın farklı ülke ve sektör verilerine de kolaylıkla uyarlanabileceği değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, çalışma hem teknik kapasite hem de politika etkisi açısından enerji sistemlerinin dijitalleşme vizyonuna doğrudan katkı sağlamaktadır.

Çalışmada önerilen hibrit model, yalnızca bireysel tüketici davranışlarını analiz etmekle kalmayıp, dağıtık enerji sistemlerinde artan üretici-tüketici profilinin modellenmesine olanak tanıyan çok boyutlu bir segmentasyon altyapısı da sunmaktadır. Literatürde nadir olarak karşılaşılan biçimde, bu çalışmada dönüştürücü mimarisine dayalı zaman serisi temsilleri ile olasılık temelli GMM kümeleme entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu yapı, hem istatistiksel güvenilirlik hem de davranışsal açıklayıcılık açısından klasik segmentasyon yaklaşımlarına kıyasla daha üstün performans ortaya koymuştur. Özellikle, esnek enerji kullanıcılarının ayrıştırılmasında sağladığı doğruluk, dağıtık enerji sistemleri ve talep yanıtı stratejileri açısından önemli bir uygulama potansiyeli sunmaktadır. Bu kapsamda, esnek tüketici gruplarının ayrıştırılması, yerel üretim-tüketim dengelemesi, mikro şebeke yönetimi ve enerji topluluklarının tasarımı açısından stratejik bir araç niteliğindedir. Gelecek çalışmalarda, bu segmentasyon mimarisinin, zaman serisi tabanlı ileri düzey enerji tüketim tahmin algoritmaları ile birleştirilerek, enerji yönetim sistemlerinde öngörücü karar destek katmanlarının güçlendirilmesi önemlidir. Özellikle, bu modelin, NoSQL, zaman serisi optimizasyonlu veri ambarları tabanlı yüksek çözünürlüklü tüketici verilerinin yer aldığı ilişkisel ve zaman serisi tabanlı veritabanlarıyla entegre biçimde çalıştırılması hem işlem verimliliğini artıracak hem de gerçek zamanlı müdahale olanaklarını geliştirecektir. Ayrıca, segment bazlı tüketici verilerinin mahremiyet, güvenlik ve erişim protokollerine uygun şekilde yönetilmesi için dağıtık veritabanı sistemleri ve yerelleştirilmiş uç bilişim veri işleme tekniklerinin devreye alınması, düzenleyici ve operasyonel gereksinimlerin karşılanması açısından kritik önemdedir. Politika geliştirme boyutunda ise, önerilen davranış temelli segmentasyon çıktılarının, dinamik tarife senaryoları, dağıtık üretim teşvikleri ve şebeke dengeleme stratejileriyle entegre edilerek, coğrafi ve sosyo teknik farklılıklara duyarlı veri güdümlü enerji politikalarının şekillendirilmesine katkı sunacaktır.

Önerilen metodolojinin farklı iklim ve tarife bölgelerine uygulanması, segment bazlı politika etkisi analizi ve gerçek zamanlı talep tarafı yönetimi kontrol sistemleri ile entegrasyonu geliştirilebilir. Ayrıca, literatürde eksikliği hissedilen mesken içi cihaz kullanımı/akıllı sayaç verilerinin gömülü modellemede öznitelik olarak kullanılması, tüketici davranışının daha bütüncül ve nedensel şekilde modellenmesini de sağlayacaktır.

ARAŞTIRMANIN SINIRLILIKLARI (LIMITATIONS OF THE STUDY)

Bu çalışmada önerilen dönüştürücü tabanlı zaman serisi modellemesi ve GMM temelli olasılıksal kümeleme yaklaşımı, tüketici segmentasyonu açısından yüksek düzeyde ayırt edicilik sunmakla birlikte, çeşitli yapısal ve uygulamaya dönük sınırlamalar içermektedir. Kullanılan Goiener veri seti yalnızca mesken tipi tüketicilere ait sınırlı bir coğrafi bölgeyi temsil ettiğinden, modelin farklı kullanıcı gruplarına ve farklı tarife yapılarına uygulanabilirliği ampirik olarak test edilmemiştir. Ayrıca, GMM yönteminin doğrusal varsayımlara dayalı doğası, ani yük değişimleri ve senkronize olmayan davranış örüntülerinin modellenmesinde yetersiz kalabilir. Dönüştürücü tabanlı modellerin yüksek hesaplama maliyetleri ve veri yoğunluğu gereksinimi, özellikle düşük donanım kapasiteli dağıtık enerji sistemlerinde gerçek zamanlı uygulamalara entegrasyonunu zorlaştırmaktadır. Bu kapsamda, zaman serisi verilerinin yüksek frekansta işlenmesi, ölçeklenebilir ve sorgu optimizasyonuna uygun veri tabanı altyapılarının geliştirilmesini gerektirmektedir.

Ayrıca, modelleme sürecinde tüketici davranışlarını etkileyebilecek sosyo-demografik öznitelikler, yaşam tarzı faktörleri ve mesken içi cihaz kullanımı/akıllı sayaç gibi açıklayıcı değişkenler veritabanında yer almaması nedeniyle çalışma dışında bırakılmış, bu durum segmentasyon çıktılarının nedensel analiz kapasitesini sınırlamıştır. Bu eksiklik, kullanıcı profillerinin daha bütüncül bir şekilde modellenebilmesi için davranışsal anket verilerinin, mobilite desenlerinin ve akıllı cihaz etkileşimlerinin sisteme entegre edilmesini gerektirmektedir.

Gelecek çalışmalarda, farklı coğrafi bölgelerden ve çeşitli tüketici kategorilerinden elde edilecek zenginleştirilmiş veri kümeleri ile modelin genellenebilirliği değerlendirilmeli, ayrıca federatif öğrenme, dikkat mekanizmaları ve çok görevli öğrenme gibi gelişmiş yapay zekâ teknikleriyle hem bireysel hem de bölgesel düzeyde daha hassas esneklik sınıflandırmaları yapılması hedeflenmelidir. Bu doğrultuda geliştirilecek yeni modeller, enerji dönüşümünün dijitalleşme ve talep tarafı katılımı ekseninde yönlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

Bu makalenin yazarı çalışmada kullandığı materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan eder.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHOR'S CONTRIBUTIONS)

***Zühre AYDIN*:** Metodolojiye yönelik geliştirmeyi sağlamış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Author developed the methodology, analyzed the results, and carried out the manuscript writing.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Figueiredo, V., Rodrigues, F., Vale, Z., Gouveia, J. B. (2005). An electric energy consumer characterization framework based on data mining techniques. IEEE Transactions on Power Systems, 20(2), 596-602. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.846234.

[2] Chicco, G., Napoli, R., Piglione, F. (2006). Comparisons among clustering techniques for electricity customer classification. IEEE Transactions on Power Systems, 21(2), 933-940. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.873122

[3] Commission for Energy Regulation (CER). (2009-2010). CER Smart Metering Project– Electricity Customer Behaviour Trial (1st ed.). Irish Social Science Data Archive. SN: 0012-00.

[4] Palensky, P., Dietrich, D. (2011). Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 7(3), 381-388. https://doi.org/10.1109/TII.2011.2158841

[5] Quesada, C., Astigarraga, L., Merveille, C., Borges, C. E. (2024). An electricity smart meter dataset of Spanish households: insights into consumption patterns. Scientific Data, 11(1), 59.

[6] Granja, C. Q., Hernández, C. E. B., Astigarraga, L., Merveille, C. (2023). GoiEner smart meters

raw data. GoiEner smart meters raw data.https://zenodo.org/records/7362094

[7] Albert, A., Rajagopal, R. (2013). Smart meter driven segmentation: What your consumption says about you. IEEE Transactions on Power Systems, 28(4), 4019-4030. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2266122

[8] Beckel, C., Sadamori, L., Staake, T., Santini, S. (2014). Revealing household characteristics from smart meter data. Energy, 78, 397-410. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.025

[9] Kwac, J., Flora, J., Rajagopal, R. (2014). Household energy consumption segmentation using hourly data. IEEE Transactions on Smart Grid, 5(1), 420-430. https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2278477

[10] Siano, P. (2014). Demand response and smart grids, A survey. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 30, 461-478. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.022

[11] Chen, X., Kang, C., O'Malley, M., Xia, Q., Bai, J. (2015). Increasing the flexibility of combined heat and power for wind power integration in China: Modeling and implications. IEEE Transactions on Power Systems, 30(4), 1848-1857. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2356796

[12] Cominola, A., Giuliani, M., Piga, D., Castelletti, A., Rizzoli, A. E. (2015). Benefits and challenges of using smart meters for advancing residential water demand modeling and management. Environmental Modelling Software, 72, 198-214. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.07.012

[13] McLoughlin, F., Duffy, A., Conlon, M. (2015). A clustering approach to domestic electricity load profile characterisation using smart metering data. Applied Energy, 141, 190-199. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.039

[14] Parag, Y., Sovacool, B. K. (2016). Electricity market design for the prosumer era. Nature Energy, 1(4), 16032. https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.32

[15] Haben, S., Ward, J., Greetham, D. V., Singleton, C., Grindrod, P. (2016). A new error measure for forecasts of household-level, high resolution electrical energy consumption. International Journal of Forecasting, 32(4), 1058-1072. https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2016.02.005

[16] Wang, Y., Chen, Q., Kang, C., Xia, Q. (2016). Clustering of electricity consumption behavior dynamics toward big data applications. IEEE Transactions on Smart Grid, 7(5), 2437-2447. https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2547995

[17] Zhou, B., Li, W., Chan, K. W., Cao, Y., Kuang, Y., Liu, X., Wang, X. (2016). Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 61, 30-40. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.047

[18] Al-Wakeel, A., Wu, J., Jenkins, N. (2017). k-means based load estimation of domestic smart meter measurements. Applied Energy, 194, 333-342. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.046

[19] Shi, H., Xu, M., Li, R. (2017). Deep learning for household load forecasting—A novel pooling deep RNN. IEEE Transactions on Smart Grid, 8(5), 2421-2430. https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2682342

[20] Zheng, J., Xu, C., Zhang, Z., Li, X. (2017). Electric load forecasting in smart grids using long-short-term-memory based recurrent neural network. Proceedings of the 51st Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS). https://doi.org/10.1109/CISS.2017.7926111

[21] Chen, Y., Xu, P., Gu, J., Schmidt, F., Li, W. (2018). Measures to improve energy demand flexibility in buildings for demand response (DR): A review. Energy and Buildings, 177, 125-139. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.003

[22] Wang, F., Li, K., Liu, C., Mi, Z., Shafie-khah, M., Catalão, J. P. (2018). Synchronised pattern matching based energy time series classification for demand response applications. Applied Energy, 232, 603-614. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.188

[23] Zhang, C., Wu, J., Zhou, Y., Cheng, M., Long, C. (2018). Peer-to-peer energy trading in a microgrid. Applied Energy, 220, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.010

[24] Zhang, D., Han, X., Deng, C. (2018). Review on the research and practice of deep learning and reinforcement learning in smart grids. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 4(3), 362-370. https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2018.00560

[25] Vercamer, D., Steurtewagen, B., Van den Poel, D., Vermeulen, F. (2018). A transformer-based approach for electricity consumer clustering using smart meter data. Energy, 114, 1089-1100. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.073

[26] Zhang, W., Quan, H., Srinivasan, D. (2019). An improved quantile regression neural network for probabilistic load forecasting. IEEE

Transactions on Smart Grid, 10(4), 4425-4434. https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2867617

[27] Kong, W., Dong, Z. Y., Jia, Y., Hill, D. J., Xu, Y., Zhang, Y. (2019). Short-term residential load forecasting based on LSTM recurrent neural network. IEEE Transactions on Smart Grid, 10(1), 841-851. https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2753802

[28] Li, S., Jin, X., Xuan, Y., Zhou, X., Chen, W., Wang, Y., Yan, X. (2019). Enhancing the locality and breaking the memory bottleneck of transformer on time series forecasting. Advances in Neural Information Processing Systems, 32.

[29] Zhu, J., Yang, Z., Mourshed, M., Guo, Y., Zhou, Y., Chang, Y., Wu, J. (2019). Electric vehicle charging load forecasting: A comparative study of deep learning approaches. Energies, 12(14), 2692. https://doi.org/10.3390/en12142692

[30] Irish Meteorological Service. (2021). Historical Weather Data. https://www.met.ie/climate/available-data/historical-data

[31] Zhang, X., Grolinger, K. (2020). Time-series transformer for energy forecasting in smart buildings. Energy and Buildings, 223, 110197. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110197

[32] Tüfekci, P., Torriti, J. (2020). Quantifying household energy flexibility potential using smart meter data. Renewable Energy, 158, 996-1006. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.053

[33] Gao, Y., Liu, X., Zhang, J., Yang, Z. (2021). A transformer-based deep learning approach for forecasting household electricity consumption. Applied Energy, 303, 117696. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117696

[34] Li, R., Li, F. (2021). Gaussian mixture model-based clustering for smart meter data analysis. Energy and AI, 3, 100051. https://doi.org/10.1016/j.egyai.2021.100051

[35] Niu, D., Yu, M., Sun, L., Gao, T., Wang, K. (2021). Short-term multi-energy load forecasting for integrated energy systems based on CNN-Bi-GRU optimized by attention mechanism. Applied Energy, 313, 118801. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.11880

[36] Wang, Z., Wang, Y. (2021). A hybrid deep learning model for short-term PV power forecasting. Applied Energy, 304, 117751. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117751

[37] Zhou, H., Zhang, S., Peng, J., Zhang, S., Li, J., Xiong, H., Zhang, W. (2021). Informer: Beyond efficient transformer for long sequence time-series forecasting. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 35(12), 11106-11115. https://doi.org/10.1609/aaai.v35i12.17325

[38] Kudarihal, C. S., Gupta, M., Gupta, S. K. (2025). Time series analysis of AMI data and comparative energy demand forecasting using deep learning models in a smart grid scenario. Engineering Research Express, 7(1), 015387.

[39] Pentsos, V., Tragoudas, S., Wibbenmeyer, J., Khdeer, N. (2025). A hybrid LSTM-Transformer model for power load forecasting. IEEE Transactions on Smart Grid.

[40] Hamad, A., Yaylacı, E. K., Antar, A. P. D. R. K. (2025). Voltage Level Managements of Multilevel Inverter Based on Renewable Energy Sources and Environment Conditions. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 13(1), 404-416.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1173-1183 (2025)

Bataryalı Elektrikli Araçlar ile İçten Yanmalı Motorlu Araçların Devrilme Kararlılığı Yönünden Karşılaştırılması

Turgay ERGİN[1*]

[1]*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 24/07/2025
Revision: 31/07/2025
Accepted: 25/08/2025

Keywords

Rollover stability
Load transfer ratio
Static stability factor
Battery electric vehicle
Internal combustion engine vehicle

Makale Bilgisi

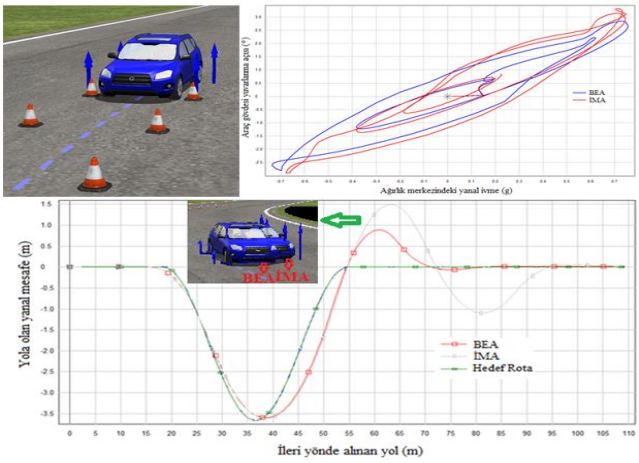
Araştırma makalesi
Başvuru: 24/07/2025
Düzeltme: 31/07/2025
Kabul: 25/08/2025

Anahtar Kelimeler

Devrilme kararlılığı
Yük transfer oranı
Statik stabilite faktörü
Bataryalı elektrikli araç
İçten yanmalı motorlu araç

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, ayni şasiye sahip bataryalı elektrikli bir araç ile içten yanmalı motorlu bir araç devrilme kararlılığı yönünden karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Araçlar önce geometrik özellikleri esaslı olarak static yönden, daha sonra simülasyon ortamında dinamik manevra testleriyle dinamik yönden karşılaştırılarak incelenmiştir. / In this study, a battery electric vehicle and an internal combustion engine vehicle with the same chassis were compared for rollover stability. The vehicles were first compared statically based on their geometric characteristics, and then dynamically through dynamic maneuvering tests in a simulated environment.



Şekil A: *Grafik özet /* ***Figure A:*** *Graphical abstract*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Araçların geometrik özellikleri ve ağırlık merkezi konumları göz önüne alınarak devrilme olasılıkları ortaya konulmuştur. / The probability of rollover of the vehicles was determined by taking into account their geometrical characteristics and center of gravity positions.*
- *Farklı güç kaynağı ve tahrik sistemi kullanan araçların ağırlık merkezi konumları sadece aracın tavan yüksekliğine göre tahmin edilmiştir. / The center of gravity positions of vehicles using different power sources and powertrain systems are estimated only based on the roof height of the vehicle.*
- *Araçlar simülasyon ortamında dinamik manevra testlerine tabi tutularak devrilme kararlılıkları incelenmiştir. / The vehicles were subjected to dynamic maneuvering tests in a simulated environment and their rollover stability was examined.*

Amaç (Aim): *Çalışmanın amacı, bataryalı elektrikli ve içten yanmalı araçların devrilme kararlılığı yönünden karşılaştırmalı olarak incelenmesidir. / The aim of the study is to comparatively examine the rollover stability of battery electric and internal combustion engine vehicles.*

Özgünlük (Originality): *Araçların ağırlık merkezi konumları hesaplanarak devrilme olasılıkları belirlenmiş ve dinamik manevra testleriyle devrilme kararlılıkları incelenmiştir. / The rollover probability of the vehicles was determined by calculating the center of gravity positions and their rollover stability was examined through dynamic maneuver tests.*

Bulgular (Results): *Elektrikli araç içten yanmalıya göre hedef rotadan daha az sapmakta, daha büyük yanal ivme değerlerine karşı koyabilmekte ve virajda daha az yuvarlanmaktadır. / Compared to internal combustion engine vehicles, electric vehicles deviate less from the target route, can withstand greater lateral acceleration values and roll less on curves.*

Sonuç (Conclusion): *Elektrikli araç içten yanmalıya göre 265 kg daha ağır olmasına ragmen devrilme kararlılığı daha üstündür. / Although the electric vehicle is 265 kg heavier than the internal combustion engine, its rollover stability is superior.*

*Corresponding author, e-mail: turgayergin@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1750103

GU J Sci, Part C, 13(3): 1173-1183 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Bataryalı Elektrikli Araçlar ile İçten Yanmalı Motorlu Araçların Devrilme Kararlılığı Yönünden Karşılaştırılması

Turgay ERGİN[1*]

[1]*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/07/2025
Düzeltme: 31/07/2025
Kabul: 25/08/2025

Anahtar Kelimeler

Devrilme kararlılığı
Yük transfer oranı
Statik stabilite faktörü
Bataryalı elektrikli araç
İçten yanmalı motorlu araç

Öz

Devrilmeyle sonuçlanan kazalarda ölüm oranları yüksek olduğundan araçların devrilme kararlılığı önem arz etmektedir. Bu çalışmada; aynı C-SUV şasiyi kullanan bataryalı elektrikli ve içten yanmalı motora sahip iki araç devrilme kararlılığı açısından karşılaştırılmıştır. Araçlar öncelikle geometrik özelliklerin ve araç boyutlarının etkili olduğu statik stabilite faktörü (SSF) ve yük transfer oranı (YTO) vasıtasıyla değerlendirilmiştir. Bataryalı elektrikli aracın (BEA) devrilme olasılığı %8,4 iken içten yanmalı motorlu aracın (İMA) devrilme olasılığı %16,6 olmuştur. BEA'da devrilme İMA'ya göre YTO dikkate alındığında %15 daha yüksek bir yanal ivme değerinde gerçekleşmiştir. Araçlar dinamik davranışlar açısından değerlendirilmek üzere simülasyon ortamında 50 km/h hızda geyik testlerine tabi tutulmuştur. Araç gövdesi yuvarlanma açılarına bakıldığında İMA'nın gövde yuvarlanmasının BEA'ya göre %50 daha fazla olduğu görülmüştür. Devrilme kararlılığı yönünden BEA'nın İMA'ya göre üstün olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmanın, içten yanmalı araçların bataryalı elektrikli araçlara dönüştürülmesi çalışmalarına temel oluşturması öngörülmektedir.

Comparison of Battery Electric Vehicles and Internal Combustion Engine Vehicles in terms of Rollover Stability

Article Info

Research article
Received: 24/07/2025
Revision: 31/07/2025
Accepted: 25/08/2025

Keywords

Rollover stability
Load transfer ratio
Static stability factor
Battery electric vehicle
Internal combustion engine vehicle

Abstract

Vehicle rollover stability is crucial, because rollover accidents have high fatality rates. In this study, battery-electric and internal combustion engine vehicles, using the same C-SUV chassis, were compared in terms of rollover stability. The vehicles were first evaluated using the static stability factor (SSF) and load transfer ratio (LTR), which are influenced by geometric characteristics and vehicle dimensions. The rollover probability of a battery-electric vehicle (BEV) was 8.4%, while the rollover probability of an internal combustion engine vehicle (CEV) was 16.6%. The rollover occurred at 15% higher lateral acceleration value for the BEV compared to the CEV, considering the LTR. The vehicles were subjected to moose tests at 50 km/h in a simulated environment to evaluate their dynamic behavior. Vehicle body roll angles revealed that the CEV had 50% greater body roll than the BEV. It was concluded that the BEV was significantly superior to the CEV in terms of rollover stability. This study is expected to form the basis for studies on converting internal combustion vehicles to battery-electric vehicles.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Karayolu trafik kazalarının küçük bir bölümü devrilmeyle sonuçlanmaktadır. Ancak, devrilmeyle sonuçlanan kazalardaki ölüm ve ciddi yaralanma oranları çok yüksektir. Bu nedenle, araç devrilmelerinin önlenmesi büyük öneme sahiptir. Piyasaya arz edilen yeni araçlar geliştirme aşamalarında bir takım test ve değerlendirmelere tabi tutulmaktadır. Özellikle Avrupa'da Yeni Araç Değerlendirme Programı (NCAP) tarafından devrilme direnci derecelendirmeleri titizlikle yapılmaktadır. Devrilme derecelendirme sistemi, bir yıldızdan beş yıldıza kadar değişebilmektedir.

Devrilme kararlılığı açısından ağırlık merkezinin konumunun bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Ağırlık merkezi ile darbe kuvveti vektörü

*Corresponding author, e-mail: turgayergin@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1750103

arasındaki mesafe kaza esnasında ve sonrasındaki araç dinamiklerini ve hareketlerini etkilemektedir. Bu nedenle, ağırlık merkezinin yeri diğer birçok kazada da önemli rol oynamaktadır. Literatürde ağırlık merkezinin konumunu hesaplamak için birçok regresyon modeli ve pratik kural önerilmiştir. Fuerbeth [1] çalışmasında 147 aracın devrilme kararlılığı ölçümlerine dayalı regresyon analizleri yapmıştır. Hem İMA hem de BEA için olmak üzere ağırlık merkezinin konumunu hesaplamada kullanılacak iki model geliştirmiştir. Her iki regresyon modelinin de genellikle araç üreticisi tarafından belirtilen tavan yüksekliğini giriş parametresi olarak kullandığını belirtmiştir. Ayrıca bataryalı elektrikli araçlar için geliştirdiği modelin literatürde ilk referans model olduğunu ileri sürmüştür. Her iki model için de %95 güven aralığı olduğunu belirtmiş ve ağırlık merkezinin konumu ile ilgili yapılacak hesaplama ve simülasyonlarda güvenle kullanılabileceğini ileri sürmüştür. Allen ve arkadaşları [2], ilk kez araç yüksekliğinin ağırlık merkezi yüksekliği ile ilişkili olduğunu fark etmişler ve ± %5 hata ile ağırlık merkezi yüksekliğini tahmin edebilen bir model önermişlerdir. Daha sonraki yıllarda yapılan birçok çalışmada daha küçük hatalarla daha doğru tahminler yapabilen ve sadece araç yüksekliğine ihtiyaç duyan birçok model geliştirilmiştir. Burckhardt ve Burg [3], araç kütlesi ve aks aralığını esas alarak yine ağırlık merkezi yüksekliğini tahmin eden bir model geliştirmişlerdir.

Araç ağırlık merkezi yüksekliği azaltılarak devrilme kararlılığı iyileştirilebileceği gibi devrilme önleme sistemlerinin kullanımıyla da devrilme kararlılığı iyileştirilebilmektedir. Yapılmış çalışmalara bakıldığında devrilme önlemede farklı yöntemlerin devrilme dinamiklerine etkileri incelenmiştir. Araç dinamiklerine müdahale ederek manevra sırasında oluşan devrilme momentlerine karşı koyarak çalışan aktif güvenlik sistemleri mevcuttur. Bunlardan biri aktif viraj denge çubuğu [4-6], diğeri aktif direksiyon sistemi [7] ve bir diğeri ise otomatik fren uygulayan elektronik stabilite programı (ESP) sistemleridir [8,9]. Ayrıca, aktif süspansiyon sistemleri [10] de yine devrilme önlemede yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu bahsedilen devrilme önleme sistemleri bazen de birbirleriyle entegre çalışabilmektedir [11]. Devrilmeyi önlemede araçların dinamik performansını artırmak için aktif yapısal dönüşüm teknolojileri de yenilikçi çalışmalardandır [12]. Son olarak, elektrikli araçlarda tekerlek içi motorlarının kullanımıyla ortaya çıkmış dört tekerlekten diferansiyel tahrik sistemlerinin aktif süspansiyon sistemleriyle birlikte kullanımı sayesinde devrilme dinamikleri yine iyileştirilebilmektedir [13].

Bu çalışmada, kullandıkları güç kaynakları dışında aynı şasilere sahip iki farklı araç devrilme kararlılığı yönünden karşılaştırılmıştır. Bunlardan biri daha düşük ağırlık merkezi yüksekliğine sahip ve bataryadan dolayı daha ağır olan BEA, diğeri ise daha yüksek ağırlık merkezli ve daha hafif olan İMA'dır. Öncelikle bir aracın devrilme eğilimini ortaya koymada büyük öneme sahip SSF, YTO ve devrilme olasılığı parametreleri her iki araç tipi için de hesaplanmıştır. Bu parametreler aracın ağırlık merkezi yüksekliği, boyutları ve geometrisi ile ilişkilidir. Araçların dinamik davranışlarını inceleyebilmek için ise daha sonra CarSim programında simülasyonlar gerçekleştirilerek araçlar devrilme kararlılığı yönünden karşılaştırılmıştır.

2. DEVRİLME KARARLILIĞI (ROLLOVER STABILITY)

Aracın devrilmesine sebep olan durumlara bakıldığında, aşırı hızlı bir şekilde viraja girme, ani ve sert bir biçimde şerit değiştirme veya engelden kaçınma manevrası yapma, sert esen yanal rüzgarlar ve aracın ön-arka tekerlekleri veya sağ-sol tekerlekleri arasında ciddi seviye farkı yaratabilecek tümsek ya da çukurlara girmek örnek sürüş durumları olarak gösterilebilir. Bir aracın devrilmeye karşı gösterdiği direnç ne kadar büyük olursa, devrilme kararlılığı da o derece iyi olacaktır. Devrilme kararlılığı üzerinde büyük etkilere sahip araç parametrelerine bakıldığında araç iz genişliği ve ağırlık merkezi yüksekliği ön sıralarda yer almaktadır. Yuvarlanma merkezi, yuvarlanma açısı, yuvarlanama hızı ve yanal ivmelenme gibi parametreler de yine devrilme riskini etkileyen diğer araç parametreleridir. Bu parametrelerin birbiriyle ilişkilerinden doğan ve devrilme kararlılığı üzerinde büyük etkileri bulunan bazı kavramlar aşağıda verilmiştir.

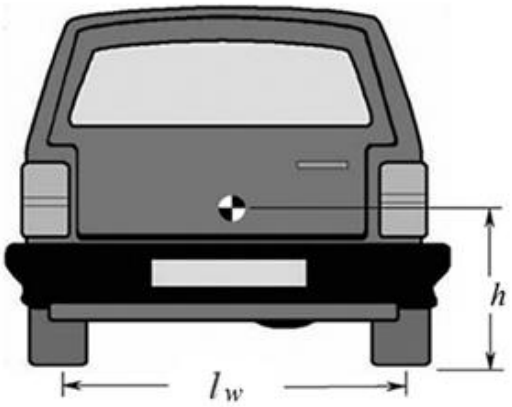
2.1. Statik Stabilite Faktörü (SSF) (Static Stability Factor)

Amerika'da Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi (NHTSA), NCAP'in bir parçası olarak tüm yeni araçlar için devrilme direnci derecelendirmeleri sağlamaktadır. Devrilme derecelendirme sistemi, bir yıldızdan (%40 veya daha fazla devrilme riski) beş yıldıza (%10 veya daha az devrilme riski) kadar değişmektedir. Başlangıçta, NCAP devrilme direnci derecelendirmeleri yalnızca bir aracın SSF temelinde sağlanmıştır. Fakat SSF bir aracın devrilme eğilimini azaltabilen süspansiyon özelliklerinin veya ESP'nin etkisini içermediğinden devrilme direncinin belirlenmesinde dinamik manevra testleri de kullanılmaya başlanmıştır. SSF

bir aracın yalnızca geometrik özelliklerini içermektedir. Yine de SSF devrilme derecesinin hesaplanmasında dinamik manevra testlerinden daha büyük bir rol oynamaktadır. Bir aracın SSF'si Eşitlik (1)'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$SSF = \frac{l_w}{2h} \tag{1}$$

Burada, "l_w" ve "h" Şekil 1'de gösterildiği gibi sırasıyla, aracın iz genişliği (m) ve ağırlık merkezinin yüksekliğidir (m).



Şekil 1. Aracın SSF parametreleri [14] (SSF parameters of the vehicle)

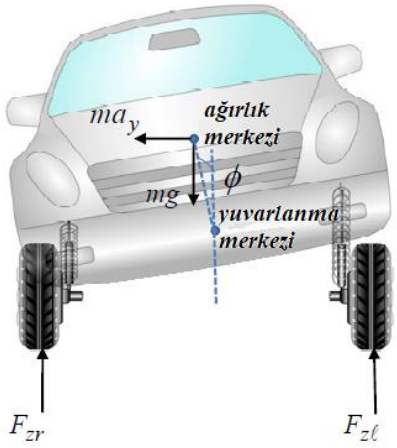
Araç viraj almadan düz bir rotada ilerlerken herhangi bir yanal ivme oluşmadığında sağ ve sol tekerleklere gelen yükler eşit olmaktadır. Araç viraj alırken yanal ivme değeri artar ve yeterince büyük bir yanal ivme değerinde viraj içindeki tekerleklere gelen yük sıfır olmaktadır. Viraj içindeki tekerleklerin yerden kalkmaya başladığı yanal ivme değeri Eşitlik (2)'de verilmiştir. Burada "g" yerçekimi ivmesidir (m/s^2).

$$a_{y_kalkma} = \frac{l_w}{2h} g \tag{2}$$

Eşitlikten de görüldüğü üzere SSF devrilmenin başlangıcını direkt olarak etkilemektedir. SSF ne kadar büyük ise, devrilmenin meydana geldiği yanal ivme değeri o kadar büyük olmakta ve araç daha zor devrilmektedir.

2.2. Yük Transfer Oranı (YTO) (Load Transfer Ratio)

YTO, devrilme önleme sistemlerinin tasarımında temel bir kavram olarak kullanılmaktadır. Devrilme indeksi olarak da kullanılan YTO, aracın devrilme olasılığını gösteren ve aktif devrilme önleme sistemlerinde hesaplanan gerçek zamanlı bir değişkendir. Şekil 2'de virajda yuvarlanma hareketine maruz kalan bir aracın düşey tekerlek yükleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Virajda yuvarlanan aracın düşey tekerlek yükleri [15] (Vertical wheel loads of a vehicle rolling on a curve)

Aracın yuvarlanma hareketinin neden olduğu düşey tekerlek kuvvetleri (N) sağ ve sol tekerlekler için sırasıyla "F_{zr}" ve "F_{zl}" ile gösterilmiştir. Araç gövdesinin yuvarlanma açısı (º) ise "ϕ" ile verilmiştir. YTO, bir aracın sağ ve sol tekerlek düşey yükleri arasındaki farkın bu düşey yüklerin toplamlarına bölünmesi ile elde edilmektedir. Eşitlik (3)'te "R" ile gösterilen YTO verilmiştir.

$$R = \frac{F_{zr} - F_{zl}}{F_{zr} + F_{zl}} \tag{3}$$

Viraj alma yönüne göre sağ veya sol tekerlek düşey yükleri yeterince büyük bir yanal ivme değerine ulaşıldığında zemin ile teması kesilecek ve sıfır olacaktır. Eşitlik (3)'ten görüldüğü üzere sola dönüş yaparken sol tekerlek düşey yükleri ve sağa dönüş yaparken de sağ tekerlek düşey yükleri sıfır olduğunda sırasıyla YTO değerleri "+1" ve "-1" değerlerini almaktadır. Bu nokta devrilmenin başlangıcıdır. Araç herhangi bir direksiyon açısı verilmeden düz bir yolda giderken F_{zr}=F_{zl} olur ve YTO değeri sıfırdır. Araç devrilme kararlılığı yönünden en iyi durumdadır. YTO değeri gerçek zamanlı olarak doğrudan hesaplanamaz. Çünkü düşey tekerlek yüklerinin ölçülmesi oldukça zordur. Bunun yerine Eşitlik (4)'te YTO'nun tahmininde yaygın olarak kullanılan formül verilmiştir [2,15].

$$R = \frac{2h}{l_w g} a_y \cos\phi + \frac{2h}{l_w} \sin\phi \tag{4}$$

Burada, küçük yuvarlanma açılarında yuvarlanma açısının ölçülmesi gereksinimi ortadan

kaldırılabilir. Yuvarlanma açısı ölçümünün araçlarda standart bir ölçüm olmaması ve bu ölçümün maliyetli bir işlem olması sebebiyle mevcut YTO formülü basitleştirilebilir. Bu durumda yaklaşık YTO formülü Eşitlik (5)'te verildiği gibi olur. Basitleştirilmiş YTO formülü, elektronik stabilite kontrol sistemleri ile donatılmış tüm araçlarda tipik olarak mevcut bir ölçüm olan sadece yanal ivmenin (a_y) ölçülmesini gerektirmektedir [7,15].

$$R_{yaklaşık} = \frac{2ha_y}{l_w g} \tag{5}$$

3. ARAÇ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ (DETERMINATION OF VEHICLE PARAMETERS)

Araç üzerinde ağırlık merkezinin konumu üç farklı şekilde tanımlanabilmektedir. Bunlar; ağırlık merkezinin araç boyuna eksenindeki konumu, araç enine eksenindeki konumu ve son olarak da ağırlık merkezi konumunun yerden yüksekliğidir. Araç boyuna ve enine olan ağırlık merkezi konumları genelde araç simetri merkezinde kabul edilebilir. Burada devrilme dinamikleri açısından asıl önemli olan ağırlık merkezi yüksekliğinin konumudur. Bu nedenle bu çalışmada karşılaştırmalar ağırlık merkezi yüksekliği esas alınarak yapılmıştır.

Daha önce giriş bölümünde bahsedildiği üzere literatürde araç ağırlık merkezi yüksekliğini tahmin edebilecek birçok model önerilmiştir. Fuerbeth [1] 2024 yılında hem içten yanmalı motorlu araçlar hem de bataryalı elektrikli araçlar için farklı iki regresyon modeli geliştirmiş ve bu çalışmada farklı güç kaynağına sahip araçların ağırlık merkezi yükseklikleri bu iki model kullanılarak tahmin edilmiştir. Ağırlık merkezi yüksekliğini araç yüksekliği kullanarak yaklaşık olarak hesaplama yaklaşımı, 147 araçlık örneklemin binek otomobilleri ve aynı zamanda günümüzün çok popüler SUV araçlarını da içerdiğinden, çok çeşitli araçlara uygulanabilmektedir. Bataryalı elektrikli araçların ağırlık merkezi yüksekliğinin belirlenmesinde kullanılan model Eşitlik (6)'da ve içten yanmalı motorlu araçların ağırlık merkezinin belirlenmesinde kullanılan model ise Eşitlik (7)'de verilmiştir. Her iki modelin de gereksinim duyduğu tek araç parametresi "h_a" araç yüksekliğidir (m).

$$h = 0,3302h_a + 0,0171 \tag{6}$$

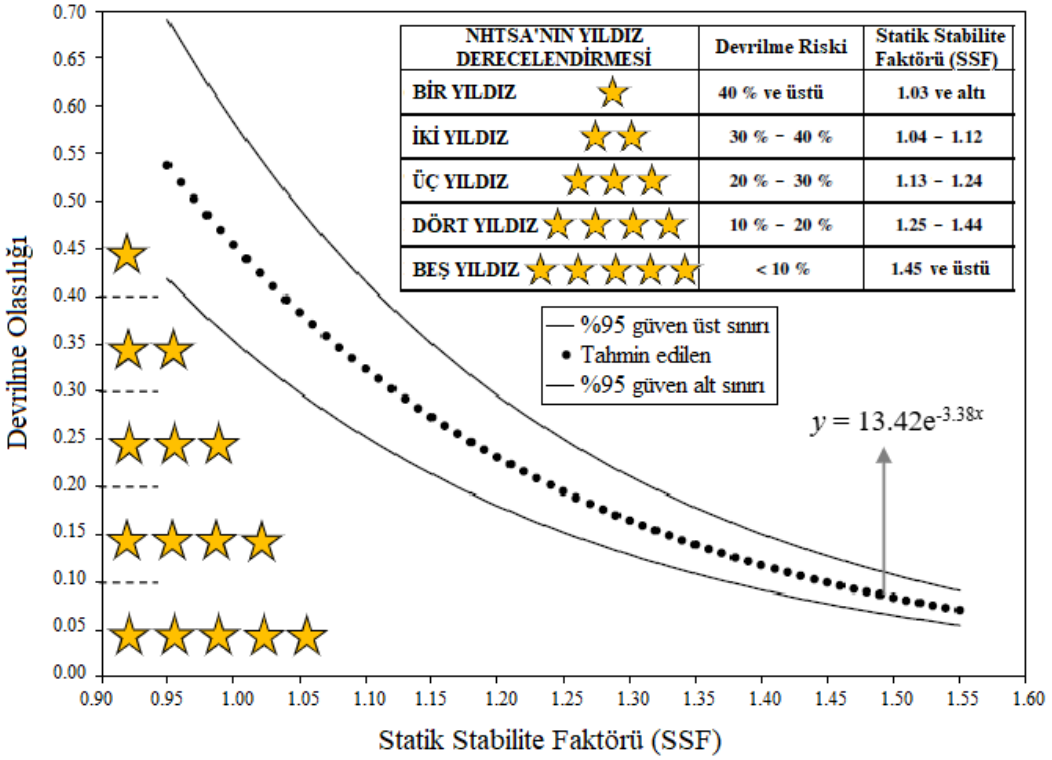
$$h = 0,4352h_a - 0,0788 \tag{7}$$

Bu çalışmada devrilme kararlılığı yönünden karşılaştırılacak olan BEA ile İMA'nın teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Her iki aracın ağırlık merkezi yüksekliği yukarda verilen modellere göre hesaplanmıştır. Ayrıca, Eşitlik (1)'e göre her iki aracın SSF değerleri de yine Tablo 1'de verilmiştir. BEA'nın SSF değeri 1,50 iken İMA'nın SSF değerinin 1,30 olduğu görülmektedir. Araçlar, sadece geometrik özellikleri ve ağırlık merkezi yüksekliğini barındıran SSF değerine göre karşılaştırıldığında BEA'nın İMA'ya göre devrilme kararlılığının daha iyi olduğu yani daha zor devrildiği söylenebilir. Bunun yanında, ilerleyen kısımlarda yapılan simülasyonlarla araç kütlelerinin etkisi de devrilme dinamiklerine yansıtılarak daha kapsamlı karşılaştırmalar yapılmıştır.

Tablo 1. Araç parametreleri (Vehicle parameters)

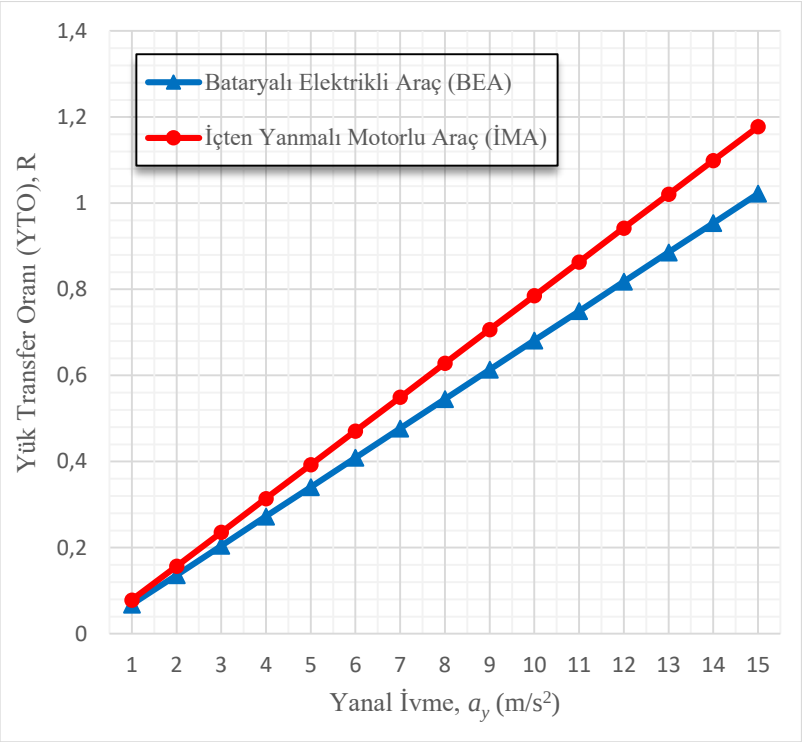
Araç Parametresi	BEA (150 kW, Elektrik Motorlu)	İMA (150 kW, 1998 cm^3 Benzinli)
Araç Yüksekliği (m)	1,56	1,59
İz Genişliği (m)	1,592	1,592
Aks Aralığı (m)	2,692	2,692
Araç Yüksüz Ağırlığı (kg)	1960	1695
Ağırlık Merkezi Yüksekliği (m)	0,532	0,613
SSF	1,50	1,30
Devrilme Olasılığı (%)	8,4	16,6

Bir aracın SSF değeri, devrilme riski olasılığıyla ilişkilidir. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki NHTSA, 226 000 kaza soruşturmasına dayanan istatistiksel analizler gerçekleştirmiş ve tek araçlı bir kazada SSF değerinin devrilme olasılığını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varmıştır. İstatistiksel verilere dayanarak, Şekil 3'te gösterildiği gibi bir aracın devrilme olasılığı ile SSF değerini ilişkilendiren bir model oluşturulmuştur. Tahmin edilen korelasyon noktalı çizgiyle, %95 güven aralığına sahip korelasyonların üst ve alt sınırları ise düz çizgilerle gösterilmiştir. SSF ile devrilme olasılığı arasındaki istatistiksel ilişki, NHTSA'nın çeşitli araçlar için devrilme direnci derecelendirme sisteminin belirlemesinin temelini oluşturmaktadır. Bu istatistiksel modele göre mevcut çalışmadaki her iki araç için hesaplanan devrilme olasılığı değerleri yine Tablo 1'de görülmektedir. Buna göre BEA NHTSA'nın SSF temelli derecelendirmesinden 5 yıldız alırken, İMA 4 yıldız alabilmektedir.



Şekil 3. SSF ile devrilme olasılığı arasındaki istatistiksel korelasyon ve NHTSA'nın devrilme direnci derecelendirme sistemi [16,17] (Statistical correlation between SSF and rollover probability and NHTSA's rollover resistance rating system)

Araçların dairesel bir pist etrafında sabit durum viraj alma sırasında yanal ivmenin bir fonksiyonu olarak YTO değerlerinin gösterildiği grafik Şekil 4'te verilmiştir. Araçların yük durumlarının ve dolayısıyla ağırlık merkezi yüksekliği değerlerinin değişmesiyle yük transfer oranı değerlerinin de değişebileceği unutulmamalıdır. YTO'nun "+1" ya da "-1" olduğu durumda viraj içindeki tekerleklerin yer ile temasını keserek devrilmenin başladığı anlaşılmaktadır. Burada işaretin negatif veya pozitif olması aracın sağa veya sola viraj aldığını göstermektedir. Şekil 4'te görüleceği üzere İMA yaklaşık 13 m/s^2'lik bir yanal ivme değerine ulaşıldığında viraj içindeki tekerlekleri yerden kalkarak devrilmenin başladığı anlaşılmaktadır. Aynı ivme değerinde BEA'nın YTO değerinin 0,88 olduğu görülmektedir. BEA'nın devrilme başlangıcı yaklaşık 15 m/s^2'lik bir ivme değerinde gerçekleşmektedir. Bu da BEA'da devrilmenin İMA'ya göre %15 daha büyük bir yanal ivme değerinde başladığını göstermektedir. Ayrıca düşük yanal ivme değerlerinde iki farklı aracın YTO değerleri arasındaki farkın küçük olduğu, yanal ivme değerinin artmasıyla araçların YTO değerleri arasındaki farkın da açıldığı görülmektedir.



Şekil 4. Yanal ivme değerlerine göre araçların YTO değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of YTO values of vehicles according to lateral acceleration values)

4. ARAÇLARIN DEVRİLME KARARLILIĞI SİMÜLASYONLARI VE SONUÇLARI (ROLLOVER STABILITY SIMULATIONS OF VEHICLES AND RESULTS)

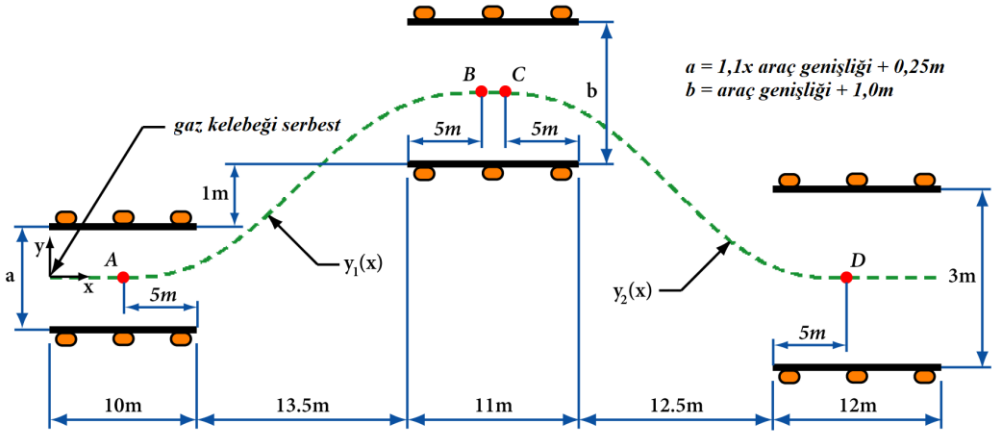
Her iki araca ait devrilme kararlılığı simülasyonları Tablo 1'deki araç parametreleri kullanılarak CarSim simülasyon programında yapılmıştır. Araçlarda bağımsız süspansiyonlar tercih edilmiş ve ESP sistemleri kapalı olarak simülasyon testleri gerçekleştirilmiştir. BEA ve İMA aynı şasilerde ve eşit güçlerde olduklarından İMA'da kullanılan içten yanmalı motor güçlü versiyon olan 2 lt'lik bujiyle ateşlemeli motordur. Simülasyon testlerindeki araçların sadece ağırlık merkezi yüksekliği ve araç kütlesi parametreleri birbirinden farklıdır. Şekil 5'te simülasyon ortamındaki araçlar görülmektedir. Tekerleklerin yanlarındaki yukarı doğru olan düşey oklar her bir tekerlekteki düşey kuvvetleri göstermektedir.



Şekil 5. Simülasyon ortamındaki araçlar (Vehicles in the simulation environment)

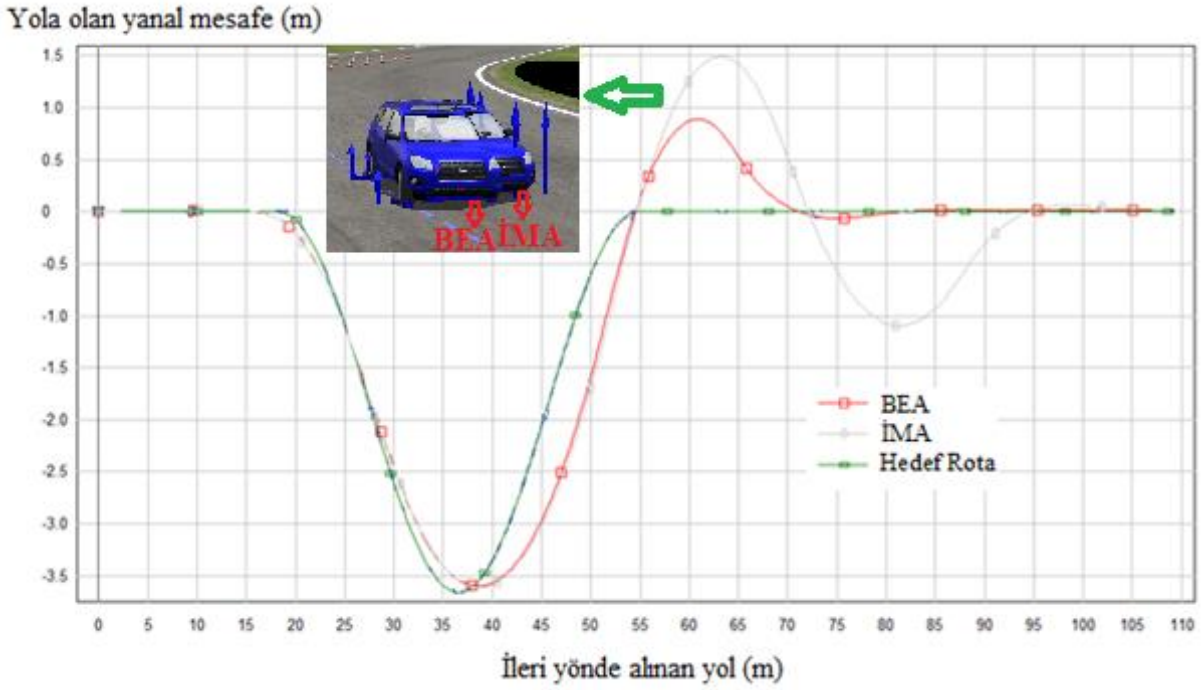
Simülasyonlarda araçlara geyik testi (kaçış manevrası / çift şerit değiştirme testi) uygulanmıştır. Geyik testi araçların savrulma, yuvarlanma ve devrilme eğilimlerini değerlendirmede kullanılan dinamik testlerden en yaygınıdır. Geyik testi, bir aracın rotası üzerinde aniden ortaya çıkan canlı veya cansız bir engelden manevra yaparak kurtulması ve kazaya neden olmadan rotasına geri dönebilme becerisini ölçmeye yarayan bir testtir. Geyik testinin teknik özellikleri ISO 3888 standardında

tanımlanmıştır [18]. Geyik testi asfalt zeminde gerçekleştirilmektedir. Simülasyonlarda zemin sürtünme katsayısı 0,85 olarak alınmıştır. Geyik testleri fren kullanılmadan sabit bir hızda sadece direksiyon hareketleriyle "S" şeklindeki bir parkurda gerçekleştirilmektedir. Yapılan simülasyonlarda araç test hızı olarak 50 km/h hız değeri kullanılmıştır. Testlerde kullanılan parkurun teknik özellikleri Şekil 6'da verilmiştir. Parkur genişliği araç genişliğine göre ayarlanmaktadır.



Şekil 6. Geyik testi parkur özellikleri [18,19] (Moose test track features)

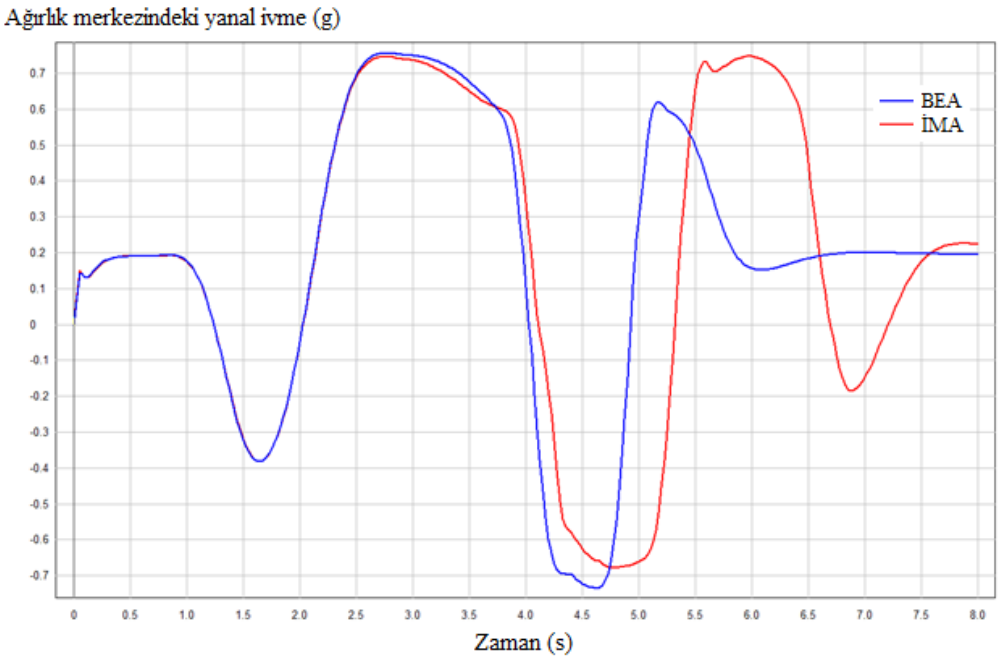
Yapılan simülasyonlar sonucunda her iki aracın hedef rotadan sapma oranları Şekil 7'de verilmiştir. Özellikle son istasyonda (kendi şeridine dönüş istasyonu) araçların hedef rotadan sapma mesafelerinin maksimum olduğu görülmektedir. Burada İMA'nın sapma değerlerinin BEA'ya göre daha fazla olduğu görülmektedir. BEA'nın sapma değeri 60,8 m ileri yönde yol alındığı anda maksimum 0,88 m iken İMA'nın maksimum sapma değeri 63 m ilerleme sağlandığında maksimum 1,49 m olarak gerçekleşmiştir. İMA'nın geyik testinde 50 km/h hızda, ESP kapalı durumda BEA'ya göre rotasından sapması %69,3 daha fazla olmuştur.



Şekil 7. Araçların hedef rotadan sapma durumları (Vehicle deviations from the target route)

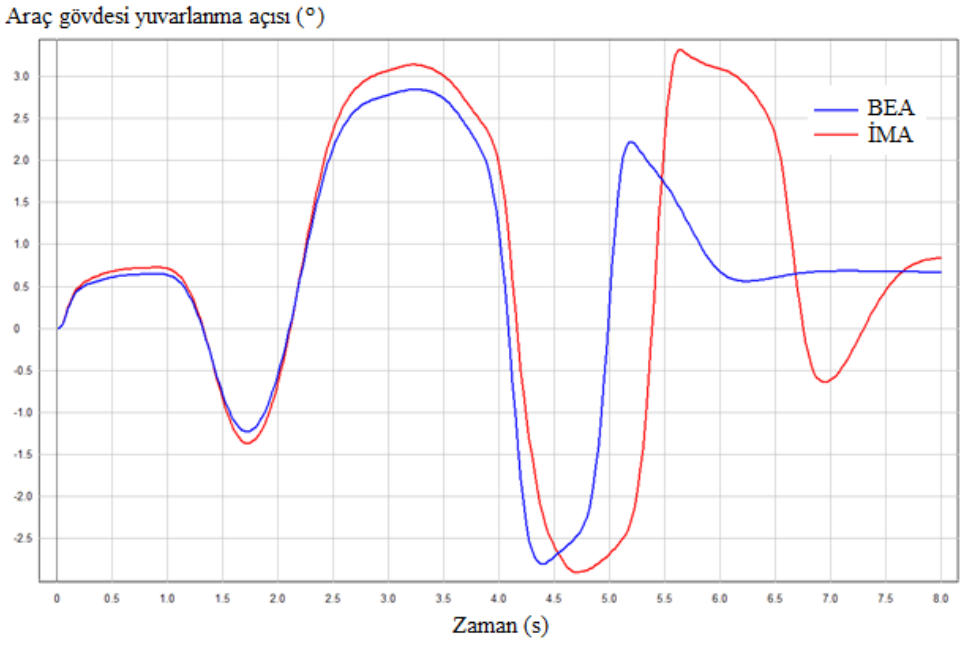
Araçların zamana bağlı ağırlık merkezlerindeki yanal ivme değişimleri yerçekimi ivmesi cinsinden Şekil 8'de verilmiştir. Yine son istasyonda iki aracın ağırlık merkezindeki yanal ivme değerleri arasında maksimum fark oluşmuştur. BEA'nın yanal ivme değeri test başlangıcından 5,2 s sonra 0,62 g olurken, İMA'nın yanal ivme değeri 6 s sonra 0,75 g olarak gerçekleşmiştir. İMA'nın ağırlık

merkezindeki yanal ivme değeri BEA'ya göre %21 daha fazladır. Bir önceki manevrada anlık olarak İMA'nın yanal ivme değerinin BEA'ya göre daha az görünmesinin sebebi İMA'nın hedef rotadan saparak yanal ivme değerinde anlık düşme meydana gelmesidir.



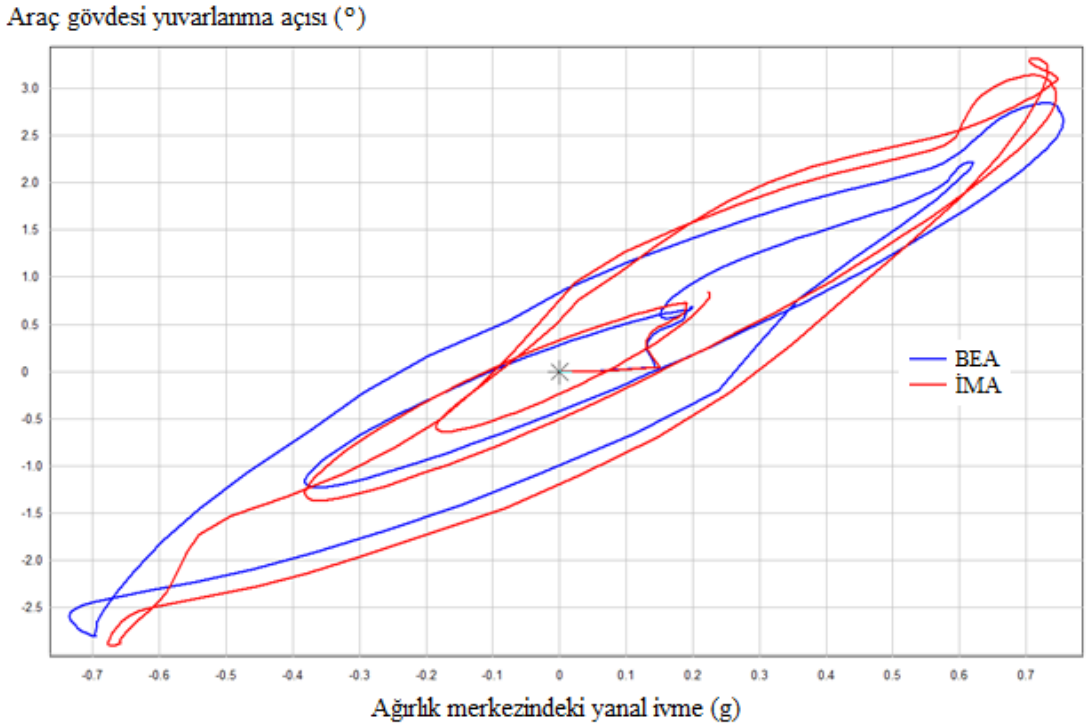
Şekil 8. Zamana bağlı ağırlık merkezindeki yanal ivme değişimleri (Lateral acceleration changes in the center of gravity with time)

Her iki araç için de zamana bağlı araç gövdesi yuvarlanma açısı değişimleri Şekil 9'da verilmiştir. Simülasyon testlerinde yapılan tüm manevralarda İMA'nın araç gövdesi yuvarlanması BEA'ya göre daha fazla olmuştur. En büyük fark yine son istasyonda gerçekleşmiştir. Maksimum araç gövdesi yuvarlanmalarının farklı zamanlarda meydana gelmesinin sebebi Şekil 7'de açıklanmış olan hedef rotadan sapmalarının çok farklı gerçekleşmesidir. BEA'nın testin başlamasından 5,2 s sonraki araç gövdesi yuvarlanma açısı 2,2 ° iken İMA'nın araç gövdesi yuvarlanma açısı 3,3 ° olarak gerçekleşmiştir. İMA'nın araç gövdesi yuvarlanma açısı BEA'ya göre %50 daha fazladır.



Şekil 9. Zamana bağlı araç gövdesi yuvarlanma açısı değişimi (Vehicle body roll angle change over time)

Ayrıca, araçların ağırlık merkezlerindeki yanal ivme değerlerine göre araç gövdesi yuvarlanma açısı değişimleri Şekil 10'da gösterilmiştir. Burada, negatif "-" değerler aracın soluna doğru yuvarlandığını ve sol tarafa doğru yanal ivmelenme olduğunu, pozitif "+" değerler ise aracın sağına yuvarlandığını ve sağ tarafa doğru yanal ivmelenme olduğunu göstermektedir. İMA'nın gövdesi sola doğru 0,67 g'de 2,9 ° ve sağa doğru 0,7 g'de 3,3 ° yuvarlanırken, BEA'nın gövdesi ise her iki yöne doğru da 0,7 g'de 2,8 ° yuvarlanmaktadır. İMA'daki araç gövdesi yuvarlanma açısı değerlerinin BEA'dan daha yüksek olduğu ve aynı gövde yuvarlanma açılarının daha yüksek yanal ivme değerlerinde oluştuğu görülmektedir.



Şekil 10. Yanal ivme değerine göre araç gövdesi yuvarlanma açısı değişimi (Vehicle body roll angle change according to lateral acceleration value)

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Devrilme kararlılığı yönünden karşılaştırılan araçlarda ağırlık merkezi yüksekliği, geometrik özellikler ve boyutlar ile ilişkili SSF ve YTO dikkate alındığında BEA'nın İMA'ya göre devrilmeye karşı daha dirençli olduğu görülmektedir. Hesaplanan devrilme olasılığı değerlerine bakıldığında da BEA'nın İMA'ya göre daha zor devrildiği ya da diğer bir deyişle devrilmenin daha yüksek yanal ivme değerlerinde gerçekleştiği anlaşılmaktadır. BEA'da devrilme İMA'ya göre YTO dikkate alındığında %15 daha yüksek bir yanal ivme değerinde gerçekleşmiştir. SSF dikkate alındığında ise, NHTSA'nın devrilme direnci derecelendirme sistemine göre İMA dört yıldız alabilirken BEA 5 yıldızla daha iyi bir skor elde etmiştir.

Araçları dinamik yönden karşılaştırabilmek için yapılan simülasyonlarda geyik testi sonuçlarına göre İMA'nın BEA'ya göre test rotasından %69,3 daha fazla saptığı ve %21 daha fazla yanal ivme değeriyle baş etmek zorunda kaldığı görülmüştür. Gövde yuvarlanma açılarına bakıldığında İMA'nın gövde yuvarlanmasının BEA'ya göre %50 daha fazla olduğu ve aynı gövde yuvarlanmasının BEA'da daha yüksek yanal ivme değerlerinde gerçekleştiği görülmüştür. Devrilme kararlılığını dinamik yönden inceleme imkanı veren simülasyonlar sonucunda da BEA'nın İMA'ya göre devrilme kararlılığının bariz bir biçimde üstün olduğu görülmüştür. Burada BEA İMA'ya göre 265 kg daha ağır olmasına rağmen ağırlık merkezi yüksekliğinin 81 mm daha düşük olması devrilme kararlılığı yönünden daha iyi bir performans sergilemesine sebep olmuştur.

Bu çalışmanın özellikle içten yanmalı araçların bataryalı elektrikli araçlara dönüştürülmesi çalışmalarına temel oluşturması öngörülmektedir. Bu sayede daha dönüşüm yapılmadan devrilme kararlılığı yönünden neler kazanılıp neler kaybedilebileceği baştan tahmin edilebilecektir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI
(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmasında kullandığı materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan eder.

The author of this article declares that the materials and methods he use in his work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

***Turgay ERGİN*:** Araç modellerini geliştirmiş, simülasyonları gerçekleştirmiş, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini tamamlamıştır.

He developed the vehicle models, performed the simulations, analyzed the results and completed the writing of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Fuerbeth, U., "Centre of gravity of motor vehicles", Forensic Science International, 2024; 361: 112073, https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2024.112073

[2] Allen, R., Rosenthal, T., Szostak, H., "Steady State and Transient Analysis of Ground Vehicle Handling" SAE Technical Paper, 1987; 870495, https://doi.org/10.4271/ 870495.

[3] Burckhardt, M., Burg, H., "Berechnung und Rekonstruktion des Bremsverhaltens von Pkw" Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim, 1988; ISBN 3885500256.

[4] Nguyen, T. A., "Establishing a novel adaptive fuzzy control algorithm for an active stabilizer bar with complex automotive dynamics model", Ain Shams Engineering Journal, 2024; 15: 102334, https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102334.

[5] Nguyen, D. N., Nguyen, T. A., Dang, N. D., "A complex rollover dynamics model with active stabilizer bar controlled by the fuzzy algorithm", Heliyon, 2022; 8: e11715, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11715.

[6] Vu, V. T., Sename, O., Dugard, L., Gaspar, P., "Active anti-roll bar control using electronic servo valve hydraulic damper on single unit heavy vehicle", IFAC-PapersOnLine, 2016; 49-11: 418-425, https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.08.062.

[7] Lee, S., Kasahara, M., Mori, Y., "Roll Damping Control of a Heavy Vehicle under the Strong Crosswind", 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, IFAC Proceedings Volumes, 2013; 46: (21) 219-224, https://doi.org/10.3182/20130904-4-JP-2042.00053.

[8] Chen, B. C., Yu, C. C., Hsu, W. F., Lo, M. F., "Design of electronic stability control for rollover prevention using sliding mode control", International Journal of Vehicle Design, 2011; 56: (1-4) 224-245.

[9] Shin, D., Woo, S., Park, M., "Rollover Index for Rollover Mitigation Function of Intelligent Commercial Vehicle's Electronic Stability Control", Electronics, 2021; 10: 2605, https://doi.org/10.3390/electronics10212605.

[10] Gaspar, P., Szaszi, I., Bokor, J., "Improving Rollover Stability With Active Suspensions By Using An Lpv Method", 5th IFAC/EURON Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, 2004; Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

[11] Yoon, J., Cho, W., Yi, K., Koo, B., "Unified Chassis Control for Vehicle Rollover Prevention", IFAC Proceedings Volumes, 2008; 41: (2) 5682-5687, https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.00958.

[12] Zhang, B., Huang, J., Wang, J., Su, Y., Li, J., Wang, X., Chen, Y., Wang, Y., Zhong, Z., "Can software-defined vehicles never roll over: A perspective of active structural transformation", Fundamental Research, 2024; 4: 1063-1071, https://doi.org/10.1016/j.fmre.2023.12.024.

[13] Wang, J., Zhang, X., Dong, Y., Liu, S., Zhang, L., "Roll stability control of in-wheel motors drive electric vehicle on potholed roads", Control Engineering Practice, 2025; 157: 106247, https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2025.106247.

[14] Gillespie, T. D., "Fundamentals of Vehicle Dynamics" SAE International, 1992; ISBN 1560911999.

[15] Rajamani, R., "Vehicle Dynamics and Control" Second Edition, Springer, 2012; ISBN 978-1-4614-1432-2.

[16] NHTSA, "Rating system for rollover resistance, Special Report 265", National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2002; U.S. Department of Transportation.

[17] Sentosa, S. P., Jusuf, A., Gunawan, L., Abu Kassim, K. A., Hakim, M.L., Wiranto, B. P. E., "Rollover Risk Probability Analysis for SUVs

and MPVs in the ASEAN Market" Journal of the Society of Automotive Engineers Malaysia, 2018; 2: (3) 275-288, https://doi.org/10.56381/jsaem.v2i3.99.

[18] ISO 3888-1:2018(E), "Passenger cars — Test track for a severe lane-change manoeuvre —Part 1: Double lane-change", Internation Standard, 2018.

[19] Jalali, K., Uchida, T., McPhee, J., Lambert, S., "Development of an Advanced Fuzzy Active Steering Controller and a Novel Method to Tune the Fuzzy Controller", SAE International, 2013; 2013-01-0688.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1184-1194 (2025)

Effects of in-situ formed TiB_2 Phase on Mechanical Properties of Spark Plasma Sintered Boron Carbide

Sinem BAŞKUT[1*], Name YALAMA[1], Servet TURAN[1]

[1]*Eskisehir Technical University, Faculty of Engineering, Department of Materials Science and Engineering, Eskisehir, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 14/05/2025
Revision: 29/06/2025
Accepted: 30/06/2025

Keywords

B_4C
TiB_2
Fracture Toughness
Hardness
SPS

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 14/05/2025
Düzeltme: 29/06/2025
Kabul: 30/06/2025

Anahtar Kelimeler

B_4C
TiB_2
Kırılma Tokluğu
Sertlik
SPS

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study investigated the effects of TiO_2 additions on B_4C sintered via SPS. The in-situ formed TiB_2 phase contributed to the improvement of fracture toughness of B_4C through various toughening mechanisms. / Bu çalışma, SPS yöntemiyle sinterlenmiş B_4C'ye TiO_2 ilavelerinin etkilerini araştırmıştır. In-situ olarak oluşmuş TiB_2 fazı, çeşitli tokluk mekanizmaları yoluyla B_4C'nin kırılma tokluğunun artmasına katkıda bulunmuştur.

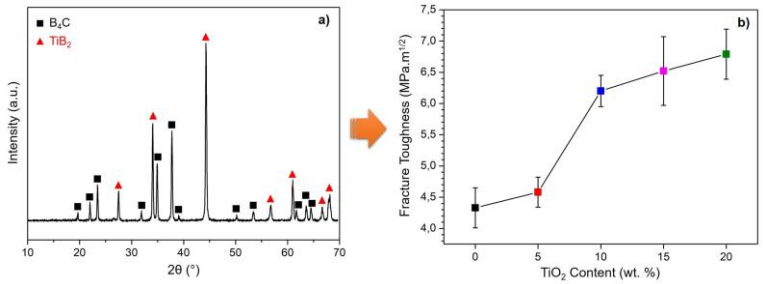


Figure A: (a) XRD patern of the B_4C containing 20 wt. % TiO_2 and (b) fracture toughness values of the B_4Cs containing 5, 10, 15 and 20 wt. % TiO_2 / **Şekil A:** Ağırlıkça % 20 TiO_2 içeren B_4C'nin XRD paterni (b) Ağırlıkça % 5, 10, 15 ve 20 TiO_2 içeren B_4C'lerin kırılma tokluk değerleri.

Highlights (Önemli noktalar)

- *In-situ TiB_2 phase was formed as a result of the reactions between B_4C and TiO_2 during SPS. / SPS sırasında B_4C ve TiO_2 arasında gerçekleşen reaksiyonlar sonucu in-situ TiB_2 fazı oluşmuştur.*
- *The toughening mechanisms provided by TiB_2 contributed to the improvement of fracture toughness of B_4C. / TiB_2'nin sağladığı tokluk mekanizmaları B_4C'nin kırılma tokluğunun iyileşmesine katkıda bulunmuştur.*
- *The relative density and hardness of B_4C decreased with increasing TiO_2 content. / TiO_2 içeriği arttıkça B_4C'nin bağıl yoğunluğu ve sertliği azalmıştır.*

Aim (Amaç): *Identify the second phases that may form during SPS when TiO_2 is used as a sintering additive in B_4C matrix, and to evaluate their effects on the density and mechanical properties of the resulting composites. / TiO_2, B_4C matrisinde sinterleme katkı maddesi olarak kullanıldığında, SPS işlemi sırasında oluşabilecek ikinci fazları belirlemek ve bu fazların elde edilen kompozitlerin yoğunluğu ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmektir.*

Originality (Özgünlük): *The fracture toughness of B_4C was enhanced through the in-situ formation of TiB_2 using a cost-effective approach. / B_4C'nin kırılma tokluğu, ekonomik bir yöntemle in-situ TiB_2 oluşumu vasıtasıyla artırılmıştır.*

Results (Bulgular): *The results revealed that an in-situ TiB_2 phase was formed as a result of the reactions between B_4C and TiO_2 during SPS. The relative density and hardness of the B_4C matrix slightly decreased with increasing TiO_2 content. The fracture toughness of the B_4C matrix was enhanced by the presence of residual stress-induced microcracks and by toughening mechanisms such as crack deflection, bridging, and blocking promoted by the in-situ formed TiB_2 phase. / Sonuçlar, SPS sırasında B_4C ile TiO_2 arasındaki reaksiyonlar sonucunda in-situ TiB_2 fazının oluştuğunu ortaya koymuştur. Artan TiO_2 içeriğiyle birlikte B_4C matrisinin bağıl yoğunluğu ve sertliğinde hafif bir azalma gözlemlenmiştir. B_4C matrisinin kırılma tokluğu, artık gerilme kaynaklı mikroçatlakların varlığı ve in-situ olarak oluşan TiB_2 fazı ile desteklenen çatlak saptırma, köprüleme ve durdurma gibi toklaştırma mekanizmaları sayesinde artırılmıştır.*

Conclusion (Sonuç): *The fracture toughness of B_4C was significantly improved through various toughening mechanisms provided by the in-situ formed TiB_2 phase throughout the matrix. / B_4C'nin kırılma tokluğu, in-situ olarak oluşmuş TiB_2 fazının matris boyunca sağladığı çeşitli tokluk mekanizmalarının yardımıyla önemli ölçüde iyileştirilmiştir.*

*Corresponding author, e-mail: skayhan@eskisehir.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1699270

GU J Sci, Part C, 13(3): 1184-1194 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Effects of in-situ formed TiB_2 Phase on Mechanical Properties of Spark Plasma Sintered Boron Carbide

Sinem BAŞKUT[1*], Name YALAMA[1], Servet TURAN[1]

Eskisehir Technical University, Faculty of Engineering, Department of Materials Science and Engineering, Eskisehir, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 14/05/2025
Revision: 29/06/2025
Accepted: 30/06/2025

Keywords

B_4C
TiB_2
Fracture Toughness
Hardness
SPS

Abstract

Due to their superior properties, B_4C ceramics are extensively utilized in applications such as defense and ballistic protection, coatings, aerospace, and high-temperature electronic devices. However, enhancing its low fracture toughness and poor sinterability would significantly expand its potential applications. In this study, the effects of TiO_2 as a sintering additive on the density and mechanical properties of B_4C were investigated, along with the identification of in-situ second phases likely to form during sintering with SPS. To achieve this, TiO_2 was added to B_4C in amounts of 5, 10, 15, and 20 wt. %. XRD analyses of the SPS-sintered samples confirmed the formation of an in-situ TiB_2 phase, resulting from reactions between B_4C and TiO_2 during sintering. The release of CO gas from the reactions between TiO_2 and B_4C during sintering led to a slight decrease in the relative density of the B_4C matrix with increasing TiO_2 content. The results from density measurements were in agreement with BSE-SEM images. The addition of TiO_2 caused a minor decrease in the hardness of the B_4C matrix. The fracture toughness of the B_4C matrix improved by approximately 6, 43, 51, and 57 % with the addition of 5, 10, 15, and 20 wt. % TiO_2, respectively. This improvement has been attributed to the contribution of toughening mechanisms such as crack deflection, bridging, and blocking provided by the in-situ formed TiB_2, as well as the presence of stress-induced microcracks.

In-situ Olarak Oluşmuş TiB_2 Fazının Spark Plazma Sinterleme ile Üretilmiş Bor Karbürün Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 14/05/2025
Düzeltme: 29/06/2025
Kabul: 30/06/2025

Anahtar Kelimeler

B_4C
TiB_2
Kırılma Tokluğu
Sertlik
SPS

Öz

B_4C seramikleri üstün özellikleri nedeniyle savunma ve balistik koruma, kaplamalar, havacılık ve yüksek sıcaklıkta çalışan elektronik cihazlar gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, düşük kırılma tokluğu ve zayıf sinterlenebilirliğinin iyileştirilmesi, bu malzemenin potansiyel kullanım alanlarını önemli ölçüde genişletecektir. Bu çalışmada, TiO_2'nin sinterleme ilavesi olarak B_4C'nin yoğunluğu ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri ile SPS yöntemiyle sinterleme sırasında oluşması muhtemel in-situ ikinci fazların belirlenmesi üzerinde durulmuştur. Bu amaçla, TiO_2 B_4C'ye ağırlıkça % 5, 10, 15 ve 20 oranlarında ilave edilmiştir. SPS ile sinterlenmiş numunelerin XRD analizleri, sinterleme sırasında B_4C ile TiO_2 arasında gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda in-situ TiB_2 fazının oluştuğunu göstermiştir. Sinterleme sürecinde TiO_2 ile B_4C arasındaki reaksiyonlar sırasında açığa çıkan CO gazı nedeniyle, artan TiO_2 içeriğiyle birlikte B_4C matrisinin bağıl yoğunluğunda az miktarda azalma gözlemlenmiştir. Yoğunluk ölçüm sonuçları, BSE-SEM görüntüleri ile uyumlu bulunmuştur. TiO_2 ilavesi, B_4C matrisinin sertliğinde hafifçe azalmaya neden olmuştur. B_4C matrisinin kırılma tokluğu, sırasıyla % 5, 10, 15 ve 20 TiO_2 katkısıyla yaklaşık % 6, 43, 51 ve 57 oranlarında artış göstermiştir. Bu iyileşme, in-situ olarak oluşmuş TiB_2'nin sağladığı çatlak saptırma, köprüleme ve durdurma gibi toklaştırma mekanizmalarının katkıları ile artık gerilme kaynaklı mikroçatlakların varlığıyla ilişkilendirilmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Boron carbide (B_4C) ceramics are widely used in various industrial applications due to their outstanding properties, including low density (2.52 g/cm³), excellent chemical inertness, high hardness (~3770 kg/mm²), high melting point (2427 °C), an elastic modulus of 450 GPa, and superior wear resistance. Common applications include body armor, cutting tools, mechanical seals, blast nozzles, wire-drawing dies, and neutron-absorbing components [1–5]. Despite these advantages, B_4C

*Corresponding author, e-mail: skayhan@eskisehir.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1699270

suffers from several limitations. It is difficult to densification owing to its low self-diffusion coefficient, often resulting in a porous microstructure. Additionally, its relatively low flexural strength and poor fracture toughness restrict its broader use as a structural engineering ceramic [6–8].

Sintering methods such as spark plasma sintering (SPS), hot pressing (HP), hot isostatic pressing (HIP), and pressureless sintering (PS) are commonly used to achieve high temperatures necessary for the densification of B_4C [9]. Among these, PS is often preferred due to its cost-effectiveness. However, in the PS technique, excessive grain growth at elevated temperatures can adversely affect the densification of B_4C. To address this issue, the addition of sintering additives is a widely used approach. These additives help lower the sintering temperature and enhance both densification and the mechanical properties of B_4C. They can be carbon-based, metallic, oxide, non-oxide or a combination of these types [10]. In one study [11], the addition of 10 wt. % graphene platelets (GPLs) to the B_4C matrix improved its fracture toughness by approximately 50 %. In another study [12], the incorporation of aluminum (Al) as a sintering additive significantly enhanced the density, fracture toughness, and strength of B_4C. Similarly, Kelvin et al. [13] reported that adding 5 wt. % Al_2O_3 to the B_4C matrix led to nearly full densification (97 %) and a ~ 45 % increase in fracture toughness.

A review of the literature indicated that in-situ secondary phases can form due to reactions between added sintering additives and B_4C during sintering [14-20]. These in-situ phases have been reported to enhance the fracture toughness of B_4C by impeding crack propagation. For instance, in a study [15] where ZrO_2 was added to B_4C and the SPS technique was used as the sintering method, it was determined that the fracture toughness increased from 2.3 $MPa.m^{1/2}$ to 3.96 $MPa.m^{1/2}$ due to the crack deflection and branching toughening mechanisms provided by the in-situ formed TiB_2 phase. Perevislov et al. [16] produced B_4C matrix composites containing varying amounts of Si using HP, and reported that the fracture toughness of B_4C increased by approximately 12 % due to the in-situ formation of a SiC phase. Liu et al. [17] examined B_4C composites containing 5 wt. % metallic Ti sintered via PS and reported the in-situ formation of a TiB_2 phase, which increased the relative density from ~79 % to ~96 % and doubled the fracture toughness, attributed to crack-bridging, deflection, and branching mechanisms induced by the TiB_2 phase. Şahin et al. [18], who added 20 vol. % metallic Ti to the B_4C matrix and identified the in-situ formation of TiB_2 after SPS sintering, achieved a fracture toughness value of 5.9 $MPa.m^{1/2}$. In a study [19] where titanium silicide (Ti_5Si_3) powder was added to the B_4C matrix as a sintering additive, the in-situ formation of TiB_2 and SiC phases was observed during SPS sintering, and a significant improvement in the wear resistance of the B_4C matrix was reported. In another study [20], where amorphous B, Ti, and graphite were added to B_4C and the powder mixtures were sintered using SPS, B_4C/TiB_2 composites with varying ratios were obtained depending on the amounts of the starting powders, and fracture toughness values as high as 9.9 ± 0.01 $MPa.m^{1/2}$ were obtained.

Given these findings, the objective of the present study is to identify the second phase that may form during sintering with SPS when TiO_2 is used as a sintering additive in B_4C, and to evaluate its effects on the density and mechanical properties of the resulting composites. To this end, TiO_2 and B_4C powders were mixed by ball milling and sintered using the SPS technique. The phases present in the sintered samples were identified via x-ray diffraction (XRD), while microstructures were examined using scanning electron microscopy (SEM). In addition, measurements of density, hardness, and fracture toughness were conducted during the study.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

Commercially available B_4C powder (CRS Chemicals, F2000 Grade, d_{50} =1.61 µm) and TiO_2 (Acros Organics, 99 % Anatase, d_{50} =5 µm) powder were used as starting materials. Prior to mixing, the TiO_2 powder was ball milled (Fritsch Pulverisette) at 300 rpm for 1 h in an isopropanol medium. TiO_2 was then added to the B_4C powder at weight fractions of 5, 10, 15, and 20 %. Subsequently, B_4C and TiO_2 powders were blended in a silicon nitride (Si_3N_4) jar with Si_3N_4 balls for 75 min. at 300 rpm in an isopropanol medium. After milling, isopropanol was removed using an evaporator, and the dried mixtures were sieved.

The prepared compositions were sintered using the SPS technique (HP 25D, FCT GmbH) at 1950 °C under a uniaxial pressure of 50 MPa for a dwell time of 20 min. in a vacuum atmosphere. The heating rate was set to 100 °C/min. The resulting sintered samples had a diameter of 20 mm and a thickness of 6 mm.

Bulk densities of the samples were measured using Archimedes' principle, with deionized water as the immersion medium. Relative density values were calculated based on the rule of mixtures. For the calculations, theoretical densities of B_4C and TiB_2 were taken as 2.52 g/cm³ and 4.52 g/cm³, respectively.

XRD (Rigaku, RINT-2000) analyses were carried out to bulk samples between 10–70° (2Θ) under the conditions of 40 kV accelerating voltage, 15 mA current, 1 °/min. scan speed and 0.02 step size. Samples were sectioned and polished using an automatic polisher (STRUERS TegraPol-25), progressing from coarse to fine polishing steps. The polished surfaces of the samples were investigated by backscatter electron imaging (BSE-SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS-SEM, Oxford Instruments, INCA Energy) techniques in the SEM (Zeiss, SUPRA 50 VP).

Hardness measurements were conducted using the Vickers indentation method (Emco-Test) under a 5 kg load and a dwell time of 10 seconds. A minimum of ten indentations was made per sample, and the average values were used for statistical analysis. Fracture toughness was calculated using Equation 1 [21].

$$K_c = 0.067 \left(\frac{E}{H_V}\right)^{0.4} H_V \alpha^{0.5} \left(\frac{c}{a}\right)^{-1.5} \quad (1)$$

3. RESULTS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE YORUMLAR)

XRD spectra of the B_4C matrix and B_4Cs containing 5, 10, 15, and 20 wt.% TiO_2 are presented in Figure 1. XRD analysis of the pure B_4C matrix revealed only the B_4C phase, whereas the patterns of the TiO_2-containing B_4Cs indicated the presence of both B_4C and TiB_2 phases. This confirms that the in-situ TiB_2 phase was formed as a result of the reactions between B_4C and TiO_2 during the sintering process, as described by Equation 2 [22, 23].

$$4B_4C(s) + 5\ TiO_2 \rightarrow 5TiB_2(s) + 4CO(g) + 6BO(g) \quad (2)$$

Furthermore, the absence of detectable TiO_2 peaks in the XRD spectra of the TiO_2-added B_4Cs indicated that all the TiO_2 was consumed during the reactions. With increasing TiO_2 content, the intensity of the TiB_2 peaks increased, whereas the intensity of the B_4C peaks gradually decreased. This trend suggested that a higher amount of B_4C was consumed and more TiB_2 was formed with increasing TiO_2 content, consistent with previous findings [24].

BSE-SEM images of the TiO_2-containing B_4C composites (Fig. 2 b1–e2) revealed two distinct phases, distinguished by white and gray contrasts. To identify the phases present, EDS-SEM analyses were performed on the polished surface of the B_4C composite containing 10 wt.% TiO_2, as shown in Figure 3. For each phase, measurements were taken at five different points, and the average atomic percentages (atm. %) were then calculated. In the gray-contrast regions (Fig. 3b1 and 3b2), labeled as region 1 (green) in the BSE-SEM image (Fig. 3a), the atm. % of boron (B) and carbon (C) were approximately 80 % and 20 %, respectively (Fig. 3b1, b2). In contrast, the white-contrast regions labeled as Region 2 (orange) in Fig. 3a exhibited atm. % of boron (B) and titanium (Ti) of approximately 65 % and 35 %, respectively (Fig. 3c1, c2). Based on the EDS-SEM results, the gray contrast can be attributed to the B_4C phase, while the white contrast corresponds to the TiB_2 phase. Considering the combined results from XRD, SEM imaging, and EDS-SEM analyses, the TiO_2-added B_4C systems can be classified as in-situ formed B_4C–TiB_2 composites.

The BSE-SEM images of the B_4C–TiB_2 composites (Fig. 2, b1–e2) revealed that the in-situ formed TiB_2 phase is homogeneously distributed within the B_4C matrix microstructure. Additionally, as observed in the images ranging from Fig. 2 b1 to e2, the in-situ formation of TiB_2 predominantly occurs along the B_4C grain boundaries. Among the in-situ formed B_4C–TiB_2 composites, no significant porosity was observed in the microstructure of the sample containing 5 wt. % TiO_2 (Fig. 2 b1 and b2). In contrast, noticeable porosities are evident in the samples containing 10, 15, and 20 wt. % TiO_2 (Fig. c1–e2). Some of these porosities may result from grain pull-out during mechanical polishing. However, the majority of the porosity is likely due to the release of CO gas generated by the in-situ reaction during the sintering process [9].

Table 1 presents the bulk and relative density values of the B_4C matrix and in-situ B_4C–TiB_2 composites. The B_4C matrix exhibited a bulk density of 2.49 g/cm³ and a relative density of 98.8 %, indicating that the material was nearly fully densified. These density measurements align well with the microstructural observations of B_4C matrix shown in Fig. 2 a1 and a2, which reveal no significant porosity. The addition of TiO_2 resulted in an increase in bulk density but a decrease in relative

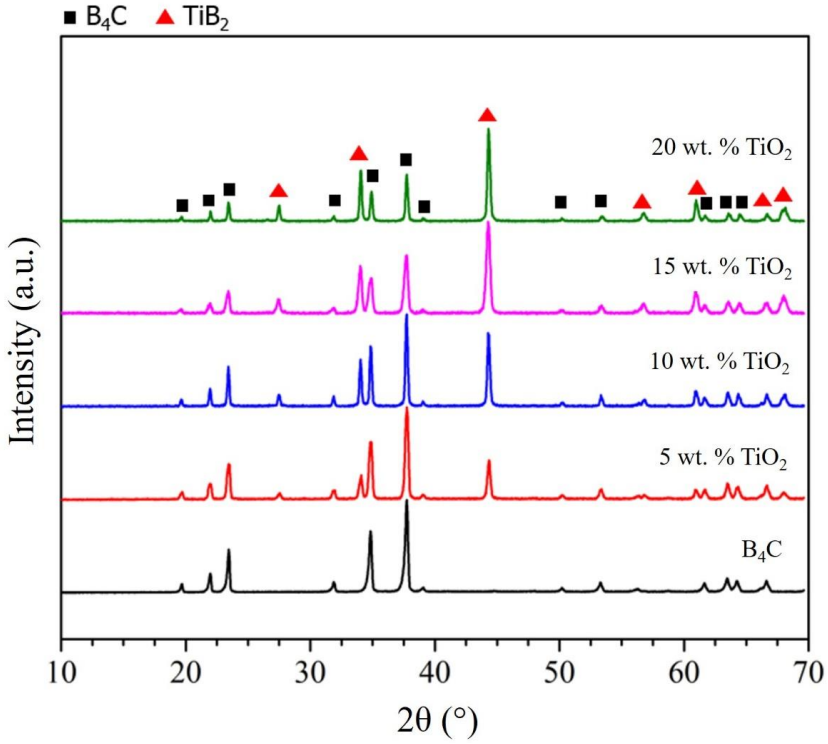


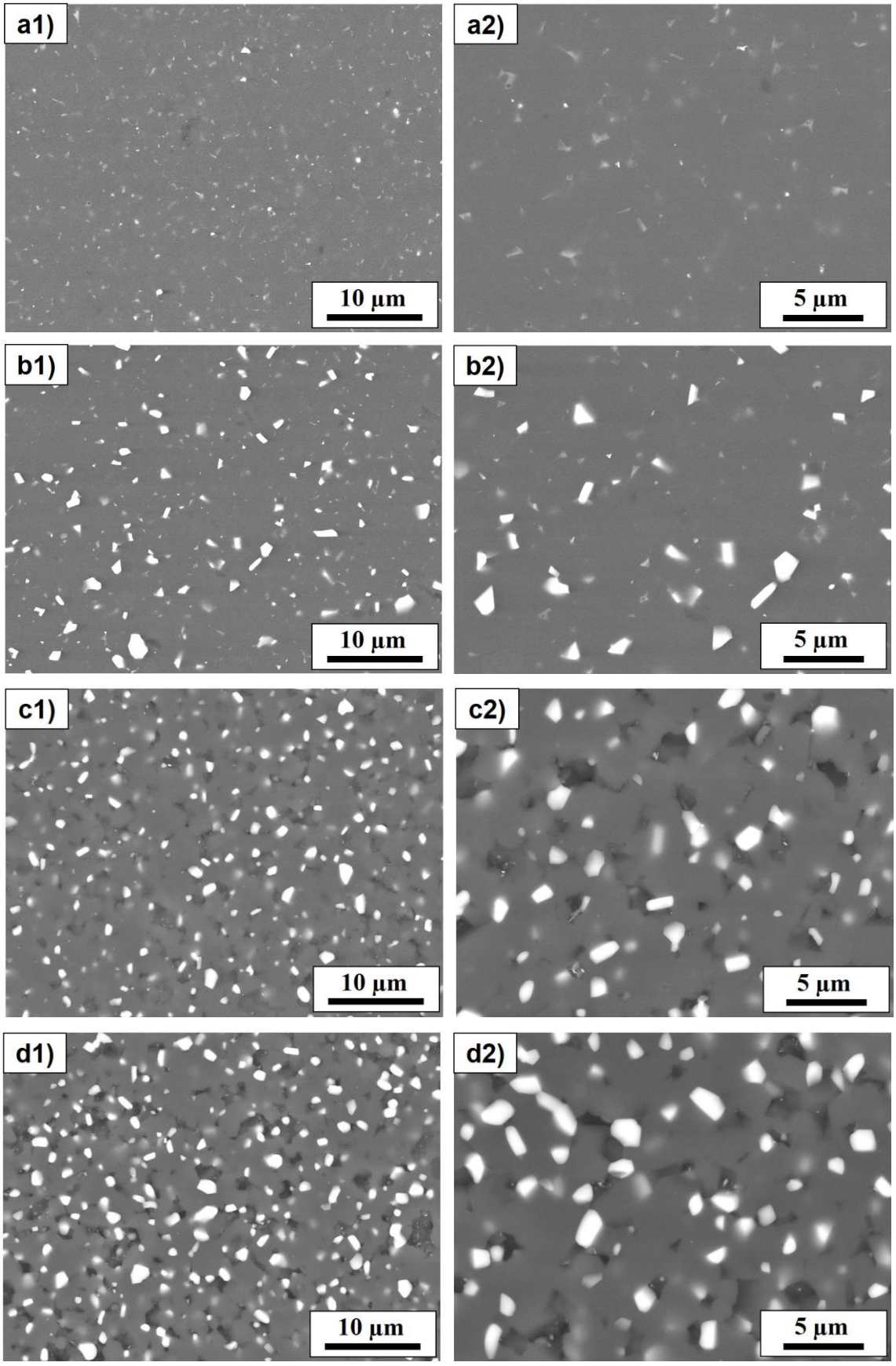
Figure 1. XRD spectra of the B_4C matrix and B_4Cs containing 5, 10, 15, 20 wt. % TiO_2. B_4C ID:2235962, TiB_2 ID: 2002799 (B_4C matrisi ile ağırlıkça % 5, 10, 15 ve 20 TiO_2 içeren B_4C'lerin XRD spektrası)

Table 1. Bulk and relative density values of the B_4C matrix and B_4Cs containing 5, 10, 15, 20 wt. % TiO_2. (B_4C matrisi ile ağırlıkça % 5, 10, 15 ve 20 TiO_2 içeren B_4C'lerin yığınsal ve bağıl yoğunluk değerleri.)

Materials	**Bulk Density (gcm^{-3})**	**Relative Density (%)**
B_4C	2.490	98.8
B_4C-5 wt. % TiO_2	2.516	97.7
B_4C-10 wt. % TiO_2	2.537	96.3
B_4C-15 wt. % TiO_2	2.589	96.0
B_4C-20 wt. % TiO_2	2.619	94.7

density. The increase in bulk density can be attributed to the formation of the TiB_2 phase, which has a higher intrinsic density than B_4C. Conversely, the reduction in relative density with increasing TiO_2 content is likely due to porosity generated by the release of CO gas during the in-situ reaction between TiO_2 and B_4C during sintering. These trends in relative density are consistent with the microstructural properties of the B_4C–TiB_2 composites (Fig. 2 b1–e2).

The average hardness and fracture toughness values of the B_4C matrix and the in-situ B_4C–TiB_2 composites are presented in Figure 4 and Figure 5, respectively. Since the hardness of materials is generally directly proportional to their density, the measured hardness of the B_4C matrix (31.3 ± 1.5 GPa) aligns with expected values (~30 GPa). While no significant change was observed in the hardness of B_4C with the addition of 5 wt. % TiO_2, its hardness decreased by approximately 11–13 % with the addition of 10, 15, and 20 wt. % TiO_2. This reduction is attributed to the increased porosity in the microstructure caused by higher TiO_2 content, which negatively impacts hardness. Furthermore, since TiB_2 has lower


a1)
10 µm
a2)
5 µm
b1)
10 µm
b2)
5 µm
c1)
10 µm
c2)
5 µm
d1)
10 µm
d2)
5 µm

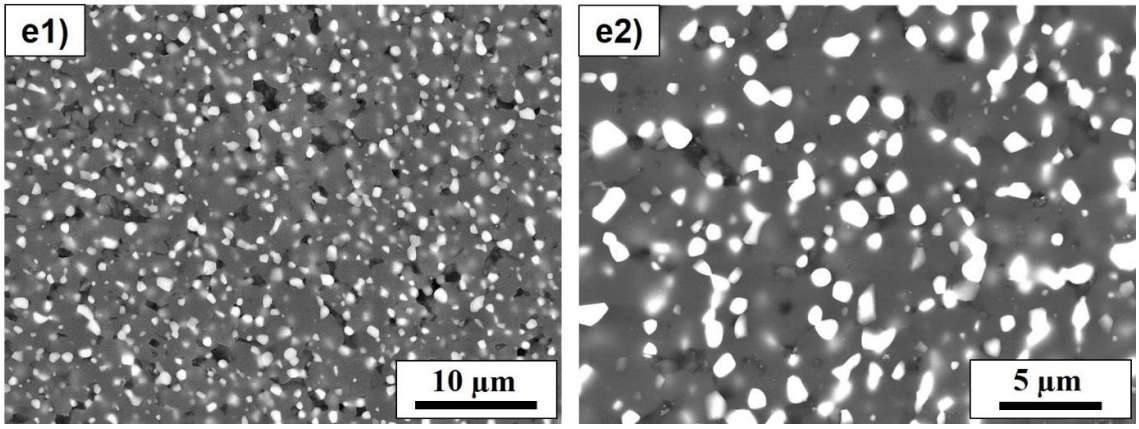


Figure 2. BSE-SEM images of the (a1, a2) B_4C matrix and B_4Cs containing (b1, b2) 5, (c1, c2) 10, (d1, d2) 15, (e1, e2) 20 wt. % TiO_2 at (a1, b1, c1, d1, e1) 5000X and (a2, b2, c2, d2, e2) 10000X magnifications. ((a1, a2) B_4C matrisi ile (b1, b2) % 5, (c1, c2) % 10, (d1, d2) % 15 ve (e1, e2) % 20 TiO_2 içeren B_4C'lerin (a1, b1, c1, d1, e1) 5000X ve (a2, b2, c2, d2, e2) 10000X büyütmelerde BSE-SEM görüntüleri.)

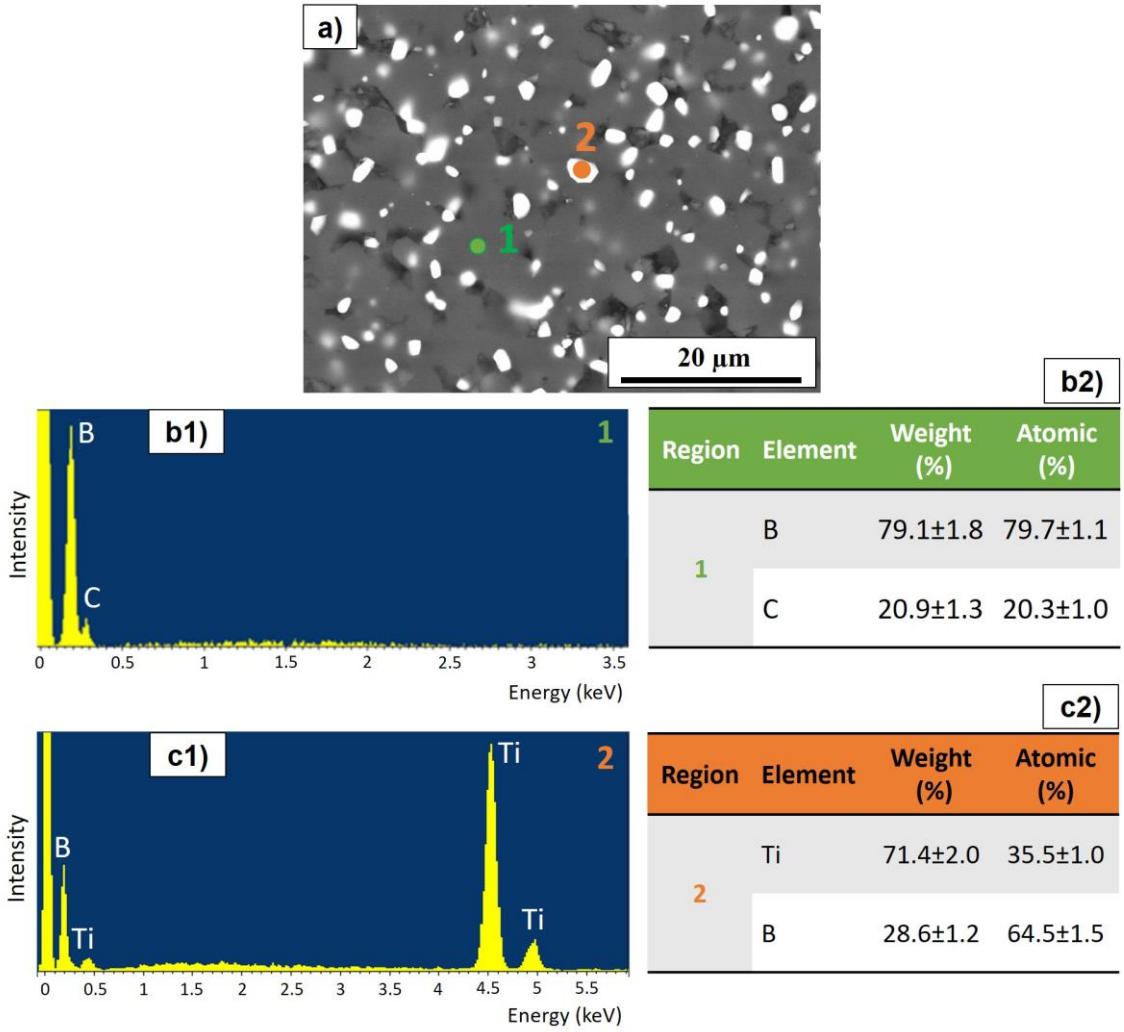


Figure 3. EDS-SEM analyses results of the phases present in the microstructure of B_4C containing 10 wt. % TiO_2. (Ağırlıkça %10 TiO_2 içeren B_4C'nin mikroyapısında bulunan fazlara ait EDS-SEM analiz sonuçları.)

hardness than B_4C, the formation of the TiB_2 phase within the composite also contributed to the overall decrease in hardness of the in-situ formed TiB_2–B_4C composites.

The fracture toughness value of the B_4C matrix (4.33 ± 0.32 MPa.m$^{1/2}$) increased by ~ 6, 43, 51 and 57 % with the addition of 5, 10, 15 and 20 wt. % TiO_2, respectively (Fig. 5). Additionally, Figure 6 contains representative microstructures revealing effective toughening mechanisms along the cracks created by Vickers indentation on the surfaces of the B_4C matrix (a) and B_4C matrix composite containing 10 wt. % TiO_2 (b). The B_4C grain boundaries were observed to be the only factor delaying crack propagation in the B_4C matrix (Fig. 6 a). On the other hand, it was determined that toughening mechanisms such as deflection, bridging and blocking provided by the TiB_2 phase along the crack increased the fracture toughness of B_4C (Fig. 6 b). Some of the energy accumulated at the crack tip, which enables its propagation, was dissipated due to crack deflections upon encountering TiB_2 phases. Subsequently, the crack was thinned through crack-bridging mechanisms provided by TiB_2. When the crack with reduced energy encountered the TiB_2 phase, its propagation was halted due to blocking mechanism (Fig. 6 b).

Residual stresses arising from the large mismatch in thermal expansion coefficients between B_4C (4.5×10^{-6} K^{-1}) and TiB_2 (8.1×10^{-6} K^{-1}) can lead to the formation of microcracks at B_4C–TiB_2 grain boundaries [25, 26]. In addition, the presence of free carbon has been reported to weaken the interfacial bonding between B_4C and TiB_2 phases, leading to the formation of microcracks at the interfaces. These microcracks may deflect propagating cracks, thereby increasing the fracture path and energy absorption, which enhances the fracture toughness [9, 27, 28]. Moreover, the increase in fracture toughness of the B_4C–TiB_2 composite with increasing TiB_2 content can be attributed to the higher intrinsic fracture toughness of TiB_2 compared to B_4C.

4. CONCLUSION (SONUÇLAR)

In this study, TiO_2 was used as a sintering additive to increase the sinterability and mechanical properties of B_4C. TiO_2 powder was added to B_4C matrix powder at different ratios, and the resulting compositions were sintered using the SPS technique. XRD and EDS-SEM analyses revealed that the in-situ TiB_2 phase was formed as a result of

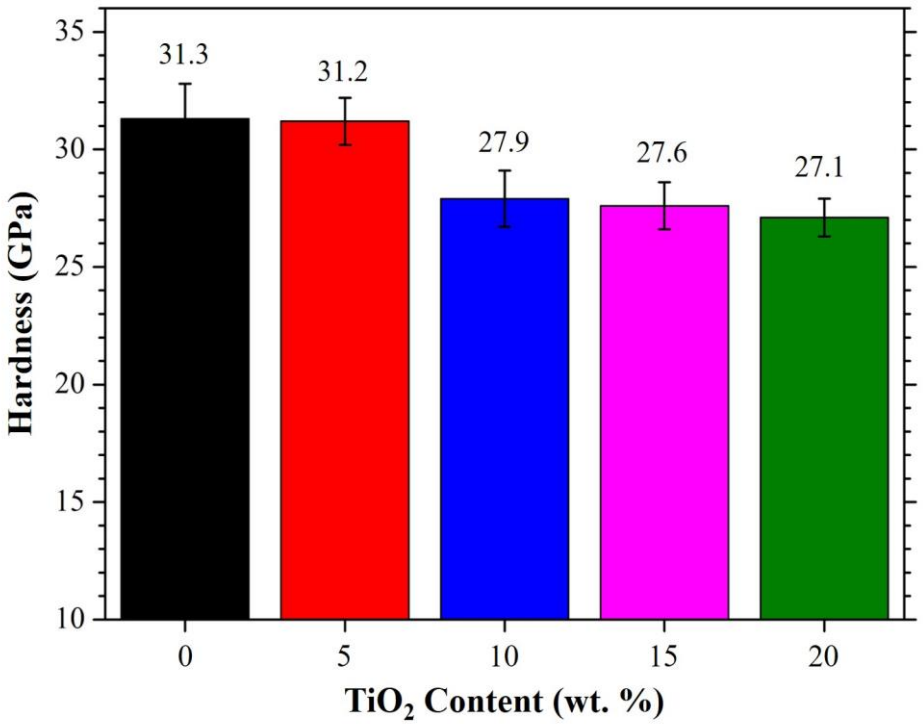


Figure 4. Hardness values of the B_4C matrix and B_4Cs containing 5, 10, 15, 20 wt. % TiO_2. (B_4C matrisi ile ağırlıkça % 5, 10, 15 ve 20 TiO_2 içeren B_4C'lerin sertlik değerleri.)

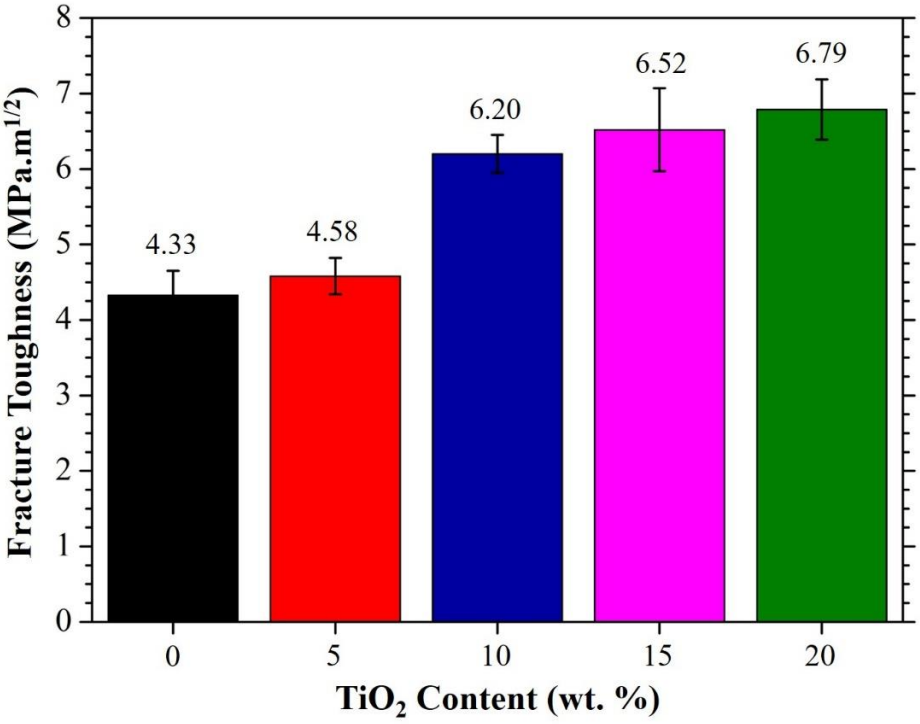


Figure 5. Fracture toughness values of the B_4C matrix and B_4Cs containing 5, 10, 15, 20 wt. % TiO_2. (B_4C matrisi ile ağırlıkça % 5, 10, 15 ve 20 TiO_2 içeren B_4C'lerin kırılma tokluğu değerleri.)

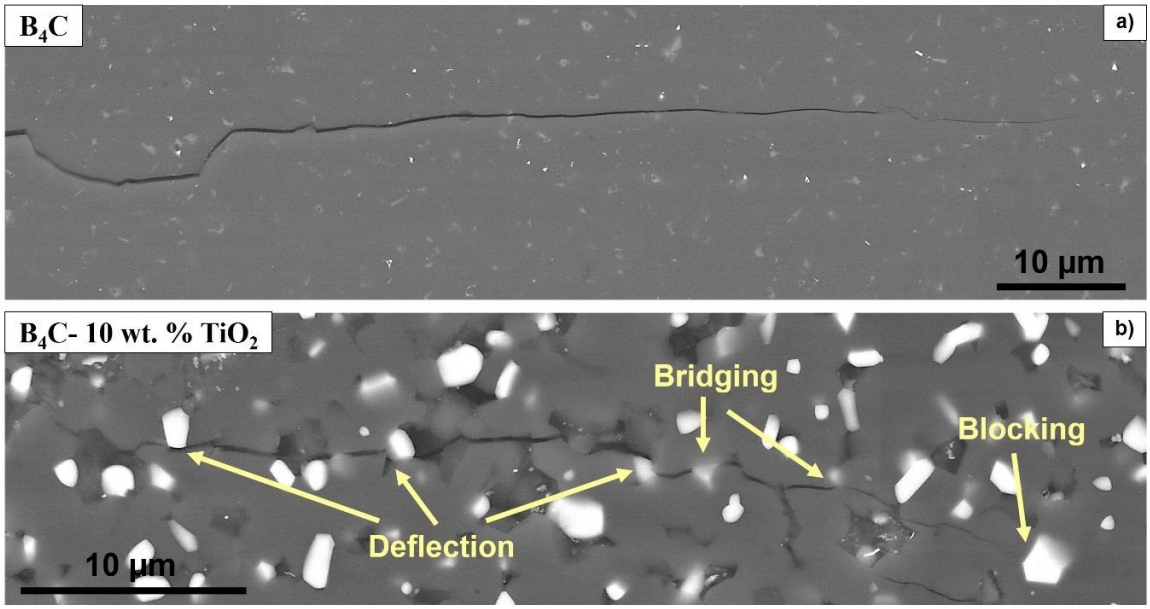


Figure 6. Representative BSE-SEM images of the cracks obtained by Vickers indentation on the surfaces of (a) B_4C matrix and (b) B_4C matrix composite containing 10 wt. % TiO_2. ((a) B_4C matrisi ve (b) ağırlıkça % 10 TiO_2 içeren B_4C matris kompozit yüzeylerinde Vickers indentasyon yöntemiyle elde edilen çatlaklardan alınmış temsili BSE-SEM görüntüleri.)

the reactions between B_4C and TiO_2 during sintering. Microstructure examinations and density measurements showed that highly dense B_4C matrix could be produced with the applied sintering conditions. While the density of the B_4C matrix composite containing 5 wt. % TiO_2 was comparable to that of pure B_4C, increased porosity was observed in composites with 10, 15, and 20 wt. % TiO_2 due to CO gas evolution during the reaction. Accordingly, the relative density slightly decreased. The hardness value of the B_4C matrix was obtained at the expected value (31.3±1.5 GPa). As the TiO_2 content increased, the hardness values tended to decrease, which corresponded proportionally to the reduction in relative density. On the other hand, the fracture toughness of the B_4C matrix, determined to be approximately 4.33 ± 0.32 MPa.m$^{1/2}$, increased by ~ 6, 43, 51, and 57 % with the addition of 5, 10, 15, and 20 wt. % TiO_2, respectively. The deflection, bridging and blocking toughening mechanisms provided by the in-situ formed TiB_2 phase to crack propagation positively affected the fracture toughness. Additionally, the microcracks formed due to residual stress in the in-situ B_4C–TiB_2 composites contributed to an increase in the fracture toughness of B_4C. In applications where hardness is prioritized over fracture toughness, the addition of 5 wt. % TiO_2 can be considered ideal, whereas in applications that demand higher fracture toughness, increased TiO_2 content may be preferred.

ACKNOWLEDGEMENTS (TEŞEKKÜR)

The Eskisehir Technical University Scientific Research Projects under the project number of 23LÖP040 and Tubitak 2209-A-Research Project Support Programme for Undergraduate Students with a number of 1919B012223499 supported this work.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Sinem BAŞKUT: She took part in the execution of the experiments, analyzed the results, and carried out the writing process.

Deneylerin yürütülmesine katıldı, sonuçları analiz etti ve yazım sürecini gerçekleştirdi.

Name YALAMA: She was involved in the experimental procedures.

Deneysel süreçlerin gerçekleştirilmesinde görev aldı.

Servet TURAN: He contributed to the analysis of the results.

Sonuçların analiz edilmesine katkı sağladı.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Domnich V, Reynaud S, Haber RA, Chhowalla M. Boron carbide: structure, properties, and stability under stress. Journal of the American Ceramic Society. 94; 2011: 3605–3628.

[2] Zhu Y, Cheng H, Wang Y, An R. Effects of carbon and silicon on microstructure and mechanical properties of pressureless sintered B_4C/TiB_2 composites. Journal of Alloys and Compounds. 772; 2019: 537–545.

[3] Shi L, Gu Y, Chen L, Qian Y, Yang Z, Ma J. A low temperature synthesis of crystalline B_4C ultrafine powders, Solid State Communication. 128; 2003: 5–7.

[4] Thevenot F. Sintering of Boron Carbide and Boron Carbide-silicon Carbide Two-phase Materials and Their Properties. Journal of Nuclear Materials. 152; 1988: 154–162.

[5] Rafi-ud-din GH et al. Ethylene Glycol Assisted Low-Temperature Synthesis of Boron Carbide Powder from Borate Citrate Precursors, Journal of Asian Ceramic Society. 2: 3; 2014: 268–274.

[6] Liu L et al. Sintering Dense Boron Carbide Without Grain Growth under High Pressure, Journal of the American Ceramic Society. 101:3; 2018:1289–1297.

[7] Tuffe S, Dubois J, Barbier G. Densification, Microstructure and Mechanical Properties of TiB_2-B_4C Based Composites. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 14; 1996: 305–310.

[8] Hwang C et al. Small Amount TiB_2 Addition into B_4C through Sputter Deposition and Hot Pressing. Journal of the American Ceramic Society. 102: 8; 2019: 4421–4426.

[9] Khajehzadeha M, Ehsania N, Baharvandia RH, Abdollahia A, Bahaaddini M, Tamadonb A. Thermodynamical evaluation, microstructural characterization and mechanical properties of B_4C–TiB_2 nanocomposite produced by in-situ

reaction of Nano-TiO_2. Ceramics International. 46; 2020: 26970–26984.

[10] Zhang W, Yamashita S, Kita H. Progress in pressureless sintering of boron carbide ceramics–a review. Advanced in Applied Ceramic. 118: 4; 2019: 222-239.

[11] Sedlák R, Kovalčíková A, Múdra E, Rutkowski P, Dubiel A, Girman V, Bystrický R, Dusza J. Boron carbide/graphene platelet ceramics with improved fracture toughness and electrical conductivity. Journal of the European Ceramic Society 37: 12; 2017: 3773-3780.

[12] Mashhadi M, Nassaj ET, Sglavo VM. Pressureless sintering of boron carbide. Ceramics International. 36: 1; 2010: 151–159.

[13] Kelvin Y, Xie M, Toksoy F, Kuwelkar K, Zhang B, Krogstad JA, Haber RA, Hemker KJ. Effect of Alumina on the Structure and Mechanical Properties of Spark Plasma Sintered Boron Carbide. Journal of the American Ceramic Society 97: 11; 2014: 3710–3718.

[14] Goldstein A, Geffen Y, Goldenberg A. Boron Carbide–Zirconium Boride In Situ Composites by the Reactive Pressureless Sintering of Boron Carbide–Zirconia Mixtures. Journal of the American Ceramic Society 84: 3; 2001: 642–644.

[15] Yao W, Yan J, Li X, Chen P, Zhu Y, Zhu B. In Situ ZrB_2 Formation in B_4C Ceramics and Its Strengthening Mechanism on Mechanical Properties. Materials. 15; 2022 7961.

[16] Perevislov SN, Lysenkov AS, Vikhman SV. Effect of Si Additions on the Microstructure and Mechanical Properties of Hot-Pressed B_4C. Inorganic Materials. 53: 4; 2017: 376–380.

[17] Liua G, Chenb S, Zhaoc Y, Fua Y, Wang Y. Effect of Ti and its compounds on the mechanical properties and microstructure of B_4C ceramics fabricated via pressureless sintering. Ceramics International, 47: 10; 2021: 13756-13761.

[18] Şahin FÇ, Mansoor M, Cengiz M, Apak B, Yanmaz L, Balazsi K, Fogarassy Z, Derin B, Göller G, Yücel O. B_4C Composites with a TiB_2-C Core–Shell Microstructure Produced by Self-Propagating High-Temperature Synthesis-Assisted Spark Plasma Sintering. The Journal of Physical Chemistry C. 126: 47; 2022: 20114-20126.

[19] Twardowska A, Kowalski M. The Microstructure, Mechanical, and Friction-Wear Properties of Boron Carbide-Based Composites with TiB_2 and SiC Formed In Situ by Reactive Spark Plasma Sintering. Materials, 17; 2024: 2379.

[20] Wang S, Yuan Y, Hanc W, Yin Z. Microstructure and mechanical properties of B_4C-TiB_2 composite ceramic fabricated by reactive spark plasma sintering. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 92; 2020: 105307.

[21] Rangel ER. Fracture Toughness Determinations by Means of Indentation Fracture, Nanocomposites with Unique Properties and Applications in Medicine and Industry. InTechOpen. 2011: ISBN:978-953-307-351-4.

[22] Kakazey M, Vlasova M, Gonzalez-Rodriguez JG, Dominguez-Patino M, Leder R. X-ray and EPR study of reactions between B_4C and TiO_2, Materials Science Engineering A. 418; 2006: 111-114.

[23] Levin L, Frage N, Dariel MP. The effect of Ti and TiO_2 additions on the pressureless sintering of B_4C. Metallurgical and Materials Transactions A, 30;1999: 3201-3210.

[24] Yang LK, Shen P, Guo R-F, Jiang Q-C. The role of TiO_2 incorporation in the preparation of B_4C/Al laminated composites with high strength and Toughness. Ceramics International. 44:13; 2018: 15219-15227.

[25] Asghar Z, Aziz T, Khan AR, Shah A, Waqas H, Ali F, Rasul HT, Khan MF. High-Hardness High-Fracture-Toughness B_4C-TiB_2 Composite Produced by Reactive Hot Pressing. Journal of Materials Engineering and Performance. 32; 2023: 7225–7233.

[26] He Q et al. Microstructures and Mechanical Properties of B_4C-TiB_2-SiC Composites Fabricated by Ball Milling and Hot Pressing. Journal of the Eıropean Ceramic Society. 38:7; 2018: 2832–2840.

[27] Sigl LS, Kleebe HJ. Microcracking in B_4C-TiB_2 Composites. Journal of American Ceramic Society. 78: 9; 1995: 2374–2380.

[28] Wang W, Lian J, Ru H. Pressureless sintered SiC matrix toughened by in situ synthesized

TiB_2: process conditions and fracture Toughness. Ceramics International. 38; 2012: 2079-2085.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1195-1207 (2025)

Laboratuvar Güvenilirlik Analizinde SPAR-H Yaklaşımı: Toprak Azot Analizi Örneği

Nurgül ZENGİN[1] Ertuğrul AYYILDIZ [1,2*]

[1]*Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Industrial Engineering, Trabzon, Turkey*

[2]*Hamad Bin Khalifa University, College of Science and Engineering, Engineering Management and Decision Sciences, Doha, Qatar*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/01/2025
Düzeltme: 14/05/2025
Kabul: 07/07/2025

Anahtar Kelimeler

Spar-h
İnsan güvenilirlik analizi Toprak azot analizi
İş sağlığı ve güvenliği

Article Info

Research article
Received: 22/01/2025
Revision: 14/05/2025
Accepted: 07/07/2025

Keywords

SPAR-H
Human reliability analysis
Soil nitrogen analysis
Occupational health and safety

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada Toprak azot analizi için SPAR-H yöntemi kullanılmıştır. Tüm görevler tanımlanarak performans şekillendiren faktör seviyeleri belirlenmiştir. Ardından nihai insan hata olasılığı SPAR-H yöntemine göre hesaplanmıştır. Hata olasılığı yüksek görevler için önlemler belirlenmiştir. / In this study, SPAR-H method was used for soil nitrogen analysis.The SPAR-H method, a human reliability analysis method, was used. All tasks were defined, and the levels of factors shaping performance were determined. The final probability of human error was then calculated using the SPAR-H method. Precautions were identified for tasks with high error probability.



Şekil A: *Toprak azot analizi /* ***Figure A:*** *Soil nitrogen analysis*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Labaratuvar ortamındaki toprak azot analizinde SPAR-H yöntemi ile insan hata olasılığı doğru bir şekilde hesaplamıştır. / The probability of human error was accurately calculated using the SPAR-H method in laboratory soil nitrogen analysis.*
- *Çalışmanın daha etkin bir sonuç vermesi için performans şekillendiren faktörlere zihinsel yorgunluk eklenebileceği önerilmiştir. / It has been suggested that mental fatigue can be added to the performance-shaping factors to give more effective results.*
- *Çalışma iş kazalarına yönelik önlem niteliği taşımaktadır. / The study, it is a precaution against work accidents.*

Amaç (Aim): *Çalışmanın amacı labaratuvar koşulları için SPAR-H yöntemi ile insan hata olasılığının belirlenmesidir**.** / The aim of the study is to determine the probability of human error using the SPAR-H method under laboratory conditions.*

Özgünlük (Originality): *Bu çalışma SPAR-H yöntemi ile Toprak azot analizi sürecini analiz edip insan hata olasılığını hesaplaması yönüyle özgün bir nitelik taşımaktadır**.** / This study is original in that it analyzes the soil nitrogen analysis process using the SPAR-H method and calculates the probability of human error.*

Bulgular (Results): *En yüksek hata olasılığı, 0,72 ile "Destilasyon Ünitesi" aşamasında belirlenmiştir. Bunu, 0,67 hata olasılığıyla "Eleme İşlemi" izlemektedir. Bu bulgular, bu adımların kimyasal reaksiyonlar ve ekipman kullanımı bakımından daha karmaşık olması nedeniyle hata riskini artırdığını göstermektedir. / The highest probability of error was found in the "Distillation Unit" stage, at 0.72. This was followed by the "Sieving Process" with a probability of error of 0.67. These findings suggest that these steps increase the risk of error due to the greater complexity of chemical reactions and equipment use.*

Sonuç (Conclusion): *Laboratuvar kazalarının önlenmesine yönelik iyileştirme çalışmalarında düzenli eğitim ve tecrübe kazanımının önemi, hem bu çalışma hem de literatürdeki benzer araştırmalar tarafından bir kez daha doğrulanmıştır. / The importance of regular training and experience in improvement efforts to prevent laboratory accidents has been confirmed once again by both this study and similar studies in the literature.*

*Corresponding author ertugrulayyildiz@ktu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1625155

GU J Sci, Part C, 13(3): 1195-1207 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Laboratuvar Güvenilirlik Analizinde SPAR-H Yaklaşımı: Toprak Azot Analizi Örneği

Nurgül ZENGİN[1] Ertuğrul AYYILDIZ [1,2*]

[1]*Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Industrial Engineering, Trabzon, Turkey*

[2]*Hamad Bin Khalifa University, College of Science and Engineering, Engineering Management and Decision Sciences, Doha, Qatar*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/01/2025
Düzeltme: 14/05/2025
Kabul: 07/07/2025

Anahtar Kelimeler

Spar-h
İnsan güvenilirlik analizi
Toprak azot analizi
İş sağlığı ve güvenliği

Öz

Bu çalışma, Trabzon Orman Bölge Müdürlüğü laboratuvarında yürütülen toprak azot analizi sürecinde insan hata olasılıklarını SPAR-H yöntemiyle incelemektedir. HRA yaklaşımının laboratuvar kazalarına uygulanması, prosedürlerin ve ekipmanların yanı sıra personelin deneyim ve eğitim düzeyi gibi faktörlerin de önemini ortaya koymuştur. Analiz adımlarında öncelikle tüm görevler tanımlanmış, ardından Performansı Şekillendiren Faktörlerin (PŞF) seviyeleri belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, en yüksek hata olasılığının distilasyon ünitesinde (0,72) gözlendiğini ve bunu eleme aşamasının (0,67) izlediğini göstermektedir. Destilasyon ünitesinde sıcak numuneyle çalışma ve kapasite eksikliği, eleme aşamasında ise yoğun tozun oluşturduğu sağlık riskleri sürecin kritik noktalarıdır. Bu riskleri azaltmak amacıyla kapasite artışı, koruyucu ekipman kullanımı ve ek eğitim programları önerilmiştir. Ayrıca analiz sırasında zihinsel yorgunluk gibi faktörlerin de göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanmıştır. Çalışma, SPAR-H yönteminin laboratuvar ortamlarında uygulanabilirliğini kanıtlamakta ve yüksek riskli endüstriler dışında da etkinliğinin altını çizmektedir. Elde edilen bulgular, iş güvenliği, verimlilik ve laboratuvar kazalarının önlenmesi konularında önemli veriler sunarak gelecekte yapılacak benzer araştırmalara yol göstermektedir.

Laboratory Reliability Analysis Using the SPAR-H Approach: A Case Study on Soil Nitrogen Analysis

Article Info

Research article
Received: 22/01/2025
Revision: 14/05/2025
Accepted: 07/07/2025

Keywords

SPAR-H
Human reliability analysis
Soil nitrogen analysis
Occupational health and safety

Abstract

This study examines the probability of human error in the soil nitrogen analysis process conducted in the Trabzon Forest Regional Directorate's laboratory through the SPAR-H method. Applying the HRA approach to laboratory incidents highlights the significance of procedural guidelines, equipment, and factors such as personnel experience and training. In the analysis steps, all tasks were initially defined, followed by the determination of Performance Shaping Factor (PSF) levels. The findings reveal that the highest error probability was observed in the distillation unit (0.72), followed by the sieving stage (0.67). Working with hot samples and limited capacity in the distillation unit, as well as the heavy dust encountered during sieving, were identified as critical points in the process. In order to mitigate these risks, capacity enhancements, the use of protective equipment, and additional training programs were recommended. Moreover, the importance of considering mental fatigue during the analysis was emphasized. This study demonstrates the applicability of the SPAR-H method in laboratory settings and underlines its effectiveness beyond high-risk industries. The results provide valuable insights into occupational safety, efficiency, and laboratory accident prevention, offering a foundation for future research in similar domains.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsan güvenilirlik analizi (HRA), insanların risk durumuna katkısını değerlendirebilmek amacıyla farklı nitel ve nicel değerlendirmelerden yararlanmaktadır. HRA, insan hatası olasılığını tanımlamak, modellemek ve ölçmekle ilgilenir [1].

Sanayi devriminden sonra meydana gelen kazalarda başlangıçta teknik kaynaklı sorunlar üzerinde yoğunlaşıldığı görülmektedir. İlerleyen dönemlerde ise odak noktası insan kaynaklı hatalara kaymış ve bu tür hataların çok ciddi sonuçlar doğurduğu ortaya konmuştur. Uzmanlar, insan performansını ölçmeye

*Corresponding author, e-mail: ertugrulayyildiz@ktu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1625155

ve performansı etkileyen etmenleri belirlemeye ağırlık vermiştir. Bu çabaların sonucunda, insan hatası olasılığını hesaplamak amacıyla çok sayıda yöntem geliştirilmiştir [2]. Başarılı bir risk analizinin amaçlarından biri, olumsuz aktivitelerin gerçekleşmesinden kaçınmaktır [3].

İnsan güvenilirlik analizi yöntemleri arasındaki farklar doğrultusunda üç nesilden oluşan bir sınıflandırma yapılmıştır: birinci nesil 1975'ten 1990'a, ikinci nesil 1990'dan 2005'e, üçüncü nesil ise 2005'ten günümüze kadar devam etmektedir. Bir operasyonda tanımlanmış alt görevlerin insan hatası olasılıklarına yoğunlaşanlar, birinci nesil yöntem olarak bilinmektedir. Bu yöntemler günümüzde de birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaya devam etmektedir. İkinci nesil yöntemler, Performansı Şekillendiren Faktörleri (PŞF'ler) tanımlarken çalışanın bilişsel süreçlerine ağırlık vermektedir. Üçüncü nesil yöntemler ise bu faktörler arasındaki etkileşimlerin ayrıntılarını açıklamaya odaklanmaktadır [4]. Literatürde yer alan bazı yöntemler Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. İnsan güvenilirlik analizi yöntemleri (Human reliability analysis methods)

Yöntem	Geliştiren	Faaliyet Alanı
AIPA (Accident Investigation And Progression Analysis)	Raabe, 1974 [5]	Nükleer
THERP (Technique For Human Error Rate Prediction)	Swain ve Guttmann, 1983 [6]	Nükleer
SLIM (Success Likelihood Index Method)	Embrey, 1983 [7]	Nükleer
HEART (Human Error Assessment And Reduction Technique)	Williams, 1985 [8]	Nükleer
SHERPA (Systematic Human Error Reduction And Prediction Approach)	Embrey, 1986 [9]	Genel
CREAM (Cognitive Reliability And Error Analysis Method)	Hollnagel, 1998 [10]	Nükleer
ATHEANA (A Technique For Human Error Analysis)	Cooper vd., 1996 [11]	Nükleer
SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk-Human Reliability Analysis)	Nuclear Regulatory Commission (NRC), 1999 [12]	Nükleer

Kaza, beklenmedik bir zamanda ve beklenmedik bir şekilde, tedbirsizlik, ihmal, bilgisizlik veya dikkatsizlik gibi faktörler sonucunda insana, çevreye, hayvana veya eşyalara zarar veren; yaralanmalara, can ya da mal kaybına yol açabilen olay olarak tanımlanmaktadır [13]. Kaza sıklığına yönelik yapılan çalışmalarda, kimyasal üretimle ilişkili sektörlerin en yüksek kaza oranına sahip olduğu ifade edilmektedir [14]. İnsan faktörünün olduğu her ortam gibi laboratuvarlar da kaza riski yüksek alanlar arasında yer almaktadır.

Laboratuvar kazaları denildiğinde en yaygın olarak akla gelen durumlar; kesik, kanama, yanık, göze ya da ağza yabancı madde girmesi, ayrıca cilt veya solunum yoluyla zehirlenme biçiminde özetlenebilir [15]. Bu çalışmada, Trabzon Orman Bölge Müdürlüğü laboratuvarında sık gerçekleştirilen toprak azot analiz sürecindeki insan hata olasılıkları SPAR-H yöntemiyle değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, laboratuvar süreçlerinde insan hatasına neden olan performans şekillendiren faktörleri belirleyerek laboratuvar güvenliği ve iş verimliliğini artırmaya yönelik öneriler geliştirmektir.

Bu çalışmada SPAR-H yönteminin laboratuvar ortamlarındaki uygulanabilirliğini araştırmak amacıyla sistematik bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Literatür taraması, şeffaf ve tekrarlanabilir bir yaklaşım olan PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) metodolojisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Scopus veri tabanında 2024 yılına kadar yayınlanmış olan makaleler, belirlenen anahtar kelimeler ve kombinasyonları kullanılarak taranmıştır. Tablo 2' de sorgu sonuçları özetlenmiştir

Tablo 2. Scopus veri tabanında Literatür taraması için kullanılan araştırma terimleri (Search terms used for literature search in Scopus database)

Aranan Anahtar Kelimeler	Bulunan Makale Sayısı
SPAR-H	176
SPAR-H AND "risk assessment"	99
"human reliability" AND "laboratory accidents"	2
SPAR-H" AND "laboratory accidents"	1

Taramada belirlenen toplam 278 makaleden, erişilebilirlik kriterleri doğrultusunda değerlendirmeye alınabilen 40 makale, ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda SPAR-H yönteminin ağırlıklı olarak nükleer enerji, denizcilik ve petrol sektörleri gibi yüksek riskli alanlarda kullanıldığı, laboratuvar ortamları üzerine yapılan çalışmaların ise oldukça sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Bu sınırlı sayıdaki çalışmadan öne çıkanlar ve uygulama alanları Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Önemli çalışmaların özeti (Summary of key studies)

Yazar	Yıl	Metod	Uygulama Alanı
Omidvari vd. [16]	2015	AHP	Üniversite laboratuvarı
Eyvazlou vd. [17]	2019	SPAR-H	Jeneratör tesisi
Zhan vd. [18]	2019	SPAR-H	Metro hattı kapı operasyonu
Taylor vd. [19]	2020	SPAR-H	Petrol endüstrisi
Liu vd. [20]	2021	SPAR-H	Nükleer santraller
Zhang vd. [21]	2022	SPAR-H, Bayes Ağı	Deniz taşımacılığı
Ahn vd. [22]	2022	SPAR-H	Gemilerde insan hatası
Ma vd. [23]	2022	Bulanık Küme ve Bayes Ağı	Laboratuvar yangını ve patlamaları
Lu[24]	2023	İstatistiksel analiz ve grafik	Üniversite laboratuvarı
Elidolu vd. [25]	2023	SPAR-H	Deniz taşımacılığı
He vd. [26]	2024	SPAR-H ve CREAM	Üniversite laboratuvarı risk ataması
Si ve Niu [27]	2024	SPAR-H, DEMATEL, ANP	İnşaat kuleleri
Liu vd. [28]	2025	SPAR-H	Nükleer santraller

SPAR-H yöntemi; sistematik yapısı, farklı görev türlerine uyarlanabilirliği ve performans şekillendiren faktörleri dikkate alması nedeniyle tercih edilmiştir. Literatürde çoğunlukla yüksek riskli sektörlerde kullanılan bu yöntemin, laboratuvar gibi daha küçük ölçekli ancak yüksek risk taşıyan ortamlarda uygulanabilirliğinin araştırılması çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır. Toprak azot tayini süreci ise hem kimyasal hem de fiziksel etkileşimlerin yoğun olduğu, aynı zamanda sık tekrarlanan bir analiz türü olması nedeniyle seçilmiştir. Süreç boyunca maruz kalınan sıcaklık, kimyasal buharlar, toz ve ergonomik zorlanmalar; insan hatasının meydana gelme olasılığını artırmakta ve laboratuvar güvenliğini doğrudan etkilemektedir.

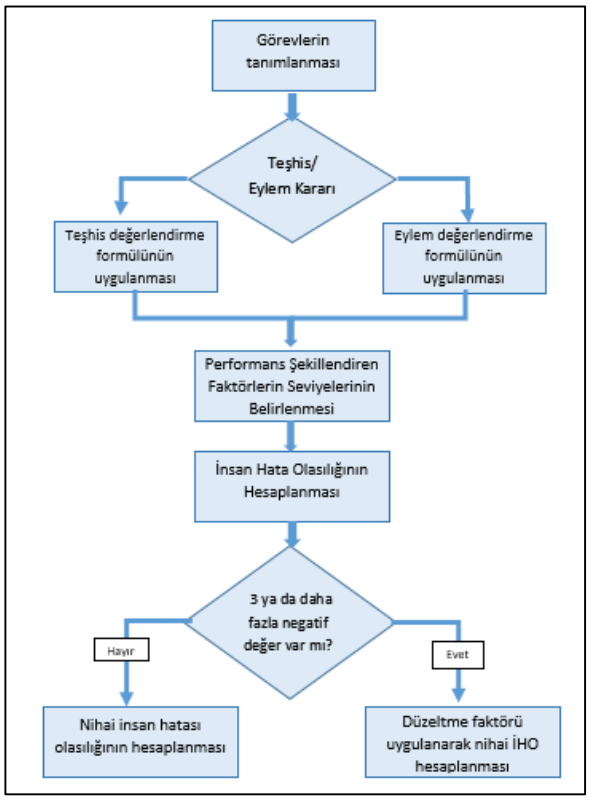
Trabzon'da Orman Bölge Müdürlüğü laboratuvarında yürütülen uygulamada toprak azot analizi örneği ele alınmıştır. Laboratuvarlarda toprak verimliliğini saptayabilmek için içindeki element miktarlarının belirlenmesi önemlidir. Azot tayini, laboratuvar ortamında sıklıkla gerçekleştirilen bir işlem olduğu için insan hata olasılığının tespitinde bu süreç tercih edilmiştir.

Laboratuvar ortamlarında meydana gelen kazalar, kimyasalların doğrudan insan sağlığı, çevre ve iş güvenliği üzerinde hızlı ve önemli etkiler oluşturmasına neden olmaktadır. Türkiye'deki çalışmaların büyük bölümü nükleer, denizcilik, havacılık gibi alanlara yoğunlaşırken, laboratuvar kazalarına ilişkin insan güvenilirlik analizi araştırmalarının sınırlı olması dikkat çekmektedir. Bu eksikliği giderebilmek ve laboratuvarlarda gerçekleştirilen işlemlerde insan faktörünün kritik rolünü ayrıntılı biçimde ortaya koymak amacıyla söz konusu laboratuvarın toprak azot tayini sürecinde SPAR-H yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçların, laboratuvar kazalarının azalmasına ve performans şekillendiren faktörlerin iyileştirilmesine katkıda bulunması hedeflenmektedir.

1. SPAR-H

SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk-Human Reliability Analysis) tekniği, ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu (NRC) tarafından 1994 yılında ilk kez tanıtılmış ve 1999 yılında son haline getirilmiştir. Bu yöntem, insan güvenilirliği açısından bir tesisteki görevler için hata olasılığını, nominal hata oranını, PŞF ve görevler arasındaki hata bağımlılığını hesaplamaya odaklanmaktadır [29]. SPAR-H tekniği, geleneksel olarak nükleer enerji santralleri gibi yüksek riskli sektörlerde uygulanmasına rağmen, sağlık, ulaştırma ve endüstriyel tesisler gibi farklı alanlarda da kullanılmaktadır.

SPAR-H yönteminin geliştirilmesinde, ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu tarafından hazırlanan NUREG serisi raporlarından yararlanılmıştır. Bu raporlar, insan faktörü mühendisliğine ilişkin çerçeveyi oluşturmakla birlikte, insan hatası olasılığının (Human Error Probability - HEP) hesaplanmasında kullanılacak çarpanların standartlaştırılmasına büyük katkı sağlamıştır [12]. SPAR-H yönteminin genel akış şeması ve adımları Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. SPAR-H yöntemi akış diyagramı (SPAR-H method flow diagram)

Adım 1. Görevlerin Tanımlanması: Değerlendirmeye alınacak süreç veya operasyon içerisindeki tüm adımlar belirlenir. Görevlerin doğru ve eksiksiz biçimde ortaya konması, yöntem uygulamasında güvenilir sonuçlar elde edebilmek için önem taşımaktadır.

Adım 2. Görevlerin Eylem mi Teşhis mi Olduğuna Karar Verilmesi: SPAR-H yöntemi, görevleri genel olarak "eylem" ve "teşhis" olarak iki ayrı kategoride ele alır. Eylem, fiziksel bir müdahale veya işlemi ifade ederken, teşhis görevleri karar alma, durum değerlendirme ve bilişsel işlem ağırlıklı faaliyetleri kapsamaktadır.

Adım 3. PŞF Seviyelendirilmesi: Tablo 4'te gösterilen PŞF'ler, SPAR-H yöntemine göre standart olarak sekiz başlık altında toplanır [29]. Her bir faktörün insan performansını nasıl etkileyeceği, olumlu ya da olumsuz seviyelerle değerlendirilir.

- Kullanılabilir Zaman: İlgili görevi tamamlamak için gerekli zaman, operatörün fiilen sahip olduğu süre ile karşılaştırılır. Zaman baskısı arttıkça hata olasılığı yükselir.
- Stres Faktörü: Aşırı ısı, gürültü, yetersiz havalandırma, kimyasal maruziyet gibi çevresel veya psikolojik stres kaynaklarıdır.
- Karmaşıklık: Görevin ne derece zor olduğunu ve birden fazla alt adım, cihaz

veya prosedür gerektirip gerektirmediğini yansıtır.

- Tecrübe ve Eğitim: Operatörün önceki deneyimleri, aldığı eğitimlerin niteliği ve miktarı dikkate alınır. Eğitim alınmış olsa dahi pratik yetersizlik varsa bu PŞF olumsuz şekilde seviyelendirilir.
- Prosedür: Tanımlanan görev için resmi bir işleyiş dokümanının varlığını ve kullanımını ifade eder. Prosedür eksikliği veya güncel olmaması, hata olasılığını artırır.
- Ergonomi: İşin insana uyumu ve insan-makine arayüzleriyle ilişkilidir. Ekipmanların uygun tasarımı, yazılımların kullanıcı dostu olması gibi unsurlar bu faktör altında değerlendirilir.
- Göreve Uygunluk: Operatörün fiziksel ve zihinsel yeterliliğinin yapılan iş için uygunluğunu yansıtır. Yorgunluk, hastalık veya dikkat dağınıklığı gibi durumlar olumsuz etkilere yol açabilir.
- İş Süreçleri: Çalışanlar arasındaki iletişim, planlama, yönetim desteği gibi iş yapış şekillerinin bütününü içerir. Planlama hataları, eksik iletişim veya yetersiz koordinasyon, hata olasılığını artırabilecek etkenlerdir.

Tablo 4. Teşhisler için PŞF seviyeleri (PSF levels for diagnoses)

PŞFler	PŞF Seviyeleri	Teşhis için Çarpan
Kullanılabilir Zaman	Yetersiz Zaman	100
	Yaklaşık yeterli zaman (≈ 2/3 x nominal)	10
	İdeal Zaman	1
	Ekstra Zaman (yarım saat 1 saat)	1
	Aşırı Zaman> 2 katı kadar	0.1
Stres	Aşırı	5
	Yüksek	2
	Nominal	1
	Yetersiz Bilgi	1
Karmaşıklık	Yüksek Karmaşıklık	5
	Orta Derecede	2
	Nominal	1
	Belirgin adımlar	0,1
	Yetersiz Bilgi	1
Tecrübe/Eğitim	Düşük	10
	Nominal	1
	Yüksek	0,5
	Yetersiz Bilgi	1
Prosedürler	Mevcut değil	50
	Eksik	20
	Mevcut ancak zayıf	5
	Nominal	1
	Mevcut ve yeterli	0,5
	Yetersiz Bilgi	1

Adım 4. İnsan Hata Olasılığının Hesaplanması: SPAR-H yönteminde insan hata olasılığı (HEP), Eşitlik (1) yardımıyla belirlenir. Her bir hata türü için nominal hata olasılığı (NHEP), teşhis görevleri için 0,01 ve eylem görevleri için 0,001 olarak varsayılmıştır. PŞF'ler nominalden (çarpan 1) olumlu veya olumsuz değer aralıklarına göre güncellenir.

$$\text{HEP} = (\text{ Eylem / Teşhis Görevi Çarpanı }) \times \left(\prod_{i=1}^{8} \text{PŞ}_i\right) \quad (1)$$

Adım 5. Negatif Etkili Çarpanların Değerlendirilmesi: Üç veya daha fazla negatif etkili çarpan söz konusu olduğunda, Eşitlik (2) ile nihai insan hata olasılığı yeniden hesaplanır. Bu sayede birden çok olumsuz faktörün aynı anda devreye girmesi durumunda hata olasılığının aşırı yükselmesi veya azımsanması engellenir.

$$\text{İnsan Hata Olasılığı} = \frac{\left(\text{NİHO} \times \text{PŞF}_{\text{bileşen}}\right)}{\left(\text{NİHO}\left(\text{PŞF}_{\text{bileşen}} - 1\right) + 1\right)} \quad (2)$$

Burada **NİHO**, nominal insan hata olasılığını, $\mathbf{PŞF_{bileşen}}$ ise olumsuz etkiyi artıran faktörlerin bileşkesini temsil eder [12]. SPAR-H yöntemi, kullanılabilir zaman ve prosedür yeterliliği gibi değişkenleri standart çarpanlar aracılığıyla ele alması nedeniyle uygulama kolaylığı sunar. Bununla birlikte, faktörler arasındaki etkileşimler veya kuruluşun kurumsal yapısı gibi daha karmaşık değişkenlerin analizinde ek değerlendirmeler gerekebilir [12]. Bu doğrultuda, SPAR-H hem nitel hem de nicel bilgilerle desteklendiğinde etkinliğini artıran bir yöntemdir ve süreç iyileştirme çalışmalarında yol gösterici bir araç olarak değerlendirilmektedir.

2. UYGULAMA (APPLICATION)

Bu bölümde, Trabzon'da Orman Bölge Müdürlüğünün laboratuvarında gerçekleştirilen uygulama adımları ve elde edilen bulgular ayrıntılı biçimde sunulmaktadır. Toprak azot analizi, pek çok laboratuvarda verimliliği belirlemek ve tarımsal kararları desteklemek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Topraktaki element içeriklerinin bilinmesi hem verimi artırıcı tedbirlerin alınmasını hem de analiz sürecinde kimyasal materyallerle etkileşime giren personelin güvenliğinin sağlanmasını önemli hale getirmektedir. Bu çalışmada insan hata olasılığının tespit edilebilmesi için SPAR-H yönteminin sistematik adımları uygulanmış ve "azot tayini" süreci üzerinde durulmuştur. Sıklıkla yürütülen bir işlem olması ve kimyasal etkileşimlerin çeşitli riskler doğurabilmesi nedeniyle bu analiz süreci, çalışmanın amaçlarına uygun bir vaka sunmaktadır.

Trabzon'da Orman Bölge Müdürlüğüne ait laboratuvar, araştırma ve analiz faaliyetlerini yürütmek üzere gerekli teknik donanıma sahiptir. Özellikle toprak örneklerinde azot, fosfor, potasyum gibi makro ve mikro besinlerin tayini yoğun olarak yapılmaktadır. Toprak azot analizi, laboratuvarda en sık tekrarlanan süreçlerden biri olduğu için insan kaynaklı hataların ortaya çıkma ihtimali açısından değerli bir uygulama alanı oluşturmaktadır. Bu süreçte, farklı kimyasal reaktiflerin kullanılması, yüksek ısıya maruz kalma ve otomatik cihazların işletilmesi gibi çeşitli adımlar söz konusudur.

SPAR-H yönteminin temel yaklaşımında öncelikle tüm görevler tanımlanır ve her görevin hangi tip eylem ya da teşhis işlevine sahip olduğu belirlenir. Daha sonra Performans Şekillendiren Faktörlerin (PŞF) seviyeleri tespit edilerek insan hata olasılığı (İHO) nominal değer üzerinden hesaplanır. Bu çalışma kapsamında, azot tayini sürecinde aşağıdaki aşamalar dikkate alınarak analiz gerçekleştirilmiştir:

I. Toprağın Hazırlanması: Azot analizi yapılacak olan toprak örnekleri laboratuvara ulaştıktan sonra kuruması için bekletilir. İşlemler hava kurusu toprak üzerinden yapılır.

II. Toprağın Elekten Geçirilmesi: Kurumuş toprak 2 mm'lik elekten geçirilerek incelenmiş hale getirilir. Analiz için elekten geçen ince kısım kullanılır.

III. Nem Ölçümü: Yaklaşık 2–10 gram hava kurusu toprak örneğinin nemi ölçülür. Böylece kuruma derecesi ve geriye kalan nem oranı belirlenir.

IV. Yakma İşlemi: Toprak numunesi, 10 ml sülfürik asit ve 3 gr azot ile bakır sülfat eklenerek yakma ünitesinde yakılır. Tepkime tamamlandıktan sonra tüp, soğuması için bekletilir. Yakma ünitesi Şekil 2'de görselleştirilmiştir.



Şekil 2. Yakma ünitesi (Combustion unit)

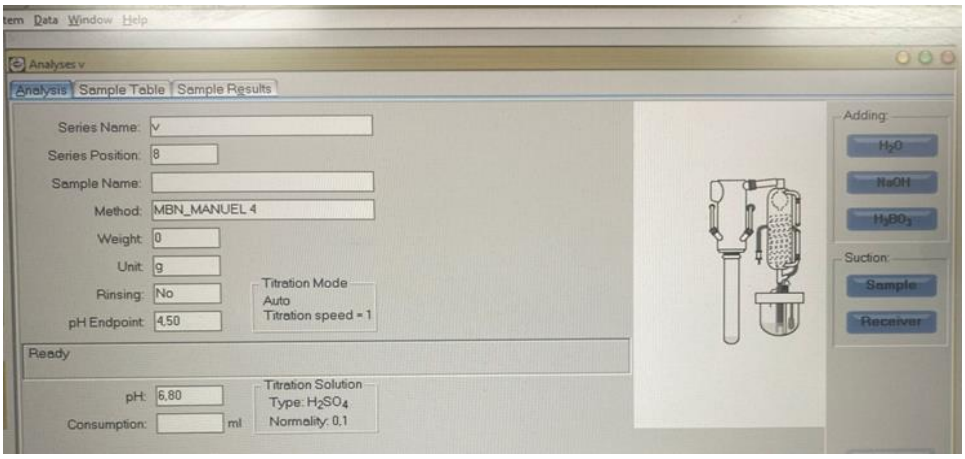
V. Destilasyon Cihaz Bağlantısı: Azot tayini için kullanılan destilasyon ünitesi, bir bilgisayara bağlanarak sonuçların alınacağı program çalışır hale getirilir. Bu aşamada yazılımın kurulu ve güncel olması önem taşır.

VI. Destilasyon Ünitesi (bkz. Şekil 3): Yakma işlemi tamamlanan ve soğuyan tüp, cihazın sol bölümüne yerleştirilir. Sağda bulunan tüpte ise %2'lik borik asit bulunur. İlk olarak borik asidin pH'ı ölçülür. Cihaz, sodyum hidroksiti (NaOH) karışıma dahil ederek kimyasal tepkime oluşturur. Açığa çıkan buhar, borik asit bulunan tüpe yönlendirilir. Sıvı geldikçe pH değişir ve titrasyon devam eder. İşlem, pH değeri ilk ölçülen seviyeye gelinceye kadar sürdürülür. Sürecin sonunda azot değeri, bilgisayar ekranındaki sonuç bölümünde görüntülenir.



Şekil 3. Destilasyon ünitesi (Distillation unit)

VII. Atık Depolama: Tam otomatik cihazlarda analiz bittiğinde atık madde, makineye bağlı hortumlar aracılığıyla özel bir toplama kabına aktarılır. Bu aşamada herhangi bir sorun ortaya çıkarsa sistem kendiliğinden işlemi durdurur. Analiz sona erdiğinde Şekil 4'te görülen VOPEDEST Manager programı üzerinden azot tayini sonuçlarına ulaşılır.



Şekil 4. VOPEDEST manager programı toplam azot tayini sonuç ekranı (VOPEDEST manager program total nitrogen determination result screen)

Bu aşamalar tamamlandığında, SPAR-H yönteminin ilk adımı olan "görev tanımlama" süreci sonuçlanmış olur. Analizin devamında, her görev için sekiz faktörün seviyesi belirlenir. Tablo 5 seviyeleri göstermektedir. PŞF'lerden herhangi biri nominal düzeyde ise hesaplamaya eklenmesi gerekmez. Bu çalışmada en yüksek seviye, "Ergonomi" ve "Prosedür" faktörlerinde, özellikle eleme aşamasında görülmüştür.

Tablo 5. Performans şekillendiren faktör seviyeleri (Performance shaping factor levels)

Görevler/ Faktörler	Hazırlık	Elek	Nem Ölçümü	Yakma Ünitesi	Cihazın Bağlanması	Destilasyon Ünitesi	Atık Depolama
Kullanılabilir zaman	10	1	0,1	10	1	10	1
Stres	1	2	1	5	2	5	1
Karmaşıklık	1	2	5	2	2	1	1
Tecrübe ve eğitim	1	1	10	10	10	10	10
Prosedür	1	20	1	1	0,5	0,5	1
Ergonomi	1	50	1	1	1	10	1
Göreve Uygunluk	1	5	1	5	1	5	1
İş süreçleri	1	1	1	0,8	1	2	1
Kullanılabilir zaman	10	1	0,1	10	1	10	1

Her görev için Eşitlik (1) kullanılarak insan hata olasılıkları hesaplanmıştır.

Hazırlık için İHO= 10*1*1*1*1*1*1*1*0,01= 0,10 nihai insan hata olasılığıdır.

Elek için İHO= 1*2*2*1*20*50*5*1*0,01=200 Bu görev için performans faktör değerlerinde 1den büyük 5 değer vardır. Bu durumda Eşitlik (2) kullanılır. NİHO = (0,01*200)/ (0,01*(200-1)+1)=0,67dir.

Nem Ölçümü için İHO= 0,1*1*5*10*1*1*1*1*0,01=0,05 nihai insan hata olasılığıdır.

Yakma Ünitesi için İHO= 10*5*2*10*1*1*5*0,8*0,01= 40 tır. 5 adet 1 den

büyük değer olduğundan Eşitlik 2 kullanılmalıdır. NİHO = (0,01*40)/ (0,01*(40-1)+1)=0,29 dur.

Üç veya daha fazla negatif yönlü seviye bulunan "Elek", "Yakma Ünitesi", "Cihazın Bağlanması" ve "Destilasyon Ünitesi" aşamalarında ise Eşitlik (2) yardımıyla nihai insan hata olasılıkları yeniden değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR (RESULTS)

SPAR-H yöntemiyle yürütülen hesaplamalar sonucunda, tüm görevlerin nihai insan hata olasılıkları Tablo 6'te özetlenmiştir.

Tablo 6. Nihai insan hata olasılığı (Ultimate probability of human error)

No	Görevler	İnsan Hata Olasılığı
1	Hazırlık	0,10
2	Elek	0,67
3	Nem Ölçümü	0,05
4	Yakma Ünitesi	0,29
5	Cihazın Bağlanması	0,00
6	Destilasyon Ünitesi	0,72
7	Atık Depolama	0,10

En yüksek hata olasılığı, 0,72 ile "Destilasyon Ünitesi" aşamasında belirlenmiştir. Bunu, 0,67 hata olasılığıyla "Eleme İşlemi" izlemektedir. Bu bulgular, bu adımların kimyasal reaksiyonlar ve ekipman kullanımı bakımından daha karmaşık olması nedeniyle hata riskini artırdığını göstermektedir. Analiz sonrasında, insan hata olasılığı yüksek görevler için laboratuvar şefiyle yapılan fikir alışverişinde çeşitli önleyici tedbirler gündeme getirilmiştir. Bu tedbirler arasında, ergonomik şartların iyileştirilmesi, prosedürlerin güncellenmesi ve çalışanların bu konularda düzenli biçimde eğitime tabi tutulması bulunmaktadır. Analiz sonuçlarının iş güvenliği, verimlilik ve çevresel riskleri azaltma açısından önemli çıkarımlar sağladığı düşünülmektedir. Özellikle laboratuvar ortamındaki yüksek risk faktörlerini dikkate alan iyileştirme çalışmaları, uzun vadede hem iş gücü kayıplarını hem de laboratuvar kazalarını en aza indirebilecektir.

Toplam azot analizi sürecine yönelik insan güvenilirlik analizi sonuçları, özellikle destilasyon ünitesi ve eleme aşamasında hata olasılığının yüksek olduğunu göstermektedir. Destilasyon ünitesinde tüp çıkartma işlemi sırasında tüpün ısınması ve kimyasal sıvı sıçrama riski, hem güvenlik ekipmanlarının kullanımını hem de sistemin ergonomisini ön plana çıkarmaktadır. Kalın eldiven ve koruyucu gözlük kullanılmasının zorunlu tutulması, bu riskleri önemli ölçüde azaltacaktır. Cihazı kullanacak tüm personelin bu süreçlerde deneyim kazanabilmesi için düzenli eğitime tabi tutulması önerilmektedir. Ayrıca çalışma sırasında tespit edilen en büyük verimlilik sorunlarından biri, yakma ünitesinin 20 tüplük kapasitesine karşın mevcut destilasyon ünitesinin yalnızca 1 tüp kapasiteli olmasıdır (Şekil 5). Bu durum, zaman yetersizliğine ve verimsiz iş akışına neden olmaktadır. Kapasite artışıyla, kullanılabilir zaman faktörünün olumsuz etkisi azaltılabilecektir.

Elekleme aşamasında yaşanan yoğun toz çıkışı, personelin solunum yolları üzerinde doğrudan olumsuz etki göstermektedir. Geçmişte bu aşamada rahatsızlık yaşayan bir çalışanın işten ayrıldığı bilgisi, söz konusu riskin ciddiyetini artırmaktadır. Dolayısıyla solunum yollarında hassasiyet (alerjik astım, KOAH vb.) bulunan kişilerin bu göreve uygun olmadığını belirtmek gerekmektedir. Yüz maskesi kullanımı ve gerekirse aspirasyon sistemi eklenmesi, çalışma koşullarını iyileştirmeye yardımcı olacaktır.

Türkiye'de laboratuvar kazalarına yönelik yapılan risk analizlerinde SPAR-H yönteminin kullanıldığı çalışmalara rastlanmamıştır. Bu nedenle mevcut çalışma, laboratuvar ortamında SPAR-H uygulaması açısından özgün bir niteliğe sahiptir. Uluslararası literatürde ise SPAR-H ve laboratuvar

anahtar kelimeleri Scopus veri tabanında aratıldığında, yöntemin laboratuvar ortamlarında sınırlı olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu kapsamda He vd. tarafından Çin'de bir üniversite laboratuvarında gerçekleştirilen çalışmada, SPAR-H ve CREAM yöntemleri kullanılarak insan güvenilirliği analizi yapılmıştır [30].. Çalışmada, güvenlik eğitimlerinin düzenli verilmesi, uygulamalı eğitimlerin sağlanması ve eğitim içeriğinin sürekli güncellenmesi gerektiği belirtilmiş, laboratuvar kazalarının en önemli nedenlerinden birinin deneyim ve eğitim eksikliği olduğu vurgulanmıştır. Mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar, literatürdeki bu bulgu ile tutarlılık göstermektedir. Özellikle hata olasılığının en yüksek olduğu görevlerde, deneyim ve eğitimin belirleyici faktörler arasında olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, literatürdeki bulguları desteklemekte ve laboratuvar ortamında insan hatalarının azaltılmasında eğitim ve deneyimin kritik önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Laboratuvar ortamlarında yapılan çalışmaların doğası gereği kimyasal, fiziksel ve ergonomik risk faktörlerinin bir arada bulunması, insan hatası olasılığını artıran önemli bir etkendir. Bu çalışmada, Trabzon Orman Bölge Müdürlüğüne ait laboratuvarda yürütülen toprak azot analizi süreci SPAR-H yöntemiyle ele alınarak görev bazlı insan hata olasılıkları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, özellikle destilasyon ünitesi ile toprağın elekten geçirilmesi adımlarında hata riskinin yüksek olduğunu göstermiştir. Destilasyon ünitesinde sıcak numuneyle çalışma ve kimyasal sıçrama tehlikesi, eleme aşamasında ise yüksek miktarda toz oluşumu personel sağlığı ve laboratuvar güvenliği açısından kritik önem taşımaktadır.

Çalışmada ortaya konan bulgular, bazı görev adımlarının gelişmiş teknolojik ekipman ve koruyucu ekipmanlarla desteklenmesi gerektiğini göstermektedir. Destilasyon ünitesinin tek tüplü yapısı, iş akışını verimsiz hale getirdiği gibi zaman baskısını da artırmaktadır. Bu sorunun çözümü için çok tüplü destilasyon ünitelerinin kullanılması önerilmiştir. Ayrıca toz çıkaran işlemlerde solunum koruyucu maskelerin zorunlu hale getirilmesi, hassas solunum yolu rahatsızlığı bulunan çalışanların eleme aşamasından uzak tutulması gibi önlemler, kaza ve sağlık risklerini önemli ölçüde azaltabilecektir.

SPAR-H yöntemi, nükleer ve yüksek riskli endüstriyel ortamlarda yaygın olarak kullanılsa da bu çalışma, laboratuvar uygulamalarında da yöntemin geçerliliğini ve pratikliğini ortaya koymuştur. Toplam azot analizi gibi sıklıkla tekrarlanan ve çeşitli kimyasalların bir arada kullanıldığı süreçlerde, insan faktörünün etkili biçimde değerlendirilmesi mümkündür. Bu kapsamda, Performans Şekillendiren Faktörler arasına "zihinsel yorgunluk" gibi ek unsurların dahil edilmesi, laboratuvar ortamlarının çoklu ve yoğun iş yükü altında ortaya çıkabilecek riskleri daha gerçekçi bir şekilde yansıtmaya yardımcı olacaktır.

Sonuç olarak, laboratuvar kazalarının önlenmesine yönelik iyileştirme çalışmalarında düzenli eğitim ve tecrübe kazanımının önemi, hem bu çalışma hem de literatürdeki benzer araştırmalar tarafından bir kez daha doğrulanmıştır. Laboratuvar çalışanlarının karşılaşabileceği risklerin tespit edilmesi, mevcut prosedürlerin güncellenmesi, ergonomik düzenlemelerin yapılması ve uygun kişisel koruyucu donanımların kullanılması, insan kaynaklı hataları önemli ölçüde azaltabilmektedir. Bu bakımdan SPAR-H yöntemi, laboratuvar güvenliğini artırma ve süreç verimliliğini iyileştirme amacı taşıyan araştırmacılar ve yöneticiler için yol gösterici bir araç niteliği taşımaktadır. Bu çalışma yalnızca bir laboratuvar ortamındaki tek bir analiz süreci üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Mevcut durumda, laboratuvar süreçlerinde geçmişe dönük insan hatası kayıtlarının sistematik olarak tutulmaması nedeniyle, bu çalışmada SPAR-H yöntemi kullanılarak hesaplanan hata olasılıkları, gerçek hata verileriyle karşılaştırılamamıştır. Bu durum, analizlerin doğrulanmasını ve elde edilen sonuçların geçerliliğinin tam olarak gösterilmesini sınırlamaktadır.

Gelecekteki çalışmalarda, laboratuvar süreçlerinde meydana gelen insan hatalarının kayıtlarının sistematik bir biçimde tutulması önerilmektedir. Bu sayede, SPAR-H yöntemiyle hesaplanan teorik hata olasılıkları ile gerçek hata verileri karşılaştırılarak yöntemin etkinliği ve doğruluğu daha net biçimde ortaya konabilir. Bu tür bir veri toplama ve analiz uygulamasının, laboratuvar güvenilirliğini artırmada ve hata azaltıcı önlemlerin etkinliğini değerlendirmede kritik bir rol oynayacağı düşünülmektedir.

Farklı laboratuvarlarda da aynı süreç için veya farklı analiz türlerine yönelik benzer SPAR-H

uygulamaları yapılarak yöntemin geüvenilirliliği artırılabilir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, SPAR-H yöntemine ek olarak farklı insan güvenilirliği analiz yöntemlerinin (örneğin CREAM, HEART) de uygulanması, yöntemler arası karşılaştırmalı analiz yapılmasına olanak tanıyabilir. Bu çalışmada PŞF sabit değerler üzerinden değerlendirilmiştir. İleride yapılacak araştırmalarda, bulanık mantık, çok kriterli karar verme yöntemleri gibi yaklaşımlarla uzman görüşleri daha esnek biçimde modellenebilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI
(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Nurgül ZENGİN: Labaratuvarda ilgili verileri toplamış, uygulamayı yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She collected the relevant data in the laboratory, implemented the application, and analyzed the results. She completed the writing of the article.

Ertuğrul AYYILDIZ: Labaratuvarda ilgili verileri toplamış, uygulamayı yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He collected the relevant data in the laboratory, implemented the application, and analyzed the results. He completed the writing of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] C. D. Griffith and S. Mahadevan, "Inclusion of fatigue effects in human reliability analysis," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 96, no. 11, 2011, doi: 10.1016/j.ress.2011.06.005.

[2] E. Uflaz, S. I. Sezer, E. Akyuz, O. Arslan, and R. E. Kurt, "A human reliability analysis for ship to ship LNG bunkering process under D-S evidence fusion HEART approach," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 80, 2022, doi: 10.1016/j.jlp.2022.104887.

[3] S. A. Yıldızel and Y. Arslan, "Risk Factors Identification and Estimation for Glass Fiber Reinforced Concrete Production Sector TT - Cam Elyaf Takviyeli Beton Üretim Sektöründe Risk Faktörlerinin Belirlenmesi ve Tahmini," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 5, no. 4, pp. 215–221, 2017, doi: 10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.345755.

[4] E. Yalçin, G. A. Çiftçioğlu, and B. Güzel, "Human reliability analysis methods," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 30, no. 2, pp. 282–292, 2024.

[5] P. H. Raabe, "Constant failure rate of redundant repairable hardware," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 96, no. 3, 1974, doi: 10.1115/1.3445789.

[6] E. N. Corlett, "Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications," *Appl. Ergon.*, vol. 12, no. 1, p. 36, 1981, doi: 10.1016/0003-6870(81)90094-6.

[7] D. E. Embrey, P. Humphreys, E. A. Rosa, B. Kirwan, and K. Rea, "SLIM-MAUD: an approach to assessing human error probabilities using structured expert judgment Volume II Detailed analysis of the technical issues," 1984. [Online]. Available: http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:16061396

[8] J. C. Williams, "HEART - A PROPOSED METHOD FOR ACHIEVING HIGH RELIABILITY IN PROCESS OPERATION BY MEANS OF HUMAN FACTORS ENGINEERING TECHNOLOGY.," 1985. doi: 10.1080/09617353.2015.11691046.

[9] D. E. Embrey, "SHERPA: A systematic human error reduction and prediction

approach," in *Proceedings of the international topical meeting on advances in human factors in nuclear power systems*, 1986.

[10] E. Hollnagel, *Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)*. 1998. doi: 10.1016/b978-0-08-042848-2.x5000-3.

[11] S. E. Cooper, J. Wreathall, C. Thompson, M. Drouin, and D. Bley, "Knowledge-base for the new human reliability analysis method 'A Technique for Human Error Analysis (ATHEANA),'" *Int. Top. Meet. probabilistic Saf. assessmentmoving Towar. risk based Regul. Park City, UT*, 1996.

[12] D. I. Gertman, H. S. Blackman, J. L. Marble, C. Smith, R. L. Boring, and P. O'Reilly, "The SPAR H human reliability analysis method," in *American Nuclear Society 4th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human Machine Interface Technology*, 2004.

[13] C. Niza, S. Silva, and M. L. Lima, "Occupational accident experience: Association with workers' accident explanation and definition," *Saf. Sci.*, vol. 46, no. 6, 2008, doi: 10.1016/j.ssci.2007.11.015.

[14] L. J. Bellamy, D. Lisbona, M. Johnson, E. Kooi, and H. J. Manuel, "The major accident failure rates Project: Concept phase," HSE Research Report RR915, Health and Safety Executive, Bootle, UK, 2012.

[15] V. Şölen, "Laboratuvar kazaları ve ilk yardım," *J. Fac. For. Istanbul Univ.*, vol. 32, no. 1, pp. 132–165, 2014, doi: 10.17099/jffiu.21947.

[16] M. Omidvari, N. Mansouri, and J. Nouri, "A pattern of fire risk assessment and emergency management in educational center laboratories," *Saf. Sci.*, vol. 73, 2015, doi: 10.1016/j.ssci.2014.11.003.

[17] M. Eyvazlou, A. Dadashpour Ahangar, A. Rahimi, M. R. Davarpanah, S. S. Sayyahi, and M. Mohebali, "Human reliability assessment in a 99Mo/99mTc generator production facility using the standardized plant analysis risk-human (SPAR-H) technique," *Int. J. Occup. Saf. Ergon.*, vol. 25, no. 2, pp. 321–330, Apr. 2019, doi: 10.1080/10803548.2017.1415832.

[18] Y. Zhan *et al.*, "Human reliability study on the door operation from the view of Deep Machine Learning," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 99, 2019, doi: 10.1016/j.future.2018.11.055.

[19] C. Taylor, S. Øie, and K. Gould, "Lessons learned from applying a new HRA method for the petroleum industry," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 194, 2020, doi: 10.1016/j.ress.2018.10.001.

[20] J. Liu *et al.*, "A study on assigning performance shaping factors of the SPAR-H method for adequacy human reliability analysis of nuclear power plants," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 81, p. 103051, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.ERGON.2020.103051.

[21] W. Zhang, X. Meng, X. Yang, H. Lyu, X. Y. Zhou, and Q. Wang, "A Practical Risk-Based Model for Early Warning of Seafarer Errors Using Integrated Bayesian Network and SPAR-H," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 16, 2022, doi: 10.3390/ijerph191610271.

[22] S. Il Ahn, R. E. Kurt, and E. Akyuz, "Application of a SPAR-H based framework to assess human reliability during emergency response drill for man overboard on ships," *Ocean Eng.*, vol. 251, p. 111089, May 2022, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2022.111089.

[23] L. Ma, X. Ma, P. Xing, and F. Yu, "A hybrid approach based on the HFACS-FBN for identifying and analysing human factors for fire and explosion accidents in the laboratory," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 75, 2022, doi: 10.1016/j.jlp.2021.104675.

[24] Z. Lu, "Analysis of China students' laboratory accidents in the past 39 years and the laboratory management reform in the future," *Educ. Chem. Eng.*, vol. 42, 2023, doi: 10.1016/j.ece.2022.12.001.

[25] G. Elidolu, S. Il Ahn, S. Ilke Sezer, R. Emek Kurt, E. Akyuz, and P. Gardoni, "Applying evidential reasoning extended SPAR-H modelling to analyse human reliability on crude oil tanker cargo

operation," *Saf. Sci.*, vol. 164, 2023, doi: 10.1016/j.ssci.2023.106169.

[26] Y. He, N. S. Kuai, L. M. Deng, Z. L. Wang, and M. J. Peng, "An investigation into accidents in laboratories in universities in China caused by human error: A study based on improved CREAM and SPAR-H," *Heliyon*, vol. 10, no. 7, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28897.

[27] W. Si and L. Niu, "Enhancing Human Reliability Prediction in Smart Tower Crane Interfaces: A Refined Approach Using Simplified Plant Analysis Risk–Human Reliability Assessment and the Decision Making Trial and Evaluation Laboratory–Analytic Network Process," *Build. 2024, Vol. 14, Page 1083*, vol. 14, no. 4, p. 1083, Apr. 2024, doi: 10.3390/BUILDINGS14041083.

[28] X. Liu, S. Yan, X. Zhang, and W. Ahmed, "Dynamic human reliability analysis method for nuclear power plant main control room based on SPAR-H and SD," *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 57, no. 3, p. 103253, Mar. 2025, doi: 10.1016/J.NET.2024.10.015.

[29] Z. Mosavianasl, A. Babaeipouya, and R. Borun, "Evaluation of human reliability in steel industry using SPAR-H and CREAM techniques," *Pakistan J. Med. Heal. Sci.*, vol. 12, no. 2, 2018.

[30] L. X. Hou, R. Liu, H. C. Liu, and S. Jiang, "Two decades on human reliability analysis: A bibliometric analysis and literature review," 2021. doi: 10.1016/j.anucene.2020.107969.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1208-1226 (2025)

AISI 1040 Alaşımının Frezelenmesinde Teorik ve Uygulamalı Kesme Parametrelerine Dayalı iTool Adlı Yeni bir Paket Program ile Bilgisayar Destekli Süreç Planlama

Kadirhan AKDENİZ[1], Ayşegül ÇAKIR ŞENCAN[2*]

[1]*Türk Uçak Sanayii Anonim Ortaklığı (TUSAŞ), Ankara, Türkiye*
[2]*Zonguldak Bülent Ecevit Üniveristesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/02/2025
Düzeltme: 13/03/2025
Kabul: 29/08/2025

Anahtar Kelimeler

iTool
Frezeleme
AISI 1040
CAP
CAD/CAM
İşleme zamanı
Takım ömrü

Article Info

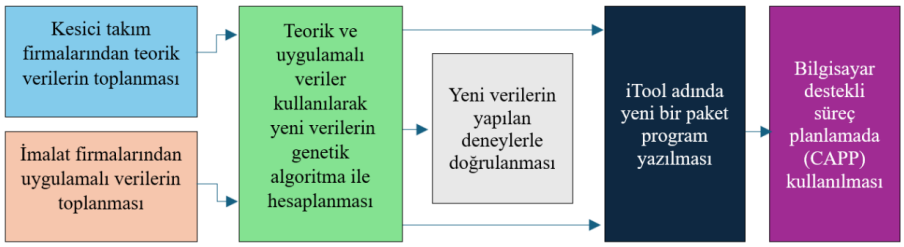
Research article
Received: 20/02/2025
Revision: 13/03/2025
Accepted: 29/08/2025

Keywords

iTool
Milling
AISI 1040
CAPP
CAD/CAM
Machining time
Tool life

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, CNC frezeleme için Python tabanlı iTool yazılımı geliştirilmiştir. AISI 1040 alaşımında farklı çaplı karbür takımlar için teorik ve endüstriyel kesme parametreleri karşılaştırılmıştır. Bulgular, yeni koşulların %87 daha uzun takım ömrü ve %22 daha kısa işleme süresi sağladığını göstermiştir. / This study presents a Python-based software, iTool, for CNC milling optimization. Cutting parameters for carbide tools in AISI 1040 alloy were compared between theoretical and industrial data. The proposed conditions achieved 87% longer tool life and 22% shorter machining time, validated through experiments with different tool diameters.



Şekil A: *Çalışmada uygulanan adımların şeması /* ***Figure A:*** *Scheme of the steps applied in the study*

Önemli noktalar (Highlights)

- *iTool yazılımı ile CAM entegrasyonu / iTool software with CAM integration*
- *Genetik algoritma ile optimize edilmiş kesme parametreleri / Cutting parameters optimized via genetic algorithm*
- *%87 daha uzun takım ömrü, %22 daha kısa işleme süresi / 87% longer tool life, 22% shorter machining time*

Amaç (Aim): *Bu çalışmanın amacı, AISI 1040 alaşımının frezeleme işleminde en uygun kesme parametrelerini belirlemek, işleme süresini optimize etmek ve takım ömrünü artırmak için bilgisayar destekli süreç planlama (CAPP) uygulaması geliştirmektir. / The aim of this study is to develop a computer-aided process planning (CAPP) approach to determine the optimal cutting parameters for milling AISI 1040 alloy, optimizing machining time and enhancing tool life.*

Özgünlük (Originality): *Teorik ve endüstriyel kesme parametrelerini birleştirip genetik algoritma ile optimize eden, ayrıca sonuçları kullanıcı dostu iTool yazılımı ile erişilebilir hâle getiren ilk kapsamlı çalışma. / First comprehensive study to combine theoretical and industrial cutting parameters optimized via genetic algorithm, making results accessible through the user-friendly iTool software.*

Bulgular (Results): *Teorik Vc ve f değerleri uygulamalı verilere göre sırasıyla %35 ve %50 daha düşük bulunmuştur. Genetik algoritma ile elde edilen yeni parametreler, endüstriyel verilere göre %87 daha uzun takım ömrü ve teorik verilere göre %22 daha kısa işleme süresi sağlamış, deneyler bu sonuçların güvenilirliğini doğrulamıştır. Theoretical Vc and f values were 35% and 50% lower than industrial data. New parameters obtained via genetic algorithm provided 87% longer tool life than industrial data and 22% shorter machining time than theoretical data, with experiments confirming their reliability.*

Sonuç (Conclusion): *Çalışma, talaşlı imalat süreçlerinde verimlilik ve takım ömrünü optimize eden bir CAPP yaklaşımı sunmaktadır. iTool yazılımı, kullanıcıların en uygun kesme parametrelerini hızlı ve kolay seçmesini sağlamaktadır. / The study presents a CAPP approach optimizing efficiency and tool life. iTool software enables users to quickly and easily select optimal cutting parameters.*

*Corresponding author, e-mail: aysegulcakir@beun.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1643768

GU J Sci, Part C, 13(3): 1208-1226 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

AISI 1040 Alaşımının Frezelenmesinde Teorik ve Uygulamalı Kesme Parametrelerine Dayalı iTool Adlı Yeni bir Paket Program ile Bilgisayar Destekli Süreç Planlama

Kadirhan AKDENİZ[1], Ayşegül ÇAKIR ŞENCAN[2*]

[1]*Türk Uçak Sanayii Anonim Ortaklığı (TUSAŞ), Ankara, Türkiye*
[2]*Zonguldak Bülent Ecevit Üniveristesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/02/2025
Düzeltme: 13/03/2025
Kabul: 29/08/2025

Anahtar Kelimeler

iTool
Frezeleme
AISI 1040
CAPP
CAD/CAM
İşleme zamanı
Takım ömrü

Öz

Bu çalışmada, CNC freze tezgâhlarında çevrim sürelerinin azaltılması ve kesici takım ömrünün artırılması amacıyla kesme parametrelerinin optimizasyonu araştırılmıştır. Bu doğrultuda Python tabanlı iTool adlı yeni bir yazılım geliştirilmiş ve CAM paket programlarına yardımcı bir modül olarak tasarlanmıştır. Programda kullanılacak veriler için, en az iki farklı kesici takım üreticisinden ve bu takımları uygulayan iki farklı imalat firmasından bilgiler toplanmıştır. Böylece literatürde tavsiye edilen teorik değerler ile endüstride uygulanan gerçek parametreler birlikte değerlendirilmiştir. Araştırma, AISI 1040 alaşımının frezelenmesinde kullanılan 4 ağızlı karbür takımlar (D: 5–25 mm) üzerine yoğunlaşmış; kesme hızı (Vc) ve ilerleme (f) parametreleri karşılaştırılmıştır. Bulgular, teorik değerlerin endüstride kullanılanlara göre sırasıyla %35 ve %50 daha düşük olduğunu göstermiştir. Belirlenen hedef hacim (255025 mm³) için işleme süresi (th) ve takım ömrü (T) temel performans kriterleri olarak ele alınmıştır. Elde edilen yeni kesme koşulları, endüstriyel uygulamalara göre %87 daha uzun takım ömrü ve teorik değerlere göre %22 daha kısa işleme süresi sunmuştur. 8, 10 ve 12 mm çaplı takımlarla yapılan deneyler hesaplanan verileri doğrulamıştır. Sonuçta, iTool programı kullanıcıların deneyimden bağımsız şekilde en uygun kesme koşullarına kısa sürede ulaşabilmesini sağlayan etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Computer Aided Process Planning with a New Package Program Named iTool Based on Theoretical and Practical Cutting Parameters in Milling of

Article Info

Research article
Received: 20/02/2025
Revision: 13/03/2025
Accepted: 29/08/2025

Keywords

iTool
Milling
AISI 1040
CAPP
CAD/CAM
Machining time
Tool life

Abstract

This study focuses on optimizing cutting parameters to reduce cycle times and extend tool life in CNC milling operations. To achieve this, a Python-based software named iTool was developed and designed as a complementary module for CAM systems. For data acquisition, information was collected from at least two cutting tool manufacturers and two machining companies, enabling a comparative assessment of recommended theoretical parameters and those applied in industry. The investigation concentrated on four-flute carbide tools (D: 5–25 mm) used in milling AISI 1040 alloy, with cutting speed (Vc) and feed rate (f) considered as primary variables. The results revealed that theoretical Vc and f values were 35% and 50% lower, respectively, than industrial practices. For a target volume of 255025 mm³, machining time (th) and tool life (T) were defined as performance criteria. New cutting conditions derived from the collected data provided 87% longer tool life compared to industrial values and 22% shorter machining time compared to theoretical recommendations. Experimental trials using tool diameters of 8, 10, and 12 mm confirmed the consistency of these findings. Ultimately, iTool offers a practical solution that allows even inexperienced users to identify the most efficient cutting conditions rapidly and effectively, enhancing both productivity and tool performance.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

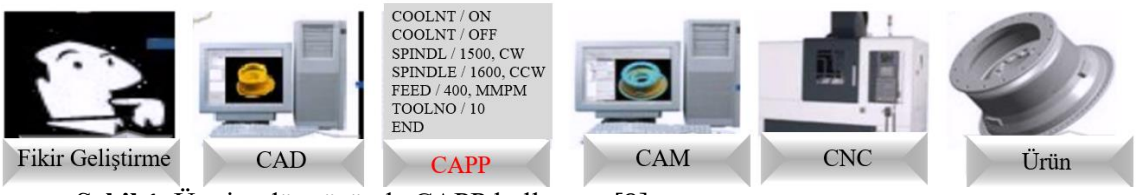
Talaşlı imalat, kesici takım marifeti ile talaş adı verilen fazla malzemenin, iş parçasından uzaklaştırılması olarak tanımlanabilir [1]. Talaşlı imalat yöntemleri endüstride en yaygın kullanılan imalat yöntemlerinden biridir. Tornalama, frezeleme ve taşlama operasyonları en sık kullanılan talaşlı imalat yöntemlerinin başında gelmektedir. Her imalat sürecinde olduğu gibi talaşlı imalat süreçlerinin de en hızlı şekilde gerçekleşmesi istenir. Bu ise yüksek kesme hızı

*Corresponding author, e-mail: aysegulcakir@beun.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1643768

(Vc) ve ilerleme (f) parametreleri ile mümkündür [1]. Fakat bu kesme parametrelerini aşırı yükseltmek, kullanılan kesici takımın çok hızlı aşınmasına ve ömrünün kısalmasına sebep olur. Çünkü artan kesme parametreleri kesici takımla iş parçasının arayüzeyindeki sürtünmeyi artırır. Bu artış, takım ile talaş ve iş parçası arasındaki temas yüzeyinde daha fazla ısıl enerji açığa çıkmasına neden olur. Ayrıca, dar kayma bölgelerinde meydana gelen yüksek hızlı plastik deformasyon ve artan talaş kaldırma oranı, malzemenin kesilmeye karşı atomik düzeyde gösterdiği içsel direnç nedeniyle daha fazla ısının açığa çıkmasına neden olarak kesme bölgesindeki sıcaklığın daha da yükselmesine yol açar. Bu yüksek sıcaklık, takımda termal yumuşama, difüzyon ve oksidasyon gibi mekanizmalarla kesici kenarlarda deformasyonun hızla artmasına yol açar [2]. Yani, yüksek üretim hızına çıkma hedefiyle kullanılan yüksek kesme parametreleri, takım sarfiyatını artırarak üretim maliyetlerini olumsuz etkileyebilmektedir [3].

Ayrıca aşınan takımın ürettiği bir iş parçasının istenilen kalitede olamaması da bir diğer önemli sorundur [4]. Bu sebeple bir malzemeye uygulanacak talaşlı imalat işlemi ile ilgili kesici takım özellikleri, kesme şartları gibi faktörlerin en doğru şekilde belirlenmesi, verimli bir imalat süreci için hayati öneme sahiptir.

Son yıllarda mühendislik sistemlerini içeren tüm endüstri alanlarında risk takibi ve süreç yönetimine yönelik daha modern ve yenilikçi yaklaşımlar kullanılmaya başlanmıştır [5]. Bu dönüşümün temel dinamiklerinden biri olan Endüstri 4.0, endüstri ile teknolojinin bütünleşmesini sağlayarak yalnızca genel üretim süreçlerini değil, aynı zamanda talaşlı imalat alanını da önemli ölçüde etkilemiştir. Talaşlı imalatta kullanılan Bilgisayar Destekli Süreç Planlama (CAPP) kavramı, üretim öncesi gerçekleştirilecek adımların, uygulanacak yöntemlerin, kullanılacak makine, cihaz ve teçhizatlar ile o teçhizatlara ait parametrelerin en verimli şekilde tespit edilebilmesi amacıyla bilgisayar teknolojisinden faydalanılması olarak tarif edilebilir [6, 7, 8]. Şekil 1' de CAPP'in üretimin hangi aşamasında yerini aldığı gösterilmiştir.



Şekil 1. Üretim döngüsünde CAPP kullanımı [9] (Use of CAPP in the production cycle [9])

Üretim endüstrisinde CAPP yaklaşımıyla ilgili günümüze kadar çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bunlardan birinde Mauthner ve arkadaşları "CAM-in-the-lop" sisteminin gelişimini ele almışlardır. Bu sistem kesme hızı, fener mili hızı, kesme derinliği gibi parametrelerin takibi ve ayarlanmasına olanak sağlamaktadır. İşleme süresinin optimizasyonuna ilave olarak takım aşınmasını önleyip kaliteyi artırmayı hedefledikleri çalışmalarında, verilerinin gerçek zamanlı analizi ve işleme sürelerinin iyileştirilmesi için önemli gelişmeler sağlamışlardır [10]. Xu ve He tarafından yapılan bir başka çalışmada CAD, CAPP, CAM ve CNC dörtlüsünün birbirleri ile ilişkisini ve entegrasyonu ele almışlardır. CAPP sayesinde üretim planlamadan, süreç yönetimine kadarki adımlarda etkin çözüm elde etmişlerdir. Bu entegrasyon ile hata payını minimuma indirme, süreci hızlandırma, kaliteyi artırma, maaliyeti kısma gibi avantajları elde etmişlerdir [11]. Deja ve Siemiatkowski ise yaptıkları çalışmada, freze-torna tezgahlarında işlem gerektiren parçaların CAPP sistemi ile işleme alınmasından makine atamasına kadar nasıl yapılabileceği üzerinde çalışmışlardır. Otomasyon ile daha hızlı, doğru ve verimli planlamaya olanak elde ederek maaliyet tasarrufu ve ürün kalitesi artışı sağlamışlardır [12]. Başka bir çalışmada Kumar ve arkadaşları tarafından yapılan araştırmalarda, mikro işleme için CAPP ile G kodu üretmeyi amaçlamışlardır. CAPP ile otomatik özellik çıkartma ve parça özelliklerine göre süreç planlaması ve kesici takım ilişkilendirilmesini incelemişlerdir [13]. Zubair ve Mansor yaptıkları araştırmalarda, tornalama işlemleri üzerinde bir parçanın geometrisinin analizini gerçekleştirmişlerdir. Yardımcı takım kütüphaneleri ile hangi bölgelerin nasıl bir işleme yapılacağına göre değişkenlik gösterebilecek bir algoritma tasarlamışlardır. Ayrıca parametrelerin otomatik oluşturulmasını sağlayan bir algoritma geliştirerek yardımcı bir yazılım ile kullanım kolaylığı sunmuşlardır [14]. Culler ve Burd tarafından yapılan çalışmada CAM programları sonucunda elde edilen dokümantasyonlar ile işleme sürelerine bakılarak faaliyet bazlı maliyetleme için CAPP üzerine bir yazılımı yapmışlardır. Bu şekilde, iş yükünü azaltan ve takip edilebilirliği arttırmayı amaçlayan bir çalışma ortaya koymuşlardır. API

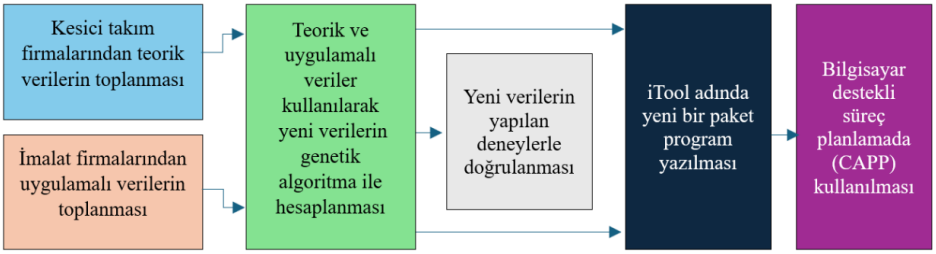
(Application Programming Interface) ile programlamada daha fazla çalışmaların yapılabileceğinin temelini gösteren bir çalışma olmuştur [15]. Bu ve benzeri çalışmaların ortaya koyduğu gerçek, CAPP teknolojisi ile yeni süreç planlamaları daha verimli bir üretim için sürekli geliştirilebilir olduğudur [16, 17].

Gerçekleştirilen bu çalışma öncesinde talaşlı imalat alanında faaliyet yürüten firmaları da kapsayan geniş çaplı incelemeler yapılmış ve en fazla sarfiyatın kesici takımlarda meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu problemin önüne geçmek için frezelemede kullanılan kesme hızı (Vc) ve ilerleme (f) gibi kesme parametreleri hakkında derin araştırmalar yapılmıştır. Özellikle kesici takımları üreten firmaların önerdikleri kesme parametreleri ile bu kesici takımları kullanan firmaların uyguladıkları kesme parametreleri yakından incelenmiştir. Böylece, teorik olarak tavsiye edilen değerler ile endüstride uygulanan değerlerin ilişkisi üzerinde durulmuştur. İncelemeler yapılırken kesici takım geometrisi ve kesme parametrelerindeki değişkenlerle ilgili gerekli bilgiler toplanarak sonuçlar elde edilmiştir. Bu kapsamda, alanında en ileri gelen en az iki büyük kesici takım firmasından alınan Vc ve f değerleri ile, bu takımlarla imalat yapan örnek en az iki imalat firmasının kullandığı Vc ve f değerlerinin farklı olduğu saptanmıştır. Toplanan veriler kullanılarak yeni kesme parametreleri genetik algoritma yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Teorik, endüstride uygulanan ve algoritma ile hesaplanan kesme şartlarından örnek bir kesit yapılan gerçek ortamlı deneylerle gözlenmiştir.

Hesaplanan verilerin ulaşılabilir olması için, talaşlı imalat alanında tecrübesi olmayan bir kullanıcının rahatlıkla kullanabileceği yeni bir paket program oluşturulmuştur. iTool adı verilen bu yeni program, Python programlama diliyle yazılmış ve CAM paket programlarına yardımcı bir yazılım programı olarak kullanılması da amaçlanmıştır. Yapılan çalışma sayesinde oluşturulan iTool programı ile talaşlı imalat süreçlerine ait birikmiş tecrübenin bir yazılım sayesinde kayıt altına alınması ve imalat süreçlerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada AISI 1040 alaşımlarını yüzey frezeleme işleminde en doğru kesme hızı (Vc) ve ilerleme (f) parametrelerinin belirlenmesini amaçlayan bilgisayar destekli süreç planlama (CAPP) yapılmıştır. Kesici takımları üreten firmalardan alınan teorik veriler (TV) ile bu kesici takımları kullanan imalat firmalarından alınan uygulamalı veriler (UV) kullanılarak geliştirilen algoritmayla yeni veriler hesaplanmıştır (HV). Hesaplanan bu yeni verilerin performansı gerçek ortamda yapılan fiziki deneylerde de gözlenmiştir. Python programlama dilinde yazılan ve kolay bir arayüze sahip olan yeni bir paket program (iTool) ile bu veriler kullanıcıya sunulacak hale getirilmiştir. Bu adımların basit bir şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada uygulanan adımların basit şeması (Simple diagram of the steps applied in the study)

2.1. Firmalardan Verilerin Toplanması ve Yeni Verilerin Hesaplanması (Collecting Data from Firms and Calculating New Data)

En verimli kesme şartlarını belirleyebilmek için en az iki farklı kesici takım firmasının katalog değerleri ile en az iki farklı imalat firmasında yaygın olarak uygulanan değerler kullanılmıştır. Firmalardan toplanan ve hesaplanan veriler kesme hızı (Vc) ve ilerleme (f) parametreleridir. İşlenecek hedef malzeme olarak AISI 1040 belirlenmiştir. Tüm firmalar için elde edilen veriler 4 ağızlı karbür parmak freze özelinde toplanmıştır. 5 mm - 25 mm çap arasındaki tüm freze takımları için Vc ve f verileri toplanmıştır. Yapılan değerlendirmelerde performans kriteri olarak takım ömrü (T) ve hedeflenen hacmin işleme zamanı (th) alınmıştır. Verilerin karşılaştırılabilir olması için dikdörtgen prizma şeklinde bir iş parçasının yüzeyinden sabit hacimde (255025 mm3) malzeme kaldırılmasına göre hesaplar yapılmıştır. Kesici takım firmalardan alınan teorik veriler, imalat firmalarından toplanan uygulamalı veriler ve bu veriler kullanılarak hesaplanan yeni veriler bir özeti Tablo 1'de verilmiştir. .

Tablo 1. Teorik veriler (TV), uygulamalı veriler (UV) ve bu veriler kullanılarak hesaplanan yeni verilerin (HV) taslağı (Theoretical data (TV), applied data (UV) and draft of new data (HV) calculated using these data)

İşleme Verileri: Girdiler									İşleme Verilerine Bağlı Algoritma ile Hesaplanan Kesme Hızı (Vc) ve İlerleme (f) Verileri	
Takım Çapı	2 Kesici Takım Firmasından Alınan Teorik Kesme hızı (Vc) ve İlerleme (f) Verileri				2 İmalat Firmasından Alınan Uygulamalı Kesme hızı (Vc) ve İlerleme (f) Verileri					
D (mm)	1.TV		2.TV		1.UV		2.UV		HV	
5-25	Vc_{5-25}	f_{5-25}	Vc_{5-25}	f_{5-25}	Vc_{5-25}	f_{5-25}	Vc_{5-25}	f_{5-25}	Vc_{5-25}	f_{5-25}
İşleme Verileri: Çıktılar									İşleme Verilerine Bağlı Algoritma ile Hesaplanan Takım Ömrü (T) ve İşleme Zamanı (th) Verileri	
Takım Çapı	Teorik Veriler için Takım ömrü (T) ve Esas İşleme Zamanı (Th)				Uygulamalı Veriler için Takım ömrü (T) ve Esas İşleme Zamanı (th)					
D (mm)	1. TV		2.TV		1.UV		2.UV		HV	
5-25	T_{5-25}	th_{5-25}	T_{5-25}	th_{5-25}	T_{5-25}	th_{5-25}	T_{5-25}	th_{5-25}	T_{5-25}	th_{5-25}

Frezelemede kesmeyi gerçekleştiren iki ana hareketin meydana getirdiği iki kesme parametresi vardır. Bunlardan biri takım çapına ve dönüş hızına bağlı olan kesme hızı (Vc), bir diğeri ise ilerleme (f) değerleridir. Bu değerler takım üreticileri tarafından alınarak gerekli formüllerle birleştirilip tezgaha girilen devir (N) ve ilerleme hızı (Vf) hesaplarken kullanılmaktadır [18].

Devir (N) takımın birim zamanda dönme sayısını ifade eder. N hesabı için Eşitlik 1 kullanılmaktadır.

$$N = \frac{V_c\ 1000}{\pi\ D} \tag{1}$$

İlerleme (f) takımın bir tam tur dönüşünde ilerleme doğrultusunda milimetre olarak aldığı yoldur. Diş başı ilerleme (fz) ve diş sayısına(z) bağlıdır. f için Eşitlik 2 şu şekildedir:

$$f = z\ \ f_z \tag{2}$$

İlerleme hızı (Vf) takımın birim zamanda ilerleme doğrultusunda milimetre olarak aldığı yoldur. Vf için Eşitlik 3 şu şekildedir:

$$V_f = N\ \ f \tag{3}$$

Esas işleme zamanı (th) takımın talaş kaldırdığı süreyi ifade etmektedir.

Paso sayısı (i), işlenen boy (L) ve ilerleme hızına (Vf) bağlı bir değerdir. Bu çalışmada th değerlerini hesaplarken kullanılan Eşitlik 4 şu şekildedir:

$$t_h = \frac{i\ L}{V_f} \tag{4}$$

Bu çalışmadaki takım ömrü hesaplamalarında Taylor takım ömrü modeli kullanılmıştır. Bu modele göre kesme parametrelerindeki artışa karşın, kullanılan takımın ömrü azlır [18]. Taylor takım ömrü modeli Eşitlik 5'te verilmiştir

$$V_c\ T^n = C \tag{5}$$

Burada kullanılan sembollerden Vc kesme hızına (m/dk), T takım ömrüne (dk), n sabit üstel değere ve C de Taylor sabitine karşılık gelmektedir. Sabit değerlerden n üsteli takım ve iş parçası malzemesine bağlı olarak değişir. C değerinin ise takım malzemesi, iş malzemesi ve kesme koşullarına bağlı olduğu bilinmektedir [19]. Seçilmiş bazı tipik takım malzemeleri incelendiğinde n ve C değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. n üsteli ve C sabitinin kesici takım ve iş parçası malzemesine göre değişimi [19] (Variation of n exponent and C constant according to cutting tool and workpiece material [19])

Takım malzemesi	**n**	**C**	
		Çelik dışı için kesim (m/dk)	Çelik için kesim (m/dk)
Sade karbon çeliği	0,1	70	20
Yüksek hız çeliği	0,125	120	70
Sinterlenmiş karbür	0,25	900	500
Sermet	0,25		600
Kaplamalı karbür	0,25		700
Seramik	0,6		900

En hızlı işleme ve en yüksek takım ömrünü birlikte sunabilecek en verimli kesme şartlarının tespiti için teorik verilerin ortalaması ile uygulamalı verilerin ortalaması arasında en verimli kesme şartlarının tespiti için genetik algoritma (GA) modeli kullanılmışıtr. Genetik algoritma modeli, evrimsel

hesaplama alanında yaygın olarak kullanılan bir optimizasyon yöntemidir. Temelde, çözüm uzayında en iyi çözümleri bulmaya çalışan bir arama algoritmasıdır. Popülasyon tabanlı olarak çalışan genetik algoritma modeli, 7 temel adıma sahiptir. Bunlar:

1. Çözümlerin Kodlanması: Probleme özgü bilgilerin genetik algoritmanın kullanacağı şekle çevrilmesi.

2. Başlangıç Popülasyonu Oluşumu: Belli bir potansiyel çözümü (birey) içeren bir kümenin türetilmesi.

3. Uygunluğu Değerlendirme: Hedeflenen probleme ait uygunluk (fitness) ölçütüne göre her bir bireyin değerlendirilmesi.

4. Çoğalma Seçilimi: Daha iyi çözümleri için en uygun bireylerin seçilmesi.

5. Çaprazlama (Crossover): Belirlenen bireylere ait genetik durumlarını değiştirerek yeni bireylerın oluşturulması

6. Mutasyon: Yeni türetilen bireylerin genetik yapısında hedeflenen probleme yaklaştıracak küçük değişiklikler yapılması.

7. Yeni Popülasyon Oluşumu ve Durdurma: Yeni bireyler bir sonraki nesli oluşturur ve süreç yeniden başlaması ve süreçin belirli bir optimizasyon problemini çözmek için en iyi sonucu elde edene kadar tekrarlanması [20, 21].

Tve th bağımlı değişkenlerini en iyi hedefe ulaştırma problemi ile oluşturulan bu yöntem ile 5 mm -25 mm arasında çaplara sahip takımlar için artarak T'ye ve azalarak th'ye yaklaşmayı sağlayan optimum Vc ve f değerleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

2.2. Fiziki Testlerin Yapılması (Performing Physical Tests)

Algoritma ile belirlenen kesme parametreleri için işleme performansını gözlemleyebilmek adına, fiziki deneylerle örnek bir veri kümesi test edilmiştir. Bu başlık altında deneysel çalışmalarda kullanılan materyaller ve uygulanan yöntemlere yer verilmiştir. Deney malzemesi olarak seçilen AISI 1040 alaşımı farklı kesme parametreleri kullanılarak frezelenmesinde tüm şartlarda aynı iş parçası hacmi işlenmiştir. Bu şartlarda işleme zamanı (th) incelenmiş ve takımlardaki aşınma görüntüleri alınmıştır. Ayrıca, her farklı şart için takım ömürleri (T) de hesaplanmıştır. Tablo 3'te yapılan deneylerde kullanılan sabit ve değişken parametreler verilmiştir.

Tablo 3. Fiziki deneylerde kullanılan sabit ve değişken parametreler (Fixed and variable parameters used in physical experiments)

Deney Değişkenleri				**Performans Kriterleri**		
Deney no	Veri Kaynağı	Kesme parametreleri: Vc (m/dk)	f (mm/dev)	İşleme zamanı th (dk)	Takım ömrü T (dk)	Takım aşınmaları Vb (mm)
1	TV_8	Vc_8,	f_8	th_8	T_8	$1.Takım_8$
2	UV_8	Vc_8	f_8	th_8	T_8	$2.Takım_8$
3	HV_8	Vc_8	f_8	th_8	T_8	$3.Takım_8$
4	TV_{10}	Vc_{10}	f_{10}	th_{10}	T_{10}	$4.Takım_{10}$
5	UV_{10}	Vc_{10}	f_{10}	th_{10}	T_{10}	$5.Takım_{10}$
6	HV_{10}	Vc_{10}	f_{10}	th_{10}	T_{10}	$6.Takım_{10}$
7	TV_{12}	Vc_{12},	f_{12}	th_{12}	T_{12}	$7.Takım_{12}$
8	UV_{12}	Vc_{12},	f_{12}	th_{12}	T_{12}	$8.Takım_{12}$
9	HV_{12}	Vc_{12}	f_{12}	th_{12}	T_{12}	$9.Takım_{12}$
Deney Sabitleri						
İş Parçası Malzemesi		AISI 1040 (18 HRC)				
Kesici Takım		8 mm, 10 mm ve 12 mm Çaplı, Karbür, 4 Ağızlı, Yekpare Takımlar				
Kesme Sıvısı		Yok (Kuru)				
Takım Bağlama Boyu-Takım Tutucu		30 mm, SNDVK CoroChuck930HA10S20-100				
İşlenen Parça Hacmi		255025 mm^3				

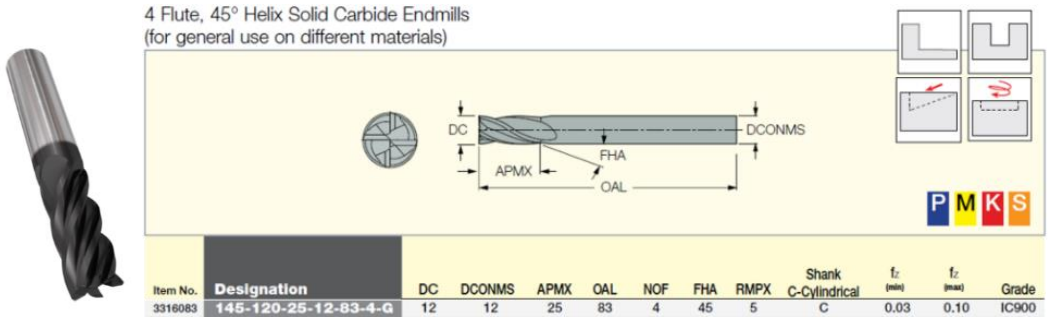
Bilindiği üzere kesici takımların kesme açıları, malzemesi veya kaplaması da işleme performansını etkilemektedir [22]. Bu sebeple deneylerde aynı kesme açısı ve malzemeye sahip üç farklı çapta (8 mm, 10 mm ve 12 mm) kesici takımlar kullanılmış ve bu takımlara ait kesme parametreleri ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir çap için sırasıyla teorik (TV), uygulamalı (UV) ve hesaplanan (HV) kesme parametreleri olmak üzere üç durum test edilerek toplamda dokuz deney yapılmıştır. İncelenen her bir

çap için, teorik veriler takım firmalarına ait verilerin ortalamaları alınarak, uygulamalı veriler ise imalat firmalarına ait verilerin ortalamaları alınarak belirlenmiştir. Hesaplanan veriler ise her takım çapı için ilgli algoritmadan türetilmiştir. Dokuz farklı kesme şartının her birinde yeni bir kesici takım kullanılarak AISI 1040 malzemeden 255025 mm3 sabit hacim işlenmiştir. Deneyler sonunda belirtilen hacmin işleme zamanı (th) ve takım ömrüne (T) işaret eden takımların işlem sonrası aşınma verileri değerlendirilmiştir.

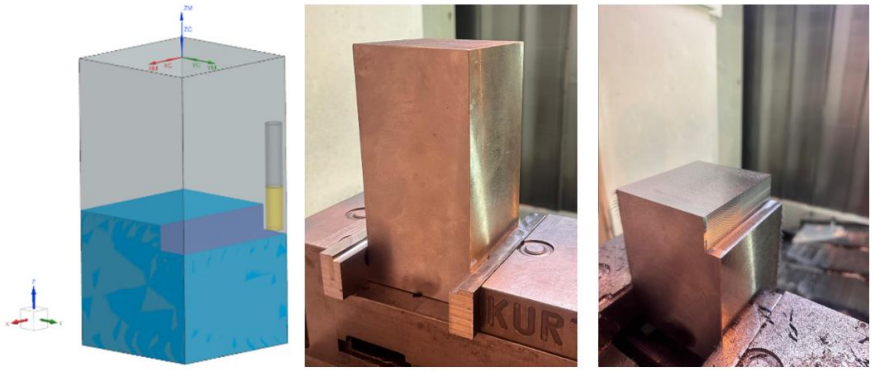
Deneylerde MAZAK marka, i-630V model 5 eksen CNC tezgahın kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kesici takımlar ise IC900 kalitesinde, 4 ağızlı, yekpare, karbür kesici takımlardır. Kullanılan kesici takımların fotoğrafı ve teknik özellikleri Şekil 3'te verilmiştir.

Kuru kesme şartlarında yapılan deneyler için Siemens NX programı üzerinden hazırlanan CAM programı kullanılmıştır. 255025 mm3 hacimde talaş kaldırılmış olan iş parçası numunesinin CAM programı üzerindeki sanal görüntüsü ve gerçek görüntüsü Şekil 4'te verilmiştir.

Deneylerde takımlardaki aşınma, çatlak ve kırılma gibi deformasyonların ultrasonik gölgelendirme yöntemi ile görüntülendiği, HAIMER Tool Presetter Vio Lineer marka/model ölçme cihazı kullanılmıştır. İş parçası olarak kullanılan AISI 1040 çeliği, piyasada karbon çeliği olarak sınıflandırılan %0,4 karbon içeren çeliklerdir. Sertleştirilmeye uygun bir malzeme olduğu için otomotiv, havacılık ve ulaşım sektörlerinde kullanılır [23, 24]. Tablo 4'te bu malzemenin kimyasal ve mekanik özellikleri verilmiştir.



Şekil 3. Kullanılan kesici takıma ait teknik özellikler [25] (Technical specifications of the cutting tool used [25])



Şekil 4. İş parçası malzemesinin işlenmiş CAM katı modeli (a), işlem öncesi (b) ve işlem sonrası (c) fotoğrafı (Photograph of the machined CAM solid model of the workpiece material (a), before (b) and after (c) processing)

Tablo 4. AISI 1040 malzemenin kimyasal ve mekanik özellikleri* (Chemical and mechanical properties of AISI 1040 material*)

C %	**Mn %**	**Si %**	**P %**	**S %**
0,37-0,44	0,60-0,90	0,15-0,35	<0,040	<0,05

Sertlik (HRC)	**Akma Dayanımı (MPa)**	**Çekme dayanımı (MPa)**	**Uzama (mm) %**
18	385	655	10-20

* Veriler üretici firmadan alınmıştır.

2.3. iTool Programının Yazılması (Writing the iTool Program)

Elde edilen yeni verilere rahatlıkla ulaşılabilmesi için, kullanımı kolay olan bir arayüze sahip ve CAM paket programlarına yardımcı bir alt program olarak çalışabilecek paket program yazılmıştır. Yazılan bu program ile uygulanacak işleme bilgisi, işlenecek malzeme bilgisi ve kullanılacak kesici takım bilgisi girildikten sonra, o şartlardaki en uygun kesme parametrelerinin kullanıcıya önerilmesi amaçlanmıştır. Hedeflenen program Python programlama diliyle yazılmış ve yazım aşamasında tkinter ile PIL araçları kullanılmıştır. Hazırlanan ve adı iTool olarak belirlenen paket programa ait kodlardan küçük bir kesite Şekil 5'te yer verilmiştir.

MAIN.launch

```
import tkinter as tk
from tkinter.ttk import *
from PIL import Image, ImageTk


def cal_step():
    root.Z = root.tool_diameter * 35 / 100
    root.step_over = root.tool_diameter * 15 / 100


class Tool_Diameter_Window:
    def __init__(self, func):
        self.win = tk.Toplevel()
        self.func = func
        frame = tk.Frame(self.win)
        self.win.title("Takım Çapı Seçme Ekranı")
        self.win.resizable(False, False)

        window_height = 500
        window_width = 900

        screen_width = self.win.winfo_screenwidth()
        screen_height = self.win.winfo_screenheight()

        x_coordinate = int((screen_width / 2) - (window_width / 2))
        y_coordinate = int((screen_height / 2) - (window_height / 2))
```

Şekil 5. iTool programı için Python programlama dili ile yazılan kodlardan bir kesit (A section of the code written in Python programming language for the iTool program)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

3.1. Toplanan Verilerin İncelenmesi (Review of Collected Data)

Bu çalışmada yekpare karbür parmak frezeler kullanılarak AISI 1040 alaşımının frezelenmesinde gereken kesme parametreleri verilerine ulaşılmıştır. Alanında en ileri gelen iki büyük kesici takım firmasından alınan teorik veriler, 5 mm'den 25 mm'ye kadar olan takım çapına (D) göre kesme hızı (Vc) ve ilerleme (f) değerleridir. Belirlenen sabit hacmin (255025 mm3) seçilen parametrelerle ne kadar sürede işleneceği (th), Eşitlik (1), Eşitlik (3) ve Eşitlik (4) kullanılarak her çap için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ayrıca, alınan verilerle birlikte Tablo 2'den uygun n ve C sabitleri alınarak kesme hızına bağlı takım ömürleri (T) de hesaplanmıştır. Takım ömrü hesabı için Taylor takım ömrü modeline ait formülü (Eşitlik 5) kullanılmıştır. 5 mm – 25 mm arasında çaplara sahip dört ağızlı yekpare karbür takımlar için kesici takım firmalarından alınan Vc ve f verileri ile hesaplanan th ve T sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.

Benzer şekilde talaşlı imalat sektöründe faaliyet gösteren iki imalat firmasından AISI 1040 alaşımlarının frezelenmesinde kullandıkları 5 mm – 25 mm çap aralığındaki dört ağızlı karbür parmak frezeler için Vc ve f verileri alınmıştır. Yine alınan bu veriler ile, belirlenen sabit hacmin ne kadar sürede işleneceği (th) ilgili denklemler kullanılarak her çap için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Yine Tablo 2'den uygun n ve C sabitleri alınarak kesme hızına bağlı takım ömürleri (T) hesaplanmıştır. 5 mm – 25 mm arasında çaplara sahip dört ağızlı yekpare karbür takımlar için imalat firmalarından alınan Vc ve f verileri ile hesaplanan th ve T sonuçları Tablo 6'daki gibidir.

Tablo 5. Kesici takım firmalarından alınan teorik veriler (Theoretical data obtained from cutting tool firms)

Takım Çapı D (mm)	1. Takım firmasına ait teorik veriler (1.TV)				2. Takım firmasına ait teorik veriler (2.TV)			
	Vc (m/dk)	f (mm/dev)	th (dk)	T (dk)	Vc (m/dk)	f (mm/dev)	th (dk)	T (dk)
5	110	0,160	72,835	426,883	110	0,060	194,227	426,883
6	120	0,220	33,720	301,408	110	0,080	101,160	426,883
7	120	0,220	24,774	301,408	115	0,080	71,090	357,345
8	130	0,220	17,509	218,829	115	0,120	36,286	357,345
9	130	0,220	13,834	218,829	117	0,140	24,154	333,531
10	140	0,240	9,538	162,692	120	0,160	16,691	301,408
11	140	0,260	7,276	162,692	125	0,180	11,771	256,000
12	150	0,300	4,946	123,456	130	0,200	8,560	218,829
13	150	0,300	4,214	123,456	135	0,200	7,023	188,167
14	155	0,300	3,516	108,281	138	0,240	4,937	172,331

15	155	0,300	3,063	108,281	140	0,280	3,633	162,692
16	160	0,300	2,608	95,367	143	0,280	3,127	149,463
17	160	0,320	2,166	95,367	145	0,300	2,549	141,386
18	165	0,340	1,763	84,322	145	0,320	2,132	141,386
19	165	0,340	1,582	84,322	150	0,360	1,644	123,456
20	170	0,360	1,309	74,831	150	0,360	1,484	123,456
21	170	0,380	1,125	74,831	153	0,380	1,250	114,054
22	175	0,380	0,996	66,638	153	0,400	1,082	114,054
23	175	0,400	0,865	66,638	160	0,400	0,947	95,367
24	180	0,420	0,736	59,537	160	0,460	0,756	95,367
25	180	0,420	0,678	59,537	165	0,460	0,676	84,322
C= 500; n=0,25; z=4								

Tablo 6. İmalat firmalarından alınan uygulamalı veriler (Applied data from manufacturing firms)

Takım Çapı D (mm)	**1. İmalat firmasına ait uygulamalı veriler (1.UV)**				**2. İmalat firmasına ait uygulamalı veriler (2.UV)**			
	Vc (m/dk)	f (mm/dev)	th (dk)	T (dk)	Vc (m/dk)	f (mm/dev)	th (dk)	T (dk)
5	141,37	0,200	45,34	156,46	109,96	0,286	40,80	427,57
6	150,80	0,248	23,61	120,86	113,10	0,333	23,61	382,01
7	175,93	0,248	14,87	65,24	131,95	0,333	14,87	206,20
8	175,93	0,284	9,96	65,24	138,23	0,454	7,97	171,19
9	197,92	0,284	7,00	40,73	141,37	0,500	5,60	156,47
10	204,20	0,320	4,86	35,94	157,08	0,600	3,40	102,66
11	224,62	0,320	3,65	24,55	155,51	0,666	2,55	106,87
12	218,65	0,376	2,68	27,34	169,65	0,666	1,97	75,46
13	224,62	0,400	2,11	24,55	171,53	0,714	1,55	72,20
14	241,90	0,416	1,62	18,25	184,73	0,714	1,24	53,67
15	245,04	0,440	1,31	17,33	188,50	0,750	1,01	49,51
16	251,33	0,480	1,04	15,66	201,06	0,750	0,83	38,24
17	267,04	0,480	0,87	12,29	213,63	0,750	0,69	30,01
18	271,43	0,500	0,73	11,51	214,88	0,789	0,58	29,31
19	286,51	0,520	0,59	9,27	226,82	0,789	0,50	23,61
20	282,74	0,576	0,49	9,77	238,76	0,789	0,43	19,23
21	296,88	0,576	0,42	8,04	250,70	0,789	0,37	15,82
22	304,11	0,612	0,35	7,30	262,64	0,789	0,32	13,14
23	310,70	0,624	0,31	6,70	252,90	0,857	0,28	15,28
24	301,59	0,712	0,26	7,55	263,89	0,857	0,25	12,89
25	314,16	0,724	0,23	6,41	274,89	1,000	0,19	10,95
C= 500; n=0,25; z=4								

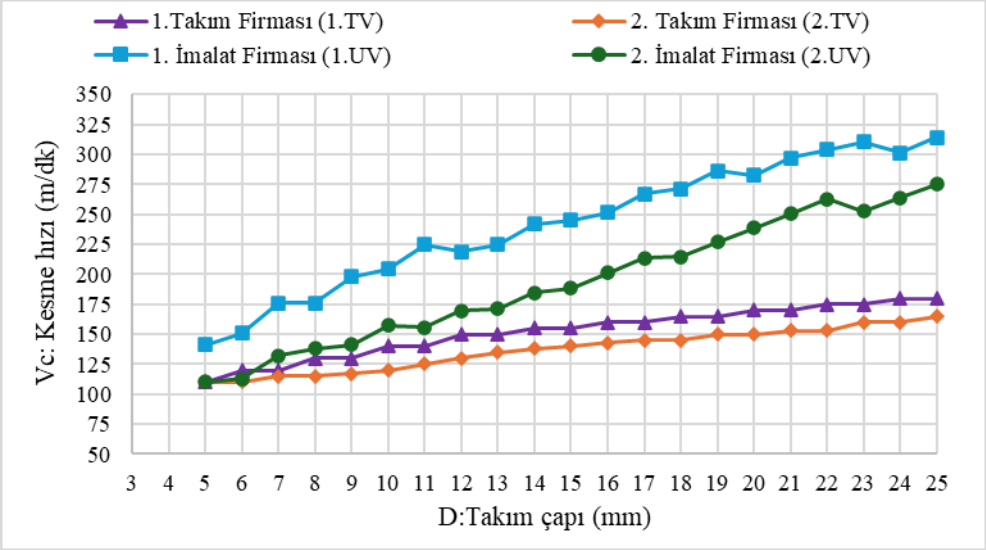
Kesici takım firmalarından alınan teorik verilerle imalat firmalarından alınan uygulamalı verilerin daha kolay karşılaştırılabilmesi için tüm veriler grafikler halinde Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmuştur. Şekil 6'da iki kesici takım firması ve iki imalat firması olmak üzere toplamda dört firmaya ait takım çaplarına göre kullanılan kesme hızları verilmiştir.

Şekil 6 incelendiğinde genel olarak artan takım çapına bağlı olarak kesme hızlarının artması Eşitlik 1'de de ifade edildiği üzere beklenen bir durumdur [26]. Takım çapı ile kesme hızı arasındaki ilişki incelendiğinde, kesme hızının sadece teorik olarak değil, uygulamalı verierde de çapla birlikte arttığı anlaşılmaktadır. Tüm veri türleri göstermektedir ki, büyük çaplı takımlar için önerilen devir sayıları düşürülse bile, bu azalış takım çapındaki artışı tam olarak dengelemediğinden dolayı, kesme hızı artmaya devam etmektedir. Bu durum, büyük çaplı takımların daha rijit yapıları sayesinde daha agresif kesme koşullarını tolere edebilmesiyle de ilişkilendirilebilir. Buna karşılık, küçük çaplı takımlar daha düşük mekanik dayanım gösterdiğinden, daha düşük kesme hızlarında çalıştırılmaları hem takım ömrünü uzatmakta hem de işleme kalitesini iyileştirmektedir.

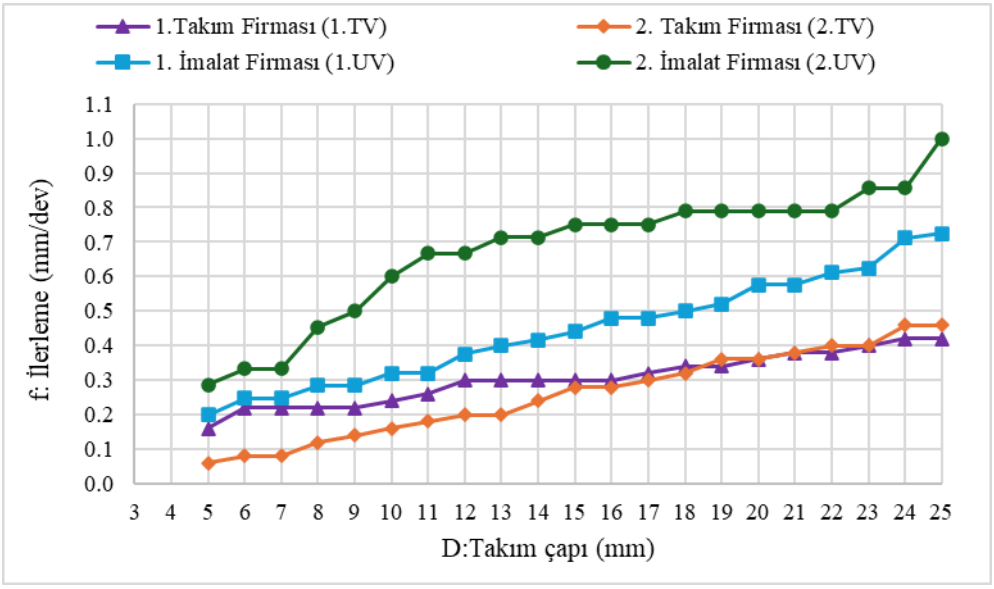
Teorik ve uygulamalı verileri karşılaştırdığımızda, imalat firmalarının kullandığı Vc değerlerinin kesici takım firmalarının önerdiği teorik değerlerden daha yüksek olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Küçük çaplı kesici takımlarda veriler daha yakınken, kesici takım çapı büyüdükçe uygulamalı ve teorik veriler arasındaki fark artmaktadır. Teorik verilerin ortalamasının uygulamalı verilerin ortalamasından %35 daha az olduğu söylenebilir. Uygulamalı veriler kendi içinde karşılaştırıldığında 2. imalat firmasının 1. imalat firmasından ortalama %20 daha düşük kesme hızları kullandığı anlaşılmaktadır. Teorik veriler birbirine yakın

olmakla birlikte, 2. kesici takım firmasının önerdiği kesme hızı değerlerinin 1. kesici takım firmasına göre %10 daha az olduğu söylenebilir.

Takım çaplarına göre dört firmanın kullandığı ilerleme değerlerini gödteren Şekil 7 incelendiğinde ise, takım tüm firmalar için artan takım çapına bağlı olarak ilerleme parametrelerinin de arttığı görülmektedir. Çünkü, yüksek kesme parametrelerinin sebep olacağı yüksek kesme kuvvetine karşı, çok küçük çaplı takımların kırılma ihtimali daha fazla olacağından, bu çaplarda düşük ilerlemelerin kullanılması daha güvenlidir [27]. Uygulamalı ve teorik veriler karşılaştırıldığında, imalat firmalarının kullandığı ilerleme verilerinin kesici takım firmasının önerdiği teorik verilerden daha yüksek olduğu Şekil 7'de görülmektedir. Yine büyük çaplı takımlarda bu farkın arttığı görülmektedir. Teorik f verilerin ortalamasının uygulamalı verilerin ortalamasına göre %50 daha az olduğu söylenebilir. Uygulamalı veriler kendi içinde karşılaştırıldığında 1. imalat firması 2. imalat firmasına göre %34 daha düşük ilerleme değerleri kullanmaktadır. İki kesici takım firmasına ait teorik f verileri özellikle büyük çaplı takımlarda birbirine çok yakınken, küçük çaplı takımlarda 1. Kesici takım firmasının önerdiği f değerleri daha fazladır. Ortalama f değerleri için 1. kesici takım firmasının 2. kesici takım firmasına göre %15 daha düşük f ilerleme değeri önerdiği söylenebilir.

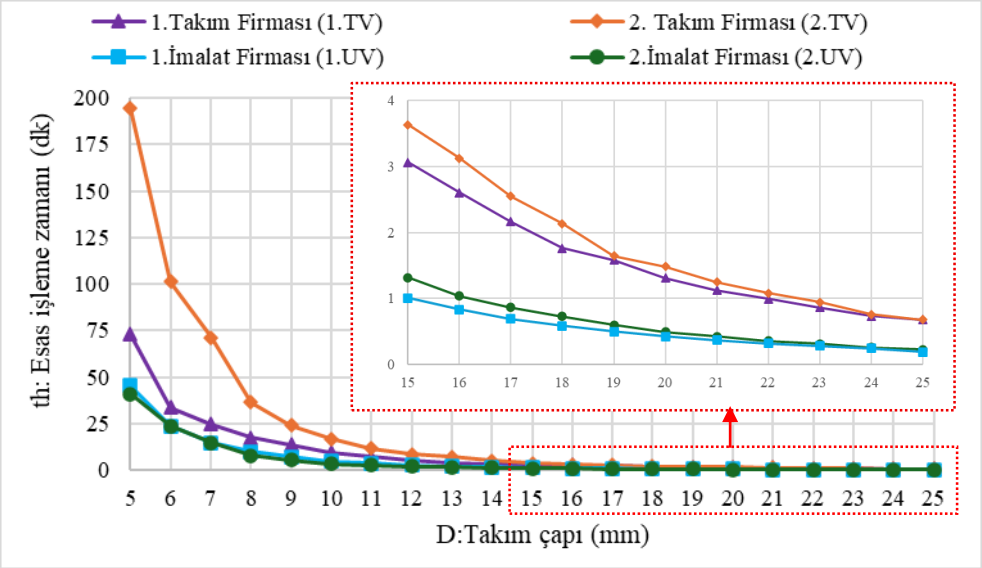


Şekil 6. Farklı firmalardan alınan kesme hızı (Vc) verilerinin karşılaştırılması (Comparison of cutting speed (Vc) data from different firms)

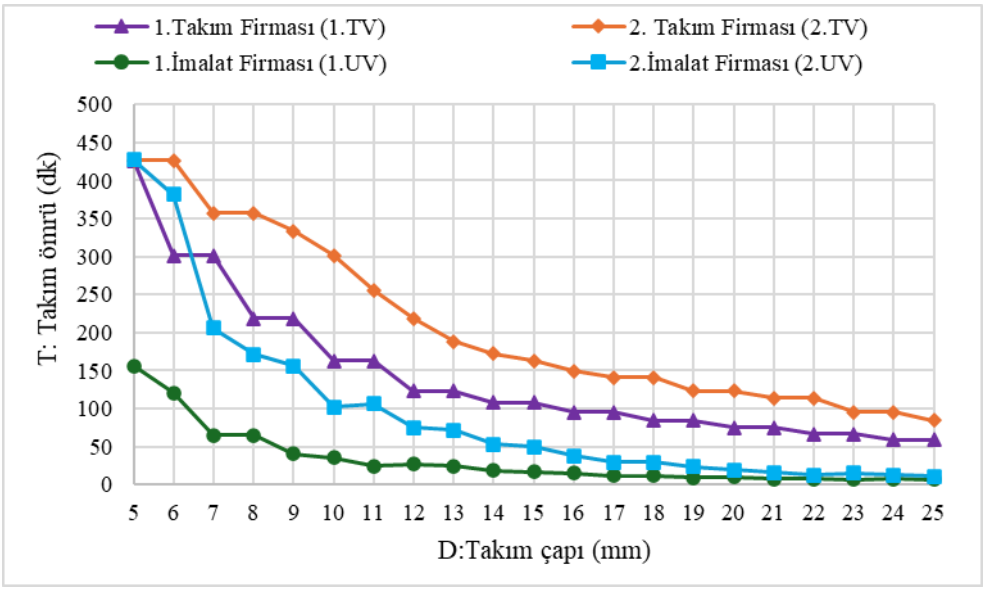


Şekil 7. Farklı firmalardan alınan ilerleme (f) verilerinin karşılaştırılması (Comparison of feed (f) data from different firms)

Sonuç olarak, 1. imalat firması 2. imalat firmasına göre daha yüksek Vc ve daha düşük f değerleri kullanmaktadır. Bu durum iki firmanın imalat uygulamasında kullandıkları f ve Vc'ye bağlı bir parametre olan ilerleme hızı (Vf) değerlerinin (Eşitlik 3) birbirine daha yakın olduğunu göstermektedir. Eşitlik 4'te de verildiği üzere, Vf özellikle esas işleme zamanını (th) belirleyen temel kesme parametrelerindendir. Dolayısıyla esas işleme zamanını Vc ve f birlikte etkiler. Artan Vc ve f (dolayısıyla Vf)'e bağlı olarak esas işleme zamanı azalacaktır. Şekil 8'de dört firmanın kullandıkları kesme parametrelerine bağlı olarak işleme zamanlarındaki değişim verilmiştir.



Şekil 8. Farklı firmalara ait esas işleme zamanı (th) verilerinin karşılaştırılması (Comparison of actual machining time (th) data of different firms)



Şekil 9. Farklı firmalardan alınan takım ömrü (T) verilerinin karşılaştırılması (Comparison of tool life (T) data from different firms)

Şekil 8'de azalan takım çapına bağlı olarak th değerinin arttığı görülmektedir. İşleme süresi üzerinde etkili olan faktörler birlikte değerlendirildiğinde, takım çapındaki artışın çift yönlü bir avantaj sunduğu görülmektedir. Bir yandan, daha büyük çaplı takımlar için önerilen yüksek ilerleme değerleri sayesinde ilerleme hızı artmakta ve bu da işlem süresini azaltmaktadır. Diğer yandan, yana kayma mesafesi (D x 0,5) takım çapıyla birlikte arttığından, sabit bir iş hacminin daha az sayıda paso ile işlenmesi mümkün olmaktadır. Bu iki etki, büyük çaplı takımların daha kısa çevrim süreleriyle çalışmasına olanak tanımaktadır [28]. Dolayısıyla takım çapının artışına bağlı olarak tüm verilerde esas işleme zamanının azalıyor olması beklenen bir durumdur.

Teorik ve uygulamalı veriler karşılaştırıldığında yüksek kesme parametrelerinin uygulandığı imalat firmalarında daha küçük işleme zamanları elde edildiği Şekil'8'de de görülmektedir. Büyük çaplı takımlarda (15-25 mm) tüm veriler birbirine çok yakın olsa da, imalat firmalarına (uygulamalı verilere) ait ortalama th değerlerinin teorik değerler göre %44 daha az olduğu söylenebilir.

Hızlı bir üretim imalat zamanını azaltsa da, takım deformasyonunda aynı azalan etkiyi göstermeyecektir. Aksine azalan işleme zamanı takımda aşınmaları artırarak ömrü kısaltacaktır [29]. Bu sebeple toplanan veriler için takım çapına göre takım ömründeki değişimi belirlemek de önemlidir. Dört firmanın kullandığı kesme parametrelerine bağlı olarak ortaya çıkabilecek takım ömürleri hesaplanarak, elde edilen sonuçlar Şekil 9'daki grafikte verilmiştir.

Daha önce Eşitlik 5'te takım ömrünün başta kesme hızı olmak üzere kesme şartlarına bağlı olarak değiştiği vurgulanmıştı. Dolayısıyla büyük çaplı takımlarda kullanılan yüksek kesme hızı takımların aşınmasını hızlandıracaktır. Artan kesme parametrelerine bağlı olarak kesici takımların daha kısa sürede aşınarak ömrünü daha kısa sürede tamamlamadığı yapılan pek çok araştırmada gözlenmiştir [30, 31, 32]. Bu sebeple daha yüksek kesme hızlarının kullanıldığı uygulamalı verilerde takım ömrü, teorik verilere göre daha düşüktür. Sayısal olarak ifade edilecek olursa, uygulamalı verilere ait takım ömrü ortalaması, teorik verilere ait takım ömrü ortalamasından %63,5 daha az olduğu söylenebilir. Dolayısıyla Şekil 9'da artan takım çapı ve buna bağlı olarak artan kesme hızı, T verilerinde azalmaya sebep olmuştur.

Tüm bu sonuçlar ışığında, kesici takımları kullanan imalat firmalarına ait (uygulamalı) verilerin işleme hızını yükselterek birim zamanda üretilecek ürün sayısını artırma motivasyonu içerdiği düşünülmektedir. Buna karşın, kesici takım firmalarının önerdikleri (teorik) veriler ise takım bütünlüğünü en uzun süre koruma motivasyonu içerdiği değerlendiril-mektedir. Verimli bir imalat süreci mümkün olan en kısa sürede imalat yaparken, eldeki imalat araçlarını mümkün olan en uzun sürede kullanmakla mümkün olacaktır. Dolayısıyla bu noktada, bu ihtiyaçlara cevap verebilecek kesme parametrelerinin belirlenmesi hayati öneme sahiptir [33].

3.2. Elde Edilen Yeni Veriler (New Data Obtained)

Verimli bir talaş kaldırma işlemi kesici takımı en uzun süre kullanırken, üretimi mümkün olan en hızlı şekilde yapmak olarak tarif edilebilir [27]. Fakat işleme hızının artışının doğrudan takım ömrünü olumsuz etkilediği Eşitlik 5'te verile Taylor takım ömrü modelinden de anlaşılmaktadır. Bu iki tezat durum için optimum bir noktada kalmak çok önemlidir. Yani, hem hızlı bir üretimi sunacak hem de takım ömrünü agresif bir şekilde aşağıya çekmeyecek kesme parametrelerinin belirlenmesi gerekir. Kesici takım firmalarının önerdiği yüksek takım ömrünü sağlayan teorik kesme parametreleri, imalat firmalarına ait uygulamalı kesme parametrelerine göre daha düşük seviyedir. Buna karşılık firmalar da düşük işleme zamanı ve buna bağlı olarak hızlı bir imalat sunan yüksek kesme parametreleri kullanmaktadır. Hızlı bir imalat yaparken, takım ömrünü de agresif bir şekilde azaltmamak için teorik veriler ve uygulamalı verilerin arasında yeni değerler hesaplanmıştır. Bu nedenle T ve th verileri oluşturulan algoritmanın problem çözme kaynağıdır. Yeni verilerin elde edilmesi için Google Colab ortamında Python programlama dili ile genetik algoritma geliştirilmiştir. Şekil 10'da oluşturulan genetik algoritma için çalıştırılan kodların bir bölümü paylaşılmıştır.

```python
# Genetik algoritma döngüsü
for generation in range(generations):
    population = sorted(population, key=lambda x: fitness(x, veriler), reverse=True)  # Fitness sıralaması
    new_population = population[:10]  # En iyi 10 birey seçilir

    # Çaprazlama ve mutasyon işlemleri
    while len(new_population) < population_size:
        parent1, parent2 = random.sample(population[:50], 2)  # İlk 50 popülasyondan iki ebeveyn seç
        child = [(p1 + p2) / 2 for p1, p2 in zip(parent1, parent2)]  # Basit çaprazlama
        if random.random() < 0.1:  # Mutasyon oranı
            child[1] += random.uniform(-10, 10)  # Kesme hızında küçük değişiklik
            child[2] += random.uniform(-0.05, 0.05)  # İlerleme miktarında küçük değişiklik
        new_population.append(child)

    population = new_population

# Sonuçları döndürme
best_solution = max(population, key=lambda x: fitness(x, veriler))
return best_solution
```

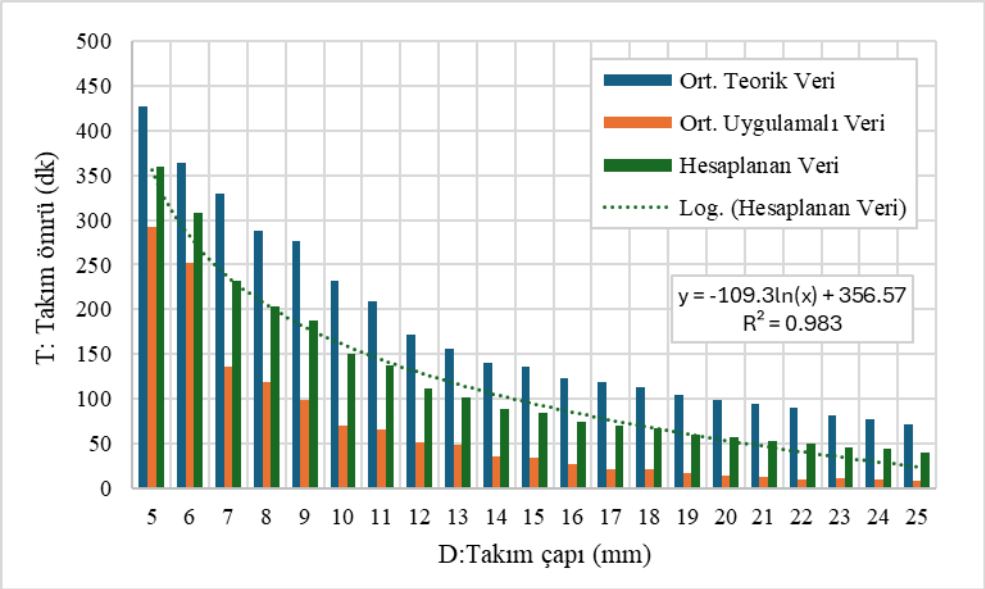
Şekil 10. Genetik algoritma için Python programlama dilinde yazılan kodlardan bir kesit (A section of the codes written in Python programming language for the genetic algorithm)

Uygulamalı verilerin ortalaması ve teorik verilerin ortalaması arasında en iyi ara değerleri için en düşük th ve en yüksek T değerlerine yaklaşan yeni kesme parametreleri Şekil 10'da kullanılan algoritmayla belirlenmiştir. Elde edilen yeni kesme parametrelerine göre her çap için türetilen yeni T verilerinin, ortalaması alınan teorik ve uygulamalı T verilerine göre durumu Şekil 11'de paylaşılmıştır.

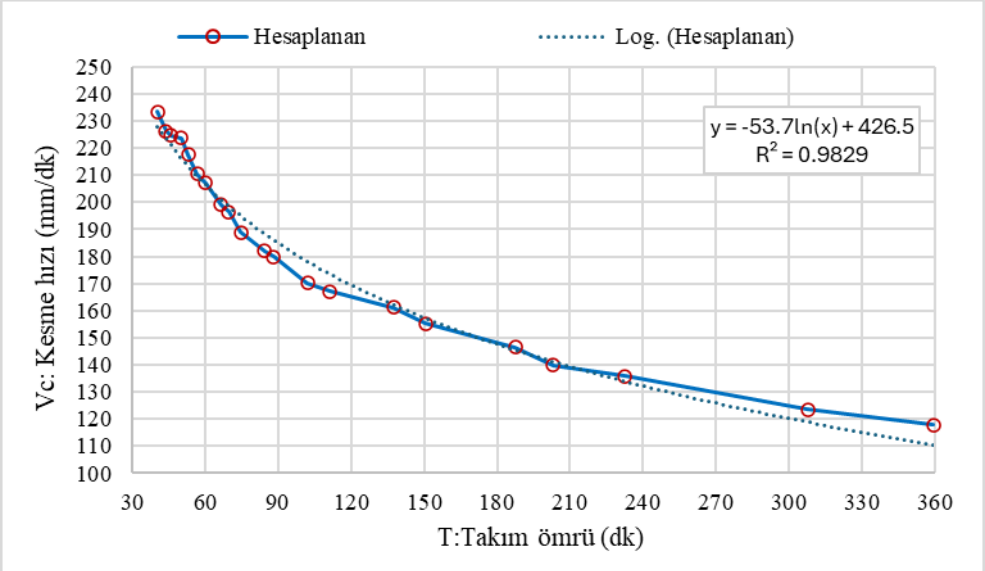
Hesaplanan veriler firmalardan toplanan verilerin arasında ortalamaya yakın bir dağılım sergilediği

Şekil 11'deki grafikte görülmektedir. Grafikte y, 5-25 mm arasında değişen takımların ömürlerine karşılık gelmektedir. x ise takım çaplarını ifade etmektedir. Toplanan verilerde ve bu veriler kullanılarak hesaplanan verilerde artan takım çapıyla birlikte o çap için kullanılacak kesme hızın da değişmesi sebebiyle, takım ömrü ile takım çapı ilişkisi, takım ömrü ile kesme hızı ilişkisine benzer davranışa sahiptir.

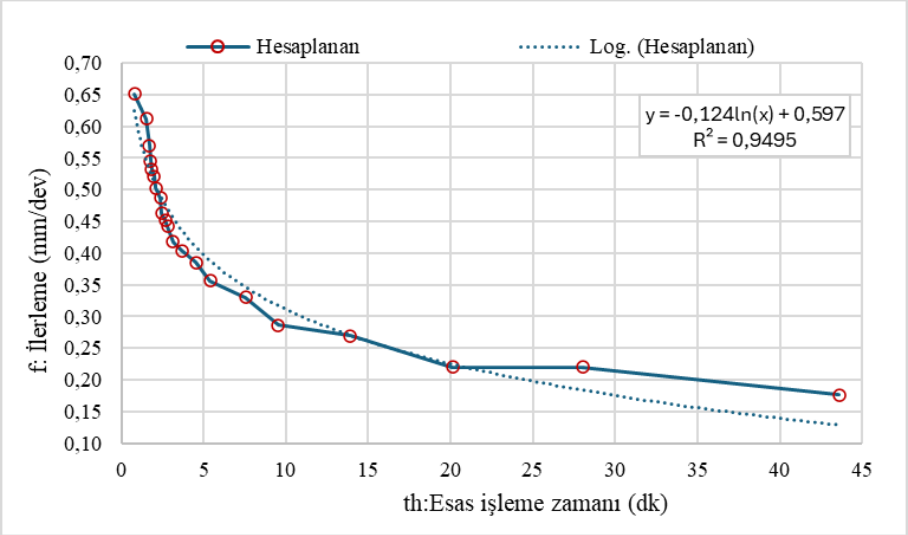
Hesaplanan yeni takım ömrü ile yeni kesme hızı verileri Şekil 12'deki gibidir. Kesme hızındaki azalmanın takım ömrünü artırdığını anlatan Şekil 12'deki grafikte verilen denklemde y kesme hızını, x ise takım ömrünü ifade etmektedir. Verilerin dağılımına göre oluşturulan logaritmik eğilim çizgisinin verilerle uyumu %98'in üzerindedir. Böylece, eğilim çizgisine ait denklem ile ara değerler doğruya çok yakın olarak hesaplanabilir.



Şekil 11. Toplanan tüm veriler kullanılarak hesaplanan yeni takım ömrü (T) verileri (New tool life (T) data calculated using all collected data)



Şekil 12. Hesaplanan yeni veriler için kesme hızı (Vc) takım ömrü (T) ilişkisi (Cutting speed (Vc) tool life (T) relationship for new calculated data)



Şekil 13. Hesaplanan yeni veriler için ilerleme (f) ve esas işleme zamanı (th) ilişkisi (The relationship between the feed (f) and the actual machining time (th) for the new calculated data)

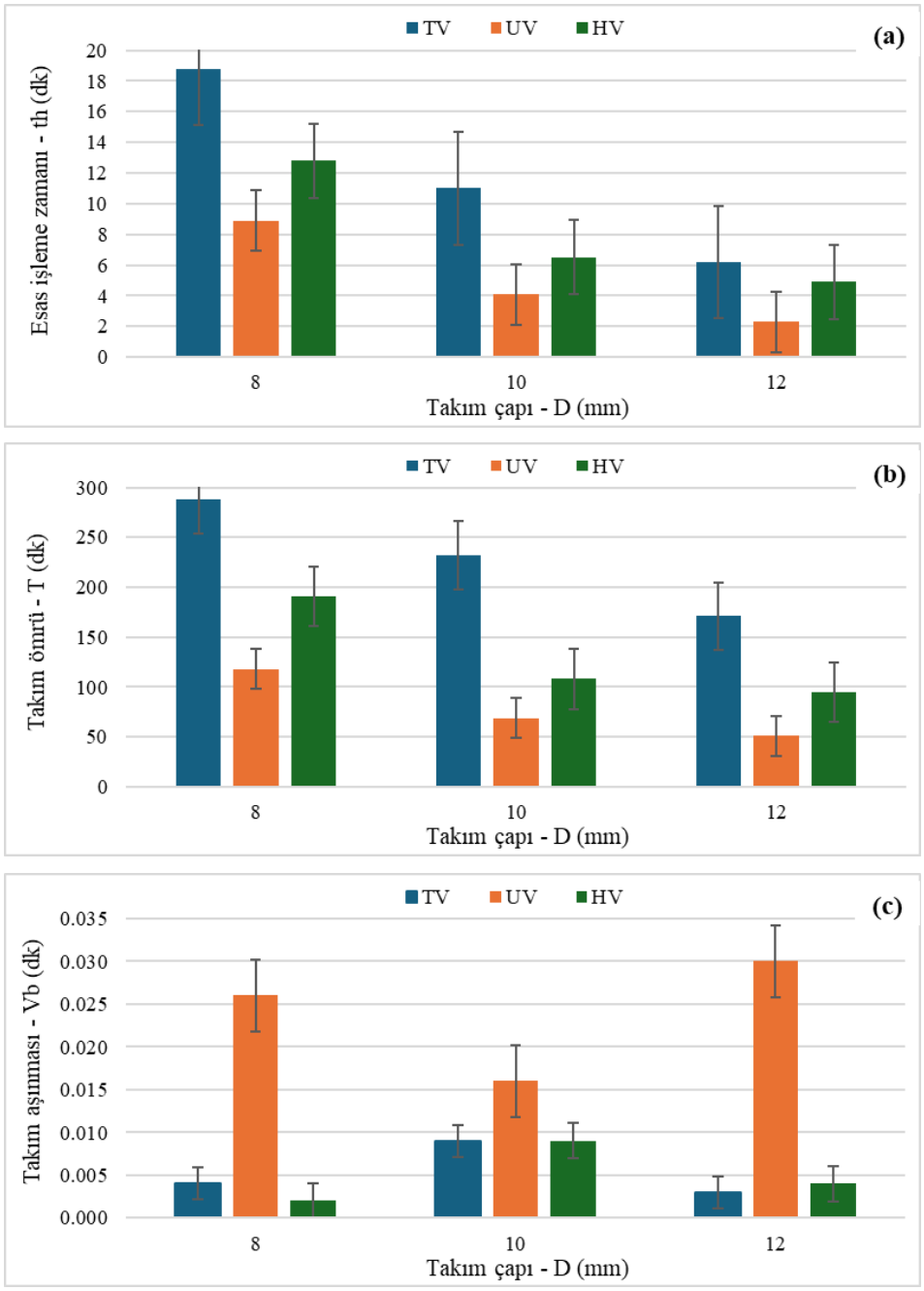
Bir diğer önemli çıktı esas işleme zamanı (th)'dır. Ve esas işleme zamanı birinci derecede ilerleme parametresine bağlıdır. Hesaplanan yeni ilerleme verine bağlı olarak Eşitlik 4 ile elde edilen th verileri Şekil 13'te paylaşılmıştır. İlerlemelerdeki azalmanın esas işleme zamanını artırdığını anlatan Şekil 13'teki denklemde y ilerlemeye, x ise esas işleme zamanına karşılık gelmektedir. Verilerin dağılımına göre oluşturulan logaritmik eğilim çizgisinin verilerle uyumu %95'e yakın olduğu için, eğilim çizgisine ait denklem ile ara değerler doğruya yakın bir şekilde hesaplanabilir.

3.3. Fiziki Testlerden Elde Edilen Sonuçlar
(Results Obtained from Physical Tests)

Çalışmada, algoritma ile hesaplanan verilerin mevcut teorik ve uygulamalı verilere göre performanslarını karşılaştırabilmek için AISI 1040 18 HRC sertliğindeki paslanmaz çelik malzemesi yüzey frezeleme operasyonu ile fiziki işleme deneylerine tabi tutulmuştur. Deneylerde test edilen 8 mm, 10 mm ve 12 mm çaplı takımlara ait ortalama teorik veriler (TV), ortalama uygulamalı veriler (UV) ve algoritma ile hesaplanan veriler (HV) kullanılarak yapılan dokuz deneyde; esas işleme zamanı (th), takım ömrü (T) ve takımlardaki aşınma (Vb) incelenmiştir. Gerçekleştirilen dokuz deneye ait kullanılan kesme parametreleri ve elde edilen performans çıktıları Tablo 7'de verilmiştir. Dokuz faklı kesme şartında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen th, T ve Vb sonuçlarının grafiklere aktarılmış hali ise sırasıyla Şekil 14.a, Şekil 14.b ve Şekil 14.c'deki gibidir.

Tablo 7. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri ve elde edilen performans çıktıları (Cutting parameters used in the experiments and the performance results obtained)

Deney Değişkenleri					Performans Kriterleri		
Deney no	Veri kaynağı	D (mm)	Vc (m/dk)	f (mm/dev)	th (dk)	T (dk)	Vb (mm)
1	TV	8	123	0,170	18,8	288	0,004
2	UV	8	157	0,369	8,9	118	0,026
3	HV	8	138	0,272	12,8	191	0,002
4	TV	10	130	0,200	11,0	232	0,009
5	UV	10	181	0,460	4,1	69	0,016
6	HV	10	157	0,327	6,5	108	0,009
7	TV	12	140	0,250	6,2	171	0,003
8	UV	12	194	0,521	2,3	51	0,030
9	HV	12	165	0,383	4,9	95	0,004



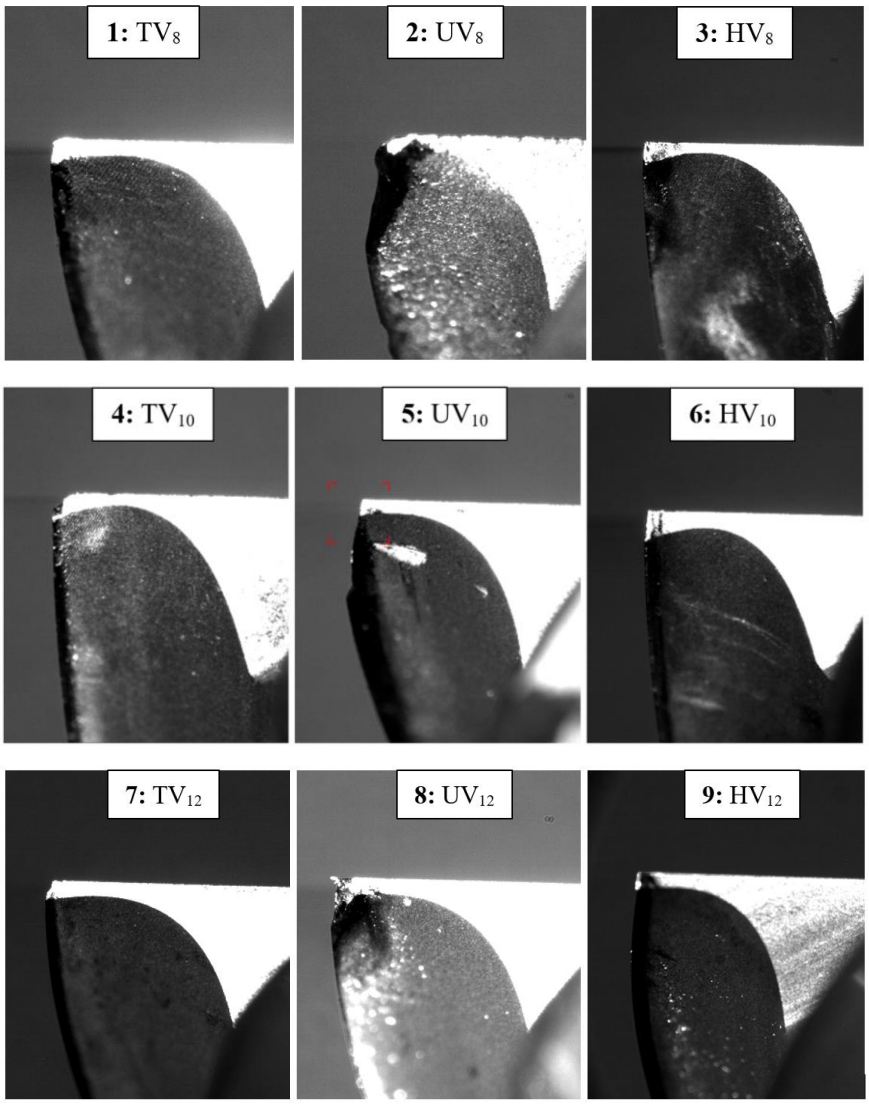
Şekil 14. Deneylerde kullanılan farklı veri kaynaklarından elde edilen esas işleme zamanı (a), takımın ömrü (b) ve takım aşınması (c) sonuçları (Actual machining time (a), tool life (b) and tool wear (c) results obtained from different data sources used in the experiments.)

Şekil 14.a ve Şekil 14.b incelendiğinde tüm takımlar için teorik verilerin kullanıldığı şartardaki düşük kesme parametreleri yüksek takım ömrü sunmasına karşılık, bu şartlarda sabit bir hacmin işlenmesi (255025 mm3) daha uzun sürdüğü anlaşılmaktadır. Sayısal olarak ifade edilecek olursa th çıktılarının ortalaması TV, UV ve HV şartları için sırasıyla 12 dk, 5 dk ve 8 dk olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde T çıktılarının ortalaması TV, UV ve HV şartları için sırasıyla 230 dk, 79 dk ve 131 dk olduğu belirlenmiştir. Takım çapının artmasıyla birlikte kesme hızları, ilerlemeler ve yanal kayma mesafeleri (D x 0,5) de arttığı için, sabit bir hacmi işlerken th ve T değerleri azalmaktadır.

Freze işleminin uzun zaman aldığı teorik veri türünde, takım aşınması beklendiği üzere en küçük seviyelerde olduğu Şekil 14.c'de net bir şekilde görülmektedir. Diğer taraftan yüksek kesme parametrelerinin kullanıldığı uygulamalı verilerde ise düşük bir takım ömrü ve aynı hacmin daha kısa sürede işlenmesi beklentisi vardır. 8 mm, 10 mm ve 12 mm çapa sahip takımlarla gerçekleştirilen deneylerde gözlenen yüksek takım aşınmaları düşük takım ömrü tahminini destekler niteliktedir. Buna

karşılık algoritma kullanılarak hesaplanan verilerde hem aynı hacim için işleme süresi teorik veriler kadar uzun değildir. Hem de deney sonucundaki takım aşınması teorik verilere çok yakındır. Sayısal olarak ifade edilecek olursa, uygulamalı verilerin kullanıldığı şartlarda aşınma değeri ortalama 0,024 mm olarak ölçülürken; bu değer teorik ve hesaplanan verilerin kullanıldığı şartların her ikisinde de ortalama 0,005 olduğu görülmüştür. Diğer bir ifadeyle uygulamalı verilerin kullanıldığı şartlarda ölçülen aşınmalara göre teorik ve hesaplanan verilerinin kullanıldığı şartlardaki aşınmalar ortalama %78 daha az olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 15'te TV, UV ve HV olmak üzere üç veri kaynağından alınan kesme parametrelerinin kullanıldığı takımlara ait aşınma görüntüleri paylaşılmıştır.



Şekil 15. Teorik veriler (TV), uygulamalı veriler (UV) ve hesaplanan veriler (HV) için deneylerde kullanılan 8-10-12 mm çaplı karbür takımlara ait aşınma görüntüleri (Wear images of 8-10-12 mm diameter carbide tools used in experiments for theoretical data (TV), practical data (UV) and calculated data (HV))

Şekil 15'teki görsellerde de uygulamalı verilerin kullanıldığı UV8 UV10 ve UV12 şartlarında takımlardaki deformasyonların diğer şartlara göre çok yüksek olduğu net bir şekilde görülmektedir. TV ve HV şartlarında kullanılan tüm takımlardaki deformasyonların ise daha az olduğu görülmektedir. Bu noktada, verimli bir işleme sadece hızlı aşınmayan bir takımla izah edilemez. Aynı zamanda üretim hızının yüksekliği de verimli bir üretim için gereklidir [34]. Teorik veriler düşük bir takım aşınması yani, uzun bir takım ömrü sunarken, düşük üretim hızları kullanmayı önermektedir. Buna karşılık uygulamalı veriler oldukça yüksek üretim hızları önerirken, bu durum hızlı bir takım aşınmasına sebep olmaktadır. Hesaplanan veriler hem teorik verilerden daha hızlı bir üretimi sunabildiği, hem de teorik verilere yakın takım ömrü de sunabildiği fiziki deneylerle ortaya

konmuştur. Bu bulgu, hesaplamalı yöntemlerin yalnızca teorik yaklaşımlardan değil, aynı zamanda uygulamalı denemelerden de daha sürdürülebilir ve dengeli kesme stratejileri önerebildiğini göstermektedir. Literatürde benzer şekilde, çok hedefli iyileştirme temelli kesme parametresi belirleme çalışmalarında da üretim verimliliği ile takım ömrü arasında denge kurulmasının en ideal strateji olduğu vurgulanmaktadır [35-36].

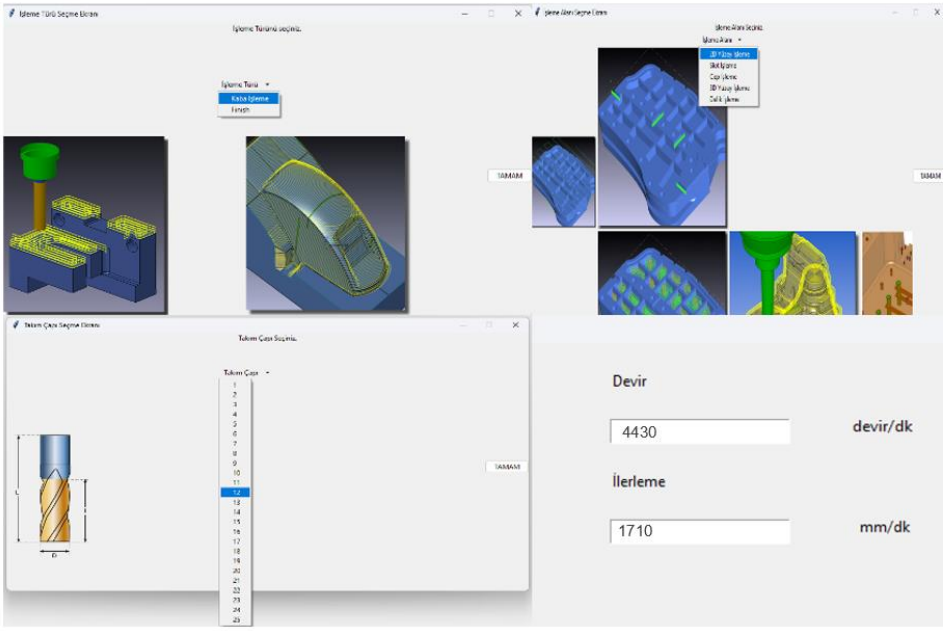
Sonuç olarak, elde edilen deneysel bulgular ışığında, hesaplanan kesme parametrelerinin hem takım ömrü hem de üretim süresi açısından makul düzeyde bir iyileştirme sunduğu, dolayısıyla endüstriyel ölçekte verimli, dengeli ve sürdürülebilir bir üretim sürecine katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir. Bu bulgular, ileri üretim sistemlerinde veri temelli karar destek mekanizmalarının önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

3.4. Yazılan iTool Paket Programı (Written iTool Package Program)

Geliştirilen algoritma ile hesaplanan verilere kullanıcının rahatlıkla ulaşabileceği paket program yazılması için öncelikle uygun arayüz tasarımı yapılmıştır. Program oluşturulurken özellikle kolay kullanılabilme ve geliştirilebilme yeteneklerine sahip olmasına dikkat edilmiştir. Python programa diliyle yazılan programda özel kodlama şablonları kullanılmış ve Tkinter kütüphanesi sayesinde kodlar çalışır duruma getirilmiştir. Programda malzeme bilgileri (cinsi ve sertliği), işleme bilgileri (işleme tipi, işleme alanı) ve kesici takım bilgileri (çapı ve ağız sayısı) kullanıcının seçimine sunulmuştur. Program şimdilik malzeme bilgisi olarak araştırmaların yapıldığı AISI 1040 alaşımı ile ilgili bilgileri içermektedir. Kesici takım bilgisi olarak ise yalnızca karbür 5-25 mm çap arası parmak freze için veri girişi yapılmıştır. İşleme tipi ile ilgili deneylerin gerçekleştirildiği yüksek hacimli talaş kaldırma adına kaba işleme yöntemine ait işlem basamakları aktif durumdadır. İşleme alanı için de yine araştırmaların yapıldığı yüzey tarama işlemi kullanılabilir durumdadır. Programının oluşturulmasında Python yazılımı ile sözü edilen her bir sekme için birden fazla pencerenin bağımsız çalışması sağlanmıştır. Her bir sekme için program geliştirilmeye açık ve kütüphaneleri eklemeye/güncellemeye uygun olarak tasarlanmıştır.

Program isim belirlenirken daha önce kullanılmamış olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca, benzer ölçüde bir programın varlığının olup olmadığına dair araştırmalar yapılmış olup özgün, yerli ve milli bir yazılım ortaya konulmaya çalışılmıştır. Programın demo arayüz görseli Şekil 16'da verilmiştir.

Girilen şartlara en uygun kesme parametreleri program tarafından önerilmektedir. Bu kapsamda takım çapına bağlı olarak algoritma ile hesaplanan Vc ve f verileri kullanıcıya sunulmaktadır. Program, önerilen Vc ve f verilerini ilerleme hızı (Vf) ve devir sayısına (N) dönüştürebilmesinin yanında, bu Vf ve N parametrelerinin manuel olarak girilebileceği ikinci bir opsiyonel pencereyi kullanıcıya sunacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 16. iTool paket programının demo arayüzü (Demo interface of the iTool package program)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada AISI 1040 alaşımının yüzey frezeleme işleminde en doğru kesme parametrelerin belirlenmesini amaçlayan bilgisayar destekli süreç planlama (CAPP) uygulaması yapılmıştır. Verimli bir işleme için performans kriteri olarak takım ömrü (T) ve hedeflenen sabit hacim (255025 mm3) için işleme zamanı (th) alınmıştır. En verimli kesme parametreleri belirleyebilmek için en az iki farklı kesici takım firmasından teorik veriler (TV) ile imalat sektöründe faaliyet gösteren en az iki farklı firmanın kullandığı uygulamalı veriler (UV) toplanmıştır. Bu verilerin incelenmesi sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Toplanan kesme hızı (Vc) verileri için, teorik verilerin ortalamasının uygulamalı verilerin ortalamasından %35 daha az olduğu gözlenmiştir.

- Toplanan ilerleme (f) verileri için ise, teorik verilerin ortalamasının uygulamalı verilerin ortalamasına göre %50 daha az olduğu görülmüştür.

- Bu kesme parametrelerine bağlı olarak sabit bir hacmin işlenmesi için gereken esas işleme zamanının (th) ortalamaları karşılaştırıldığında uygulamalı verilerin ortalamasının, teorik verilerin ortalamasına göre %44 daha az olduğu hesaplanmıştır.

- Diğer taraftan hesaplanan takım ömrü (T) için, uygulamalı verilere ait T ortalamasının, teorik verilere ait T ortalamasından %63,5 daha az olduğu belirlenmiştir.

Hızlı bir imalat yaparken, takım ömrünü de agresif bir şekilde azaltmamak hedefiyle, teorik veriler ile uygulamalı verilerin arasında yeni değerler genetik algoritma ile hesaplanmıştır. Elde edilen yeni verilerin endüstride uygulanan verilere göre %87 daha fazla takım ömrü sunduğu, teorik verilere göre ise %22 daha kısa işleme zamanı sağladığı hesaplanmıştır. Hesaplanan verilere (HV) ait parametreler arasındaki ilişkiler yüksek uyumla belirlenmiştir. Bu ilişkiler aşağıdaki denklemlerle kısaca ifade edilebilir:

- Takım çapı (D) ile takım ömrü (T) arasındaki ilişkiyi veren denklem:

$$T = -109{,}3\ln(D) + 356{,}57 \quad (R^2 = \%98)$$

- Takım ömrü (T) ile kesme hızı (Vc) arasındaki ilişkiyi veren denklem:

$$Vc = -53{,}7\ln(T) + 426{,}5 \quad (R^2 = \%98)$$

- İşleme zamanı (th) ile ilerleme (f) arasındaki ilişkiyi veren denklem:

$$f = -0{,}124\ln(th) + 0{,}597 \quad (R^2 = \%95)$$

Farklı kesme parametrelerinin göreli performansını değerlendirmek amacıyla, çapları 8 mm, 10 mm ve 12 mm olan her bir takım için teorik veriler (TV), uygulamalı veriler (UV) ve algoritma ile türetilmiş veriler (HV) kullanılarak dokuz ayrı kesme koşulunda sabit bir talaş hacminin (255025 mm³) işlendiği deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Bu çeşitli kesme koşullarına ilişkin esas işleme süresi (th), takım ömrü (T) ve takım aşınması (Vb) verilerinden elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur:

- TV ve HV şartlarındaki aşınma ortalamalarının birbirine çok yakın (0,005 mm) ve GV şartlarındaki aşınma ortalamasına (0,024 mm) göre çok daha (%78) az olduğu tespit edilmiştir.

- Diğer taraftan, TV şartlarındaki takım ömrü ortalamasına (230 dk) göre UV ve HV şartlarındaki takım ömrü ortalamaları sırasıyla %65,6 ve %43 daha az olduğu belirlenmiştir.

- Buna karşılık, TV şartındaki işleme süresi ortalamalarına (12 dk) göre UV ve HV şartlarındaki işleme süresi ortalamaları sırasıyla %57,5 ve %32,8 daha az olduğu görülmüştür.

- Dolayısıyla, UV şartlarında takım aşınmaları, TV şartlarında ise işleme süresi çok yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlara göre hem hızlı bir imalat yapabilmek, hem de takım aşınmasını kritik bir şekilde artırmamak adına, diğer verilere göre algoritma ile belirlenen HV şartlarının makul seviyelerde olduğu söylenebilir.

Tüm bu aşamalar sonunda bu çalışmanın hedeflerinden biri olan yeni bir CAPP programı Python programlama diliyle yazılmıştır. iTool olarak isimlendirilen ve hesaplanan yeni verilere göre kesme parametresi sunan bu yeni paket program, talaşlı imalat alanında tecrübesi olmayan bir kullanıcıya rehber olabileceği değerlendirilmektedir. Böylece, talaşlı imalat

süreçlerine ait birikmiş tecrübenin geliştirilebilir özelliğe sahip bu yeni yazılım sayesinde kayıt altına alınabileceği ve imalat süreçlerindeki verimin sürdürülebilir hale getirilmesine destek olabileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar, fiziki deneylerde makine ve ekipman kullanma olanağı sağlayan Türk Uçak Sanayii Anonim Ortaklığı (TUSAŞ)'a teşekkür eder.

The authors would like to thank Turkish Aircraft Industries Inc. (TUSAŞ) for providing the opportunity to use machinery and equipment in physical experiments.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI
(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

***Kadirhan AKDENİZ*:** Verileri toplamış, deneyleri yapmış, iTool paket programını oluşturmuş ve makaleyi yazmıştır.

He collected the data, conducted the experiments, created the iTool package program and wrote the article..

***Ayşegül ÇAKIR ŞENCAN*:** Çalışmayı planlamış, deney sonuçlarını analiz etmiş, makaleyi yazmış ve gerekli kontrolleri yapmıştır.

She planned the study, analyzed the experimental results, wrote the article and made the necessary checks.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Akkurt M. (2012) Talaş Kaldırma Bilimi ve Teknolojisi: CNC Takım Tezgahları ve Üretim Otomasyonu, Birsen Yayınevi, İstanbul.

[2] Uluğ D ve Dilipak H. (2012) Kaplamalı ve Kaplamasız Sementit Karbür Takımlar İçin Takım Ömrü Modeli'ndeki "N" Üstel Değerinin Deneysel Olarak Araştırılması, 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, 04-05 Ekim 2012, Ankara

[3] Çakır MC. (2018) Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri, 3. Baskı, Dora Yayınevi, Bursa.

[4] Yağmur S. (2023), AISI 1050 çeliğinin tornalanmasında minimum miktarda yağlamanın (MMY) kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlüğü üzerindeki etkisinin araştırılması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji, 11(4), 1024-1034. https://doi.org/10.29109/gujsc.1378275.

[5] Yılmaz AF, Köse O. (2025) Advancing sustainable shipbuilding through a hybrid risk prioritization model: integrating FMEA and machine learning, Engineering Science and Technology, an International Journal, 70:102158, https://doi.org/10.1016/j.jestch.2025.102158.

[6] Akdeniz K. (2024) Frezeleme Operasyonlarinda Bilgisayar Destekli Süreç Planlama ile Kesme Parametrelerinin Optimizasyonu, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak,

[7] Zhou J, Camba JD. (2021) Computer-Aided Process Planning In Immersive Enviroments: A Critical Review, Computers in Industry, Volume: 133.

[8] Shin H, Olling GJ, Chung YC, Kim BH, Cho SK. (2003) An Integrated CAPP/CAM System For Stamping Die Pattern Machining, Computer-Aided Design 35: 203-213.

[9] Yusof Y, Latif K. (2014) Survey on computer-aided process planning. Int J Adv Manuf Technol 75, 77–89. https://doi.org/10.1007/s00170-014-6073-3

[10] Mauthner G, Votruba W, Ramsauer C, Plessing L, Trautner T, Bleicher F. (2022) Development of a CAM-in-the-Loop System for Cutting Parameter Optimization using an Instrumented Tool Holder, Procedia CIRP, 107: 326-331.

[11] Xu XW and He Q. (2004) Striving for a Totalintegration of CAD, CAPP, CAM and CNC, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 20: 101-109.

[12] Deja M, Siemiatkowski MS. (2018) Machining Process Sequencing And Machine Assignment In Generative Feature-based CAPP For Mill-turn Parts, Journal of Manufacturing Systems, 48: 49-62.

[13] Kumar SPL, Jerald J, Kumanan S. (2014) Automatic Feature Extraction and CNC Code Generation in a CAPP System for Micromachining, Procedia Materials Science, 5: 1986-1997.

[14] Zubair AF, Mansor MSA. (2021) Embedding Firefly Algorithm In Optimization of CAPP Turning Machining Parameters for Cutting Tool Selections, Computers&Industrial Engineering, Volume 135: 317-325.
[15] Culler DE, Burd W. (2007) A Framework For Extending Computer Aided Process Planning to Include Business Activities and Computer Aided Design and Manufacturing (CAD/CAM) Data Retrieval, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 23: 339-350.
[16] Lin AC, Lin MY, Ho HB. (1999) CAPP And Its Integration With Tolerance Charts For Machining Of Aircraft Components, Computers in Industry, 38: 263-283.
[17] Pobozniak J and Sobieski S. (2017) Extension of STEP-NC Data Structure to Represent Manufacturing Process Structure in CAPP System, Procedia Manufacturing, 11: 1692-1699.
[18] Şeker U. (2000) Talaşlı İmalatta Takım Tasarımı, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Ders Notları, 39-45, Ankara.
[19] Groover MP. (2021) In Prenciples of Modern Manufacturing, Vol.4 (Eds: Yurdakul M, İç YT), Nobel Press, İstanbul, Türkiye.
[20] Emel GG, Taşkın Ç. (2002) Genetik Algoritmalar ve Uygulama Alanları, Uludağ Üniversitesi İİBF Dergisi, 21(1):129-152.
[21] Tül U, Tuncer A. (2017). Intelligent Test Paper Generation with Genetic Algorithm. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji, 5(4), 27-34. https://doi.org/10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.341977
[22] Günay M, Kayki MÖ, Yilmaz AF. (2025). Comprehensive analysis of FEM assisted cermet insert design and tool performance for turning bearing rings. Sādhanā 50, 180. https://doi.org/10.1007/s12046-025-02867-y
[23] URL2:/https://www.muhendisalemi.com/her-yonuyle-1040-celigi>, Ziyaret tarihi: 09.11.2023.
[24] Vakulenko, I. A., Plitchenko, S., Yılmaz, A. F. (2025). Influence Degree and Scheme of Hot Reduction on Properties of the Carbon Steel. Manufacturing Technologies and Applications, 6(1), 150-156. https://doi.org/10.52795/mateca.1634663.
[25] URL1: /https://www.iscar.com/Catalogs/publication-2021/Flash_Solid_catalog_ 43_1_2021_METRIC.pdf, Ziyaret tarihi: 18.02.2023.
[26] Çakır MC. (2018) Modern Machining Methods, Dora Press, Bursa, Turkey.
[27] Kalpakjian S, Schmid SR. (2003) Manufacturing processes for engineering materials. 4th ed. Newjersey.
[28] Akkurt M., CNC Takım Tezgahlarının Programlanması ve CAD-CAM Sistemleri, Birsen yayınevi.
[29] Altıntaş Y. (2012) Manufacruring Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design, Canbridge University Press, USA.
[30] Şirin E, Yıldırım ÇV, Şirin Ş, Kıvak T, Sarıkaya M. (2024) Comprehensive analysis of cutting temperature, tool wear, surface integrity and tribological properties in sustainable milling of Ti6Al4V alloy: LN2, nanofluid and hybrid machining. Journal of Manufacturing Processes, 131:1360-1371. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.09.120.
[31] Sarıkaya M, Gupta MK, Tomaz I, Pimenov DY, Kuntoğlu M, Khanna N, Yıldırım ÇV, Krolczyk GM. (2021) A state-of-the-art review on tool wear and surface integrity characteristics in machining of superalloys. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 35: 624-658. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.08.005.
[32] Gupta MK, Boy M, Korkmaz ME, Yaşar N, Günay M, Krolczyk GM. (2022) Measurement and analysis of machining induced tribological characteristics in dual jet minimum quantity lubrication assisted turning of duplex stainless steel. Measurement, 187:110353. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110353.
[33] Uzun G. (2019) Analysis of grey relational method of the effects on machinability performance on austempered vermicular graphite cast irons, Measurement 142, 122–130.
[34] Zheng G, Li L, Li Z, Gao J, Niu Z. (2018) Wear mechanisms of coated tools in high-speed hard turning of high strength steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technolog, 94: 4553-4563. https://doi.org/10.1007/s00170-017-1132-1.
[35] Sardinas, R. Q., Santana, M. R., & Brindis, E. A. (2006). Genetic algorithm-based multi-objective optimization of cutting parameters in turning processes. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 19(2), 127-133. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2005.06.007
[36] Saravanan, M., Ramalingam, D., Manikandan, G., & Kaarthikeyen, R. R. (2012). Multi objective optimization of drilling parameters using genetic algorithm. Procedia engineering,

38, 197-207. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.027

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1227-1239 (2025)

Türkiye'de Emsal Kararların Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Sınıflandırılması

Süleyman Kürşat DEMİR[1*], Emrah AYDEMİR[2], Yasin SÖNMEZ[3]

[1]*Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Design, Ankara, Turkey*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 31/03/2025
Düzeltme: 04/06/2025
Kabul: 02/07/2025

Anahtar Kelimeler

Yapay Zekâ
Doğal Dil İşleme
Makine Öğrenimi
Emsal Kararlar
Gradient Boosting

Article Info

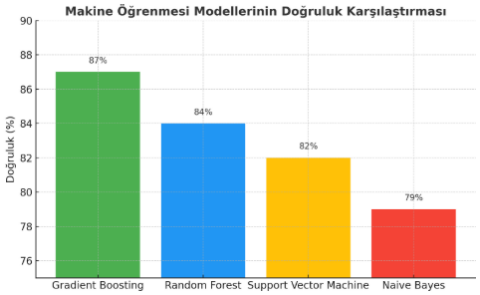
Research article
Received: 31/03/2025
Revision: 04/06/2025
Accepted: 02/07/225

Keywords

Artificial Intelligence
Natural Language Processing
Machine Learning
Precedent Decisions
Gradient Boosting

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Bu çalışma Türkiye'deki emsal kararların makine öğrenmesi ile sınıflandırılmasını ele alıyor. Gradient Boosting %87 doğrulukla en iyi sonucu verirken, hukukta yapay zekanın potansiyelini ortaya koydu. / This study examines classification of precedent decisions in Turkey using machine learning. Gradient Boosting achieved 87% accuracy, demonstrating AI's potential in the legal field



Şekil A: *Modellerin karşılaştırılması /* ***Figure A:*** *Comparison of models*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Gradient Boosting algoritması üçlü sınıflandırmada %83, ikili sınıflandırmada %87 doğruluk oranı ile en başarılı sonuçları verdi. / Gradient Boosting achieved the highest accuracy with 83% in multi-class and 87% in binary classification*
- *Hükümler arasında en sık kullanılan üç sınıf (Reddi, Kabulü, İadesi) üzerine odaklanıldı. / Focus was on the three most frequent judgment classes: Rejection, Acceptance, Return.*
- *Türk hukuk dilinin karmaşıklığı nedeniyle makine öğrenmesi modellerinin özelleştirilmesi gerekliliği vurgulandı. / The need for customization of machine learning models due to the complexity of Turkish legal language was emphasized.*
- *Çalışma, hukuk alanında yapay zekâ kullanımının potansiyelini ve emsal karar analizinde makine öğrenmesinin etkinliğini ortaya koymaktadır. / The study highlights AI's potential in law and effectiveness of machine learning in precedent decision analysis.*

Amaç (Aim): *Türk yargı sistemindeki emsal kararların yüksek doğruluklu makine öğrenmesi modeli ile sınıflandırılmasını geliştirerek, hukuk araştırmaları ve karar alma süreçlerinin etkinliğini artırmak. / To develop a high-accuracy machine learning model for classifying precedent decisions in the Turkish judiciary system, enhancing the efficiency of legal research and decision-making processes.*

Özgünlük (Originality): *Bu çalışma, UYAP sisteminden elde edilen büyük ölçekli Türk emsal kararları veri setine makine öğrenimi algoritmalarını uygulayarak, hukuki hükümlerin kapsamlı analiz ve sınıflandırmasını özgün bir şekilde sunmaktadır. / This study uniquely applies machine learning algorithms to a large-scale dataset of Turkish precedent decisions from the UYAP system, providing comprehensive analysis and classification of legal judgments.*

Bulgular (Results): *Gradient Boosting algoritması, çoklu sınıflandırmada %83, ikili sınıflandırma senaryolarında ise %87'ye varan doğruluk oranlarıyla diğer modelleri geride bırakmıştır. / Gradient Boosting algorithm achieved the highest accuracy with 83% in multi-class classification and up to 87% in binary classification scenarios, outperforming other models.*

Conclusion (Sonuç): *Makine öğrenmesi modelleri, özellikle Gradient Boosting, hukuki karar alma süreçlerini destekleyip hızlandırma potansiyelini güçlü bir şekilde göstermektedir; ancak transformatör modeller Türk hukuk metinleri için daha fazla uyarlama gerektirmektedir. / Machine learning models, especially Gradient Boosting, demonstrate strong potential to support and accelerate legal decision-making processes, although transformer models require further adaptation for Turkish legal texts.*

*Corresponding author, e-mail: demiresa38@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1668535

GU J Sci, Part C, 13(3): 1227-1239 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Türkiye'de Emsal Kararların Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Sınıflandırılması

Süleyman Kürşat DEMİR[1*], Emrah AYDEMİR[2], Yasin SÖNMEZ[3]

[1]*Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Design, Ankara, Turkey*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 31/03/2025
Düzeltme: 04/06/2025
Kabul: 02/07/2025

Anahtar Kelimeler

Yapay Zekâ
Doğal Dil İşleme
Makine Öğrenimi
Emsal Kararlar
Gradient Boosting

Öz

Son yıllarda yapay zekâ (YZ), büyük veri ve veri analitiği alanlarındaki hızlı gelişmeler, birçok sektörde iş süreçlerini kolaylaştırarak iş yükünü azaltmıştır. Ancak hukuk alanında, YZ'nin dünya çapında önemli bir dönüşüm yarattığına dair belirgin bir gelişme henüz gözlemlenmemiştir. Bu durum, hukukta yapay zekânın belirli ilerlemeler kaydettiğini, fakat daha büyük potansiyel barındırdığını göstermektedir.

Bu çalışmada Türkiye'deki emsal mahkeme kararları analiz edilmiştir. UYAP sistemi üzerinden indirilen veri setleri metin ve hüküm olarak sınıflandırılmıştır. En sık tekrar eden üç hüküm olan Reddi, Kabulü ve İadesi kararları üzerine odaklanılmıştır. Doğal Dil İşleme (NLP) teknikleri ve çeşitli makine öğrenimi algoritmaları (Gradient Boosting, Yapay Sinir Ağları, Karar Ağaçları vb.) kullanılarak sınıflandırma ve tahmin işlemleri yapılmıştır. Sonuçlar, doğruluk ve F1 skoru gibi metriklerle değerlendirilmiş; Gradient Boosting algoritması %83 doğruluk oranı ile en iyi performansı göstermiştir.

Çalışmanın devamında modelin performansını daha detaylı incelemek için veri seti ikili sınıflandırma görevlerine ayrılmıştır: "Kabulü-Reddi", "Reddi-İadesi" ve "Kabulü-İadesi". Bu senaryolarda da Gradient Boosting %87 doğrulukla en başarılı sonuçları vermiştir. Diğer algoritmalar da benzer başarı göstermiştir.

Bu çalışma, yapay zekânın hukuk alanındaki potansiyelini ortaya koymakla kalmayıp, emsal kararların sistematik analizine ve hukukta veriye dayalı karar alma süreçlerinin gelişimine önemli katkı sağlamaktadır.

Classification of Precedent Decisions in Türkiye with Machine Learning Algorithms

Article Info

Research article
Received: 31/03/2025
Revision: 04/06/2025
Accepted: 02/07/225

Keywords

Artificial Intelligence
Natural Language Processing
Machine Learning
Precedent Decisions
Gradient Boosting

Abstract

In recent years, rapid advancements in artificial intelligence (AI), big data, and data analytics have facilitated business processes and reduced workloads in many sectors. However, no significant global transformation driven by AI has yet been observed in the legal field. This indicates that while AI has made some progress in law, it still holds considerable untapped potential.

This study analyzes precedent court decisions in Turkey. The dataset, obtained from the UYAP system, was classified into text and judgment categories. The focus was on the three most frequently occurring judgments: Rejection, Acceptance, and Return. Classification and prediction tasks were performed using Natural Language Processing (NLP) techniques and various machine learning algorithms such as Gradient Boosting, Artificial Neural Networks, and Decision Trees. The results were evaluated using metrics like accuracy and F1 score, with the Gradient Boosting algorithm showing the best performance at an accuracy rate of 83%.

To further examine the model's performance, the dataset was divided into binary classification tasks: "Acceptance-Rejection," "Rejection-Return," and "Acceptance-Return." In these scenarios, Gradient Boosting again achieved the highest accuracy at 87%, with other algorithms also showing similar success.

This study not only reveals the potential of artificial intelligence in the legal domain but also contributes significantly to the systematic analysis of precedent decisions and the advancement of data-driven decision-making processes in law.

*Corresponding author, e-mail: demiresa38@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1668535

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Türk yargı sistemi, hiyerarşik bir düzen içinde işler ve yargılama süreci ilk derece mahkemelerinde başlayarak istinaf (Bölge Adliye Mahkemeleri) ve temyiz (Yargıtay ve Danıştay) aşamalarıyla devam eder. Anayasa Mahkemesi, yasaların anayasaya uygunluğunu denetlerken bireysel başvuruları da değerlendirir; Sayıştay, kamu kurumlarının mali denetimini gerçekleştirir; Uyuşmazlık Mahkemesi ise yargı organları arasındaki görev ve yetki çatışmalarını çözüme kavuşturur. İç hukuk yollarının tükenmesi durumunda bireyler Avrupa İnsan Hakları Mahkemesi'ne başvurma hakkına sahiptir. [1] Tüm bu süreçlerde verilen kararlar kamuya açık olarak yazılı şekilde sunulur ve avukatlar bu kararları, benzer davalarda müvekkilleri lehine içtihat olarak kullanabilir. Bu nedenle üst mahkeme kararları hem alt mahkemeler hem de taraf vekilleri için bağlayıcı ve yol gösterici niteliktedir. Emsal kararlar, geçmişte benzer uyuşmazlıklarda verilmiş kararlar olup avukatlar tarafından detaylı incelenerek savunmalarda etkili şekilde kullanılmalıdır. Bu bağlamda, Adalet Bakanlığı tarafından geliştirilen Ulusal Yargı Ağı Bilişim Sistemi (UYAP), yargı süreçlerinin dijitalleşmesini sağlamış, adli ve idari yargı birimlerinin otomasyonunu mümkün kılmıştır. UYAP sayesinde emsal karar araştırmaları daha erişilebilir hale gelmiş olsa da, mevcut sistemler genellikle anahtar kelimeye dayalı çalıştığı için, çok sayıda karar arasında en uygun olanı bulmak hâlâ zaman alan bir süreçtir. Dava konuları karmaşıklaştıkça araştırılması gereken içtihat sayısı artmakta, bu da avukatlar açısından yoğun bir mesleki çaba gerektirmektedir. Sonuç olarak, Türk yargı sistemi teknolojik altyapı ve üst mahkeme kararlarının rehberliğiyle adaletin etkinliğini artırmayı, taraf vekillerinin savunma süreçlerini daha verimli ve hızlı hale getirmeyi amaçlamaktadır.

Son yıllarda büyük veri ve yapay zekâ (YZ) teknolojisinin hızla gelişmesi, birçok sektörde geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Eğitim, savunma, sağlık, ticaret ve mühendislik gibi [2], [3] alanlarda çeşitlilik gösteren YZ uygulamaları, hukuk sektöründe de büyük bir potansiyel taşımaktadır. Hukuk alanında, doğal dil işleme (NLP) teknolojilerinin etkisiyle, dava kararı tahmini, belge analizi, hukuki yardım ve sözleşme oluşturma gibi konularda YZ çözümleri geliştirilmiştir. Bu uygulamalar, Hukuki Yargı Tahmini (HYT) adı altında, dava kararlarını hızla ve duygusallıktan uzak bir şekilde sonuçlandırmayı hedeflemektedir. Özellikle Hindistan ve Brezilya gibi ülkelerdeki dava yoğunluğu göz önüne alındığında, bu tür uygulamalar, hukuk profesyonelleri için büyük faydalar sunmaktadır. [4], [5] Türkiye'de ise Adalet Bakanlığı'nın mahkeme kararlarını dijitalleştirme kararı, YZ ve hukuk entegrasyonunun önünü açmaktadır. Ancak Türk hukuk veri setlerinin gelişimi henüz erken aşamalarda olup, bu alandaki çalışmaların hızlandırılması gerekmektedir. Bu bağlamda, yeni bir Türk hukuk veri seti oluşturulması ve Türk hukukuna yönelik NLP uygulamalarına katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Yapay zeka ve makine öğrenimi teknolojilerinin hukuk alanındaki yükselişi, karar alma süreçlerinde insan kaynaklı önyargıları azaltarak adaletin daha hassas bir şekilde tesis edilmesine katkıda bulunma potansiyeli taşımaktadır.[6] Ancak, bu potansiyel aynı zamanda, dilin kültürel bağlamlarından ve çeviri süreçlerinden kaynaklanan anlamsal sorunlar gibi bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, yapay zeka sistemlerinin adalet sistemine entegrasyonunda, yüksek kaliteli veri setlerinin kullanılması ve doğal dil işleme tekniklerinin (N-gramlar, TF-IDF gibi) etkin kullanımı büyük önem arz etmektedir. Günümüzde birçok ülke, kamusal bilgilerin dijital erişilebilirliğini artırarak yasal veri analizinin önünü açmakta, bu da yapay zeka uygulamalarının hukuk alanında daha fazla kullanılmasını teşvik etmektedir.[7] Hukuki metinlerin analizi için geliştirilen yapay zeka modelleri, özellikle doğal dil işleme teknikleri ile birlikte, dava sonuçlarını tahmin etme konusunda umut vaat eden sonuçlar ortaya koymaktadır.[8] Ancak, yapay zeka uygulamalarının eğitim verilerindeki olası önyargılar, karar alma süreçlerindeki şeffaflık sorunları ve etik kaygılar, bu teknolojilerin dikkatli ve sorumlu bir şekilde kullanılması gerektiğini göstermektedir. [6] Bu bağlamda, hukuki metinler üzerinde yapılan analizler, hem karar verme süreçlerinde insanlara destek olacak uygulamaların geliştirilmesine hem de yapay zeka tabanlı sanal yargıç gibi çözümlere temel oluşturabilecek niteliktedir. Bu çalışmalar, hukuk sisteminin yapay zeka ve makine öğrenmesini daha etkin ve adil hale gelmesi yönündeki tartışmaları derinleştirmeyi amaçlamaktadır.

1.1. Türkiye'de Yapay Zeka ve Hukuk Alanındaki Gelişmeler (Developments in Artificial Intelligence and Law in Türkiye)

Türkiye'de hukuk alanında yapay zekâ uygulamaları giderek artan bir ilgi görmektedir. Özellikle son yıllarda, hukuki süreçleri daha verimli hale getirmek, bilgiye erişimi kolaylaştırmak ve karar alma süreçlerini desteklemek amacıyla çeşitli yapay zekâ araçları ve yöntemleri kullanılmaya

başlanmıştır. Bu alandaki gelişmeler, hem yargı sistemini hem de hukuki araştırmaları derinden etkileme potansiyeline sahiptir.

Türkiye'de hukuki bilgiye erişim, özellikle Yargıtay, Danıştay ve Anayasa Mahkemesi gibi yüksek yargı organlarının kararlarına erişim açısından önemli adımlar atılmıştır. Bu mahkemelerin kararlarına, özel olarak geliştirilmiş arama motorları aracılığıyla ulaşılabilmektedir. Benzer şekilde, Bölge Adliye Mahkemeleri ve bazı yerel mahkemelerin kararlarına da arama motorları vasıtasıyla erişim imkanı sunulmaktadır. Ayrıca, kanun yararına bozma kararları gibi olağanüstü kanun yollarına ait bilgilere de yine özel arama motorları sayesinde ulaşılabilmektedir. Bu durum, hukukçuların ve araştırmacıların hukuki bilgiye daha hızlı ve etkin bir şekilde erişmelerini sağlamaktadır. [9]

Yapay zekâ teknolojileri, hukuki metinlerin analizinde de önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle doğal dil işleme (NLP) teknikleri, hukuki metinlerden otomatik olarak kişi, yasal düzenleme, mahkeme ve kuruluş ismi gibi önemli bilgileri çıkarabilme kabiliyetine sahiptir. Bu tür çalışmalar, büyük hukuki veri tabanlarından (örneğin, Legalbank) elde edilen metinler üzerinde derin öğrenme yöntemleri kullanılarak başarılı sonuçlar vermiştir. Hukuki metinlerdeki önemli bilgilerin otomatik olarak tespit edilmesi, hem hukuki araştırmaları hızlandırmakta hem de hukukçuların bilgiye erişimini kolaylaştırmaktadır. [13]

Yapay zekânın hukuk alanındaki en dikkat çekici uygulamalarından biri de karar tahminidir. Özellikle dava dosyalarının içeriği kullanılarak, dava sonucunda verilecek hukuki kararların otomatik olarak tahmin edilmesi, hukuki süreçlerin verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Türkiye'de de mahkeme kararlarının doğal dil işleme teknikleri kullanılarak işlenmesi ve otomatik karar tahminine yönelik çalışmalar az da olsa bulunmaktadır. Bu çalışmalar, gelecekte mahkeme süreçlerinin daha öngörülebilir ve şeffaf hale gelmesine katkıda bulunabilir.

1.2. Literatür (Literature)

Yapay Zeka (YZ) ve Makine Öğrenimi (ML) teknolojilerinin hukuk alanına entegrasyonu, son yıllarda büyük bir ivme kazanmış ve hukuk profesyonellerinin çalışma yöntemlerini dönüştürme potansiyeli taşımaktadır. Bu durum, aynı zamanda yeni araştırma alanlarının ortaya çıkmasına da zemin hazırlamıştır [5], [10]. Literatürde YZ'nin; hukuki araştırma süreçlerinden belge analizine, dava sonuçlarının tahmininden hukuki risk değerlendirmesine, otomatik belge oluşturmadan kişiselleştirilmiş hukuk danışmanlığı hizmetlerine, hukuki doğruluk ve etik kontrollerden otomatik uyuşmazlık çözümüne kadar geniş bir uygulama alanına sahip olduğu görülmektedir [11], [12], [13]. Ayrıca, hukuk güvenliği, veri koruma, suçlu profilleme, suç öngörüsü ve suç analitiği gibi alanlarda YZ'nin artan kullanımı, bu teknolojilerin hukuk sistemleri üzerindeki etkisini daha da belirgin hale getirmiştir [14].

Ancak, hukuk dilinin karmaşık ve özgün yapısı ile her dile özgü dil özellikleri, YZ ve hukuk çalışmalarında disiplinler arası bir iş birliğini zorunlu kılmaktadır. Hukuki metinlerin doğru anlaşılması ve yorumlanabilmesi için dilbilim, Doğal Dil İşleme (DDİ) ve hukuk alanlarında uzmanlaşmış bilim insanlarının ortak çalışması gereklidir. Bu disiplinler arası yaklaşım, YZ, büyük veri analitiği, makine öğrenimi ve DDİ gibi teknolojilerin hukuk alanında daha etkili ve verimli çözümler sunmasını sağlamaktadır.

1.3. Metin Sınıflandırma ve Hüküm Tahmini Çalışmaları (Text Classification and Verdict Prediction Studies)

Metin sınıflandırma, DDİ'nin temel unsurlarından biridir ve hukuki metinlerin belirli kategorilere ayrılmasında kritik bir rol oynar. Örneğin, bir e-postanın spam olup olmadığının belirlenmesinden, haber makalelerinin kategorize edilmesine veya sosyal medya paylaşımlarının duygu analizine kadar geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. Hukuki metinlerde bu teknik, aile içi şiddet gibi hassas konularda veri kümelerinin sınıflandırılması ve tanımlanması yoluyla hukuk profesyonellerine destek sağlayabilecek sistemlerin geliştirilmesine de olanak tanır.

Hüküm tahmini ise dava tanımlarına dayanarak, hukuki terimler, önceden verilmiş hükümler, para cezaları ve suçlar gibi unsurları kullanarak mahkeme kararlarını tahmin etmeyi amaçlar. Örneğin, Çin'de hukuki davalar üzerinde yapılan çalışmalar, derin öğrenme modellerinin, özellikle çoklu füzyon yaklaşımlarıyla birlikte dava tanımlarını analiz etmede ve hüküm sonuçlarını tahmin etmede umut vadeden sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu çalışmalarda TextCNN, TextRNN, Wide & TextCNN ve TextDenseNet gibi çeşitli modeller karşılaştırılmış ve TextDenseNet'in tahmin doğruluğu açısından öne çıktığı belirlenmiştir [15]. Ayrıca, hukuki metinlerin analizinde TF-IDF ve BiLSTM kombinasyonunun, Word2vec, SVM ve LR gibi yöntemlerle

birleştirilerek yüksek doğruluk oranları sağladığı tespit edilmiştir. Özellikle Suudi Arabistan'daki velayet davalarında bu yaklaşımlar etkili bir karar tahmin sistemi geliştirilmesine olanak tanımıştır [16].

Hibrit sinir ağı modelleri (örneğin, CNN+LSTM), mahkeme kararlarını tahmin etmede önceki çalışmalara göre daha yüksek doğruluk, hassasiyet, geri çağırma ve F1 puanları sağlamıştır. Avrupa İnsan Hakları Mahkemesi (AİHM) kararlarının analizinde Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN), AİHM'nin belirli maddelerinde (örneğin, 3, 5, 6, 8, 13, 2, 10, 11 ve 14) Destek Vektör Makineleri (SVM) modellerine kıyasla %7 oranında daha yüksek bir performans sergileyerek %82'ye varan eğitim doğruluğu sağlamıştır [17].

ABD'de yapılan bir çalışmada ise Yüksek Mahkeme dava sonuçlarının doğal dil işleme (NLP) ve makine öğrenimi teknikleri kullanılarak tahmin edilmesi araştırılmıştır. Bu model, iki hedef sınıf arasında ayrım yapabileceğini göstererek 0.324 F1 puanı ve 0.68 AUC değeri elde etmiştir. Ancak, bu modellerin yüksek mahkeme seviyesinde kullanılabilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu belirtilmiştir [8]. Brezilya mahkemelerinden elde edilen 4.043 dava üzerinde yapılan bir çalışmada ise, çeşitli sınıflandırıcılar ve derin öğrenme modelleri ile %80.2 F1-skor performansı gösteren bir prototip geliştirilmiştir. Bu çalışma, Brezilya mahkemelerinin karar sonuçlarını tahmin etmeye yönelik bilinen ilk yaklaşımlardan biri olarak değerlendirilmektedir [4].

Türkiye'deki hukuki emsal kararlar üzerinde yapılan bir çalışmada ise Uyuşmazlık Mahkemesi'nin olumsuz görev uyuşmazlığı davaları, adli ve idari olmak üzere iki sınıfa ayrılarak tahmin edilmiştir. Bu çalışmada lojistik regresyon, destek vektör makineleri (SVM), karar ağaçları ve rastgele orman algoritmalarının performansı değerlendirilmiş ve destek vektör makinelerinin %87 doğruluk oranıyla öne çıktığı görülmüştür [18].

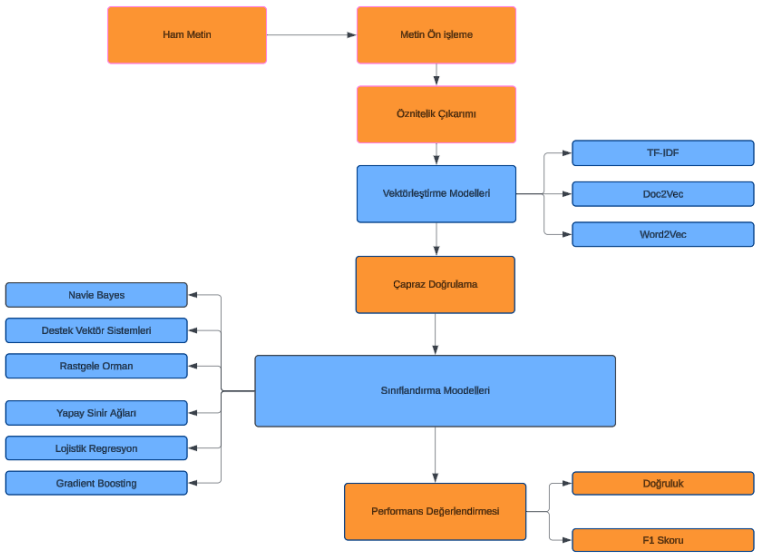
Son olarak, Türkiye'de yapılan ve bu çalışmaya benzer nitelikteki bir araştırmada, dava metinlerinden yola çıkarak Türk Anayasa Mahkemesi ve İstinaf Mahkemelerinin kararlarını tahmin etme üzerine çalışılmıştır. Bu tahmin sürecinde çeşitli Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme algoritmaları kullanılarak yüksek doğruluk ve F1-skoru değerleri elde edilmiştir. [19]

1.4. Bu Çalışmanın Katkısı (Contribution of This Study)

Türkiye'deki emsal kararların mevcut arama sistemlerinin sınırlılıkları ve artan karar hacmi nedeniyle yaşanan zorluklara çözüm sunmayı amaçlayan bu çalışma, makine öğrenimi tekniklerinin Türk yargı sistemindeki emsal kararların nihai hükümlerini (Reddi, Kabulü, İadesi) otomatik olarak sınıflandırma potansiyelini araştırmayı ve yüksek doğruluklu bir model geliştirmeyi hedeflemektedir. Ve elde edilecek makine öğrenimi modelleri, emsal karar veritabanlarının daha akıllı ve verimli bir şekilde organize edilmesine, dolayısıyla hukuk profesyonellerinin emsal karar araştırmalarını kolaylaştırmasına nasıl bir katkı sağlayabilir? Gibi sorulara cevap vermeye çalışmaktadır.

Bu doğrultuda, makine öğrenimi algoritmalarının üç ana hükmü ne derece doğrulukla sınıflandırabileceği ve ikili sınıflandırmanın doğruluk oranını artırıp artırmadığı gibi temel araştırma sorularına yanıt aranmıştır. Büyük bir emsal karar veri kümesi üzerinde yapılan eğitimler sonucunda, üç sınıflı sınıflandırmada %70'in üzerinde, ikili sınıflandırmalarda ise %80'in üzerinde doğruluk oranlarına ulaşılarak önemli bir başarı elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, makine öğreniminin karar metinleri analizindeki etkinliğini kanıtlamakla kalmayıp, emsal kararların daha sistematik değerlendirilmesi ve hukuk profesyonellerinin emsal araştırmalarını kolaylaştırması için güçlü bir temel oluşturarak, adaletin daha hızlı ve etkin tecellisine önemli bir katkı sağlamaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)



Şekil 1. Çalışmanın akış şeması (Flow chart of the study)

Günümüz bilgi çağında, büyük veri setlerinden anlamlı bilgiler çıkarmak kritik öneme sahiptir. Makine öğrenmesi yöntemleriyle yapılan çıkarımsal metin özetleme, bu ihtiyaca cevap veren önemli bir alandır. Çıkarımsal özetleme, orijinal metinden temel bilgileri seçerek kısa ve öz bir özet oluşturmayı hedefler, böylece metnin boyutu küçülürken önemli bilgiler korunmuş olur.[20] Doğal Dil İşleme (DDİ), metin analitiği, metin ön işleme, makine öğrenimi ve istatistik gibi farklı alanları bir araya getirerek, yapılandırılmış veya yapılandırılmamış metin verilerinden anlamlı bilgiler elde etmeyi ve bu verileri makinelerin anlayabileceği bir forma dönüştürmeyi amaçlayan bir disiplindir. Bilgisayarların insan dilini anlamasını, analiz etmesini ve işlemesini sağlayan DDİ, metin verilerini yorumlama, çıkarımlar yapma ve yanıtlar üretme gibi karmaşık dil tabanlı görevleri yerine getirme yeteneği sunar. Metin sınıflandırma, veri madenciliğinin bir alt alanı olarak, belgelerin önceden tanımlanmış kategorilere atanması sürecini ifade eder. Bu süreç, belgedeki verilere bakarak, kitabın türünün belirlenmesinden e-postaların spam olarak işaretlenmesine, yazarın üslubunun tespitinden konuşmaların tanınmasına kadar geniş bir uygulama yelpazesi sunar. Metin sınıflandırma uygulamaları, belge erişimi, e-posta sınıflandırması, haber organizasyonu gibi birçok alanda kullanıldığı gibi; bilgi alma, bilgi çıkarımı, duyarlılık analizi, öneri sistemleri, bilgi yönetimi, metin özetleme gibi çeşitli görevleri de içerir.[4] Metin sınıflandırma sürecinde, denetimli makine öğrenimi teknikleri kullanılarak belgelerin hangi kategoriye ait olduğunu, o kategoriye özgü kelimelere veya terimlere bakarak belirlemek amaçlanır. Bu süreç, veri toplama, metin ön işleme, eğitim ve test verilerine ayırma, farklı sınıflandırma teknikleri uygulama ve performans değerlendirmesi gibi aşamalardan oluşur.[21],[22]

Öznitelik çıkarımı, metin verilerinden anlamlı ve temsilci özelliklerin çıkarılma sürecidir. Metinler, genellikle karmaşık ve yüksek boyutlu verilerdir ve doğrudan kullanılamayacakları için, öznitelik çıkarımı adımı, metin verilerini daha düşük boyutlu ve daha anlamlı bir temsile dönüştürerek, makine öğrenimi veya diğer analiz yöntemlerine girdi olarak kullanılabilecek veri özelliklerini elde etmeyi amaçlar.

2.1. Vektörleşme Yöntemleri (Vectorization Methods)

Word2Vec: Tahmin tabanlı (prediction-based) kelime temsil yöntemi olup, temelinde yapay sinir ağı ile iki farklı model kullanarak kelimelerin eğitilmesi amaçlanıp geliştirilmiştir. [4]

- Word2Vec'in kullandığı iki model CBOW (Continuous Bag of Words) ve Skip-Gram Model'dir.
- Continuous Bag of Words: CBOW modelinde pencere boyutu merkezinde olmayan kelimeler girdi olarak alınıp, merkezinde olan kelimeler çıktı olarak tahmin edilmeye çalışılmaktadır.
- Skip Gram: Skip Gram modelinde pencere boyutu merkezinde olan kelimeler girdi olarak alınıp, mikeside olmayan kelimeler

çıktı olarak tahmin edilmeye çalışılmaktadır.

Doc2Vec: Paragraf Vektörü olarak da adlandırılır ve Doğal Dil İşleme'de belgelerin vektörler olarak gösterilmesini sağlayan bilinen bir tekniktir. Bu teknik, kelimeleri sayısal vektörler olarak gösterme yaklaşımı olan Word2Vec'e bir uzantı olarak tanıtılmıştır. Word2Vec kelime yerleştirmelerini öğrenmek için kullanılırken, Doc2Vec belge yerleştirmelerini öğrenmek için kullanılır Doc2Vec, belgelerin dağıtılmış gösterimini öğrenen sinir ağı tabanlı yaklaşımdır. Her belgeyi yüksek boyutlu bir uzayda sabit uzunlukta bir vektöre eşleyen gözetimsiz bir öğrenme tekniğidir. Vektörler, benzer belgelerin vektör uzayındaki yakın noktalara eşlendiği şekilde öğrenilir. Bu, belgeleri vektör gösterimlerine göre karşılaştırmamızı ve belge sınıflandırması, kümeleme ve benzerlik analizi gibi görevleri gerçekleştirmemizi sağlar [23]

TF-IDF: Bir metindeki veya dizideki kelimelerin metinle ne kadar ilgili olduğunun hesaplanması yöntemidir. TF-IDF Makine Öğrenmesi, Metin Madenciliği, Doğal Dil İşlemi gibi uygulamalarda sıkça kullanılır. Bu yöntem 2 ölçümden oluşur:[23]

Bir belgede kelimenin kaç kez görüldüğü (TF),

Bir dizi belgede (farklı belgelerde) kelimenin ters belge sıklığı (IDF).

Terimler:

t — term (kelime)

d — document (belge)

N —count of corpus (belge sayısı)

corpus —belgeler dizisi

Terim Frekansı: Bir belgede belli bir kelimenin sayısını temsil eder.

$$tf(t,d) = \frac{d\ belgesindeki\ t\ kelimesinin\ sayısı}{d\ belgesindeki\ toplam\ kelime\ sayısı}$$

Belge Frekansı: Terim frekansına benzer bir şekilde birkelimenin tüm dizi belgelerdeki anlamını test eder.

$$df(t) = t\ kelimesinin\ geçtiği\ belge\ sayısı$$

Ters Belge Frekansı: IDF yani Ters Belge Frekansı bir terimin (t) bilgilendiriciliğini (anlamlılığını) ölçen değerdir, Belge Frekansı'nın tersidir.

$$idf(t) = \log_e \frac{toplam\ belge\ sayısı(N) + 1}{t\ kelimesinin\ geçtiği\ belge\ sayısı + 1}$$

2.2. Makine Öğrenme Algoritmaları (Machine Learning Algorithms)

Navie Bayes: Naive Bayes sınıflandırıcıları, olasılıkları bulmak için Bayes Teoremi'ne dayanan sınıflandırma görevleri için kullanılan denetlenen makine öğrenme algoritmalarıdır, Naive Bayes sınıflandırıcısının arkasındaki ana fikir, verilerin özelliklerine göre farklı sınıfların olasılıklarına göre verileri sınıflandırmak için Bayes Teoremi'ni kullanmaktır. [24]

Destek Vektör Makinesi: Destek Vektör Makinesi (SVM), hem doğrusal hem de doğrusal olmayan sınıflandırma, regresyon ve aykırı değer algılama görevleri için yaygın olarak kullanılan güçlü bir makine öğrenme algoritmasıdır. SVM'ler son derece uyarlanabilirdir ve bu da onları metin sınıflandırması, görüntü sınıflandırması ve anormallik algılama gibi çeşitli uygulamalar için uygun hale getirir. [24]

Rastgele Orman: Rastgele Orman algoritması, Makine Öğrenmesinde tahminler yapmak için güçlü bir ağaç öğrenme tekniğidir ve daha sonra tahmin yapmak için tüm ağaçların oylamasını yapılır. Sınıflandırma ve regresyon görevi için yaygın olarak kullanılırlar. Her ağacı eğitmek için veri kümesinin farklı rastgele parçaları alınır ve ardından sonuçları ortalamasını alarak birleştirilir. Bu yaklaşım tahminlerin doğruluğunu artırmaya yardımcı olur. Random Forest, topluluk öğrenimine dayanır. [25]

Yapay Sinir Ağları: Yapay Sinir Ağı (YSA), beyinden esinlenen bir bilgi işleme paradigmasıdır. YSA'lar, insanlar gibi örneklerle öğrenir. Bir YSA, bir öğrenme süreci aracılığıyla desen tanıma veya veri sınıflandırması gibi belirli bir uygulama için yapılandırılır. Öğrenme büyük ölçüde nöronlar arasında var olan sinaptik bağlantılarda ayarlamalar içerir. Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beyninin yapısı ve işlevinden esinlenen bir tür makine öğrenme modelidir. Bilgileri işleyen ve ileten birbirine bağlı "nöron" katmanlarından oluşurlar. [24]

Lojistik Regresyon: Lojistik regresyon, amacın bir örneğin belirli bir sınıfa ait olup olmadığını tahmin etmek olduğu sınıflandırma görevleri için kullanılan bir gözetimli makine öğrenme alg oritmasıdır. Lojistik regresyon, iki veri faktörü arasındaki

ilişkiyi analiz eden bir istatistiksel algoritmadır. [26]

Gradient Boosting: Gradyan artırma, genellikle karar ağaçları olan zayıf modellerin bir topluluğunu ardışık olarak oluşturur. Her yeni model, önceki modelin hatalarını düzeltmeye odaklanarak genel doğruluğu iyileştirir. Gradyan artırma, verilerdeki aykırı değerlere ve gürültüye karşı hassastır ve özellik ölçekleme ve eksik değer ataması gibi ön işleme adımları gerektirir. Her yinelemede, GBM, kayıp fonksiyonunun tahminlerine göre negatif gradyanını hesaplar. Bu gradyan, öğrenme yönünü temsil eder ve yeni ağacı bu artıklara daha iyi uyacak şekilde yönlendirir. Öğrenme oranı, bu gradyan boyunca atılan adım boyutunu kontrol ederek her bir ağacın etkisini etkiler. [27]

2.3. Transformatörler (Transformers)

BERT: Google'ın, belirli bir bağlama dayalı olarak kullanıcıların sorgularındaki dilsel varyasyonları anlamasını sağlayan bir yapay zekadır. Algoritma, kısaca bir metindeki kelimeler arasındaki bağlamsal ilişkiyi anlamak için bir mekanizma olan sözde bir dönüştürücü kullanır.

RoBERTa: BERT'i temel alır ve önemli hiperparametreleri değiştirir, sonraki cümle ön eğitim hedefini kaldırır ve çok daha büyük mini gruplar ve öğrenme oranları ile eğitim verir. [28]

Yukarıda bahsedilen makine öğrenme algoritmaları, vektörleştirme yöntemleri ve transformatör tabanlı sistemler; Visual Studio Code ortamında, Python programlama dili kullanılarak bir dizüstü bilgisayar üzerinde uygulandı. Bu süreçte, ham metin verisi ile başlatılan işlem adımları sırasıyla metin ön işleme (küçük harfe çevirme, noktalama temizliği, kök/gövde bulma vb.), özellik çıkarımı ve vektörleştirme (TF-IDF, Word2Vec, Doc2Vec) yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Sayısallaştırılmış metinler, çapraz doğrulama yöntemi ile farklı veri setlerinde test edilerek; Naive Bayes, Destek Vektör Makineleri, Rastgele Orman, Yapay Sinir Ağları, Lojistik Regresyon ve Gradient Boosting gibi sınıflandırma algoritmaları kullanılarak eğitilmiştir. Son olarak, her bir modelin başarımı doğruluk ve F1 skoru gibi performans metrikleri ile ölçülmüş ve karşılaştırmalı değerlendirmeler bu kriterler temelinde yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar kayıt altına alınarak yöntem aşaması tamamlanmıştır.

3. RESULTS (BULGULAR)

Bu çalışmada, 27 Ekim 2024 tarihinde UYAP Emsal Karar veri tabanından web scraping yöntemiyle 530.000 adet karar indirilmiştir. İndirilen bu veriler; Daire, Esas No, Karar No, Dava Konusu, Hüküm ve Metin sütunlarını içeren bir Pandas DataFrame'ine dönüştürülmüştür. -Tablo 1 de gösterilmiştir- Veri temizleme sürecinde boş verilerin kaldırılması sonucunda toplam karar sayısı 280.000'e düşmüştür. Bu düşüşün nedenleri arasında, dava konusu sütununda kararların %5'inde veri eksikliği bulunması (bazı mahkeme kararlarında dava konusunun belirtilmemesi), hüküm sütununda kararların %10'unda eksiklik olması (bazı kararların hüküm bölümüne sahip olmaması), hükmün kesinleşmemiş olması ve her sütun içinde oluşan bazı boş veriler yer almaktadır.

Tablo 1. DataFrame'e dönüştürülmüş veriler (Data converted to DataFrame)

Daire	Esas No	Karar No	Dava Konusu	Hüküm	Metin
Kayseri Bölge Adli..	2020/494	2021/399	İtirazın İptali	Reddine	Mahkememizde..
Sakarya Bölge Adli..	2019/205	2020/700	Ticari Şirket	Kabulüne	Mahkememizde..
İstanbul Bölge Adli..	2022/424	2023/555	Menfi Tespit	İadesine	Mahkememizde..
Ankara Bölge Adli..	2023/456	2019/123	Diğer	Reddine	Mahkememizde..

Hüküm sütununda oluşan temel hüküm sınıfları ve frekansları aşağıdaki gibidir:

Tablo 2. Hüküm sınıfları, en yüksek frekansa sahip temel hükümler dikkate alınarak oluşturulmuştur. Detay hükümlerin sınıflandırılması DİĞER sınıfına topluca atanılmıştır (The provision classes were created by taking into account the main provisions with the highest frequency. The classification of the detailed provisions was assigned collectively to the OTHER class.)

Hüküm Sınıfı	Yüzde (%)	Adet (Sayı)
Reddine	30%	99.000
Kabulüne	24%	79.000
İadesine	15%	50.000
İptaline	0,01%	2.150
Gönderilmesine	1,50%	5.400
Görevsizliğine	0,01%	1.800
Kaldırılmasına	0,001%	1.100
Karar Verilmesine Yer Olmadığına	1,20%	4.200
Açılmamış Sayılmasına	0,30%	12.500
Geri Çevrilmesine	0,001	428
Diğer	5%	25.000

Çalışmada elde edilen hukuk kararlarını sınıflandırmaya Çalışmanın bu aşamasında, veri seti makine öğrenmesi modelleri için uygun hale getirmek amacıyla bir dizi aşamalar gerçekleştirildi. Öncelikle, veri seti yer alan her bir sınıf için rastgele 2000 adet veri seçimi yapılarak, dengeli bir analiz zemini oluşturma hedeflendi. Bu seçilen veriler üzerinde, metinleri sayısal verilere dönüştürmek ve makine öğrenmesi algoritmalarının anlayabileceği bir format sunmak amacıyla çeşitli vektörleştirme teknikleri uygulandı. Bu bağlamda, TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency) tekniği ile kelime önemlerini belirlerken, Doc2Vec (Belge Temsili) ve Word2Vec (Kelime Temsili) modelleri ile de metinlerin anlamsal bütünlüğünü koruyarak vektör uzayında temsil edildi. Veri vektörleştirme aşamasının ardından, bu dönüştürülmüş veriler üzerinde altı farklı makine öğrenmesi algoritmasını deneyerek sınıflandırma performansı değerlendirmesi yapıldı. Kullanılan algoritmalar arasında Naive Bayes, Support Vector Machines (SVC), Random Forest, Neural Network, Logistic Regression ve Gradient Boosting yer almaktadır. Bu algoritmalar aracılığıyla hukuk kararlarının sınıflandırılmasında en başarılı sonuçları elde etme amaçlanıldı.

yönelik izlenilen veri işleme adımlarını ve kullanılan yönttem ve teknikleri detaylandırılmıştır. İlk olarak, "REDDİ, KABULÜ ve İADESİ" sütunlarından oluşturulan bir CSV dosyasını, "Metin" ve "Sınıf" olmak üzere iki sütun içeren bir DataFrame yapısına dönüştürüldü. -Tablo 3'te gösterilmiştir- Ardından, veri ön işleme aşamasına geçerek metinleri analizimize uygun hale getirildi. Bu kapsamda, metinlerde bulunan sayıları ve noktalama işaretlerini temizlendi. Kelime analizinde anlamlı sonuçlar elde edebilmek için, frekans değeri 5'in altında olan kelimeleri çalışmamızdan çıkarıldı. Ayrıca, metinlerin anlamını doğrudan etkilemeyen "stopword" olarak adlandırılan sık kullanılan kelimeler de filtrelendi. Metin uzunluğunu standardize etmek amacıyla, 1000 karakterden kısa olan metinleri veri setimizden çıkarıldı. Son olarak, sınıflandırma sürecini kolaylaştırmak için, her bir kararı ait olduğu sınıfa göre yeniden etiketlendi: 'REDDİ' kararlarını 1, 'KABULÜ' kararlarını 2 ve 'İADESİ' kararlarını 3 olacak şekilde. Bu ön işlemler, verileri sınıflandırma algoritmaları için hazır hale getirmeye olanak tanımıştır

Tablo 3. Label Encoding edilmiş DataFrame
(Label Encoded DataFrame)

Filterelenmis_Metin	Sınıf
dava karar mahkememizde görülen taz…	3
dava karar mahkememizde görülen me…	2
dava karar mahkememizde görülen itira…	1
dava karar mahkememizde görülen ala…	2
dava karar mahkememizde görülen taz…	1

Çalışmanın bu aşamasında, veri seti makine öğrenmesi modelleri için uygun hale getirmek amacıyla bir dizi aşamalar gerçekleştirildi. Öncelikle, veri seti yer alan her bir sınıf için rastgele 2000 adet veri seçimi yapılarak, dengeli bir analiz zemini oluşturma hedeflendi. Bu seçilen veriler üzerinde, metinleri sayısal verilere dönüştürmek ve makine öğrenmesi algoritmalarının anlayabileceği bir format sunmak amacıyla çeşitli vektörleştirme teknikleri uygulandı. Bu bağlamda, TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency) tekniği ile kelime önemlerini belirlerken, Doc2Vec (Belge Temsili) ve Word2Vec (Kelime Temsili) modelleri ile de metinlerin anlamsal bütünlüğünü koruyarak vektör uzayında temsil edildi. Veri vektörleştirme aşamasının ardından, bu dönüştürülmüş veriler üzerinde altı farklı makine öğrenmesi algoritmasını deneyerek sınıflandırma performansı değerlendirmesi yapıldı. Kullanılan algoritmalar arasında Naive Bayes, Support Vector Machines (SVC), Random Forest, Neural Network, Logistic Regression ve Gradient Boosting yer almaktadır. Bu algoritmalar aracılığıyla hukuk kararlarının sınıflandırılmasında en başarılı sonuçları elde etme amaçlanıldı.

Çalışmanın derinlemesine analiz aşamasında, ilk değerlendirme sonucunda en yüksek performansı sergileyen Gradient Boosting algoritmasının yanı sıra, Random Forest ve Neural Network algoritmalarını da ileri analizler için seçildi. Bu üç güçlü algoritmanın potansiyelini daha da artırmak amacıyla, her sınıftan 5000 rastgele örneklem

Tablo 4. Her sınıf için 2000 tane verinin kullanıldığı doğruluk değerleri (Accuracy values using 2000 data for each class)

Algoritma	TF-IDF Doğruluk Değeri	Word2Vec Doğruluk Değeri	Doc2Vec Doğruluk Değeri
Navie Bayes	0.59	0.49	0.42
Destek Vektör Sistemleri	0.71	0.54	0.46
Rastgele Orman	0.70	0.57	0.50
Yapay Sinir Ağları	0.70	0.59	0.48
Lojistik Regresyon	0.71	0.59	0.48
Gradient Boosting	0.73	-	-

üzerinde dönüştürücü (transformatör) mimarilere sahip, günümüz doğal dil işleme alanında iyi işler çıkartan BERT ve RoBERTa modelleri uygulandı. Bu modeller sayesinde, hukuk metinlerinin karmaşık dil yapılarını daha iyi anlamayı ve daha yüksek sınıflandırma başarısı elde etme hedeflenildi, aşağıda-Tablo 5- modellerin f1-Skorları verilmiştir.

Tablo 5. Bu aşamadaki düşük performans, transformatör modellerinin bu veri seti için uygun olmadığını göstermiştir (The poor performance at this stage indicated that the transformer models were not suitable for this data set)

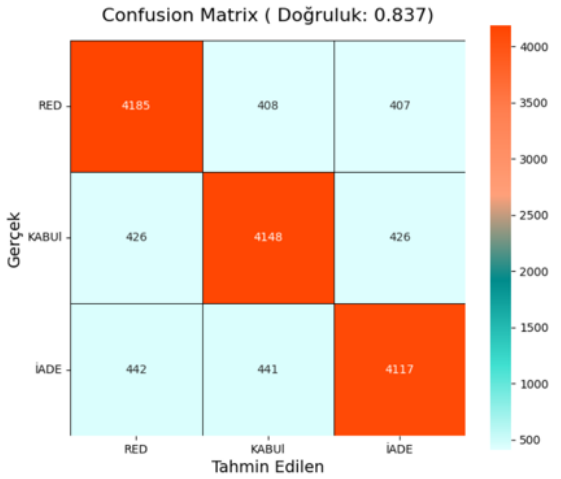
Algoritma	F1-Skoru
Rastgele Orman	0.16
Yapay Sinir Ağları	0.16
Gradient Boosting	0.37

Çalışmada transformatör modelleri beklenen başrayı gösterememiştir. Bu başarısızlığınnedenleri Türk davalarının karmaşıklığı, uzunluğu ve modellerin Türkçe dilinde yeterli düzeyde eğitilememesi düşünülebilir. Beklenen başarıyı elde

edilememesinin ardından, her sınıftan 5000 tane rastgele örneklem üzerinde seçilen üç algoritmayı (Gradient Boosting, Random Forest ve Neural Network) daha da geliştirmek için bir dizi performans iyileştirici yöntemler uygulandı. Öncelikle, Türkçe dilinin özelliklerine uygun olarak kelime köklerine inme işlemini gerçekleştirmek için TurkishStemmer'ı kullanıldı. Ardından, metin verilerini sayısal formata dönüştürmek ve kelime önemlerini belirlemek için TF-IDF vektörleştirme tekniğini uygulanıldı. Modelin genelleme yeteneğini artırmak için çapraz doğrulama (cross-validation) yöntemini kullanılarak, modelin farklı veri alt kümelerinde ne kadar iyi performans gösterdiğini ölçüldü. Son olarak, her algoritma için en uygun parametreleri bulmak amacıyla Grid Search algoritmasın kullanılarak, model performansı optimize etme hedeflenildi. Bu iyileştirme sürecinin sonunda, aşağıdaki değerleri elde edildi.

Tablo 6. 5000 tane veri ile geliştirilmiş modelin, f1-skoru değerleri (F1-score values of the model developed with 5000 data)

Algoritma	F1-Skoru	Hassasiyet	Geri Çağırma
Rastgele Orman	0.76	0.75	0.77
Yapay Sinir Ağları	0.72	0.73	0.72
Gradient Boosting	0.83	0.82	0.84



Şekil 2. Gradient Boosting algoritmasının (0.83) Confusion matrix'i (Gradient Boosting algoritmasının (0.83) Confusion matrix'i)

Yukarıdaki confusion matrix, Gradient Boosting algoritmasının sınıflandırma performansını özetlemektedir. Doğru sınıflandırmalar incelendiğinde, RED sınıfı için 4185, KABUL sınıfı için 4148 ve İADE sınıfı için 4117 doğru tahmin yapılmıştır. Yanlış sınıflandırmalarda ise RED yerine KABUL (408) veya İADE (407), KABUL yerine RED (426) veya İADE (442), İADE yerine RED (442) veya KABUL (441) tahmin edilmiştir. Bu sonuc kapsamında Gradient Boosting algoritmasının seçilen en iyi hiperparametreleri şunlardır: learning_rate: 0.15, max_depth: 7, n_estimators: 270 Genel olarak model, %83 doğruluk oranı ile iyi bir performans sergilemiş olsa da bazı sınıflar arasında karışıklık yaşandığı görülmektedir.

Tablo 6 deki değerlerden yola çıkarak, modelin performansını farklı sınıflandırma senaryolarında değerlendirmek amacıyla, ikili sınıflandırma görevlerine odaklanıldı. Bu kapsamda, veri seti "KABULÜ-REDDİ", "REDDİ-İADESİ" ve "KABULÜ-İADESİ" olmak üzere üç farklı iki sınıflı veri setine ayrıldı. Böylece, modelin farklı kararlar arasındaki ayrımı ne kadar başarılı bir şekilde yapabildiğini daha detaylı inceleme amaçlanıldı. Bu üç ikili sınıflandırma senaryosunda, Random Forest, Neural Network ve Gradient Boosting algoritmalarını kullanarak modeller tekrar eğitildi ve performanslarını değerlendirildi. Elde edilen doğruluk değerleri, -Tablo 7 belirtilmiştir- modelin farklı senaryolardaki etkinliğini daha net bir şekilde anlaşılması sağlandı.

Tablo 7. Modellerin üçlü sınıflandrımaki doğruluk değerleri (Accuracy values of the models in triple classification)

Veri Seti	Rastgele Orman	Yapay Sinir Ağları	Gradient Boosting
Kabulü-Reddi	0.79	0.80	0.86
Reddi-İadesi	0.83	0.82	0.87
Kabulü-İadesi	0.83	0.82	0.87

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Türk yargı sisteminde mahkeme kararlarının çevrimiçi ortamlarda erişilebilir hale gelmesiyle ortaya çıkan bilgi yoğunluğunu yönetmek ve hukuk profesyonellerinin karar alma süreçlerini hızlandırmak amacıyla, UYAP veri tabanından elde edilen hukuki karar metinleri üzerinde doğal dil işleme (DDİ) ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak bir emsal karar tahmin modeli geliştirilmiştir. Çalışma, 530.000 adet yapılandırılmamış veri ile başlanmış ve

çalışma kapsamı için bu veri seti 280.000 adet ile sınırlandırılmıştır. Veri setindeki yanlılık ve tutarsızlık gibi etkileri en aza indirmek ve sonuçların daha geniş kapsamda geçerli olmasını sağlamak için çeşitli temizleme ve ön işleme adımları uygulanmıştır. Elde edilen veri seti ile transformatör modellerinin beklendiği doğrultuda başarılı sonuçlar vermemesi üzerine, Gradient Boosting, Random Forest ve Neural Network algoritmaları denenmiştir. Bu algoritmalar, TurkishStemmer ile kelime köklerine indirme ve TF-IDF ile vektörleştirme teknikleri kullanılarak uygulanmıştır. Algoritmaların performansı, çapraz doğrulama ve Grid Search ile parametre optimizasyonu ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Gradient Boosting algoritmasının %83 doğruluk oranıyla en başarılı performansı sergilediğini göstermiştir. İki sınıflı model değerlendirmesinde ise, "KABULU-REDDİ", "REDDİ-İADESİ" ve "KABULU-İADESİ" veri setleri üzerinde yapılan testlerde, Gradient Boosting algoritması yine en yüksek doğruluk değerlerine ulaşarak (sırasıyla 0.86, 0.87 ve 0.87) diğer algoritmaları geride bırakmıştır.

Bu sonuçlar, makine öğrenmesi modellerinin hukuk alanındaki karar alma süreçlerini destekleme ve hızlandırma potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle Gradient Boosting algoritmasının yüksek doğruluk oranları, bu algoritmanın hukuki karar metinlerinin sınıflandırılması ve emsal karar tahmininde etkili bir araç olabileceğini göstermektedir. Ancak, transformatör modellerinin bu çalışmada başarısız olması, hukuki metinlerin kendine özgü yapısı ve karmaşıklığı nedeniyle, bu tür modellerin daha fazla özelleştirme ve optimizasyona ihtiyaç duyabileceğini işaret etmektedir. Ayrıca, farklı veri setleri ve algoritmalar kullanılarak elde edilen sonuçlardaki küçük farklılıklar, modelin başarısının veri kalitesine ve kullanılan tekniklere duyarlı olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın sonuçları, hukuk profesyonellerinin içtihat ve emsal karar araştırmalarını kolaylaştırarak, karar verme süreçlerini daha etkin hale getirebilecek bir araç sunmaktadır. Ancak, bu tür modellerin pratik uygulamaları için, modelin şeffaflığı, yorumlanabilirliği ve etik sorunları gibi konuların da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Gelecek çalışmalarda, farklı veri setleri, öznitelik çıkarma teknikleri ve makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak modelin performansı daha da artırılabilir. Ayrıca, modelin insan uzmanlar tarafından denetlenmesi ve yorumlanması, hukuki karar alma süreçlerinin daha güvenilir ve adil olmasına katkı sağlayabilir. Bu bağlamda, makine öğrenmesi ve yapay zeka teknolojilerinin hukuk alanındaki potansiyelini tam olarak değerlendirebilmek için daha fazla araştırmaya ve işbirliğine ihtiyaç vardır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI
(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI
(AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Süleyman Kürşat DEMİR: Yazılım geliştirme, görselleştirme, saha/araştırma çalışmaları, kaynak sağlama, veri düzenleme ve yazımın ilk taslağını hazırlama süreçlerinde görev almıştır.

He participated in software development, visualization, field/research studies, sourcing, data editing, and preparation of the first draft of the manuscript.

Emrah AYDEMİR: Danışmanlık, kavramsal çerçeveninoluşturulması, yöntem geliştirme ve yazımın gözden geçirilip düzenlenmesi aşamalarına katkı sağlamıştır.

He contributed to the consultancy, conceptual framework development, method development, and manuscript review and editing stages.

Yasin Sönmez: Araştırmanın metodolojik tasarımına önemli katkılar sunmuş, makalenin yazımının gözden geçirilmesi ve düzenlenmesi aşamalarına katkıda bulunmuştur.

He made significant contributions to the methodological design of the research and contributed to the review and editing stages of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] B. Kılıç and Y. Öner, "Yargıtay Kararlarının Suç Türlerine Göre Makine Öğrenmesi Yöntemleri İle Sınıflandırılması," Veri Bilim Dergisi, vol. 4, no. 3, pp. 61-71, 2021, doi: 10.51203/veri.1011206.

[2] E. Mohammed, E. Mustapha, and A. Mourad, "Using Machine Learning to Predict Public Prosecution Judges Decisions in Moroccan Courts," Procedia Computer Science, vol. 220, pp. 998-1002, 2023, doi: 10.1016/j.procs.2023.08.199.

[3] J. Morison and T. McInerney, "When should a computer decide? Judicial decision-making in the age of automation, algorithms and generative artificial intelligence," 2024. [Online]. Available: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4723280

[4] A. Lage-Freitas et al., "Predicting Brazilian Court Decisions," PeerJ Computer Science, vol. 8, e904, 2022, doi:10.7717/peerj-cs.904.

[5] R. Sil, A. Alpana, and A. Roy, "Machine Learning Approach for Automated Legal Text Classification," International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications, vol. 13, no. 1, pp. 242-251, 2021.

[6] K. Javed and J. Li, "Artificial intelligence in judicial adjudication: Semantic biasness classification and identification in legal judgement (SBCILJ)," PLoS One, vol. 19, no. 5, e0301841, 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0301841.

[7] N. A. K. Rosili, N. H. Zakaria, R. Hassan, S. Kasim, F. Z. Che Rose, and T. Sutikno, "A systematic literature review of machine learning methods in predicting court decisions," IAES International Journal of Artificial Intelligence, vol. 9, no. 4, pp. 638-651, 2020, doi: 10.11591/ijai. v9. i4. pp638-651.

[8] K. Lockard, R. Slater, and B. Sucrese, "Using NLP to model U.S. Supreme Court Cases," SMU Data Science Review, vol. 7, no. 1, Article 4, 2023. [Online]. Available: https://scholar.smu.edu/datasciencereview/vol7/iss1/4

[9] D. Küçük and F. Can, "Hukuki metinlerin otomatik işlenmesinde yapay zekâ teknolojilerinin kullanımı," Bilişim Hukuku Dergisi, vol. 2024, no. 1, pp. 29-53, 2024, doi: 10.59752/bhd.1451000.

[10] M. Medvedeva, M. Vols, and M. Wieling, "Using machine learning to predict decisions of the European Court of Human Rights," Artificial Intelligence and Law, vol. 28, no. 3, pp. 237-266, 2020, doi: 10.1007/s10506-019-09255-y.

[11] S. Abbara et al., "ALJP: An Arabic legal judgment prediction in personal status cases using machine learning models," arXiv preprint arXiv:2309.00238, 2023.

[12] D. Alghazzawi et al., "Efficient Prediction of Court Judgments Using an LSTM+CNN Neural Network Model with an Optimal Feature Set," Mathematics, vol. 10, no. 5, 683, 2022, doi: 10.3390/math10050683.

[13] T. Turan, E. U. Küçüksille, and N. K. Alagöz, "Prediction of Turkish Constitutional Court Decisions with Explainable Artificial Intelligence," Bilge International Journal of Science and Technology Research, vol. 7, no. 2, pp. 128–141, 2023, doi: 10.30516/bilgesci.1317525.

[14] R. Sil, A. Alpana, and A. Roy, "Machine Learning Approach for Automated Legal Text Classification," International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications, vol. 13, no. 1, pp. 242-251, 2021.

[15] Y. Wen and P. Ti, "A Study of Legal Judgment Prediction Based on Deep Learning Multi-Fusion Models—Data from China," SAGE Open, vol. 14, no. 2, pp. 1-10, 2024, doi: 10.1177/21582440241257682.

[16] M. B. Görentaş, T. Uçkan, and N. B. Arlı, "Classification of Decisions of the Court of Jurisdictional Disputes of Türkiye Using Machine Learning Methods," Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, vol. 28, no. 3, pp. 947-961, 2023, doi: 10.53433/yyufbed.1292275.

[17] N. Aletras, D. Tsarapatsanis, D. Preoţiuc-Pietro, and V. Lampos, "Predicting judicial decisions of the European Court of Human Rights: a natural language processing perspective," PeerJ Computer Science, vol. 2, e93, 2016, doi: 10.7717/peerj-cs.93.

[18] M. Bilgin, "Kelime Vektörü Yöntemlerinin Model Oluşturma Sürelerinin Karşılaştırılması," Gazi Üniversitesi Bilimsel Teknik Dergisi, vol. 29, no. 4, pp. 695–705, Apr. 2019, doi: 10.17671/gazibtd.472226.

[19] E. Mumcuoğlu, C. E. Öztürk, H. M. Ozaktas, and A. Koç, "Natural language processing in law: Prediction of outcomes in the higher courts of Turkey," Information Processing and Management, vol. 58, no. 6, 102684, 2021, doi: 10.1016/j.ipm.2021.102684.

[20] T. Uçkan and K. Karabulut, "The Effectiveness of Machine Learning Algorithms in Extractive Text Summarization: A Comparative Analysis of K-Means, Random Forest, GBM, Logistic Regression, and SVM," Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, vol. 7, no. 2, pp. 77–91, 2024, doi: 10.57244/dfbd.1538959.

[21] J. Cui, X. Shen, and S. Wen, "A Survey on Legal Judgment Prediction: Datasets, Metrics, Models and Challenges," IEEE Access, vol. 11, pp. 111598-111626, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3317083.

[22] I. Habernal et al., "Mining legal arguments in court decisions," Artificial Intelligence and Law, 2023, doi:10.1007/s10506-023-09936-8.

[23] Kınık, D., & Güran, A. (2021). TF-IDF and Doc2Vec Based Turkish Text Classification System Performance Enhancement with Sequential Word Group Detection. European Journal of Science and Technology (21), 323-332. https://doi.org/10.31590/ejosat.774144

[24] Harman, G. (2021). Diabetes Mellitus Prediction Using Support Vector Machines and Naive Bayes Classification Algorithms. European Journal of Science and Technology, (32), 7-13. DOI: 10.31590/ejosat.1041186

[25] Parmar, A., Katariya, R., and Patel, V. (2018). A Review on Random Forest: An Ensemble Classifier. In International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things, pp. 758-763. Cham: Springer.

[26] Çokluk, Ö. (2010). Logistic Regression Analysis: Concept and Application. Educational Sciences: Theory & Practice, 10(3), 1357-1407.

[27] Natekin, A., & Knoll, A. (2013). Gradient Boosting Machines: A Tutorial. Frontiers in Neurorobotics, 7, 21.

[28] Rothman, D. (2021). Transformers for Natural Language Processing: Build Innovative Deep Neural Network Architectures for NLP with Python, PyTorch, TensorFlow, BERT, RoBERTa, and More. Packt Publishing Ltd. Bert

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1240-1252 (2025)

Determination of Radiation Shielding Properties of Magnesium Oxychloride Cement with Acidic and Basic Pumice Aggregate

Şemsettin KILINÇARSLAN[1], Yasemin ŞİMŞEK TÜRKER[1*], Nuri IŞILDAR[2]

[1]*Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Engineering, Isparta, Turkey*

[2]*Süleyman Demirel University, Natural and Industrial Building Material Applied Center, Isparta, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 01/05/2025
Revision: 09/09/2025
Accepted: 12/09/2025

Keywords

Magnesium oxychloride
Cement
Pumice
Radiation shielding

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 01/05/2025
Düzeltme: 09/09/2025
Kabul: 12/09/2025

Anahtar Kelimeler

Magnezyum oksiklorür
Çimento
Pomza
Radyasyon zırhlama

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study investigates the radiation shielding properties of magnesium oxychloride cement (MOC) using acidic and basic pumice aggregates. Experimental tests and XCOM simulations revealed that acidic pumice provided superior attenuation, especially at low energies, while basic pumice offered advantages in mass efficiency. Findings highlight potential of MOC as an eco-friendly, functional construction material.

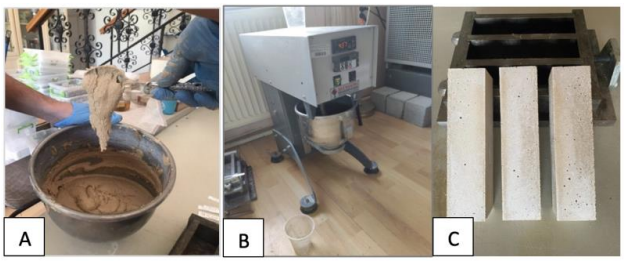


Figure 2*. Preparation of samples A: Pouring ingredients into a container, B: Mixing the ingredients, C: Removing the samples from the mold/**Şekil 2:** Numunelerin hazırlanması A: Malzemelerin bir kaba boşaltılması, B: Malzemelerin karıştırılması, C: Numunelerin kalıptan çıkarılması*

Highlights (Önemli noktalar)

- *Acidic pumice aggregate showed superior radiation shielding, especially at low energies. / Asidik pomza agregası düşük enerjilerde üstün radyasyon zırhlama özelliği göstermiştir.*
- *Basic pumice provided better mass attenuation efficiency, particularly at higher energies. / Bazik pomza özellikle yüksek enerjilerde daha iyi kütle zayıflatma verimliliği sağlamıştır.*
- *Experimental results were slightly higher than XCOM predictions, confirming material effectiveness. / Deneysel sonuçlar XCOM tahminlerinden biraz daha yüksek çıkmış, malzemenin etkinliğini doğrulamıştır.*
- *Findings highlight the potential of MOC-based concretes as eco-friendly functional building materials. / Bulgular, MOC esaslı betonların çevre dostu işlevsel yapı malzemeleri olma potansiyelini ortaya koymaktadır.*

Aim (Amaç): *This study aims to investigate the radiation shielding properties of magnesium oxychloride cement concretes containing acidic and basic pumice aggregates. / Bu çalışma, asidik ve bazik pomza agregaları içeren magnezyum oksiklorür çimentosu betonlarının radyasyon zırhlama özelliklerini incelemeyi amaçlamaktadır.*

Originality (Özgünlük): *The study presents a comparative evaluation of acidic and basic pumice in MOC concretes, providing new insights into their effectiveness in radiation shielding applications. /Çalışma, MOC betonlarında asidik ve bazik pomzanın karşılaştırmalı değerlendirmesini sunarak radyasyon zırhlama uygulamalarındaki etkinliklerine dair yeni bulgular ortaya koymaktadır.*

Results (Bulgular): *Experimental findings showed that acidic pumice concretes have higher attenuation capacity at lower energies, while basic pumice concretes offer mass efficiency advantages at higher energies. /Deneysel bulgular, asidik pomza betonlarının düşük enerjilerde daha yüksek zayıflatma kapasitesine sahip olduğunu, bazik pomza betonlarının ise yüksek enerjilerde kütle verimliliği avantajı sunduğunu göstermiştir.*

Conclusion (Sonuç): *Acidic pumice is more effective for compact shielding applications, while basic pumice is suitable for lightweight structures, highlighting the versatility of MOC-based concretes. /Asidik pomza kompakt zırhlama uygulamaları için daha etkili, bazik pomza ise hafif yapılar için uygun bulunmuş, bu durum MOC esaslı betonların çok yönlülüğünü ortaya koymuştur.*

*Corresponding author, e-mail: yaseminturker@sdu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1688022

GU J Sci, Part C, 13(3): 1240-1252 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Determination of Radiation Shielding Properties of Magnesium Oxychloride Cement with Acidic and Basic Pumice Aggregate

Şemsettin KILINÇARSLAN[1], Yasemin ŞİMŞEK TÜRKER[1*], Nuri IŞILDAR[2]

[1]*Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Engineering, Isparta, Turkey*

[2]*Süleyman Demirel University, Natural and Industrial Building Material Applied Center, Isparta, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 01/05/2025
Revision: 09/09/2025
Accepted: 12/09/2025

Keywords

Magnesium oxychloride
Cement
Pumice
Radiation shielding

Abstract

New-generation cements are increasingly being investigated due to their potential for low carbon emissions and reduced environmental impacts. Magnesium oxychloride cement (MOC) is an innovative binder formed by the reaction of magnesia powder with $MgCl_2$ solution, offering properties such as high early strength, good workability, low density, and fire resistance. In this study, pumice was used as an aggregate in MOC-based concrete, and the radiation shielding properties of the resulting concrete were investigated using both experimental methods and XCOM calculations. Basic and acidic pumice aggregates, commonly used in lightweight concrete production, were compared. The results showed that experimental radiation shielding values were slightly higher than XCOM predictions, particularly at low energies. This highlights the critical importance of material selection and the potential for innovative mix designs to enhance concrete performance.

Asidik ve Bazik Pomza Agregalı Magnezyum Oksiklorür Çimentosunun Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin Belirlenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 01/05/2025
Düzeltme: 09/09/2025
Kabul: 12/09/2025

Anahtar Kelimeler

Magnezyum oksiklorür
Çimento
Pomza
Radyasyon zırhlama

Yeni nesil çimentolar, düşük karbon emisyonları ve çevresel etkileri azaltma potansiyelleri nedeniyle giderek daha fazla araştırılmaktadır. Magnezyum oksiklorür çimentosu (MOC), magnezya tozunun $MgCl_2$ çözeltisi ile reaksiyonu sonucu oluşan, yüksek erken dayanım, iyi işlenebilirlik, düşük yoğunluk ve yangına dayanıklılık gibi özelliklere sahip yenilikçi bir bağlayıcıdır. Bu çalışmada, MOC esaslı betonda agrega olarak pomza kullanılmış ve elde edilen betonun radyasyon zırhlama özellikleri hem deneysel yöntemlerle hem de XCOM hesaplamalarıyla incelenmiştir. Hafif beton üretiminde yaygın olarak tercih edilen bazik ve asidik pomza agregaları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, deneysel radyasyon tutuculuk değerlerinin özellikle düşük enerjilerde XCOM tahminlerinden biraz daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu durum, malzeme seçiminin kritik önemini ve betonun performansını artırmak için yenilikçi karışım tasarımlarının potansiyelini ortaya koymaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Magnesium-based cement, also known as Sorel cement, differs from Portland cement in terms of production technology and is a new-generation binder that is being researched to prevent Portland cement from releasing high carbon and damaging the environment structure. Magnesium-based cement is a combination of a cross-linking agent that reacts with the calcined magnesite component to form a solidified binder matrix. Concrete mixtures prepared with magnesium oxychloride cement (MOC) can have high compressive strength between 55 and 69 MPa within 48 hours when properly formulated. Concrete produced with MOC is a very stable building material against heating, freezing, and thawing cycles. MOC is produced by mixing water, magnesium oxide (MgO), and magnesium chloride ($MgCl_2$) for a certain period [1,2]. MOC has a shorter setting time than regular Portland cement, but it has less water resistance. A certain amount of phosphoric acid is added to the mixture to minimize the disadvantage of MOC against water. The properties of MOC have been investigated in terms of $MgO/MgCl_2$ and $H_2O/MgCl_2$ molar ratios. The changes in $MgO/MgCl_2$ and $H_2O/MgCl_2$ molar ratios greatly affect the mechanical properties of MOC. The most preferred ranges for design purposes are 11-17 $MgO/MgCl_2$ and 12-18 $H_2O/MgCl_2$ for a binder with a majority of $5MgO\ MgCl_2{\cdot}8H_2O$ (phase 5) crystals. However, the $MgO/MgCl_2$ mole ratio plays

*Corresponding author, e-mail: yaseminturker@sdu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1688022

a major role in determining the $H_2O/MgCl_2$ mole ratio, primarily to regulate the workability of the paste [3,4].

Research was conducted on various usage ratios of several MOC types, including 13 mol fixed magnesite, 12 mol water, and 0.5 to 1.9 mol magnesium chloride. It was found that as the amount of magnesium chloride used in MOC increased, the compressive strength, initial and final setting times, and water solubility values of the samples also increased. The maximum compressive strength value was found in the 1.5 mol magnesium chloride samples used in MOC. According to X-ray diffraction analysis (XRD) studies, Phase 5, 5 Mg $(OH)_2$•$MgCl_2$·$6H_2O$, gradually increased, while hydrated magnesia, Mg $(OH)_2$, gradually decreased. According to experiments using a scanning electron microscope (SEM), phase 5 needle-shaped crystals are very good at strengthening the MOC matrix. Using the sample with the best strength among those made using MOC, a nanocomposite containing SiC nanoparticles was created. It was stated that this composite does not carry the risk of grain growth and does not require melting or burning for sintering. With the high concentration of needle-shaped reinforcing crystals in Phase 5, the increase of magnesium chloride in the matrix, and the nano-sized aggregate particles of SiC, the production of stronger nanocomposites can be realized [4-6].

Pumice is a light and porous natural stone of volcanic origin. Formed by releasing gases during the rapid cooling and solidification of lava, this stone draws attention with its low density, high heat, and sound insulation properties. Pumice is an environmentally friendly and recyclable material, and it is used as an insulation material, especially in the construction sector, in the production of lightweight concrete and mortar [7,8]. Turkey, with its rich pumice reserves, produces in provinces such as Nevşehir, Isparta, Kayseri, Van, Agrı, and Bitlis, meeting both domestic market needs and exporting to the world. Thanks to its lightness, pumice, which reduces the weight of buildings and provides energy savings, is an indispensable material for the construction sector and other industries with its natural structure and versatile use [9-11]. For this reason, pumice is widely used in many construction products.

Pumice is a porous rock type formed because of volcanic activity. Pumice has been used as aggregate in the production of lightweight concrete in many countries of the world. Satisfactory concrete, lighter than normal concrete with good insulating characteristics, with high absorption and shrinkage, can be manufactured using pumice [12]. The pores in pumice are usually unconnected spaces. For these reasons, it is quite light, has low permeability, and has high heat and sound insulation [13, 14]. Pumice is widely used in many industries, especially in the construction sector. There are varieties of pumice, such as acidic pumice and basic pumice. Acidic pumice is rich in silica, usually containing 63% or more silica. It has more quartz and feldspar in terms of mineral composition. Basic pumice has a lower silica ratio, usually containing 45-52% silica [15-17]. Acidic pumice is light-colored, light gray, and cream colors, while Basic pumice is darker, dark gray, and black. Acidic pumice has a lower density because it is more porous, but Basic pumice is less porous and therefore has a higher density. Acidic pumice can contain a glassier structure, and the rapid cooling process limits crystallization. Basic Pumice Magma cools more slowly, so it can contain more crystalline mineral phases. These differences affect the physical and chemical properties of pumice and, therefore, its areas of use. Acidic and basic types of pumice are important examples to understand the diversity and versatile usability of this stone. The acidic and basic properties of pumice make it a versatile material for both industrial and environmental applications. Both types of pumice are used in various areas to maintain sustainability and ecological balance [18-20].

The low pH level of acidic pumice allows it to be used effectively in applications with acidic properties. On the other hand, basic pumice stands out with its composition structure, which contains higher proportions of minerals such as iron and magnesium. This type of pumice can be used in applications that require alkaline properties, especially since it is stable in environments with basic pH levels. Its chemical composition is used in the definition of pumice. The chemical composition properties of acidic and basic pumice are given in Table 1, and the physical properties are given in Table 2 [21].

Table 1. Chemical properties of acidic and basic pumice samples (%) (Asidik ve bazik pomza örneklerinin kimyasal özellikleri (%))

Compound	Acidic Pumice	Basic Pumice
SiO_2	72.5	45.0
Al_2O_3	14.0	21.0
Fe_2O_3	2.5	7.0
CaO	0.9	11.0
MgO	0.6	7.0
Na_2O+K_2O	9.0	8.0
LOI	3.0	1
Compound	Acidic Pumice	Basic Pumice
SiO_2	72.5	45.0
Al_2O_3	14.0	21.0
Fe_2O_3	2.5	7.0

Table 2. Physical properties of acidic and basic pumice samples (Asidik ve bazik pomza örneklerinin fiziksel özellikleri)

Properties	Acidic Pumice	Basic Pumice
Unit Volume Weight (kg/m^3)	613	1012
Water Absorption	20.8	9.6

2. MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

In this study, MOC, Magnesium Oxide (MgO), and Magnesium Chloride ($MgCl_2$) prepared in certain proportions, were used as binders. The following chemicals were used for the syntheses: $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (>99%), MgO (>98%), and deionized water.

The ratio of 5 MgO to $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ was used for the synthesis of a stoichiometric phase of MOC with a composition $5Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$ (termed as Phase 5, also known as $Mg3(OH)_5Cl \cdot 4H_2O$). To prepare the first sample, 30.6 g of $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ was dissolved in 19.0 g of deionized water. In the next step, 30.4 g of magnesium oxide was added, and the of Phase 5:

$$5\,MgO + MgCl_2 \cdot 6H_2O + 3\,H_2O \cdot 5Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O \quad (1)$$

Similarly, the stoichiometric Phase 3 ($3Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$ or $Mg_2(OH)_3Cl \cdot 4H_2O$) was prepared by mixing MgO, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ and H_2O in the molar ratio 3:1:5. To prepare the second sample, 39.1 g of $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ was dissolved in 17.3 g of deionized water. In the next step, 23.2 g of magnesium oxide was added, and the suspension was intensively stirred for 5 min. The formation of magnesium oxychloride cement MOC 3-1-8 is summarized in the following Equation (2):

$$3\,MgO + MgCl_2 \cdot 6H_2O + 5\,H_2O \rightarrow 3Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O. \quad (2)$$

Suspensions were used to prepare samples. Isparta-Karakaya and Isparta-Gelincik pumice were used as aggregate. Sieve analysis was performed to standardize the granulometry of the aggregates used, and castings were made according to the determined granulometry. After the crushing process, one of the most important parameters to obtain high-strength concrete is sieve analysis. The dimensions of the aggregates should have a distribution by the standards; that is, the general grain distribution should be known, or the aggregate grain distribution ratios should be adjusted correctly to provide a suitable composition and prevent grain segregation. In this study, acidic and basic pumice were used. First, MOC was produced with acidic pumice (MAP) and basic pumice (MBP). Isparta Karakaya and Isparta Gelincik Pumice are given in Figure 1.



Figure 1. Isparta Karakaya and Isparta Gelincik Pumice (Isparta Karakaya ve Isparta Gelincik Pomza)

The radiation shielding properties of the produced concrete samples were examined. Experiments were carried out on 3 samples from each series. The production phase of the samples is given in Figure 2.

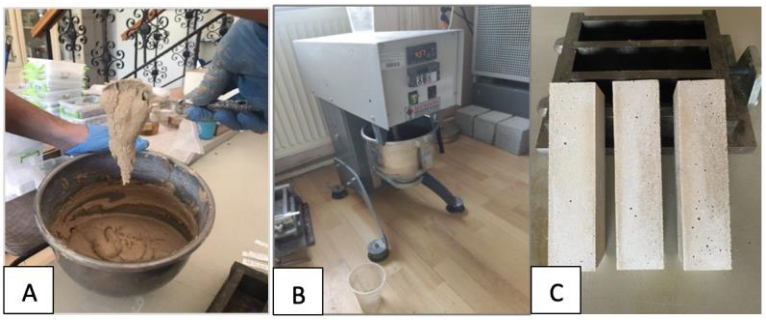


Figure 2. Preparation of samples A: Pouring ingredients into a container, B: Mixing the ingredients, C: Removing the samples from the mold (Numunelerin hazırlanması A: Malzemelerin bir kaba boşaltılması, B: Malzemelerin karıştırılması, C: Numunelerin kalıptan çıkarılması)

Experiments with radiation shielding were conducted in the Gamma Spectroscopy Laboratory. A gamma spectroscopy system uses the interaction of the emitted gamma rays with the NaI (TI) detector to distinguish them based on their energy. The radiation shielding experimental setup, Na (TI) scintillation detector, was used to evaluate radiation absorption coefficients. The scintillator, which is a sparkling substance, and the photomultiplier tube, which houses the photocathode, electrode, electron multipliers, and anode, are the two primary components of a scintillation detector. The gamma ray first enters the scintillator, where it interacts with certain solid, liquid, or gaseous materials known as scintillation phosphors to cause ionization and excitation. Gamma-ray-excited electrons return to their initial state and release light when the energy required to remove them from their environment is insufficient. Photomultiplier tubes gather the emitted light and transform it into a voltage pulse. The energy of the radiation determines the amplitude of this pulse. These detectors can also be used for energy separation and counting. With the aid of an amplifier, the gamma radiation-generated signals in the NaI (TI) detector are strengthened and shaped to offer the proper energy separation. The Multi-Channel Analyzer (MCC), which has 16384 channels, each of which represents an energy, receives the signal from the amplifier and transforms it into digital form. The analyzers digitally transformed data is shown as a spectrum on the screen. The high-voltage unit supplies power to the system [22, 23]. As seen in Figure 3, it will be ensured that the sample is equally spaced from the source and the detector during the trials.

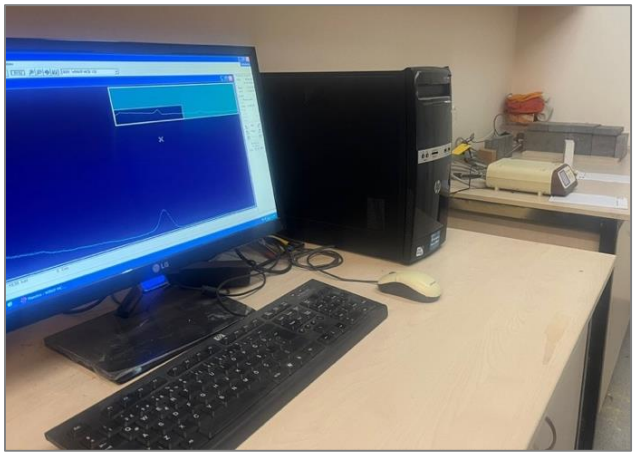


Figure 3. Schematic and real images of the detector and electronic devices that make up the gamma spectroscopy system (Gama spektroskopisi sistemini oluşturan dedektör ve elektronik cihazların şematik ve gerçek görüntüleri)

All concretes were measured using the same reference measurement. After that, the samples were positioned between the detector and the source. Concrete radiation absorption coefficients were determined using ^{137}Cs and ^{60}Co radioactive sources in tests conducted at 662 keV, 1173 keV, and 1332 keV energies. In the experiments, it will be ensured that the sample is at an equal distance between the source and the detector, as shown in Figure 4.

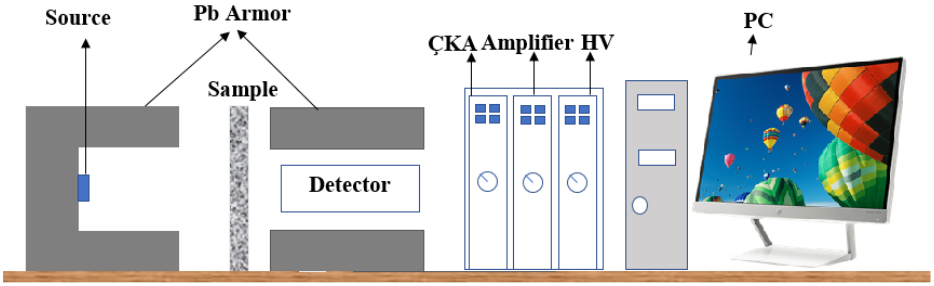


Figure 4. Detector and electronic devices that make up the gamma spectroscopy system (Gama spektroskopisi sistemini oluşturan dedektör ve elektronik cihazlar)

The linear attenuation coefficient (μ) is the probability of radiation interaction with a material per unit path length. The mass attenuation coefficient (μ/ρ) is the probability of all types of interactions (photoelectric, Compton, and pair production) per unit mass density. Parameters such as effective atomic number, effective electron density, half-value layer (HVL), mean free path (MFP), and X-ray and gamma-ray transmission factors can be calculated using the mass attenuation coefficient [24].

$$\frac{\mu}{\rho} = \left(-\frac{1}{\rho x}\right) \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (3)$$

Where x is the thickness of the absorbing material, I_0 and I represent the initial radiation intensity and transmission, respectively.

The total mass attenuation coefficient (μ_{total}) is the aggregate of the attenuation coefficients for photoelectric absorption, Compton scattering, and pair production for a particular energy photon [25].

$$\mu_{total} = \mu_{photoelectric} + \mu_{compton} + \mu_{pair-production} \quad (4)$$

Half-value layer (HVL) is the thickness of radiation shielding required to reduce the radiation intensity by half compared to the initial radiation intensity. Meanwhile, Tenth-value layer (TVL) is the thickness of radiation shielding required to reduce the radiation intensity by one-tenth compared to the initial radiation intensity. Both parameters can be calculated using the equation [26]:

$$HVL = \ln 2/\mu \quad (5)$$

$$TVL = \ln 10/\mu \quad (6)$$

Mean free path (MFP) is a concept used to measure the average distance traveled by particles or photons in a medium before they interact or collide with other particles. Low-energy photons lose their

energy over shorter distances, while high-energy photons require longer distances. This parameter is defined as a statistical measure used to describe how often particles or photons will interact in a specific medium. MFP can be calculated using the value of the linear attenuation coefficient [27]:

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad (7)$$

WinXCOM was established to calculate photon interaction cross-sections and mass attenuation coefficients for different combinations of elements, compounds, or mixtures across energy levels ranging from 1 keV to 100 GeV. This popular and widely used tool was recently converted to the Windows platform. Many people have now modified this standalone program to run in the Windows environment. For an energy grid set at standard values with points roughly logarithmically separated, or for a user-specified grid, WinXCom can produce cross-sections or attenuation coefficients. In addition to providing complete mass attenuation coefficients for compounds, it also presents partial cross-sections for pair production, coherent scattering, incoherent scattering, and photoelectric absorption. Additionally, as total attenuation coefficients are frequently employed in gamma-ray transport calculations, they provide these without the contribution of coherent scattering.

2. RESULTS (BULGULAR)

In this study, experiments were carried out on 3 samples from each series. The density values of the produced samples are given in Figure 5.

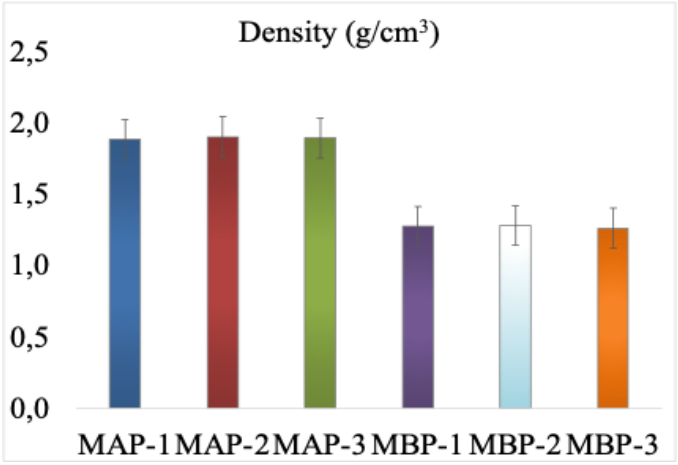


Figure 5. Density values of samples (Numunelerin yoğunluk değerleri)

Kilincarslan et al. (2018) [14] produced foam concrete with Portland cement using Isparta-Karakaya pumice. They obtained the 28-day compressive strength values of the foam concretes with a density of 0.551 g/cm^3 as 8 MPa and the thermal conductivity values as 0.14 W/ mK.

Concrete radiation shielding coefficients were determined using ^{137}Cs and ^{60}Co radioactive sources in tests conducted at 662 keV, 1173 keV, and 1332 keV energies. The radiation retention coefficient values of the samples are given in Figure 6.

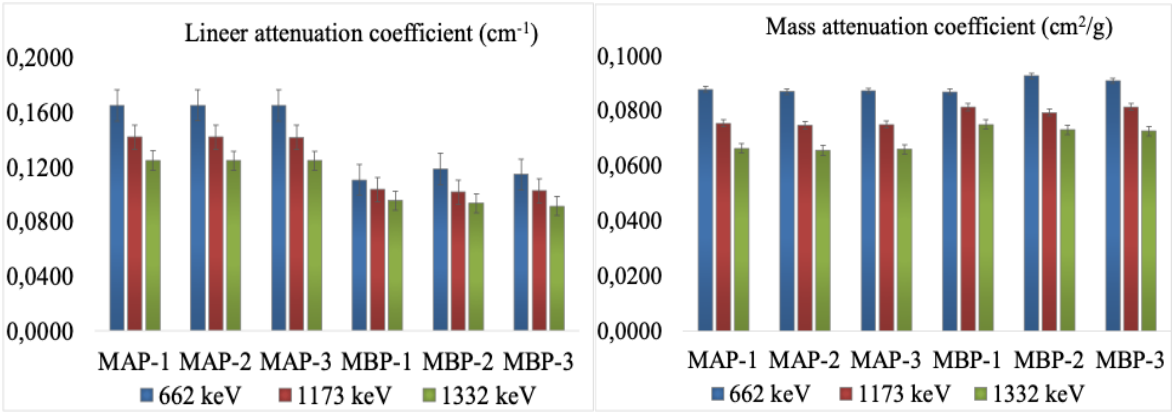


Figure 6. Lineer and mass attenuation coefficient values of samples (Numunelerin doğrusal ve kütle zayıflama katsayısı değerleri)

The findings in the table compare the linear and mass attenuation coefficients of MAP and MBP materials at different energies (662 keV, 1173 keV, and 1332 keV) and reveal the radiation attenuation performances of these materials. In terms of linear attenuation coefficient, it is observed that MAP has higher values compared to MBP at all energies. MAP, which shows a higher linear attenuation coefficient of 44% at 662 keV, 38% at 1173 keV, and 33% at 1332 keV, contributes to the absorption of photons. However, this difference decreases as the energy increases, i.e., the superiority of MAP for high-energy photons decreases relatively. The main reason for this is that the probability of high-energy photons interacting with the material decreases, and they can penetrate deeper. On the other hand, when evaluated in terms of mass attenuation coefficient, it is observed that MBP has higher values compared to MAP. With a higher mass attenuation coefficient of 3% at 662 keV, 7.5% at 1173 keV, and 11.5% at 1332 keV, MBP shows more radiation attenuation per unit mass. This indicates that MBP is advantageous in terms of low density while maintaining a relatively strong attenuation capacity. The fact that the mass attenuation advantage of MBP increases as the energy increases indicates that this material can be an effective option for high-energy photons.

In many different applications, radiation concrete is essential for preventing damaging ionizing radiation [28,29]. It is an essential component of reactor containment buildings, spent fuel storage, and waste disposal facilities in nuclear power plants, and it is vital for protecting both the environment and employees. To provide a secure environment for patients, employees, and guests, medical facilities also use radiation shielding concrete to construct the walls, floors, and ceilings of diagnostic imaging and radiation therapy rooms [30]. Additionally, it is necessary for industrial radiography facilities, which allow for safe non-destructive testing in the construction, automotive, and aerospace industries [31, 32]. Radiation shielding concrete is essential to the safety and compliance of research labs that work with radioactive materials. It is used by the military in command centers and bunkers to shield equipment and people from nuclear threats. By isolating radioactive materials in nuclear waste storage, radiation shielding concrete stops radiation from seeping into the surrounding environment [33]. Additionally, it protects employees when handling and producing medicinal isotopes in radiopharmaceutical manufacturing. All things considered, radiation-shielding concrete is essential for maintaining safety and legal compliance while promoting the advantageous application of radiation in various industries. HVL and TVL values of the sample are given in Figure 7, and MFP values are given in Figure 8. In Figures 7 and 8, the first three bars show MAP values and the last three bars show MBP values.

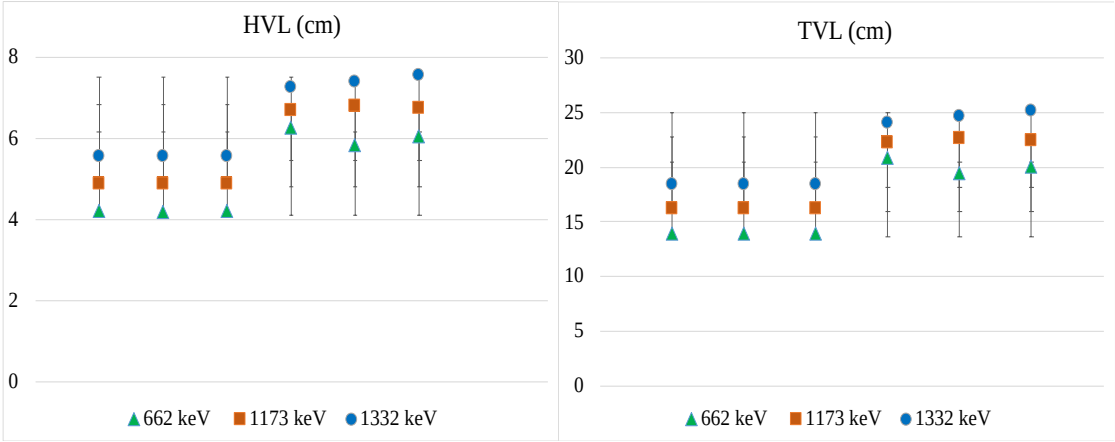


Figure 7. HVL and TVL values of the samples at 662 keV, 1173 keV and 1332 keV energies (662 keV, 1173 keV ve 1332 keV enerjilerindeki numunelerin HVL ve TVL değerleri)

When the HVL and TVL values are evaluated, it is seen that both the HVL and TVL values of the MBP material are higher than those of MAP at all energies. For example, at 662 keV, the HVL for MAP is 4.20 cm, while it is 6.05 cm for MBP, meaning that the half-value thickness of MBP is 44% higher than that of MAP. Similarly, at 1332 keV, the HVL for MAP is 5.56 cm, while it is 7.42 cm for MBP, indicating that MBP requires more thickness. A similar trend is observed in terms of TVL values; at 662 keV, the TVL value of MAP is 13.95 cm, while it is 20.12 cm for MBP, indicating that MBP requires 44% more thickness than MAP to reduce the radiation to one-tenth.

These results show that MAP is a better attenuator compared to MBP, that is, it absorbs more radiation with less material. The difference is more pronounced, especially at low energies, and it is seen that the difference decreases as the energy increases. While the difference between MAP and MBP decreases at 1332 keV, it is still understood that MAP is a better attenuator. These findings show that MAP is a more advantageous material for effective protection with a thinner layer in radiation shielding applications, but MBP can also be considered if other factors, such as lightness or cost, come into play. The MFP values obtained in the study are given in Figure 8.

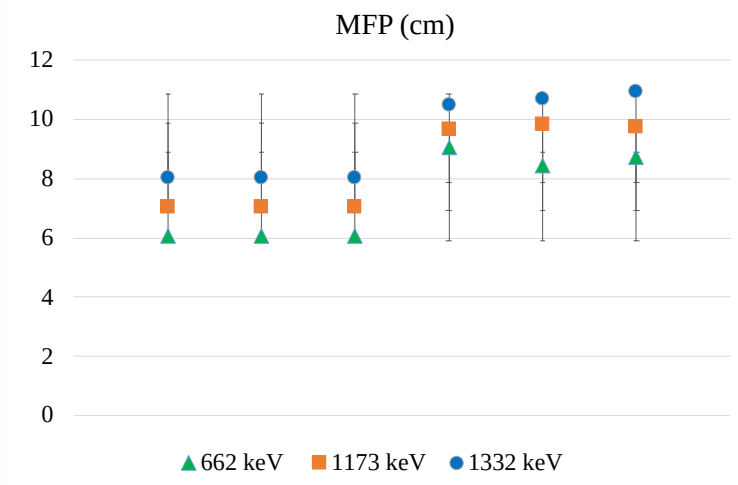
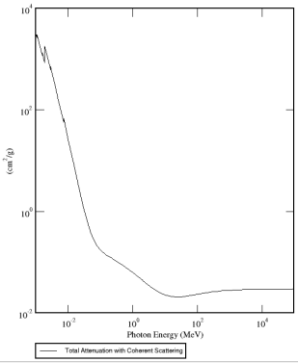


Figure 8. MFP values of the samples at 662 keV, 1173 keV and 1332 keV energies (662 keV, 1173 keV ve 1332 keV enerjilerindeki numunelerin MFP değerleri)

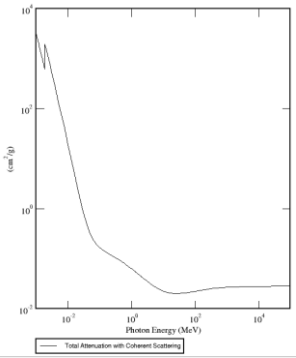
Mean free path values at 662 keV energy are on average 6.059037 in MAP samples and 7.661328 in MBP samples. Mean free path values at 1173 keV energy are on average 7.050643 in MAP samples and 8.885692 in MBP samples. Mean free path values at 1332 keV energy are on average 8.021529 in MAP samples and 10.703606 in MBP samples. The difference between MAP and MBP samples is also clearly seen in the Mean Free Path (MFP) values. MFP shows how far photons can travel in a material without colliding and expresses the permeability of the material to the photon beam. At 662 keV, 1173 keV, and 1332 keV, the MFP values of the MAP sample are lower than those of the MBP sample at each energy level. For example, at 662 keV, the MFP value of the MAP sample is 6.059037, while that of the MBP sample is 7.661328. This indicates that the MAP sample causes photons to collide at shorter distances; therefore, the photons are absorbed more quickly in the material. It is observed that MFP values increase as energy increases in both samples. This is related to the fact that as photon energy increases, photons are attenuated less in the material and can travel longer distances. In general, the MBP sample allows photons to travel longer distances than the MAP sample because the MFP values of the MBP are higher at each energy level. This means that the MBP has a lower attenuation of the photon beam, and the photons are free to move in this material for a longer time. The MAP sample, on the other hand, has shorter MFP values, which means that the photons attenuate more quickly and collide at shorter distances.

The values obtained at 662 keV, 1173 keV, and 1332 keV energies, because of entering the data into the WinxCOM program output examples are given in Figure 9 for the MAP sample and Figure 10 for the MBP sample.



Edge	(required) Photon Energy	Scattering		Photoelectric Absorption	Pair Production		Total Attenuation	
		Coherent	Incoherent		In Nuclear Field	In Electron Field	With Coherent Scattering	Without Coherent Scattering
	MeV	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g
	6.620E-01	2.913E-04	7.639E-02	7.941E-05	0.000E+00	0.000E+00	7.676E-02	7.647E-02
	1.173E+00	9.298E-05	5.826E-02	2.281E-05	1.017E-05	0.000E+00	5.838E-02	5.829E-02
	1.332E+00	7.212E-05	5.457E-02	1.833E-05	6.014E-05	0.000E+00	5.472E-02	5.465E-02

Figure 9. WinxCOM mass attenuation coefficient values of the MAP sample at 662 keV, 1173 keV and 1332 keV energies (MAP örneğinin 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV enerjilerindeki WinxCOM kütle zayıflama katsayısı değerleri)



Edge	(required) Photon Energy	Scattering		Photoelectric Absorption	Pair Production		Total Attenuation	
		Coherent	Incoherent		In Nuclear Field	In Electron Field	With Coherent Scattering	Without Coherent Scattering
	MeV	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g
	6.620E-01	2.555E-04	7.697E-02	4.769E-05	0.000E+00	0.000E+00	7.727E-02	7.702E-02
	1.173E+00	8.152E-05	5.869E-02	1.362E-05	9.405E-06	0.000E+00	5.880E-02	5.872E-02
	1.332E+00	6.322E-05	5.498E-02	1.099E-05	5.596E-05	0.000E+00	5.511E-02	5.504E-02

Figure 10. WinxCOM mass attenuation coefficient values of the MBP sample at 662 keV, 1173 keV and 1332 keV energies (MBP örneğinin 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV enerjilerindeki WinxCOM kütle zayıflama katsayısı değerleri)

The mass attenuation coefficient values of the MAP samples obtained according to the experimental and XCOM analysis results are given in Figure 11, and the mass attenuation coefficient values of the MBP samples are shown in Figure 12.

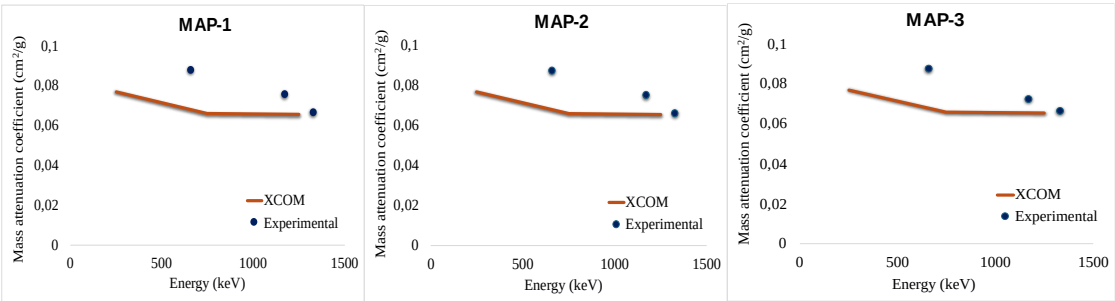


Figure 11. Experimental and XCOM values of the MAP sample (MAP örneğinin deneysel ve XCOM değerleri)

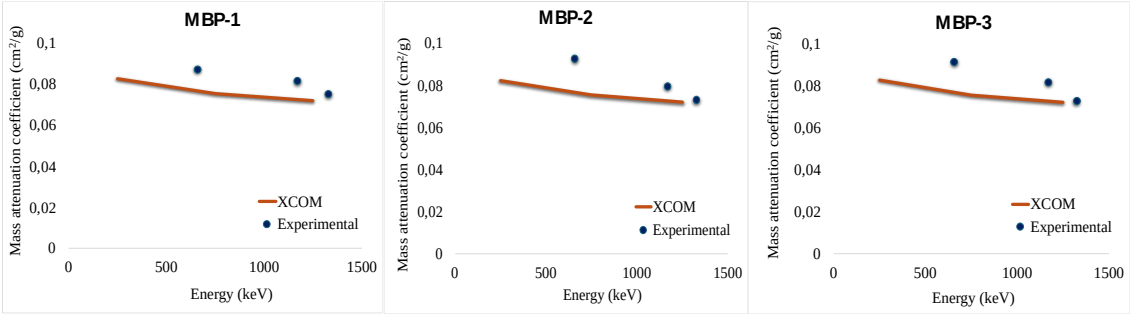


Figure 12. Experimental and XCOM values of the MBP sample (MBP örneğinin deneysel ve XCOM değerleri)

It is observed that the experimental results are slightly higher than the XCOM values at all energy levels (662 keV, 1173 keV, and 1332 keV). For example, for MAP 1, the experimental value at 662 keV is 0.0878 while the XCOM value is 0.07676, which is approximately 14.4% higher than the experimental measurement. Similarly, at 1173 keV, the experimental value is 0.0754 while the XCOM is 0.0659, which is also approximately 14.4% higher. At 1332 keV, the difference decreases to 1.2%. Similar trends are also valid for MAP 2 and MAP 3. The experimental value of MAP 2 at 662 keV is 0.0869, which is 13.2% higher than XCOM, but this difference decreases to 0.5% at 1332 keV. The same trend continues for MAP 3, there is a difference of 13.6% at 662 keV, decreasing to 0.5% at 1332 keV. These findings show that the experimental results are higher than the XCOM calculations at low energies, but the difference decreases as the energy increases. In general, it was determined that there is a good agreement between the XCOM data and the experimental findings.

The results of this study suggest that both MAP and MBP concretes possess unique properties that make them suitable for specific industrial applications. MAP concretes, which demonstrate high radiation shielding capacity, are particularly promising for use in nuclear facilities, medical radiology rooms, and research laboratories where exposure to gamma and X-ray radiation is a critical concern. Their ability to attenuate radiation efficiently, combined with satisfactory mechanical performance, ensures both safety and structural integrity in such environments. On the other hand, MBP concretes, incorporating lightweight aggregates such as pumice, offer reduced density while maintaining adequate mechanical properties. These characteristics make MBP concretes ideal for applications where weight reduction is advantageous, such as in high-rise buildings, long-span structures, or modular construction. The reduced dead load can lead to lower structural demands, cost savings, and improved seismic performance, all while maintaining environmental benefits due to the use of sustainable aggregates. Overall, the selection between MAP and MBP concretes should consider both functional requirements such as radiation shielding versus lightweight structural performance and environmental and economic factors. These insights highlight the versatility of MOC-based concretes and point to opportunities for further optimization in industrial applications.

3. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In conclusion, the findings of this study provide a comprehensive comparison of the radiation attenuation properties of MAP and MBP materials at different photon energies, highlighting their respective advantages in radiation shielding applications. The linear attenuation coefficient analysis demonstrates that MAP exhibits superior photon absorption capabilities compared to MBP across all energy levels, with the difference being more pronounced at lower energies. This indicates that MAP is a more effective shielding material for lower-energy photons, where the probability of interaction is higher. However, as photon energy increases, the difference between MAP and MBP decreases, suggesting that high-energy photons penetrate both materials more easily, reducing MAPs relative advantage. In contrast, the mass attenuation coefficient results reveal that MBP performs better than MAP in terms of radiation attenuation per unit mass, particularly at higher energies. This suggests that MBP could be a more efficient choice when material density or weight reduction is a key consideration, making it potentially advantageous in applications where lightweight shielding is required.

The HVL and TVL values further reinforce these observations by showing that MBP requires greater thickness than MAP to achieve the same level of radiation attenuation. At all photon energies, both HVL and TVL values for MBP are higher than those of MAP, emphasizing that MAP is a more effective attenuator, requiring less material to achieve the

desired shielding effect. This property makes MAP a preferable option in scenarios where space and material efficiency are critical. However, the increasing HVL and TVL differences at higher energies also indicate that MBP's relative effectiveness improves as energy increases. The MFP results also align with these trends, as MAP consistently exhibits lower MFP values than MBP, confirming that photons travel shorter distances before undergoing interactions in MAP. This indicates that MAP can attenuate photons over a shorter distance, further confirming its effectiveness as a shielding material. On the other hand, MBP 's higher MFP values indicate that it allows photons to travel longer distances without interactions, making it less effective for shielding but potentially suitable for other applications where controlled photon transmission is required.

Additionally, the comparison between experimental and XCOM data reveals a consistent trend where experimental attenuation values are slightly higher than XCOM predictions, particularly at lower energies. Despite these differences, the overall agreement between experimental and XCOM data suggests that theoretical models provide reliable estimates for attenuation coefficients, with experimental validation offering valuable refinements. Overall, these findings highlight that acidic pumice is a highly effective material for radiation shielding, especially in applications requiring compact, high-performance barriers. However, basic pumice remains a viable alternative in applications where material density and weight considerations play a crucial role. The study highlights the importance of selecting shielding materials based on specific application needs, energy levels, and practical constraints, ensuring optimal radiation protection in various scenarios.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***Şemsettin KILINÇARSLAN*:** He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

***Yasemin ŞİMŞEK TÜRKER*:** He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

***Nuri IŞILDAR*:** He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Jankovský O, Lojka M, Lauermannová AM, Antonc˘ík F, Pavlíková M, Pavlík Z, Sedmidubský D, Carbon dioxide uptake by MOC-based materials, Appl. Sci. 2020; 10: 2254.

[2] Chen X, Zhang T, Bi W, Cheeseman C. Effect of tartaric acid and phosphoric acid on the water resistance of magnesium oxychloride (MOC) cement, Constr. Build. Mater. 2019; 213: 528-536.

[3] Jin YJ, Xiao LG, Luo F. Influence of calcium added slag on the strength and water-repellency of magnesium oxychloride cement, Appl. Mech. Mater. 2013; 278-280: 437-439.

[4] Huang Q, Zheng W, Xiao X, Dong J, Wen J, Chang C. Effects of fly ash, phosphoric acid, and nano-silica on the properties of magnesium oxychloride cement. Ceramics International. 2021; 47: 34341–34351.

[5] Guo Y, Zhang Y, Soe K, Pulham M. Recent development in magnesium oxychloride cement. Structural Concrete. 2018; 19(5): 1290–1300.

[6] He P, Poon CS, Tsang DC. Using incinerated sewage sludge ash to improve the water resistance of magnesium oxychloride cement (MOC). Construction and Building Materials. 2017; 147: 519–524.

[7] Madani H, Norouzifar MN, Rostami J. The synergistic effect of pumice and silica fume on the durability and mechanical characteristics of eco-friendly concrete. Construction and Building Materials. 2018; 174: 356–368.

[8] Szabó R, Kristaly F, Nagy S, Singla R, Mucsi G, Kumar S. Reaction, structure and properties of

eco-friendly geopolymer cement derived from mechanically activated pumice. Ceramics International. 2023; 49(4): 6756–6763.

[9] Deniz V, Umucu Y, Yılmaz İ. Evaluation of Jig Performances in Pumice Enrichment Plant of Industrial Minerals Inc. In: Akar A, Seyrankaya A, editors. 5th Industrial Raw Materials Symposium; 2004; Izmir, Turkey. p. 307–312.

[10] Bınıcı H, Durgun MY, Rızaoğlu T, Koluçolak M. Investigation of durability properties of concrete pipes incorporating blast furnace slag and ground basaltic pumice as fine aggregates. Scientia Iranica. 2012; 19(3): 366–372.

[11] Tapan M, Depci T, Özvan A, Efe T, Oyan V. Effect of physical, chemical and electro-kinetic properties of pumice on strength development of pumice blended cements. Materials and Structures. 2013; 46: 1695–1706.

[12] Hossain KMA, Properties of volcanic pumice-based cement and lightweight concrete. Cement and Concrete Research, 2004; 34: 2, 283-291.

[13] Kilincarslan Ş, Davraz M, Akça M. The effect of pumice as aggregate on the mechanical and thermal properties of foam concrete, Arab. J. Geosci. 2018; 11: 1-6.

[14] Kilinçarslan Ş, Davraz M, Akça M. Investigation of the properties of pumice aggregate foam concretes, J. Eng. Sci. 2018; 6 (1): 148-153.

[15] Ersoy B, Sariisik A, Dikmen S, Sariisik G. Characterization of acidic pumice and determination of its electrokinetic properties in water, Powder Technol. 2010; 197 (1-2): 129-135.

[16] Yücel HE, Öz HÖ, Güneş M. The effects of acidic and basic pumice on physico-mechanical and durability properties of self-compacting concretes, Green Build. Constr. Econ. 2020; 21-36.

[17] Öz HÖ. Properties of pervious concretes partially incorporating acidic pumice as coarse aggregate, Constr. Build. Mater. 2018; 166: 601-609.

[18] Soleimani A, Mahvi AH, Yaghmaeian K, Abbasnia A, Sharafi K, Alimohammadi M, Zamanzadeh M. Effect of modification by five different acids on pumice stone as natural and low-cost adsorbent for removal of humic acid from aqueous solutions-Application of response surface methodology. J Mol Liq. 2019; 290: 111181.

[19] Çifçi Dİ, Meriç S. A review on pumice for water and wastewater treatment. Desal Water Treat. 2016; 57(39): 18131–18143.

[20] Tanyıldızı M, Gökalp İ. Utilization of pumice as aggregate in the concrete: A state of art. Constr Build Mater. 2023; 377: 131102.

[21] Gündüz L, Sarıışık A, Tozaçan B, Davraz M, Uğur İ, Çankıran O. Pumice Technology (Pumice Characterization). Isparta; 1998. p. 285.

[22] Akkurt I, Akyıldırım H, Mavi B, Kilincarslan S, Basyigit C. Photon attenuation coefficients of concrete includes barite in different rate. Ann Nucl Energy. 2010a; 37(7): 910–914.

[23] Akkurt I, Akyıldırım H, Mavi B, Kilincarslan S, Basyigit C. Radiation shielding of concrete containing zeolite. Radiat Meas. 2010b; 45(7): 827–830.

[24] Tellili B, Elmahroug Y, Souga C. Investigation on radiation shielding parameters of cerrobend alloys. Nucl Eng Technol. 2017; 49(8): 1758–1771.

[25] Alsaab AH, Zeghib S. Analysis of X-ray and gamma ray shielding performance of prepared polymer micro-composites. J Radiat Res Appl Sci. 2023; 16(4): 100708.

[26] Gunoglu K, Akkurt I. Radiation shielding properties of concrete containing magnetite. Prog Nucl Energy. 2021; 137: 103776.

[27] Matori KA, Sayyed MI, Sidek HAA, Zaid MHM, Singh VP. Comprehensive study on physical, elastic and shielding properties of lead zinc phosphate glasses. J Non-Cryst Solids. 2017; 457: 97–103.

[28] Ban CC, Khalaf MA, Ramli M, Ahmed NMA, Ahmad MS, Ali AMA, et al. Modern heavyweight concrete shielding: principles, industrial applications and future challenges; review. J Build Eng. 2021; 39: 102290.

[29] Kanagaraj B, Anand N, Andrushia AD, Naser MZ. Recent developments of radiation shielding concrete in nuclear and radioactive waste storage facilities – a state-of-the-art review. Constr Build Mater. 2023; 404: 133260.

[30] Al-Buriahi MS, Alzahrani JS, Alrowaili ZA, Olarinoye IO, Sriwunkum C. Recycling of waste cathode-ray tube glasses as building materials for shielding structures in medical and nuclear facilities. Constr Build Mater. 2023; 376: 131029.

[31] Zayed M, El Khayatt AM, Petrounias P, Shahien MG, Mahmoud KA, Rashad AM, et al. From discarded waste to valuable products: barite combination with chrysotile mine waste to produce radiation-shielding concrete. Constr Build Mater. 2024; 417: 135334.

[32] Zhang P, Wittmann FH, Zhao T, Lehmann EH, Vontobel P. Neutron radiography, a powerful method to determine time-dependent moisture distributions in concrete. Nucl Eng Des. 2011; 241: 4758–4766.

[33] Wisnubroto DS, Zamroni H, Sumarbagiono R, Nurliati G. Challenges of implementing the policy and strategy for management of radioactive waste and nuclear spent fuel in Indonesia. Nucl Eng Technol. 2021; 53: 549–561.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1253-1260 (2025)

Time-Series Forecasting of the Pazarcık Earthquake Using LSTM, Transformer and RNN Models

Seda ŞAHİN[1,*] Emine ÇANKAYA[2]

[1] *Assist. Prof. Dr., Çankırı Karatekin University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, 18100, Çankırı, Turkey*
[2] *Bsc., Çankırı Karatekin University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, 18100, Çankırı, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 26/08/2025
Revision: 20/09/2025
Accepted: 22/09/2025

Keywords

Earthquake Prediction, Deep Learning, LSTM, Transformer, RNN, Seismic Time-Series

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 26/08/2025
Düzeltme: 20/09/2025
Kabul: 22/09/2025

Anahtar Kelimeler

Deprem Tahmini, Derin Öğrenme, LSTM, Transformer, RNN, Sismik Zaman Serisi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study investigates deep learning models (LSTM, Transformer, RNN) for earthquake time-series forecasting using USGS teleseismic data (Figure 2). LSTM Transformer+RNN achieved highest accuracy (R^2=0.9999987) for seismic waveform prediction following Pazarcık earthquake. / Bu çalışma, USGS telesismik verileri kullanarak deprem zaman serisi tahmini için derin öğrenme modellerini (LSTM, Transformer, RNN) araştırmaktadır (Figure 2). LSTM Transformer+RNN, Pazarcık depremi sonrası sismik dalga formu tahmini için en yüksek doğruluğu (R^2=0.9999987) elde etmiştir.



Figure 2. *General diagram of the study (Çalışmanın genel diyagramı)*

Highlights (Önemli noktalar)

- *LSTM Transformer+RNN model achieved superior performance with MSE of 3.5691×10^{-9} and R^2 score of 0.9999987 for earthquake time-series forecasting. / LSTM Transformer+RNN modeli, deprem zaman serisi tahmini için 3.5691×10^{-9} MSE ve 0.9999987 R^2 skoru ile üstün performans elde etti.*
- *Global broadband teleseismic dataset from USGS containing 1000 seismic records was utilized for comprehensive model training and validation. / Kapsamlı model eğitimi ve doğrulama için 1000 sismik kayıt içeren USGS küresel geniş bant telesismik veri seti kullanıldı.*
- *Novel integration of Transformer architecture with LSTM and RNN demonstrates effectiveness in capturing long-range dependencies in seismic data. / Transformer mimarisinin LSTM ve RNN ile yeni entegrasyonu, sismik verilerdeki uzun menzilli bağımlılıkları yakalamada etkinlik gösterdi.*
- *Results provide significant implications for earthquake early warning systems and real-time seismic monitoring applications. / Sonuçlar, deprem erken uyarı sistemleri ve gerçek zamanlı sismik izleme uygulamaları için önemli çıkarımlar sunmaktadır.*

Aim (Amaç): *To develop and evaluate deep learning models for earthquake time-series forecasting using global teleseismic data, specifically analyzing the Pazarcık earthquake sequence. / Küresel telesismik verileri kullanarak deprem zaman serisi tahmini için derin öğrenme modelleri geliştirmek ve değerlendirmek, özellikle Pazarcık deprem dizisini analiz etmek.*

Originality (Özgünlük): *This study presents the first comprehensive comparison of LSTM, Transformer, and hybrid architectures for earthquake waveform prediction using global USGS teleseismic data. / Bu çalışma, küresel USGS telesismik verileri kullanarak deprem dalga formu tahmini için LSTM, Transformer ve hibrit mimarilerin ilk kapsamlı karşılaştırmasını sunmaktadır.*

Results (Bulgular): *LSTM Transformer+RNN model achieved the lowest error rates (MSE: 3.5691×10^{-9}, MAE: 4.5421×10^{-5}) and highest accuracy (R^2: 0.9999987) among tested architectures. / LSTM Transformer+RNN modeli, test edilen mimariler arasında en düşük hata oranlarını (MSE: 3.5691×10^{-9}, MAE: 4.5421×10^{-5}) ve en yüksek doğruluğu (R^2: 0.9999987) elde etti.*

Conclusion (Sonuç): *The hybrid LSTM Transformer+RNN architecture demonstrates superior capability for seismic waveform prediction, offering promising applications for earthquake early warning systems. / Hibrit LSTM Transformer+RNN mimarisi, sismik dalga formu tahmini için üstün yetenek göstererek deprem erken uyarı sistemleri için umut verici uygulamalar sunmaktadır.*

*Corresponding author, e-mail: sedasahin@karatekin.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1772273

GU J Sci, Part C, 13(3): 1253-1260 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Time-Series Forecasting of the Pazarcık Earthquake Using LSTM, Transformer and RNN Models

Seda ŞAHİN[1,*] Emine ÇANKAYA[2]

[1] *Assist. Prof. Dr., Çankırı Karatekin University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, 18100, Çankırı, Turkey*
[2] *Bsc., Çankırı Karatekin University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, 18100, Çankırı, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 26/08/2025
Revision: 20/09/2025
Accepted: 22/09/2025

Keywords

Earthquake Prediction, Deep Learning, LSTM, Transformer, RNN, Seismic Time-Series

Abstract

The Earth's internal structure and mitigating seismic hazards are significant for understanding earthquake prediction and seismic wave analysis. In this study, we studied with different deep learning models for earthquake time series prediction using Broadband Teleseismic Data from the USGS database. This dataset consists of 1000 seismic records in SAC format with long-period seismic waves from global earthquakes. This study aimed to test LSTM and RNN models with LSTM Transformer to predict the next time step based on previous seismic waves. In this study, model performances was evaluated with Mean Square Error (MSE), Mean Absolute Error (MAE) and R^2 Score. In conclusion, the LSTM Transformer+RNN model achieves the lowest error rates and presents its effectiveness in learning both short-term dependencies and long-term correlations in seismic data. At the same time, this study can also contribute to the advancement of deep learning applications in seismology and the improvement of the prediction capabilities of earthquake monitoring systems.

LSTM, Transformer ve RNN Modellerini Kullanarak Pazarcık Depreminin Zaman Serisi Tahmini

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 26/08/2025
Düzeltme: 20/09/2025
Kabul: 22/09/2025

Anahtar Kelimeler

Deprem Tahmini, Derin Öğrenme, LSTM, Transformer, RNN, Sismik Zaman Serisi

Öz

Dünya'nın iç yapısını anlamak ve sismik tehlikeleri azaltmak için deprem tahmini ve sismik dalga analizlerinin yapılması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, USGS veritabanından elde edilen Geniş Bant Teleseismik Veriler kullanılarak deprem zaman serisi tahmini için farklı derin öğrenme modelleri uygulanmıştır. Veri seti, küresel depremlerden gelen uzun dönemli sismik dalgaları yakalayan 1000 adet SAC formatında sismik kayıttan oluşmaktadır. Çalışmanın amacı, önceki sismik dalgaları temel alarak bir sonraki zaman adımını tahmin etmek için LSTM, LSTM-Transformer ve LSTM-Transformer-RNN modellerinin performansını karşılaştırmaktır. Model performansları, Ortalama Karesel Hata (MSE), Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve R^2 skoru kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, LSTM-Transformer-RNN modelinin en düşük hata oranlarına ulaştığını ve sismik verilerde hem kısa vadeli bağımlılıkları hem de uzun vadeli korelasyonları öğrenmede etkin olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, derin öğrenme uygulamalarının sismolojide ilerlemesine ve deprem izleme sistemlerinin tahmin yeteneklerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Earthquakes are disasters that cause major destructive disasters with seismic signals caused by sudden ground oscillations [1]. On February 6, 2023, at 04:17 local time, a devastating earthquake with a magnitude of 7.7 struck Kahramanmaraş, Turkey. Approximately nine hours later, another 7.6-magnitude earthquake occurred in the same region, followed by over 1,000 aftershocks, some exceeding magnitude 6. According to official reports from AFAD and USGS, these earthquakes are among the most destructive in Turkey's history,

*Corresponding author, e-mail: sedasahin@karatekin.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1772273

causing severe damage with over 50,000 casualties and hundreds of thousands of injuries [2,3].

The global significance of this problem is further highlighted by similar large-scale earthquakes, such as the 2011 Tōhoku earthquake in Japan (Mw 9.0) and the 2010 Maule earthquake in Chile (Mw 8.8), both of which resulted in severe human and economic losses [4,5]. These events demonstrate the universal need for more accurate prediction methods. Traditional approaches for earthquake magnitude prediction are based on physical models and statistical methods; however, these techniques often have difficulty capturing nonlinear and complex patterns in seismic activities. Recent advancements in deep learning have introduced more robust predictive models capable of learning from large-scale seismic datasets. In particular, Recurrent Neural Networks (RNNs) and Transformer-based architectures can give promising results in capturing temporal dependencies in seismic signals.

This study contributes to the literature by utilizing Broadband Teleseismic Data obtained from the USGS to train deep learning-based regression models for earthquake magnitude prediction. Unlike prior studies that rely on region-specific data or shallow learning methods, our approach leverages a global dataset and advanced architectures, thereby offering improved generalization and accuracy in magnitude estimation.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

In this study, we used a dataset of seismic waveforms recorded during the Mw 7.8 Pazarcık earthquake on February 6, 2023, consisting of 1,000 SAC-formatted seismic records obtained from the USGS, primarily collected through the Global Seismographic Network (GSN) and selected ANSS stations were used in this study [6]. It was in SAC (Seismic Analysis Code) format which includes broadband teleseismic waveforms and the SAC files contain time-series data representing ground motion with metadata such as station information, sampling rate and the details of events.

2.1. DATASET AND PREPROCESSING
(Veriseti ve Önişleme)

The raw seismic data were preprocessed to remove noise and normalize the amplitude values. A band-pass filter (0.1 Hz to 1.0 Hz) was applied to eliminate low-frequency and high-frequency noise. Then, the MinMaxScaler from the scikit-learn library was used to normalize to ensure that all values were scaled between 0 and 1. This normalization step is crucial for improving the convergence of the deep learning model during training.

In this study, all measurements and data are processed using the International System of Units (SI). The parameters of the data used in the study are given in the Table 1. The seismic data, which are read from the SAC files, are represented in amperes per meter (A/m) for magnetic field strength and teslas (T) for magnetic flux density. The time-series data extracted from the seismic recordings are normalized using the MinMaxScaler, where the data values are scaled between 0 and 1. The deep learning models (LSTM, RNN) use these normalized data for training and prediction and the evaluation metrics (e.g., Mean Squared Error - MSE, Mean Absolute Error - MAE) are computed without changing units, as the data is already normalized. For data storage, both SI and English units are used when required (e.g., "10 Gb/cm² (100 Gb/in²)").

Table 1. Key parameters of the seismic dataset (Sismik verisetindeki anahtar parametreler)

Parameter	Value
Network	IU
Station	MACI
Location	00
Channel	BH2
Start Time	2023-02-06T01:17
End Time	2023-02-06T02:07
Sampling Rate	40.0Hz
Sample Interval	0.025 seconds
Number of samples	120,000
Calibration Factors	1.0
Station Latitude	28.2502°
Station Longitude	-16.5082°
Station Elevation	1674.0 meters
Component Azimuth	81.0°
Component Inclination	90.0°

For the seismic data processing, the Matplotlib library is used for visualization of the seismic waveforms, where the plots are saved in PNG format which is represented in Figure 1.

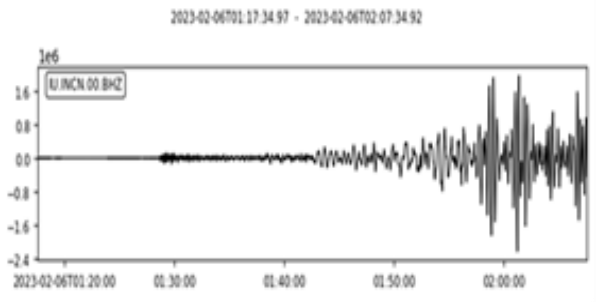


Figure 1. *Sample seismic waveforms with PNG format (PNG formatında örnek sismik dalga formları)*

Each plot corresponds to a seismic recording file and the output is stored in a specified directory. The training and testing of the machine learning models, such as LSTM and RNN are performed with input data in the form of 3D arrays (samples, time steps, features).

2.2. PROPOSED SYSTEM (Önerilen Sistem)

The overall framework of the proposed system is illustrated in Figure 2.) Three different deep learning architectures were implemented and compared in this study: LSTM, LSTM + Transformer and LSTM + Transformer+RNN. The details of each architecture are described below.

SAC data provided by the United States Geological Survey (USGS) is used in this study. This dataset consists of seismic waveform time series that represent ground motion generated by the Mw 7.8 Pazarcık earthquake. The dataset serves as the primary source for model training and evaluation. The proposed deep learning-based framework shows significant potential for improving earthquake magnitude prediction.

Furthermore, the evaluation results are presented in a comparative format, supported by quantitative metrics such as RMSE, MAE and R^2 which are summarized in Table 2. This comparative discussion highlights the relative strengths of different models and provides a clearer understanding of the performance improvements achieved.

Data Preprocessing (Densifying, Filtering, Normalization): Densifying: Filling in missing data or condensing the dataset. Filtering: Noisy or anomalous data is cleaned. Normalization: Scaled the data to a specific range (e.g. 0-1). Purpose: To make the data suitable for model training.

Model training: LSTM: Used to learn long dependencies in time series data. LSTM+Transformer: Used to capture both local (LSTM) and global (Transformer) dependencies and to use in time series data. RNN: Used for time series problems.

Model evaluation: MSE (Mean Squared Error): Measures how far the predictions are from the true values. MAE (Mean Absolute Error): Gives the absolute average of the prediction errors. R^2 (R-squared): It presents how well the model explains the data. Purpose: To compare the performance of the models quantitatively.

Results: LSTM Model: It achieved 2.669×10^{-9} MSE and 3.01×10^{-5} MAE values. LSTM + Transformer Model: It achieved 3.63×10^{-8} MSE, 1.20×10^{-4} MAE and 0.99999 R^2 score. LSTM Transformer+RNN Model: It recorded 3.57×10^{-9} MSE, 3.48×10^{-5} MAE and 0.999999 R^2 score.

The results indicate that hybrid models combining recurrent and transformer-based architectures can effectively capture complex patterns in seismic data. These findings highlight the substantial potential of deep learning approaches in earthquake magnitude estimation and contribute to advancing research in seismic prediction.

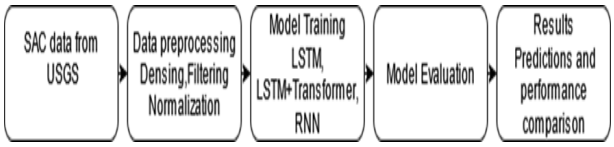


Figure 2. General diagram of the study (Çalışmanın genel diyagramı)

2.3. MODEL TRAINING AND EVALUATION (Model eğitimi ve değerlendirmesi)

In this study, the Adam optimizer with Mean Squared Error (MSE) as the loss function was used to train all models. Early stopping and learning rate reduction mechanisms were implemented to prevent overfitting to improve training efficiency: Early Stopping: It shows the validation loss and stops training if no improvement is observed for 5 consecutive epochs. ReduceLROnPlateau: It reduces the learning rate by a factor of 0.5 if the validation loss does not improve for 3 consecutive epochs. The data set of this study was split into training and testing sets as 80% of the data used for training and 20% for testing procedure. Each model was trained for a maximum of 50 epochs with a batch size of 32. The training process was presented using validation loss to ensure generalization. After training process, the models' performance was evaluated using the test dataset. As a result, the predicted values were compared to the actual

values, then the following performance metrics were calculated: Mean Absolute Error (MAE): It is the average absolute difference between predicted and actual values. Mean Squared Error (MSE): It is the the average squared difference between predicted and actual values. R^2 Score: It is the proportion of variance in the dependent variable that is predictable from the independent variable.

2.3.1. LSTM MODEL (LSTM modeli)

The LSTM model was designed to capture temporal dependencies in the seismic time-series data. The architecture consists of the following layers. Figure 3. shows the LSTM model architecture. Input Layer: It accepts input with shape (None, 20, 1), where 20 is the window size and 1 is the number of features. LSTM L1: 100 units with return_sequences=True. LSTM L2: 50 units with return_sequences=False. Dense Layer: A single unit for regression output. The total number of trainable parameters in this model is 71,051.

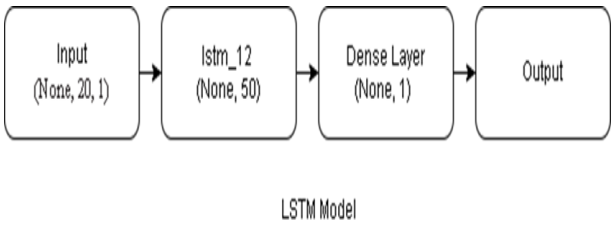


Figure 3. LSTM Diagram (LSTM diyagramı)

2.3.2. LSTM + TRANSFORMER MODEL (LSTM+TRANSFORMER)

To enhance the model's ability to capture long-range dependencies, a hybrid architecture combining LSTM and Transformer was implemented. Figure 4. shows the LSTM model architecture. Input Layer: Accepts input with shape (None, None, 1). LSTM Layer: 64 units with return_sequences=True. Multi-Head Attention Layer: 64 units with 8 attention heads. Layer Normalization: Applied after the attention layer. Global Average Pooling 1D: Reduces the sequence dimension. Dense Layer: A single unit for regression output. The total number of trainable parameters in this model is 83,457.

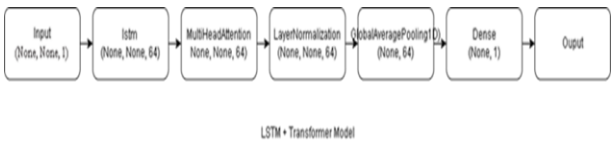


Figure 4. LSTM + Transformer model diagram (LSTM+Transformer modeli diyagramı)

2.3.3. RNN MODEL (RNN modeli)

Recurrent neural networks (RNN) is one of the most widely used method for time series forecasting. RNN is an artificial neural network in which nodes are connected in a loop and the internal state of the network can display dynamic temporal behavior [7]. Figure 5. shows the LSTM model architecture Input Layer: Accepts input with shape (None, None, 1). Simple RNN Layer: 64 units with return_sequences=True.Multi-Head Attention Layer: 64 units with 8 attention heads. Layer Normalization: Applied after the attention layer. Global Average Pooling 1D: Reduces the sequence dimension. Dense Layer: A single unit for regression output. The total number of trainable parameters in this model is 70,785.



Figure 5. RNN MODEL (RNN modeli)

3. FINDINGS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

In this study, three deep learning models LSTM, LSTM + Transformer and LSTM + Transformer+RNN were developed and evaluated for predicting seismic waveforms following the Mw7.8 Pazarcık earthquake. The models were trained on broadband teleseismic data obtained from the USGS, preprocessed to remove noise and normalize amplitude values. The key findings are as follows:

Model Performance: The LSTM model achieved a Mean Squared Error (MSE) of 2.6694e-09, a Mean Absolute Error (MAE) of 3.0116e-05 and an R^2 score of 0.9999993 on the test dataset. The LSTM + Transformer model demonstrated slightly lower performance, with an MSE of 3.6322e-08, an MAE of 0.0001200 and an R^2 score of 0.9999950. The LSTM+RNN model showed the best performance among the three, with an MSE of 3.5691e-09, an MAE of 4.5421e-05 and an R^2 score of 0.9999987. The LSTM Transformer+RNN model the extremely low MSE and MAE values, along with the high R^2 scores, indicate that all models are highly accurate in predicting seismic waveforms.

Training Dynamics: LSTM model converged in 18 epochs, LSTM + Transformer model converged in 21 epochs and LSTM + Transformer+RNN model converged in 13 epochs. This also shows that LSTM+Transformer+RNN model trained faster.

Learning rate was kept at 1.0e-04 throughout the training process and no significant fluctuation was observed. Visualization of Predictions: Predicted waveforms closely matched the actual waveforms for all models, especially for LSTM+Transformer+RNN model. For example, RNN model achieved a nearly perfect R^2 score of 0.9999987 indicating almost perfect match between predicted and actual values. LSTM model also showed an outstanding performance with an R^2 score of 0.9999993, while LSTM + Transformer model achieved an R^2 score of 0.9999950. The results of this study are consistent with previous research demonstrating the effectiveness of deep learning models in seismic data analysis. Time series prediction features are usually obtained by shifting the time window and the prediction results are influenced by the sequence of events. The use of LSTM for time series prediction in seismology has been widely documented with studies such as [8] reporting similar success in capturing temporal dependencies. The deep NN model has a recurrent Long Short Term Memory (LSTM) part that accounts for temporal dependencies between earthquakes and a convolutional part that accounts for spatial dependencies. The results demonstrate that NNs-based models outperform baseline feature-based models, which also account for spatio-temporal dependencies between different earthquakes. The other benefit of combining LSTM and RNNs is to achieve both high accuracy and computational efficiency [9]. Time series prediction is a critical component in many fields, such as the geosciences [10]. However, due to limited measurement conditions, we can usually only obtain short-term time series samples. On the one hand, since a short-term data set does not have enough information, accurate multi-step forward prediction using a short-term time series becomes a challenging task [11]. Transformer, RNN, and LSTM models are therefore used in the study.

3.1. MODEL PERFORMANCE (Model performansı)

The LSTM Transformer+RNN model achieved the best performance, with an MSE of 3.5691e-09, an MAE of 4.5421e-05 and an R^2 score of 0.9999987. This indicates that the hybrid architecture combining LSTM Transformer and RNN is highly effective in capturing both local and global dependencies in seismic data. The Actual and Estimated Values graph is shown in Figure 6 and the training graph is shown in Figure 7.

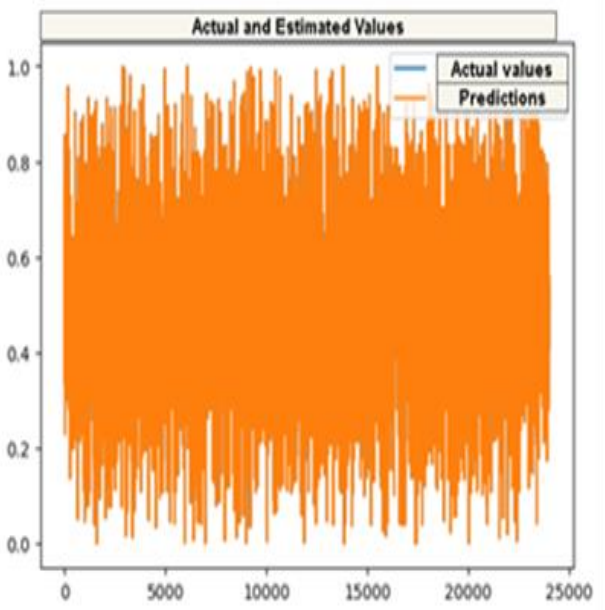


Figure 6. Actual and Estimated Values graph +RNN for LSTM T. + RNN model (Gerçek ve Tahmini Değerler grafiği +LSTM T için RNN. + RNN modeli)

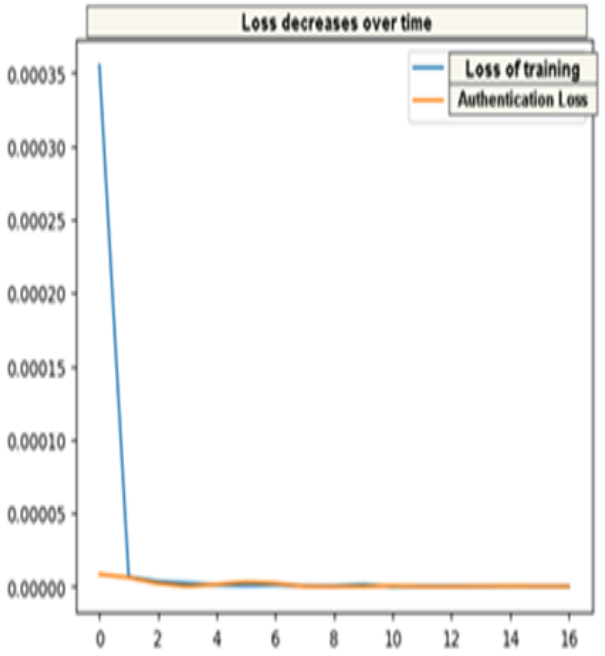


Figure 7. Training graph of LSTM T.+RNN Model (LSTM T+RNN. Modelinin eğitim grafiği)

The LSTM model also performed exceptionally well, with an MSE of 2.6694e-09, an MAE of 3.0116e-05 and an R^2 score of 0.9999993, demonstrating the robustness of LSTM in handling temporal dependencies. The Actual and Estimated Values graph is shown in Figure 8 and the training graph is shown in Figure 9.

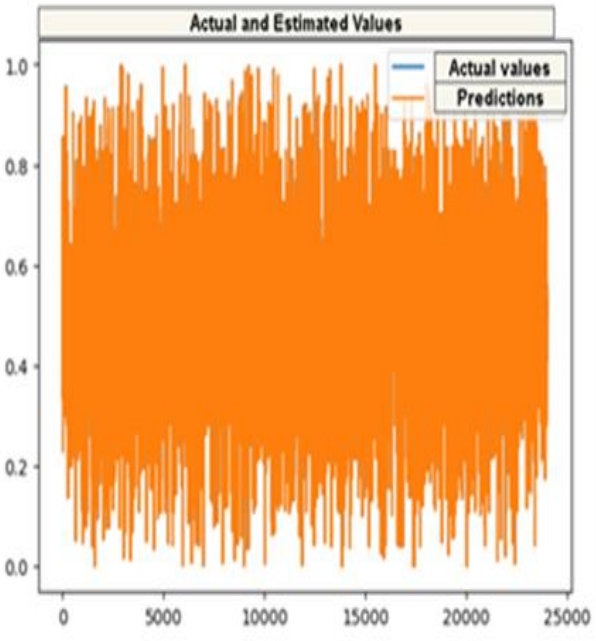


Figure 8. Actual and Estimated Values graph for LSTM model (LSTM modu için Gerçek ve Tahmini Değerler grafiği)

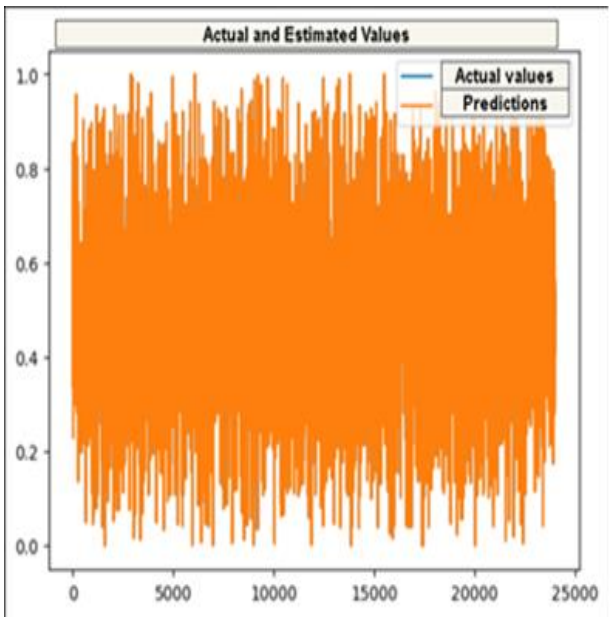


Figure 10. Actual and Estimated Values LSTM T. model (Gerçek ve Tahmini Değerler LSTM T. modeli)

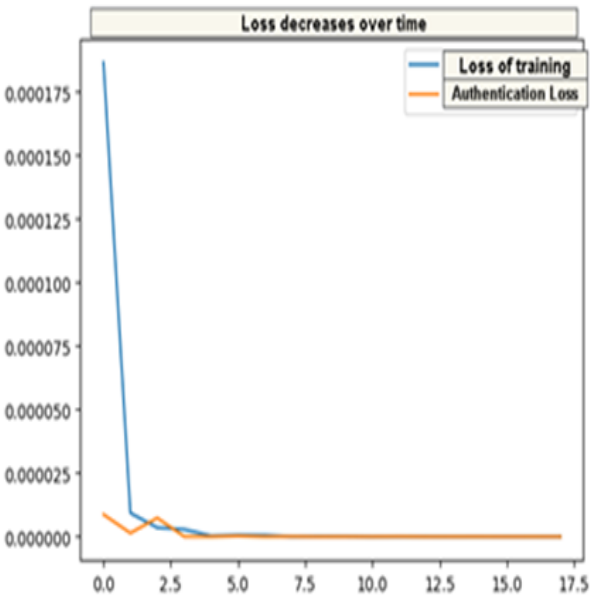


Figure 9 Training graph of LSTM model (LSTM eğitim grafiği)

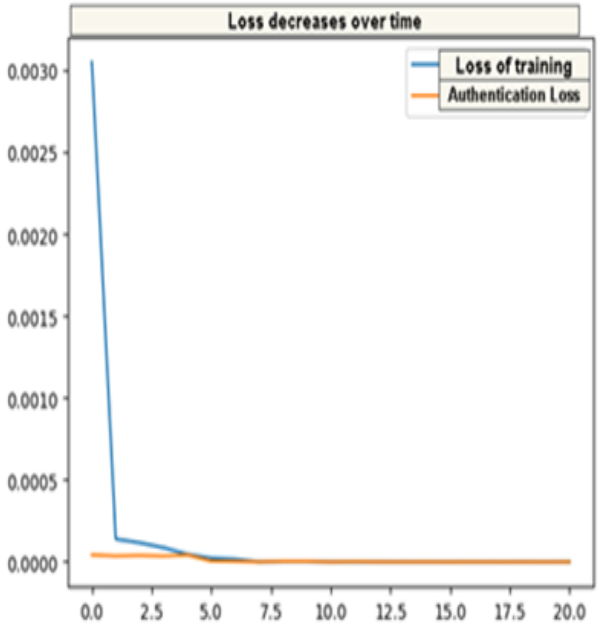


Figure 11. Training graph of LSTM T. model (LSTM eğitim grafiği)

The LSTM + Transformer model showed slightly lower performance, with an MSE of 3.6322e-08, an MAE of 0.0001200 and an R^2 score of 0.9999950, but still provided accurate predictions, highlighting the potential of Transformer-based approaches for seismic data analysis. The Actual and Estimated Values graph is shown in Figure 10 and the training graph is shown in Figure 11.

3.2. TRAINING EFFICIENCY (Eğitim performansı)

The LSTM + Transformer+RNN model not only achieved the highest accuracy but also demonstrated faster convergence, requiring only 13 epochs to train, compared to 18 epochs for the LSTM model and 21 epochs for the model. This suggests that the LSTM Transformer+RNN architecture is both efficient and effective for seismic waveform prediction. The Model Values graph is shown in Table 2.

Table 2. Different Deep Learning Models Result Values (Farklı Derin Öğrenme Modelleri Sonuç Değerleri)

Model	MSE	MAE	R^2	Epoch
LSTM	2.6694e-09	3.0116e-05	0.9999993	18
LSTM + Transformer	3.6322e-08	0.0001200	0.9999950	21
LSTM Transformer+ RNN	3.5691e-09	4.5421e-05	0.9999987	13

4. CONCLUSION (SONUÇLAR)

This study investigates the effectiveness of three deep learning models—LSTM, LSTM + Transformer and LSTM Transformer+RNN—for forecasting seismic waveforms following the Mw 7.8 Pazarcık earthquake. The models were trained on broadband teleseismic data from the USGS which were preprocessed to remove noise and normalize amplitude values. The results of this study have significant implications for earthquake early warning systems and seismic data analysis. The LSTM Transformer+RNN model demonstrated the highest accuracy and efficiency, making it a strong candidate for real-time applications as it achieved the lowest MSE (3.5691×10^{-9}) and MAE (4.5421×10^{-5}) values, along with the highest R^2 score (0.9999987), outperforming both the LSTM and LSTM + Transformer models. Furthermore, the integration of Transformers with LSTM and RNN models presents a novel approach for capturing long-range dependencies in seismic data. In conclusion, this study highlights the considerable potential of deep learning models for seismic waveform prediction. Future research could focus on enhancing these models using explainable AI (XAI) techniques [12, 13] to enable accurate and reliable automatic detection of seismic processes.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Seda ŞAHİN: She conducted the software, program experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Yazılım ve program uygulamalarını yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Emine ÇANKAYA: She conducted the software, program experiments, analyzed the results.

Yazılım ve program uygulamalarını yapmış, sonuçlarını analiz etmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.
Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] B. Gutenberg and C. F. Richter, Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. Princeton University Press, 1954.

[2] AFAD, "6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Raporu," Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2023. [Online]. Available: https://www.afad.gov.tr

[3] USGS, "M 7.8 – Türkiye-Suriye sınır bölgesi," United States Geological Survey, 2023. [Online]. Available: https://earthquake.usgs.gov.

[4] K. Satake, Y. Fujii, T. Harada, and Y. Namegaya, "Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tōhoku earthquake as inferred from tsunami waveform data," Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 103, no. 2B, pp. 1473–1492, 2013.

[5] R. Madariaga, M. Métois, C. Vigny, and J. Campos, "The 2010 Mw 8.8 Maule megathrust earthquake of Central Chile, and its aftershocks," Geophysical Journal International, vol. 184, no. 1, pp. 1–17, 2011.

[6] USGS "M 7.8 - Pazarcik earthquake, Kahramanmaras earthquake sequence" Avaible:https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jllz/executive [Accessed : February 09,2024].

[7] Qin, Yao & Song, Dongjin & Cheng, Haifeng & Cheng, Wei & Jiang, Guofei & Cottrell, Garrison. (2017). A Dual-Stage Attention-Based Recurrent Neural Network for Time Series Prediction. 10.48550/arXiv.1704.0297.

[8] Youru Li. ,Zhenfeng Zhu. ,Deqiang Kong. , Hua Han. ,Yao Zhao.,"EA-LSTM: Evolutionary attention-based LSTM for time series prediction",2019,01.

[9] R. Kail, E. Burnaev and A. Zaytsev, "Recurrent Convolutional Neural Networks Help to Predict Location of Earthquakes," in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 19, pp. 1-5, 2022, Art no. 8019005, doi: 10.1109/LGRS.2021.3107998.

[10] Bosilovich, M.G.; Robertson, F.R.; Chen, J. NASA's Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications (MERRA). U.S. CLIVAR Var. 2006

[11] You, Y., Zhang, L., Tao, P., Liu, S., & Chen, L. (2022). Spatiotemporal Transformer Neural Network for Time-Series Forecasting. Entropy, 24(11), 1651. https://doi.org/10.3390/e24111651.

[12] Saranya A., Subhashini R., A systematic review of Explainable Artificial Intelligence models and applications: Recent developments and future trends,Decision Analytics Journal,Volume 7,2023,100230, ISSN 2772-6622.

[13] "What is explainable AI?" Available :https://www.ibm.com/ [Accessed :June 2020].

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1261-1267 (2025)

TiO_2 Tozlarından TiC Tozlarının Karbon Kaplama Metodu ile Üretilebilirliğinin Araştırılması

Ali Rıza EBEOĞLU[1*] Ağah AYĞAHOĞLU[2] Mustafa AYDIN[3]

[1]*Dumlupınar Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Mekatronik Programı, Kütahya, Türkiye*

[2]*Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye*

[3]*Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye*

Makale Bilgisi

Research article
Received: 30/01/2025
Revision: 25/05/2025
Accepted: 26/05/2025

Anahtar Kelimeler

TiO_2
TiC
Karbon Kaplama
Karbotermal Reaksiyon

Article Info

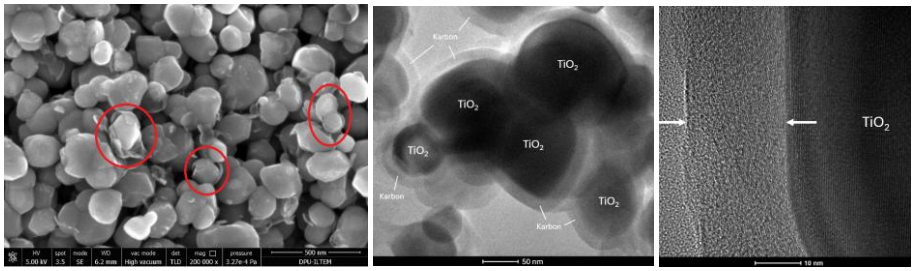
Araştırma makalesi
Başvuru: 30/01/2025
Düzeltme: 25/05/2025
Kabul: 26/05/2025

Keywords

TiO_2
TiC
Carbon coating
Carbotermal Reaction

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada propilen gazının (C_3H_6) parçalanması ile elde edilen karbon, difüzyon yolu ile TiO_2 toz yüzeyine kaplanmıştır. Karbon kaplı TiO_2 tozları katı-gaz karbotermal reaksiyon yöntemiyle üç farklı sinterleme sıcaklığında (1150 °C, 1300 °C, 1450 °C) TiC tozlarının üretilebilirliği araştırılmıştır. / In this study, carbon obtained by decomposition of propylene gas (C_3H_6) was coated on the TiO_2 powder surface by diffusion. The producibility of TiC powders by carbon coated TiO_2 powders at three different sintering temperatures (1150 °C, 1300 °C, 1450 °C) was investigated by solid-gas carbothermal reaction method.



Şekil A: *Karbon ile kaplanan TiO_2 tozlarının SEM ve TEM görüntüleri /* ***Figure A:*** *SEM and TEM images of TiO_2 powders coated with carbon*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Katı-gaz karbotermal reaksiyon yöntemi ile TiC üretilmiştir. / TiC was produced by solid-gas carbothermal reaction method.*
- *C_3H_6 gazının 625 °C parçalanmasıyla oluşan karbon, TiO_2 toz yüzeyine difuze olarak 22 nm kalınlığında katman oluşturmuştur. / Carbon formed by the decomposition of C_3H_6 gas at 625 °C diffused onto the TiO_2 powder surface and formed a 22 nm thick layer.*
- *TiC oluşumu için termodinamik başlangıç sıcaklığı 1300 °C olmasına rağmen XRD grafiğinden 1150 °C sıcaklıkta oluşmaya başladığı gözlenmiştir. / Although the thermodynamic starting temperature for TiC formation is 1300 °C, it was observed from the XRD graph that it started to form at 1150 °C.*

Amaç (Aim): *TiO_2 toz yüzeyini C_3H_6 gazını kullanarak karbon ile kaplamak ve karbon kaplı TiO_2 tozundan TiC tozunu üretmektir. / TiO_2 powder surface is coated with carbon using C_3H_6 gas and TiC powder is produced from carbon coated TiO_2 powder.*

Özgünlük (Originality): *TiO_2 toz yüzeyinin karbon ile kaplanması ve karbon kaplı TiO_2 tozundan farklı sıcaklıklarda TiC tozunun üretilebilirliği ve karakterizasyonu / Coating of TiO_2 powder surface with carbon and manufacturability and characterization of TiC powder from carbon-coated TiO_2 powder at different temperatures*

Bulgular (Results): *TEM analizinden TiO_2 toz yüzeyinin 22 nm kalınlığında karbon katmanı ile kaplandığı, XRD analizlerinden ise TiC dönüşüm sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta sinterlenmesine rağmen TiC piklerinin oluşmaya başladığı gözlenmiştir. / From TEM analysis, it was observed that the TiO_2 powder surface was covered with a 22 nm thick carbon layer, and from XRD analysis, it was observed that TiC peaks started to form despite being sintered at a temperature below the TiC transformation temperature.*

Sonuç (Conclusion): *SEM ve TEM analiz sonuçlarından TiO_2 toz yüzeyinin karbon ile kaplandığı, XRD analizinden farklı sıcaklıklarda TiC tozlarının elde edildiği gözlenmiştir. / From the SEM and TEM analysis results, it was observed that the TiO_2 powder surface was coated with carbon, and from the XRD analysis, TiC powders were obtained at different temperatures.*

*Corresponding author, e-mail: aliriza.ebeoglu@dpu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1629841

GU J Sci, Part C, 13(3): 1261-1267 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

TiO_2 Tozlarından TiC Tozlarının Karbon Kaplama Metodu ile Üretilebilirliğinin Araştırılması

Ali Rıza EBEOĞLU[1*] Ağah AYĞAHOĞLU[2] Mustafa AYDIN[3]

[1]*Dumlupınar Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Mekatronik Programı, Kütahya, Türkiye*

[2]*Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye*

[3]*Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/01/2025
Düzeltme: 25/05/2025
Kabul: 26/05/2025

Anahtar Kelimeler

TiO_2
TiC
Karbon Kaplama
Karbotermal Reaksiyon

Öz

Bu çalışmada TiO_2 tozlarının katı-gaz karbotermal reaksiyon yöntemiyle karbon kaplanması ve bu süreç sonucunda TiC üretimi ve karakterizasyonu amaçlanmıştır. Bu süreç iki basamaktan oluşmaktadır; ilk olarak TiO_2 tozlarının hidrokarbon gaz olan propilen gazının (C_3H_6) parçalanması (cracking) esnasında karbon ile kaplanması ve ikinci olarak da sinterleme yapılarak TiC tozlarının üretilmesidir. Katı-katı karbotermal yöntemlerinde kullanılan katı fazdaki karbon karışım tozlarına göre, TiO_2 toz yüzeyine kaplanan karbonun yakın temasından ve gerekli olan karbon monoksit (CO) gaz çıkışının sürekli sağlanmasından dolayı reaksiyonun daha düşük sıcaklıkta gerçekleşmesini ve daha yüksek saflıkta toz üretimini sağlamaktadır. Üretim sonrasında numunelerin karakterizasyon işlemleri için taramalı elektron mikroskopu (SEM), geçirimli elektron mikroskopu (TEM) ve X-ışını kırınım (XRD) analizleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarından TiO_2 toz yüzeyinin 22 nm karbon ile kaplandığı ve TiC tozlarının üretilebildiği tespit edilmiştir

Investigation of the Feasibility of Producing TiC Powders from TiO_2 Powders Using the Carbon Coating Method

Article Info

Research article
Received: 30/01/2025
Revision: 25/05/2025
Accepted: 26/05/2025

Keywords

TiO_2
TiC
Carbon coating
Carbotermal Reaction

Abstract

In this study, carbon coating of TiO2 powders by solid-gas carbothermal reaction method and as a result of this process TiC production and characterization was aimed. This process consists of two steps; Firstly, TiO_2 powders are coated with carbon during the cracking of propylene gas (C_3H_6), which is a hydrocarbon gas, and secondly, TiC powders are produced by sintering. Compared to solid-phase carbon mixture powders used in solid-solid carbothermal methods, TiO_2 ensures that the reaction occurs at lower temperatures and produces higher purity powder due to the close contact of the carbon coated on the powder surface and the necessary carbon monoxide (CO) gas release. Scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM) and X-ray diffraction (XRD) analyzes were applied for the characterization of the samples after production. From the experimental results, it was determined that the TiO_2 powder surface was covered with 22 nm carbon and TiC powders could be produced.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İleri teknolojik seramik malzemelerin tasarımı ve üretimi, mühendisliğin en karmaşık ve zorlu sorunlarından biridir [1,2]. Borürler, nitrürler ve karbürler gibi refrakter malzemeler, yüksek sertlikleri ve yüksek sıcaklıklardaki kimyasal ve mekanik kararlılıkları sayesinde bu tür uygulamalar için ideal aday olarak öne çıkmaktadır [2,3,6]. Bu adaylardan biri de yüksek ergime sıcaklığı (3067 °C), yüksek aşınma direnci, yüksek sertlik (28-35 GPa), yüksek ısıl iletkenlik, yüksek elektriksel

*Corresponding author, e-mail: aliriza.ebeoglu@dpu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1629841

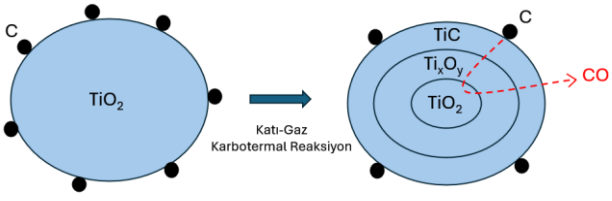
iletkenlik, iyi termal şok direnci, korozif ortamlara direnci ve nispeten düşük sayılabilecek yoğunluk (4,91 g/cm³) gibi avantajlara sahip olan ve aşağıda Tablo 1'de özellikleri verilen titanyum karbürdür [4,5]. Bu avantajları sayesinde başta savunma sanayi olmak üzere, kesici takımlar, potalar, aşınmaya dayanıklı kaplamalar, pres takımları ve yüksek gerilim pilleri gibi yapısal ve elektronik alanlarda geniş uygulama alanına sahiptir [4,7,8].

Tablo 1. Titanyum Karbürün Özellikleri [4,5]
(Properties of Titanium Carbide)

Kristal Yapısı	YMK
Molekül Ağırlığı (g/mol)	59,91
Yoğunluk (g/cm^3)	4,91
Ergime Noktası (°C)	3067
Özgül Isı (J/mol.K)	33,8
Termal İletkenlik (W/m. °C)	21
Elastisite Modülü (Gpa)	410-510
Kayma Modülü (Gpa)	186
Elektriksel Direnç (μΩ.cm)	68
Oksidasyon Direnci	Havada yavaş oksitlenir
Microsertlik (Vickers)	3200
Renk	Gümüş Gri

TiC'nin üretim yöntemleri arasında karbotermal reaksiyon, kimyasal buhar biriktirme, doğrudan karbürizasyon, kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi ve mekanik alaşımlama yöntemleri yer alır [7,9,10,11].

Karbotermal indirgeme yöntemi karmaşık üretim prosesi olmayıp, ucuz hammaddelerin kullanılmasından dolayı tercih edilen bir yöntemdir. Katı-katı karbotermal yöntemlerinde, oksit tozları katı fazdaki karbon ile karıştırılarak yüksek sıcaklıkta sinterlenmektedir. Karbür tozları üretebilmek için de reaksiyon dönüşümü sırasında Xiang ve ark. çalışmalarında gösterdikleri şematik resimdeki gibi Şekil 1'de görülen karbon monoksit (CO) gaz çıkışının sürekli sağlanması gerekir [12].



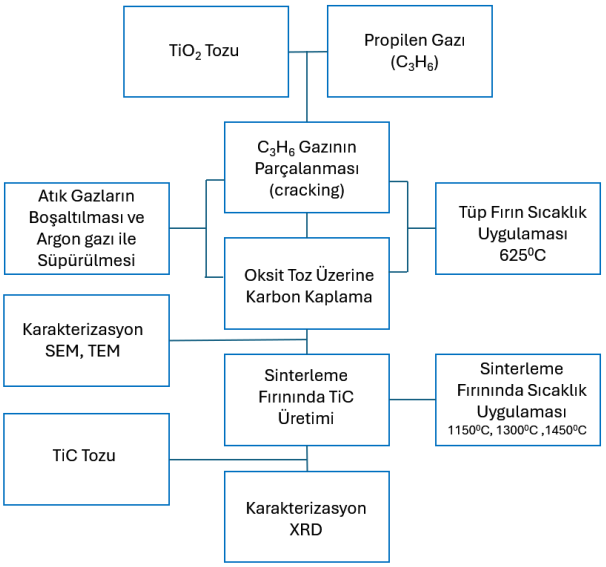
Şekil 1. CO gaz çıkışı ile TiC üretiminin şematik gösterimi (Schematic illustration of TiC synthesis with CO gas release)

CO gaz çıkışının rahat sağlanabilmesi için de karıştırılarak reaksiyona girecek oksit tozu ile karbonun temas yüzeyinin fazla olması gerekmektedir [13]. Katı-katı karbotermal reaksiyon yönteminde oksit tozu ile karıştırılan karbonun temas yüzeyi sınırlı olduğundan ve karbonun düzensiz dağılımından dolayı reaksiyonun gerçekleşmesi termodinamik başlangıç sıcaklığından daha yüksek sıcaklıkta gerçekleşmektedir. Bu sınırlamalar ve sıcaklıktaki artıştan dolayı tanelerde büyüme, tane aglomerasyonu, düzgün olmayan tane şekli gibi olumsuzluklardan dolayı üretilecek tozun saflığı azalmaktadır [14].

Bu çalışmada kullanılan ve daha önceden patenti alınmış yöntem olan katı-gaz karbotermal reaksiyon yönteminde gaz formunda olan C_3H_6 bileşimindeki karbon, oksit tozun yüzeyine kaplandığından ve oksit toz ile karbon arasındaki temas yüzeyi fazla olduğundan reaksiyon daha düşük sıcaklık ve sürede gerçekleşmekte, yüksek sıcaklık olmadığından dolayı da tane büyümesi, tane aglomerasyonu, düzgün olmayan tane şekli gibi olumsuzluklar görülmemekte ve bunun sonucunda daha yüksek saflıkta toz üretimi sağlanabilmektedir [15,16].

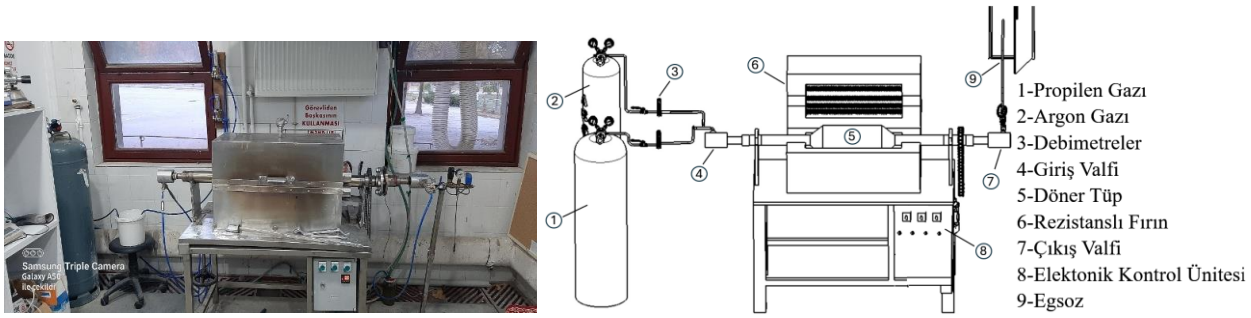
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL METHOD)

Oksit tozlarından karbotermal reaksiyon yöntemiyle karbür tozlarının üretimi; oksit tozlarının karbon ile kaplaması ve kaplanmış tozların sinterlenerek karbür tozunun oluşturulması olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Aşağıda bu aşamalar ayrıntılı olarak açıklanmış ve üretim sırasında kullanılan akış diyagramı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Kullanılan üretimin akış diyagramı (Flow diagram of the production process used)

Birinci aşama; TiO_2 toz yüzeyinin gaz formundaki karbon ile kaplanmasıdır. Kaplama işlemi Şekil 3a'da görülen deney ünitesinde yapılmaktadır [17]. Şekil 3b'de kısımları görülen deney düzeneğinde bulunan çapı 20 cm ve uzunluğu 40 cm olan paslanmaz çelikten imal edilmiş döner tüp fırının içerisine TiO_2 tozları (Nanokar, CAS No:13463-67-7, %99,99 saflık, ~5 mikron) yerleştirilmiş ve döner fırın 30 devir/dakika dönmekte iken iç kısımda bulunan oksijen ve diğer gazları atmosfere tahliye etmek ve nötr hale getirmek için 2 dk boyunca argon gazı geçirilerek temizlenmiştir. Paslanmaz çelik tüp fırın sıcaklığı 10 °C/dk hızla 625 °C çıkartılmış ve karbon kaynağı olarak kullanılan propilen gazı (C_3H_6) tüp fırın içerisine salınarak HSC Chemistry (Metso tarafından geliştirilen termokimya yazılımı) bilgisayar programında hesaplanan 1 numaralı reaksiyonda görülen parçalanma (cracking) işlemi ile karbon ve hidrojene ayrışması sağlanmıştır.



a) b)

Şekil 3. Karbon kaplamada kullanılan deney düzeneğinin; a) fotoğrafı b) kısımları (a) Photograph and b) parts of the experimental setup used in carbon coating)

$$C_3H_{6(g)} = 3C_{(k)} + 3H_{2(g)} \quad (1)$$

Katı-gaz karbotermal reaksiyon sonucu elde edilen karbon, TiO_2 tozun afinitesine bağlı olarak difüzyon yoluyla TiO_2 tozunun yüzeyine kaplanmaktadır. Her bir çevrimde propilen gazı tüp fırın içerisine verilerek tüp iç basıncı 3 bar'a çıkana kadar devam edilmekte ve bu durumda 5 dk beklenerek karbonun toz yüzeyine kaplanması sağlanmaktadır. Hidrokarbon gazının parçalanması (cracking) işleminden sonra atık gazlar dışarıya salınmış elde edilen karbon, oksit tozun yüzeyinin kaplanmasını sağlamış ve tüp içi argon gazı ile süpürülmüştür. Sonraki çevrimlerde aynı işlemler ardışık olarak tekrarlanmıştır. Her bir çevrimde 100 g toz yüzeyine yaklaşık 1,4 g karbon kaplandığı hesaplanmıştır. İstenilen karbon miktarı on üç çevrimde elde edilmiştir.

İkinci aşama; TiC elde etmek için bir sonraki aşama sinterlemedir. Tozlar, sinterleme fırınında reaksiyonun (2) gerçekleşmesi için dönüşüm sıcaklığında tutulmalıdır. Şekil 4a'da HSC Chemistry bilgisayar programının reaksiyon için verdiği dönüşüm sıcaklığı minimum 1300 °C olarak verilmektedir.

$$TiO_{2(k)} + 3C_{(g)} \rightarrow TiC_{(k)} + 2CO_{(g)} \quad (2)$$

TiC üretimi için aşağıdaki Şekil 4b'de görülen karbon kaplı TiO_2 tozlarına üç farklı sıcaklıkta sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Basamak sıcaklıklar 1150 °C, 1300 °C, 1450 °C sıcaklıklarda argon atmosferi (150 mL/dk) altında ısıtma ve

T C	deltaH kcal	deltaS cal/K	deltaG kcal	K	Log(K)
0,000	128,788	83,876	105,877	1,904E-085	-84,720
100,000	129,007	84,577	97,447	8,348E-058	-57,078
200,000	128,987	84,540	88,987	7,817E-042	-41,107
300,000	128,791	84,169	80,550	1,917E-031	-30,717
400,000	128,469	83,653	72,158	3,721E-024	-23,429
500,000	128,061	83,088	63,821	9,077E-019	-18,042
600,000	127,599	82,527	55,540	1,250E-014	-13,903
700,000	127,100	81,986	47,315	2,361E-011	-10,627
800,000	126,575	81,473	39,142	1,066E-008	-7,972
900,000	126,030	80,988	31,019	1,663E-006	-5,779
1000,000	125,474	80,533	22,944	1,151E-004	-3,939
1100,000	124,912	80,108	14,912	4,231E-003	-2,374
1200,000	124,346	79,710	6,921	9,400E-002	-1,027
1300,000	123,780	79,339	-1,031	1,391E+000	**0,143**
1400,000	123,217	78,991	-8,947	1,475E+001	1,169

a)



b)

Şekil 4. a) HSC programının hesapladığı sıcaklık değeri b) Sinterlenecek karbon kaplı TiO_2 tozları (a) Temperature value calculated by HSC program b) Carbon coated TiO_2 powders to be sintered)

soğutma hızı (5 °C/dk) olacak şekilde ikişer saat süre ile dönüşüme tabi tutulmuştur. Sinterleme fırınında kullanılan Al_2O_3 borunun çatlama riskinden dolayı süre 2 saat ile sınırlandırılmıştır.

Karbon kaplama deneyleri sonrası, kaplama miktarının tespitinde kullanılan SEM görüntüleri ve EDX analizleri, Dumlupınar Üniversitesi İLTEM Laboratuvarındaki SEM (FEI Nova NanoSEM 650 HV-15kV) ile, kaplama kalınlığının tespitinde kullanılan TEM görüntüleri ise Bayburt Üniversitesi Bumer Araştırma merkezinde bulunan TEM (FEI Talos F200S 200 kV) kullanılarak analiz edilmiştir.

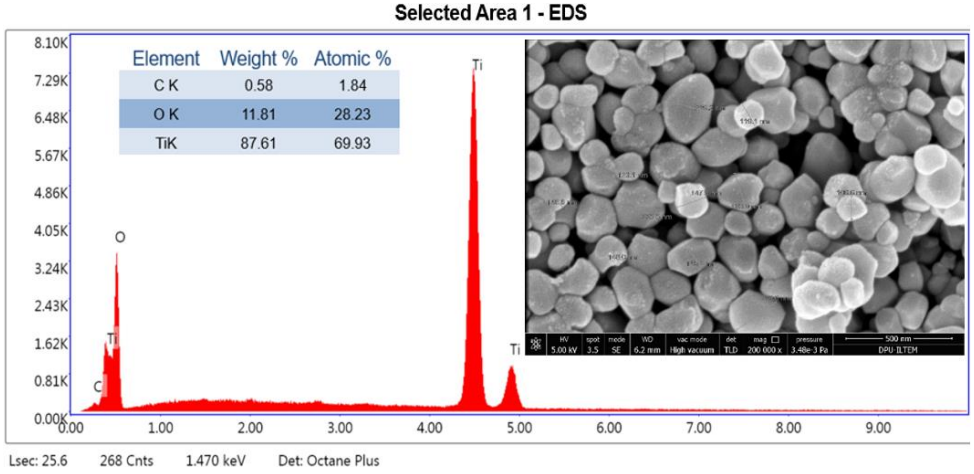
Sinterleme sonrası elde edilen TiC tozlarının XRD analizleri Dumlupınar Üniversitesi İLTEM Laboratuvarındaki Panalytical Empyrean marka cihaz ile dalga boyu λ=0,131303 nm olan, 45 kV, 40 mA CuKα ışını kullanılarak 0,02 °/s hızında 2Θ=20°-70° aralığında ölçümler alındı. Bileşiklerin tespitinde 98-018-1681 (TiC), 98-002-5779 (TiO_2), 98-007-6767 (C) PDF numaraları ve HighScore Plus yazılımı kullanılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

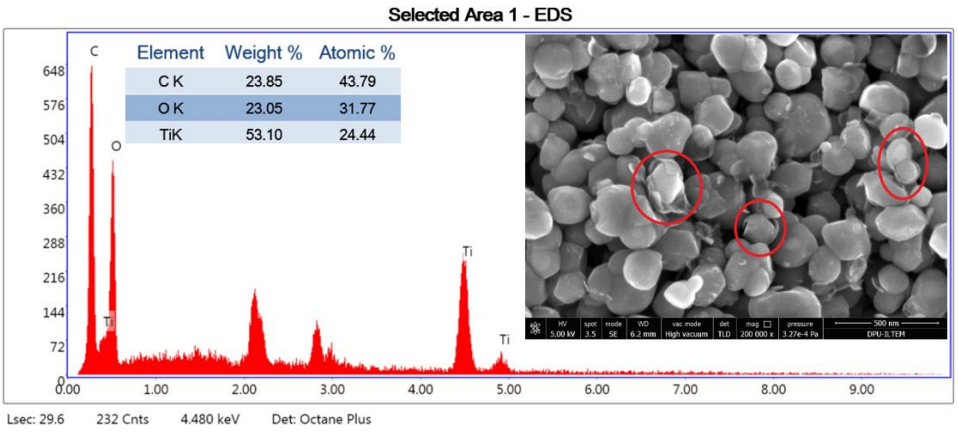
Karbon kaplama deneyleri sonrası TiO_2 tozlarının yüzeyine kaplanan karbon miktarı ve karbon kalınlığı SEM ve TEM analizleri ile, üretilen TiC tozları ise XRD analizi ile karakterize edilmiştir.

3.1. Karbon Kaplı TiO_2 Tozunun SEM İncelemesi ve EDX Analizi (SEM Analysis and EDX Analysis of Carbon Coated TiO_2 Powder)

SEM çekilirken tozlar karbon bant üzerine konularak çekildiğinden, saf haldeki TiO_2 ile karbon kaplı TiO_2 tozlarının EDX analizlerini karşılaştırma yoluna gidilmiş ve Şekil 5'deki saf TiO_2'nin EDX analizinde hacimce %2 olan karbon oranının Şekil 6'daki karbon kaplı TiO_2'nin EDX analizinde %43'e çıktığı görülmektedir. Bu artış miktarı toz yüzeyine kaplanan karbonun varlığını göstermekte, yine Şekil 6'daki SEM görüntüsünde tozların üzerindeki açılmış karbon kabuklanmaları görülmektedir.



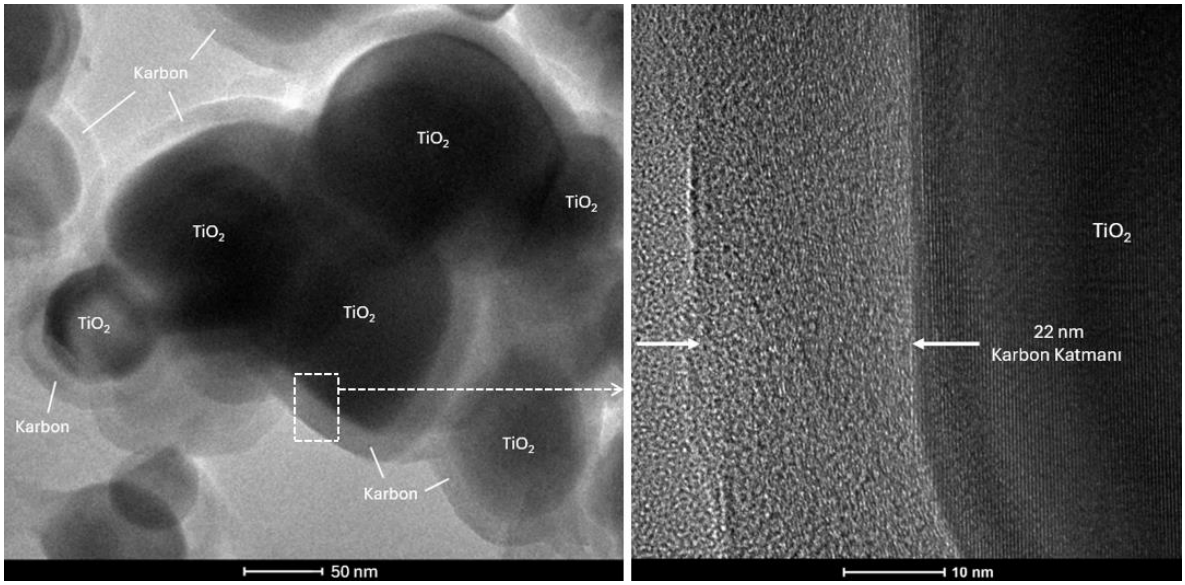
Şekil 5. Saf TiO_2'nin SEM görüntüsü ve EDX analizi (SEM image and EDX analysis of pure TiO_2)



Şekil 6. Karbon kaplı TiO_2'nin SEM görüntüsü ve EDX analizi (SEM image and EDX analysis of carbon-coated TiO_2)

3.2. Karbon kaplı TiO_2 tozunun TEM İncelemesi (TEM Analysis of Carbon-Coated TiO_2 Powder)

Şekil 7a'daki TEM görüntüsü incelendiğinde koyu gri renkte görülen TiO_2 toz tanelerinin yüzeyinde açık gri renkte görülen karbon ile kaplandığı ve Şekil 7b'deki TEM görüntüsü incelendiğinde bu kaplama kalınlığının 22 nm olduğu görülmektedir. Bu kaplanan karbon katmanı TiO_2 tozuna yakın temas ederek, sürekli ve hızlı bir karbon kaynağı sağlamaktadır.



a) b)

Şekil 7. Karbon kaplı TiO_2'nin a) TEM görüntüsü b) Karbon tabakası kalınlığı (a) TEM image of carbon-coated TiO_2 b) Carbon layer thickness)

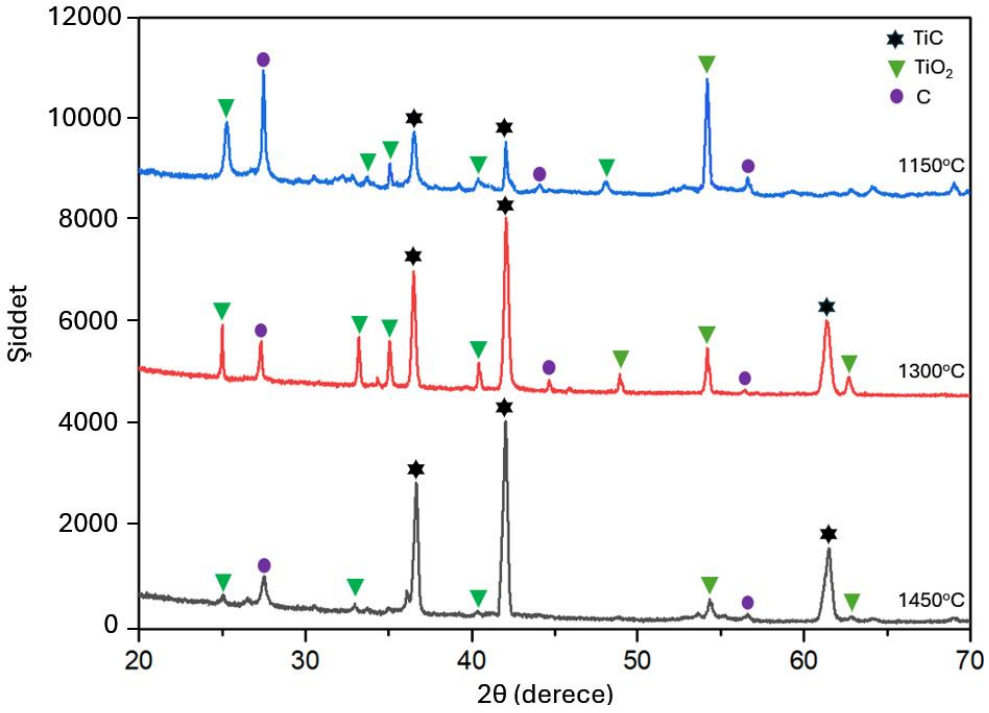
Karbon kaplama deneyleri sonrası yapılan SEM ve TEM analizlerinde elde edilen görüntüler incelendiğinde TiO_2 tozlarının karbon ile kaplanması çalışmalarının başarı ile sonuçlandığını göstermektedir.

3.3. Üretilen TiC Tozlarının XRD Analizi (XRD Analysis of the Synthesized TiC Powders)

1150 °C, 1300 °C ve 1450 °C sıcaklıklarda sinterlenen tozların XRD analizleri Şekil 8'de verilen grafikte görülmektedir.

HSC programında TiC üretimi başlangıç sıcaklığı 1300 °C'de başladığı hesaplanmıştı. Şekil 8'de verilen XRD grafiği incelendiğinde 1150 °C'de sinterlenen TiC tozlarının az da olsa pik oluşturduğu, büyük oranda dönüşüme uğramamış TiO_2 tozlarından oluştuğu gözlenmiştir. Dönüşüm sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta sinterlenmesine rağmen TiC piklerinin oluşumunu, TiO_2 tozu ile tozun yüzeyine kaplanan karbonun temas yüzeyini artırarak daha kolay reaksiyona girmesi ve dönüşüm reaksiyon sıcaklığını düşürmesi yani daha düşük bir sıcaklıkta oluşmaya başlaması olarak açıklanabilir. Sinterleme süresinin artırılmasıyla TiC piklerinin bu sıcaklıkta daha da artacağı düşünülmektedir.

Ayrıca Şekil 8'deki 1300 °C ve 1450 °C'de sinterlenen TiC tozlarının XRD pikleri incelendiğinde 1450 °C'de sinterlenen TiC tozlarının 1300 °C'de sinterlenen tozlara göre daha fazla pik oluşturduğu, yapıda dönüşüme uğramamış TiO_2 tozlarının daha az bulunduğu ve bunun da sıcaklığın artmasıyla dönüşüm reaksiyonlarının hızlanması olarak açıklanabilir. Şekil 8'deki 1300 °C ve 1450 °C'de sinterlenen XRD grafikleri incelendiğinde yapıda henüz dönüşüme uğramamış TiO_2 tozlarının bulunduğu gözlenmiştir. Bunların da sinterleme süresi artırılarak TiC tozuna dönüşeceğini düşündürmektedir. Burada önemli olan kriterin sıcaklıktan ziyade verilen sürenin daha önemli olduğunu göstermektedir. Sıcaklık gerekli olan değerden düşük bile olsa yeterli süre verildiğinde dönüşüme uğrayan tozların pik şiddetinin ve sayısının artacağı öngörülmektedir. Ayrıca XRD grafiği incelendiğinde, karbon gaz halinde oksit toz yüzeyine kaplandığından katı-katı karbotermal reaksiyon yöntemindeki gibi dışarıdan katılan öncül madde bulunmadığından kirlenme olmamakta ve daha saf toz elde edilebildiği gözlenmektedir.



Şekil 8. 1150 °C, 1300 °C ve 1450 °C sıcaklıklarda sinterlenen TiC tozlarının XRD analizleri (XRD analysis of TiC powders sintered at 1150 °C, 1300 °C and 1450 °C)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda verilmektedir;

- TiO_2 tozunun yüzeyine 625 °C sıcaklık ve on üç çevrimde karbon kaplama işlemi başarıyla yapılmıştır. Kaplama sonrası elde edilen SEM ve TEM analiz sonuçları da bunu desteklemektedir.

- Kaplanan karbon kalınlığının 22 nm olduğu gözlenmiştir.

- Karbon kaplanmış tozlara 1150 °C sıcaklıkta sinterleme yapıldığında TiC piklerinin dönüşüm sıcaklığının altında olmasına rağmen oluşmaya başladığı gözlenmiş, yeterli süre verildiği taktirde TiC piklerinin artacağı düşünülmektedir. 1300 °C ve 1450 °C sıcaklıkta sinterlenen tozlar karşılaştırıldığında 1450 °C sıcaklıkta sinterlenen TiC piklerinin daha fazla olduğu bunun da sıcaklık artışıyla dönüşüm reaksiyonunun hızlandığı, yapıda dönüşüme uğramadan kalan TiO_2 tozlarının da yeterli süre verildiğinde TiC tozlarına dönüşeceği öngörülmektedir.

- Katı-gaz karbotermal reaksiyon yönteminde oksit tozlarının yüzeyinin karbon ile kaplanabildiği ve bu kaplı karbon ile oksit toz arasındaki temas yüzeyi arttığından reaksiyon daha hızlı gerçekleşmekte ve bu da reaksiyon sıcaklığını düşürmektedir.

- Katı-gaz karbotermal reaksiyon yönteminde oksit toz yüzeyine gaz halinde karbon kaplandığından, katı-katı karbotermal reaksiyon yöntemindeki gibi dışardan öncül madde katılmadığından kirlenme olmamakta ve bunun sonucu olarak daha saf toz elde edilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenen 2021-04 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. / This study was carried out within the scope of project number 2021-04 supported by Dumlupınar University Scientific Research Projects Unit.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

***Ali Rıza EBEOĞLU*:** Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process of the article.

Ağah AYĞAHOĞLU: Deneylerin planlanması, sonuçların değerlendirilmesi ve makalenin kontrolünü sağlamıştır.

He provided planning of experiments, evaluation of results and control of the article.

Mustafa AYDIN: Deneylerin planlanması, sonuçların değerlendirilmesi ve makalenin kontrolünü sağlamıştır.

He provided planning of experiments, evaluation of results and control of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Timuçin, Muharrem. İleri teknolojik seramik üretimi elektronik ve mekanik seramikler. 1995.

[2] Akkurt, F., Kalender, E., & Yörükoğlu, A., Üstün özelliklere sahip ileri teknoloji seramiği: Titanyum diborür. Journal of Boron. 2019; 4.4: 203-208.

[3] Y. G. Gogtsi, R. A. Andrievski, "Materials Science of carbides, nitrides and borides", Proceedings of NATO Advanced Study Institute on Materials Science of carbides, nitrides and borides. 1998; 68: 273

[4] Karaduman, B. Titanyum matrisli titanyum karbür takviyeli kompozit üretimi ve karakterizasyonu. 2010.

[5] Duman, D. Titanyum talaşından titanyum karbür üretimi ve sert metal üretiminde kullanımı (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. 2010.

[6] Özbelge, Ö. H., Katırcıoğlu, B., Atılgan, İ., Özkol, E., Anutgan, T. A., & Anutgan, M. Bor nitrür üretimi. 2008.

[7] Ergül, T. Kendiliğinden-İlerleyen Yüksek-Sıcaklık Sentezi (SHS) Yöntemi ile Titanyum Karbür (TiC) Üretimi [Yüksek Lisans Tezi]. Yalova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 2001.

[8] Bae, S. T., Shin, H., Jung, H. S. & Hong, K. S. Synthesis of titanium carbide nanoparticles with a high specific surface area from a TiO2 core-sucrose shell precursor. J. Am. Ceram. Soc. 2009; 92: 2512–2516

[9] Ye, L. L., & Quan, M. X. Synthesis of nanocrystalline TiC powders by mechanical alloying. Nanostructured materials. 1995; 5.1: 25-31.

[10] İpek, M. Kutu sementasyon yöntemiyle çelik yüzeylerin TiC kaplanması. 1996.

[11] Wolfe, D. E., Singh, J., & Narasimhan, K. Synthesis of titanium carbide/chromium carbide multilayers by the co-evaporation of multiple ingots by electron beam physical vapor deposition. Surface and Coatings Technology. 2002; 160.2-3: 206-218.

[12] Xiang, M., Ding, W., Dong, Q., & Zhu, Q. Synthesis methods and powder quality of titanium monocarbide. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2024; 72: 10-18.

[13] Fu, Z., & Koc, R. Synthesis of TiB2 from a carbon-coated precursors method. Journal of the American Ceramic Society. 2017; 100.6: 2471-2481.

[14] Weimer, A.W., Carbide, Nitride and Boride Materials Synthesis and Processing, Chapman and Hall, London. 1997; 333

[15] R. KOC and G. GLATZMAIER, US Patent 5417952. 1995.

[16] Siddiqui, N., Koc, R., Mawdsley, J., & Carter, D. Synthesis of submicron/nano sized CaB6 from carbon coated precursors. Nanostructured Materials and Nanotechnology V: Ceramic Engineering and Science Proceedings. 2011; 32: 137-149.

[17] Kadıoğlu, M. Hidrokarbon Gazlar ile Karbür Tozu Üretim Fırını Tasarım ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Kütahya. 2019.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1268-1285 (2025)

Recent Reviews on Topology Optimization

Fatma Nur ŞEN[1*], Mithat Kutay CAN[1]

[1]*Turkish Aeronautical Association University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Ankara, Türkiye*

Article Info

Review article
Received: 09/08/2025
Revision: 22/09/2025
Accepted: 23/09/2025

Keywords

Topology Optimization
Optimization Algorithms
Meta-heuristic Algorithms
Continium Structural Topology

Makale Bilgisi

Derleme makale
Başvuru: 09/08/2025
Düzeltme: 22/09/2025
Kabul: 23/09/2025

Anahtar Kelimeler

Topoloji Optimizasyonu
Optimizasyon Algoritmaları
Sezgi Üstü Algoritmalar
Süreklilik
Yapısal Topolojisi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study represent the literture reviews and comparison of non-gradient based optimization metholodigies in terms of structural optimization./ Bu çalışma, yapısal optimizasyon bakımından eğimsiz optimizasyon yöntemlerinin literatür incelemelerini ve karşılaştırılmasını göstermektedir.

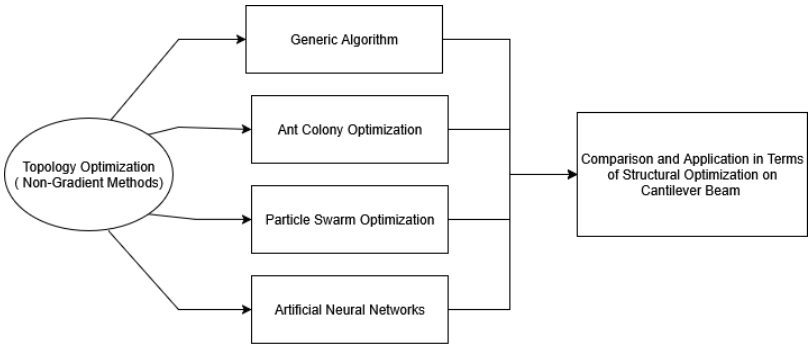


Figure A: *Non-Gradient methods in structural topology optimization: comparative application on cantilever beams /* ***Şekil A:*** *Yapısal topoloji optimizasyonunda gradyansız yöntemler: konsol kirişlerde karşılaştırmalı uygulama*

Highlights (Önemli noktalar)

- *İlk olarak, belirtilen optimizasyon yöntemlerin literatür taraması yapılmıştır. / Initially, the literatur reviews of the specifsied optimization methods have been done.*
- *Daha sonra, bu metotlar yapısal optimizasyon (kiriş) bakımından kıyaslanmıştır. / Then, these methods have been compared in terms of structural optimization (cantilever beam).*
- *Sonuçlara göre, metotlar ve kullanım alanları tablolaştırılmıştır ve araştırmacılara yol gösterici öneri sunmuştur. / Regarding results, methods and their applications were tabulated and they have been presented to resarchers guiding conclusions.*

Aim (Amaç): *This study aims to compare the non- gradient based optimization methods to define the possible best methods for structural optimization of cantilevear beams. / Bu çalışma, kirişin yapısal optimizasyou için mümkün olan en iyi yöntemleri tanımlamak amacıyla eğimsiz optimization yöntemleri karşılaştırmayı amaçlamaktadır.*

Originality (Özgünlük): *This study compounds the informative tabulated contents for the optimization review studies. / Bu çalışma optimizasyon derleme makaleleri için bilgilendirici tablolaştırılmış içerikleri bir araya getirmiştir.*

Results (Bulgular): *The possible best non-gradient optimization methods can be determined for the cantilevear beam. / Kiriş için mümkün olan en iyi eğimsiz optimizsayon yöntemleri belirlenebilir.*

Conclusion (Sonuç): *The important points to be taken into consideration by researchers have beenindicated for future works. / Gelecekteki çalışmalar için araştırmacıların dikkat etmesi gerekenönemli noktalar belirtilmiştir.*

*Corresponding author, e-mail: fnsen@thk.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1761253

GU J Sci, Part C, 13(3): 1268-1285 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Recent Reviews on Topology Optimization

Fatma Nur ŞEN[1*], Mithat Kutay CAN[1]

[1]*Turkish Aeronautical Association University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Ankara, Türkiye*

Article Info

Review article
Received: 09/08/2025
Revision: 22/09/2025
Accepted: 23/09/2025

Keywords

Topology Optimization
Optimization Algorithms
Meta-heuristic Algorithms
Continium structural topology

Abstract

Gradient-based methods are utilized in traditional topology optimization studies. This approach is based on a point-by-point technique, which depends on the gradient information of the objective functions regarded as independent variables. Despite the fast response, this approach can lead them to find local optimal solutions, but it faces problems in defining the global optimal solutions in large-scale problems or high-degree functions. For this reason, non-gradient methods that give better solutions have been developed to solve these struggles. This study examines the nature-inspired methods developed over the last 25 years, which are called Genetic Algorithms, Ant Colony Optimization, Particle Swarm Optimization, and Artificial Neural Networks, and presents flowcharts to illustrate their principles. These methods are clarified via a cantilever beam. According to the results, methods are compared, and Particle Swarm Optimization can provide a reasonable solution to determine the optimal solution. These comparisons are tabulated and may be a guide for researchers.

Topoloji Optimizasyonunda Güncel Yaklaşımlar

Makale Bilgisi

Derleme makale
Başvuru: 09/08/2025
Düzeltme: 22/09/2025
Kabul: 23/09/2025

Anahtar Kelimeler

Topoloji Optimizasyonu
Optimizasyon Algoritmaları
Sezgi üstü Algoritmalar
Süreklilik yapısal topolojisi

Öz

Geleneksel topoloji optimizasyon çalışmalarında eğimli yöntemler olarak belirtilen metotlar kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, bir dizi bağımsız değişkene bağlı olarak amaç fonksiyonun türevine dayanan hesaplamalı nokta tekniğine bağlıdır. Bu metotlar, hızlı çözümler vermesine rağmen, kapsamlı işlemler, yüksek mertebeli fonksiyon gibi durumlarda yerel optimum çözümleri bulmakta; küresel sonuçlarda problemlerle karşılaşılmaktadır. Karşılaşılan sorunları çözmek amaçlı daha iyi sonuçlar elde edilen eğimsiz yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada, son 25 yılda yapılan eğimsiz yöntemler olarak belirtilen ve doğadan ilham alan Genetik Algoritmalar, Karınca Kolonisi Optimizasyonu, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu ve Yapay Sinir Ağları adlı yöntemler hakkında araştırmalar yapılmış ve çalışma prensipleri akış şeması ile belirtilmiştir. Bu yöntemler, özellikle kiriş örneği ile detaylandırılmıştır. Sonuçlara bağlı olarak, yöntemler karşılaştırılmakta ve Parçacık Sürü Optimizasyonu optimum çözümü belirlemek için uygun bir sonuç sunulabilmektedir. Bu karşılaştırmalara dayanarak, araştırmacılara rehber olabilecek kıyaslama tablosu oluşturulmuştur.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Topology optimization addresses a key engineering challenge: determining the optimal distribution of material within a given space to maximize structural performance. Initially developed for mechanical design, this technique has found applications in diverse fields such as fluid dynamics, acoustics, electromagnetism, optics, and multi-physics problems. The process typically involves iterative analysis and design modifications.

Different categories of optimization techniques are sorted as gradient-based methods and non-gradient-based methods. The gradient-based method depends on the direction of the objective function's gradient. This method generally converges quickly and requires fewer function evaluations, particularly when considering the number of independent variables. Despite the advantages, the main drawback of this method is that the gradient-based methods converge to a local optimum and a global

*Corresponding author, e-mail: fnsen@thk.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1761253

optimum depending on the initial conditions of the system.

In contrast to the gradient-based methods, the non-gradient-based methods do not depend on the gradient of the function and work based on the function evaluation. This method tries to mimic nature algorithms, and one of the main differences in this method is that the non-gradient-based methods search multiple points in space rather than a single point [1].

Naturally, topology optimization techniques have advanced and evolved due to complex problems and limitations of gradient-based methods. Although non-gradient, nature-inspired methods have struggles and limitations, these methods can be suitable to handle the non-differentiable, discrete or multi-objective problems. Indeed, these methods have strengths in terms of flexibility, global capability, and effectiveness in complex model space.

Topology optimization is a primary approach in structural optimization, aiming to find the optimal structure that meets specific requirements, such as functionality. Furthermore, structural topology can be determined through optimal modifications of connections and holes in the design, as well as the size and shape of the structures, achieved by redistributing material in an iterative method. Therefore, structural topology optimization can be a compelling approach to select the applicable initial structural topologies [2-3].

Topology optimization for structures, as defined as a shape optimization problem, has gained attention in the last decades. Hence, several studies have built upon and improved earlier advancements in homogenization theory and numerical optimization, laying the groundwork for Bendsøe and Kikuchi's influential 1988 work on numerical topology optimization. Since this initial "homogenization approach," the field has evolved in various directions, including: (a) density-based methods; (b) level set methods; (c) methods using topological derivatives; (d) phase-field methods; and (e) evolutionary methods, among others. Density and evolutionary approaches in topology optimization use straightforward design variables linked to elements or nodes. In comparison, the level set method, often paired with topological derivatives, utilizes shape derivatives to determine the optimal topology. Recently, hybrid approaches have emerged, where filtered density fields in advanced projection techniques increasingly mirror the level set function used in level set methods [4-10].

In light of this information, Genetic Algorithm (GA), Ant Colony Optimization (ACO), Particle Swarm Optimization (PSO), and Neural Network (NN) methods can be addressed in terms of structural engineering and explained in Section 2. The comparison of these methods is clarified and concluded briefly in Section 3.

2. LITERATURE REVIEW (LİTERATÜR İNCELEMESİ)

2.1. Genetic Algorithms on Topology Optimization (Topoloji Optimizasyonunda Genetik Algoritmalar)

Inspired by natural selection, the Genetic Algorithm (GA) is a search algorithm based on a population that employs the "survival of the fittest" principle. Each new generation is created by using the operators created for this algorithm and iteratively applying these operators to individuals within the population. The core components of a Genetic Algorithm (GA) are chromosome representation, selection, crossover, mutation, and the computation of the fitness function. The GA process follows these steps: Firstly, the Genetic Algorithm (GA) process begins by randomly generating an initial set of chromosomes. Then, the fitness of each chromosome is assessed. Two chromosomes are selected for reproduction based on their fitness scores in the third step. Indeed, these selected chromosomes undergo a single-point crossover process with a certain probability to create an offspring. Finally, one operator of the genetic algorithm, named mutation, is applied evenly to this offspring with a specific mutation chance, resulting in a mutated offspring. This mutated offspring is added to the new population. These steps of selection, crossover, and mutation are repeated until the new population is fully formed. Given that GA can provide a diverse set of solutions, it can be used in many engineering areas such as structural operations, control engineering, computer games, artificial intelligence, deep learning, and image processing [11-14]. The flow chart for the Genetic Algorithm can be seen in Figure 1.

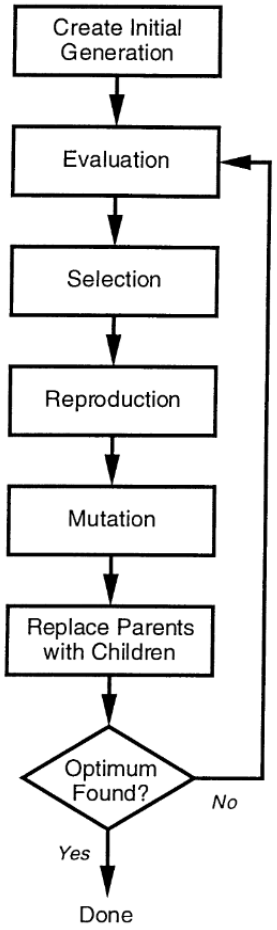


Figure 1. Flow chart of Genetic Algorithm [17] (Genetik Algoritmanın Akış Şeması [17])

In terms of structural optimization, several studies have been conducted over the last decades [2, 15-21]. Based on these studies, structural optimization started with the truss optimization. Ohsaki's study [15] indicates the optimal topologies of truss systems under static loading conditions. Indeed, singularity problems due to the zero cross-sectional area are overcome with GA methods. The cross-section of every member was designed as a string of binary data. Firstly, initial values were determined randomly, and the fitness value was defined via a function. Then, the other processes, mutation and crossover, are applied to find an optimal solution. Finally, parents were selected, and children were produced until the optimal solution was achieved. However, this algorithm can be affordable for large truss systems. Another study [17] addressed that the traditional ground structure method was compensated for by GA methods optimization. In this study, the selection of penalty functions was essential to avoid different local optimums in each new population. Numerical examples were simulated with varying numbers of nodes. As an improvement, this method can be integrated into rigid jointed structures. According to [2], topology optimization for beam and plate examples involves a combination of graph representation of geometrical structures and ranking the results using fitness assignment and stochastic sampling. The procedure begins by creating a graph representation for the genetic algorithm to work on. For their first example in [2], a cantilever plate with the left side of the plate fixed on the wall and a force applied vertically at the right side of the plate at the midpoint is used. Figure 2 shows the mesh and graphical representations of the cantilever plate as shown in Figure 3.

Using these graph representations and genetic algorithms, the constrained optimization for an artificial unconstrained objective function will be calculated, and at the end, the optimized topology result will be found. To achieve this result, a penalty function approach is necessary to generate feasible individuals within the population. The optimized topology for the cantilever plate, as shown in Figures 4 and 5, corresponds to the two different graph representations in Figure 3.

As a conclusion, in all studies [15-21], the Genetic Algorithm method was applied as a novel method, especially in contrast to the ground structure topology method, and they reached advantages in the GA method. Furthermore, the selection of the

penalty and fitness function becomes crucial to take these advantages.

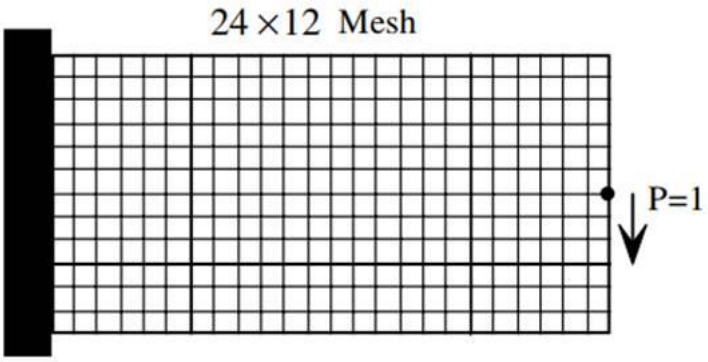


Figure 2. Cantilever plate mesh used for the optimization [2] (Optimizasyon için kullanılan konsol plaka ağı [2])

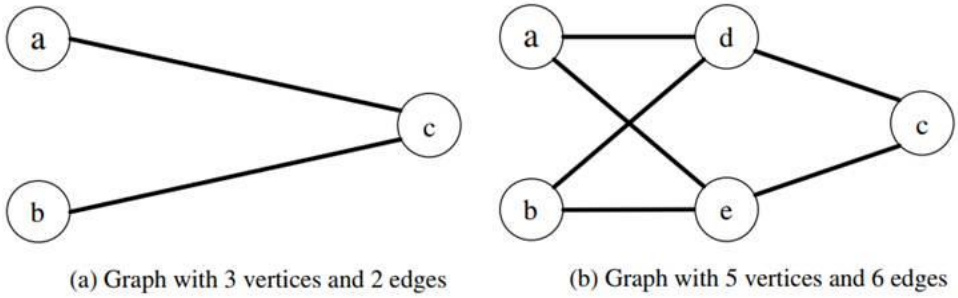


Figure 3. Examples of two graph representations used for minimum compliance design [2] (Minimum uyumluluk tasarımı için kullanılan iki grafik gösteriminin örnekleri [2])

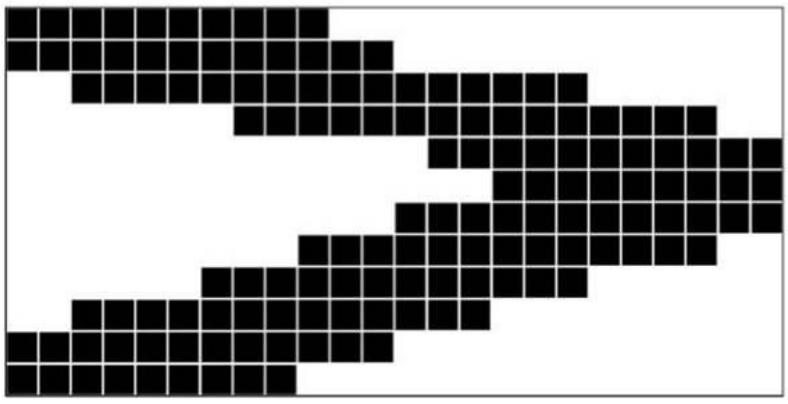


Figure 4. Three-vertex two-edge graphical representation based optimization solution [2] (Üç köşeli iki kenarlı grafiksel gösterime dayalı optimizasyon çözümü [2])

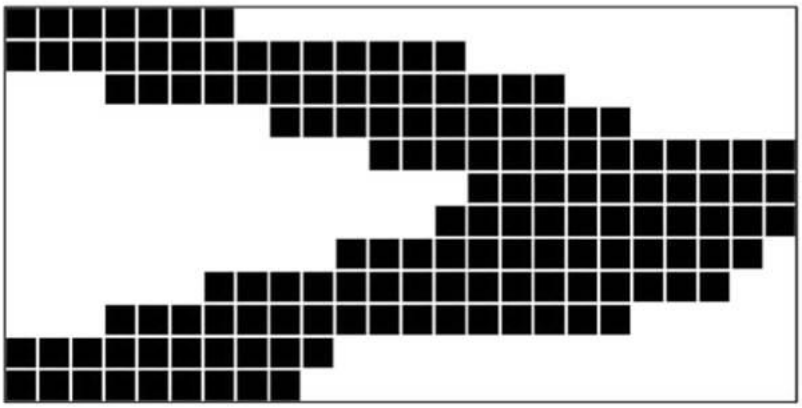


Figure 5. Five-vertex and six-edge graphical representation based optimization solution [2] (Beş köşeli ve altı kenarlı grafiksel gösterime dayalı optimizasyon çözümü [2])

2.2. Ant Colony Optimization on Topology Optimization (Topoloji Optimizasyonunda Karınca Kolonisi Optimizasyonu)

Ant Colony Optimization (ACO) uses a group of computer-created ants to find the optimum point for a given optimization problem. These virtual ants then share information about the quality of their solutions through a communication mechanism analogous to how real ants communicate [22]. The proposed solution follows a structured sequence comprising Initialization, Initial Design Generation, Solution Component Selection, Analysis and Evaluation, Cycle Completion Verification, and Pheromone Update. Initializations start with a certain number of sections, and a certain number of paths are selected. A pheromone level characterizes each path. This level indicates the suitability of the path. These level of phenomena depends on the number of design variables. The next step is constructing the colony of ants. Each of these ants create a solution of its own. Each time an ant follows a path, the pheromone level is decreased. When all the ants select a path and follow, the probabilities of the paths are recalculated. Indeed, using an objective function, the results of all ants are calculated and compared. An optimal local search can also be applied to the solutions. After these pheromone levels around the path s will be updated. These updates can be evaporation or reinforcement. These can be selected if we have any specific rules; more high-quality solutions depend on the objective function result, and to reduce uniformly to avoid unlimited accumulation and to encourage exploration [23-24]. The flow chart for the ant colony optimization is shown in Figure 6. These processes are repeated until a stagnation point is reached or predefined criteria are met. This optimization can be used in civil engineering, timetabling, data mining, cell placement in circuit designs, the vehicle routing problem, and even in music [25-30]. Regarding the scope of this study, there are several studies in structural topology [31-34].

Hassani et. al [31] used an ant colony optimization algorithm for topology optimization. Real ants can locate the shortest path between the nutrient source and their nest by relying on a chemical substance called pheromones, rather than visual cues. This behavior has inspired the creation of Ant Colony Optimization (ACO), a method in which a group of computers creates ants that work together to address a combinatorial problem by transmitting indirect information through an artificial pheromone trail. This trail builds up over time through a learning process that rewards effective solutions to the problem. For example, one of the cases uses a cantilever beam with boundary conditions shown in Figure 7. Lastly, the findings of optimal topology are shown in Figure 8.

Luh et. al [32] explored the classic cantilever beam problem using a modified Ant Colony Optimization (ACO) algorithm. The goal was to find the most efficient structures by minimizing weight while maintaining sufficient stiffness. The design space was broken down into finite elements, and the algorithm, much like a colony of ants, built up various designs, element by element. When subjected to four distinct loading scenarios, the method did not yield a single perfect answer. Instead, it produced a wide array of functional topologies, each representing a unique balance of stiffness and weight. The resulting designs were not just different in shape but also in their internal

makeup, showing both truss-like and more composite-like structures. This demonstrates the algorithm's power in generating diverse solutions, providing designers with a valuable set of lightweight alternatives tailored to specific performance or manufacturing needs.

In their respective studies on using Ant Colony Optimization (ACO) for structural design, Kaveh et al. [31] and Luh and Lin [32] approached the problem with different goals. Kaveh focused on a practical, clear-cut method to achieve the stiffest possible structure for a given amount of material. Their approach treated the design problem as a straightforward on-or-off decision for each element, which avoids the ambiguous "grey areas" seen in other methods. They even added a technique to remove non-functional parts, resulting in designs that are both realistic and easy to build. In contrast, Luh and Lin took a more conceptual and exploratory path. Instead of seeking a single optimal design, they aimed to discover a whole variety of high-quality solutions. They improved the basic ACO algorithm with features like "elitist ants" and "multiple-colony memories" to encourage the creation of diverse and innovative designs. Their work highlights that many reasonable solutions can exist for a single design problem, offering engineers a range of viable and creative options. Essentially, while Kaveh et al. delivered a direct and efficient way to create a manufacturable design, Luh and Lin demonstrated how to evolve the ACO method itself to foster diversity and robustness in generating structural topologies.

2.3. Particle Swarm Optimization on Topology Optimization (Topoloji Optimizasyonunda Parçacık Sürüsü Optimizasyonu)

Particle Swarm Optimization is a stochastic optimization method that utilizes the collective behavior of animal groups, such as insects, herds, birds, and fish. In other words, PSO simulates how these swarms cooperate to find resources, with each member adjusting its search pattern based on its own experiences and those of its peers. The main design principles of this method draw from two main areas: evolutionary algorithms, which share the use of a swarm to explore a wide area of the objective function's solution space concurrently, and artificial life, focusing on the study of artificial systems exhibiting life-like characteristics [35,36]. The algorithm structure is sorted into eight parts. These parts are mainly related to adopting populations, developing selection strategies, modifying position or velocity strategies, and maintaining population diversity. These steps are shown in Figure 9 as a flow chart. Furthermore, parameters such as inertia weight, learning factors, position and speed limits, and initial and size of swarm are crucial in this algorithm. Although the PSO is a recent method, it garnered significant attention in many areas. Particle swarm optimization can be used in engineering, healthcare, environmental, industrial, and commercial applications [37-44].

In terms of structural optimization [45,46], based on the study [45], particles refer to a set of arbitrary vectors generated as a solution to the problem. The swarm flies or goes over the domain of the problem, and particles detect a new location or paths in each step. In this way, the quality of locations can be related to the defining fitness function properly. However, in traditional methods, the swarm can be located for the new location, close to the best particle location, and kept in memory. This situation can affect the essential points in the tracking path in the current particle, and local minimums can be trapped. Therefore, the weighted particle can be determined for the new particles and adapt the velocity formulation. Regarding numerical examples, results indicated that the integrated PSO eliminates the drawbacks and can be a sufficient method for discrete and continuous systems.

Luh et al.'s study [46] introduces a modified binary particle swarm optimization (BPSO) algorithm specifically for continuous structural topology optimization. The algorithm translates its binary decisions into a physical design using a special mapping scheme. It begins with a randomized set of designs. It evaluates them based on a multi-objective fitness function that considers stiffness, weight, and stress, while also penalizing designs that punish constraints. The method uses adaptive rules to balance exploring the design space with refining current solutions, and a multi-swarm memory to save diverse good designs, preventing it from converging on just one answer too early. When tested on standard cantilever plate problems, the proposed BPSO proved effective, generating a wide variety of structurally sound and efficient designs, including truss-like layouts. Its improved diversity and solution quality, when compared to other

optimization methods, confirm its effectiveness as a robust tool for this type of structural design.

The particle's position and velocity correspond to the genotype parameters, while the binary positions correspond to the phenotype parameter. These binary positions are utilized to map the structure of the topology optimization problem. Figure 10 shows how the binary particle to topology mapping is done.

Both studies apply swarm intelligence to structural optimization, but they target different types of problems and use different enhancements. Luh [46] adapted Particle Swarm Optimization (PSO) to a binary framework to handle continuous topology optimization. Their main contribution is a robust way to translate the algorithm's binary decisions into a physical design, allowing it to efficiently explore different material layouts and produce a wide range of feasible solutions. In contrast, Mortazavi and Toğan [45] extend PSO to a more complex problem involving truss systems. Their approach simultaneously optimizes the size, shape, and topology of the truss. They introduce specialized techniques, such as weighted particles and rules, which help them deal with constraints, thereby improving the algorithm's ability to find feasible solutions and converge effectively. In short, [46] work addresses the challenge of making PSO work for binary design spaces in continuous structures, while [45] work tackles the mixed continuous and discrete variables found in truss optimization. Together, they demonstrate the versatility of PSO.

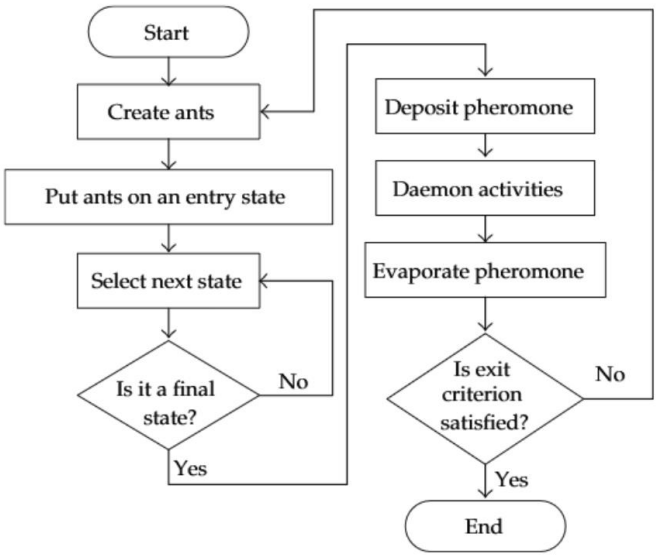


Figure 6. Ant colony optimization flowchart [31] (Karınca kolonisi optimizasyon akış şeması [31])

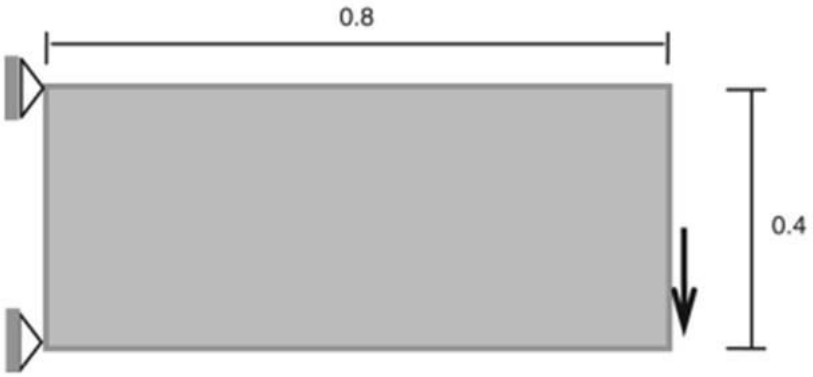


Figure 7. Cantilever beam problem defined in [31] (Tanımlanan konsol kiriş problemi [31])

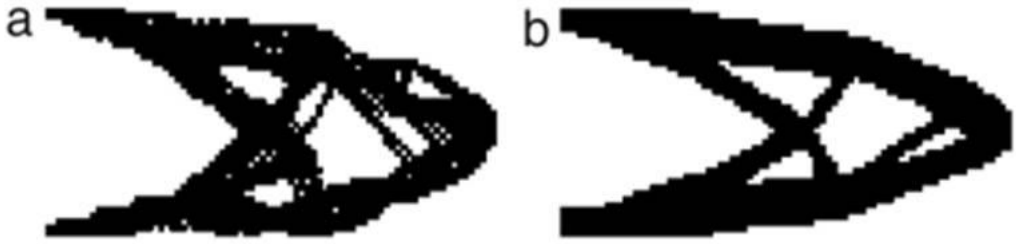


Figure 8. Final results of the optimization including the nose and not respectively [31] (Burun ve burun olmayan kısımları içeren optimizasyonun nihai sonuçları [31])

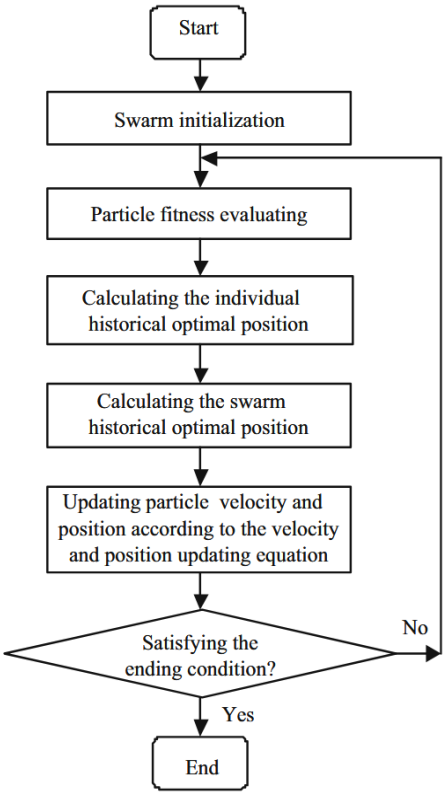


Figure 9. Particle swarm optimization flowchart [35] (Parçacık sürüsü optimizasyon akış şeması [35])

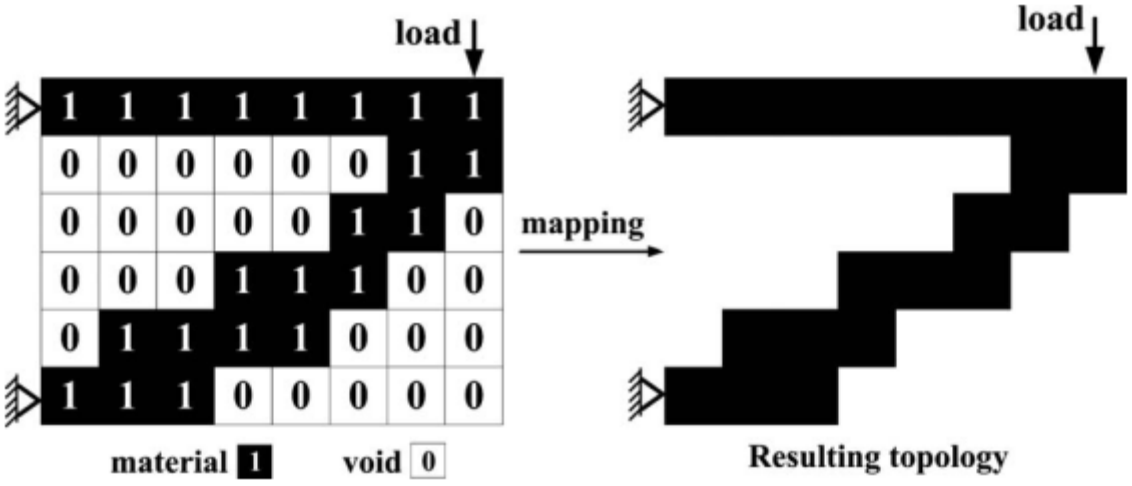


Figure 10. Binary particle domain method-based mapping for topology (Topoloji için ikili parçacık alanı yöntemi tabanlı eşleme)

2.4. Neural Network on Topology Optimization
(Topoloji Optimizasyonu Sinir Ağı)

The human nervous system contains a vast network of interconnected neurons, which are called nerve cells. The term "neural" is an adjective derived from "neuron," while "network" refers to a graph-like structure. Artificial Neural Networks (ANNs) are computing systems that draw inspiration from the biological neural networks found in humans. These systems are also known as "Neural Nets," "parallel distributed processing systems," or "connectionist systems [47,48].

To be classified as an ANN, a computing system must have a directed graph structure. In this structure, the nodes (or vertices) perform simple computations, and the connections (or edges/links/arcs) link pairs of these nodes. This structure is a fundamental concept from elementary graph theory, which defines a directed graph as a set of nodes and the connections between them [47]. Neural networks can be used for speech recognition, several engineering areas, computer vision, and pattern recognition [47-53].

Banga et al. [54] work on using a deep learning method based on a 3D encoder-decoder Convolutional Neural Network to improve the solutions of the Solid Isotropic Material with Penalization process. The proposed method first uses SIMP to perform iterations to obtain an intermediate solution. Then, using the neural network (NN) based on density distribution, the NN creates the results. From the results, the NN calculated the same result with % 40% less computation. In Figure 11, the results are shown. The left side shows the structure and the forces acting on it. The right side shows the CNN prediction and the results of the optimization program.

Meng et al. [55] use a neural network based on finite element analysis, which focuses on solving reliability-based topology optimization. Again, this article focuses on decreasing computational time. The method uses numerical basic functions to calculate the elements on the mesh. The neural network-based deep learning algorithm does each numerical calculation. Then the results were analyzed with displacement solutions and sensitivity analyses. With these results and numerical solutions, the optimal density distribution is created. Since this is a reliability-based topology optimization, the displacement function contains a reliability index parameter; by changing this parameter, different results can be achieved, and the results are shown in Figure 12.

Chandrasekhar and Suresh [56] work on a method for topology optimization (TO) via neural networks (NN). The key idea is to utilize the NN's activation functions to represent the material density field, which is typically managed by a method called Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP). Regarding this approach, the density function is defined via the weights and biases of the NN, making it independent of the finite element mesh. The optimization process relies on the NN's backpropagation algorithm, along with a standard finite element solver, to adjust the density field and find the optimal design. Their results, compared with the regular optimization programs' results, are shown in Figure 13.

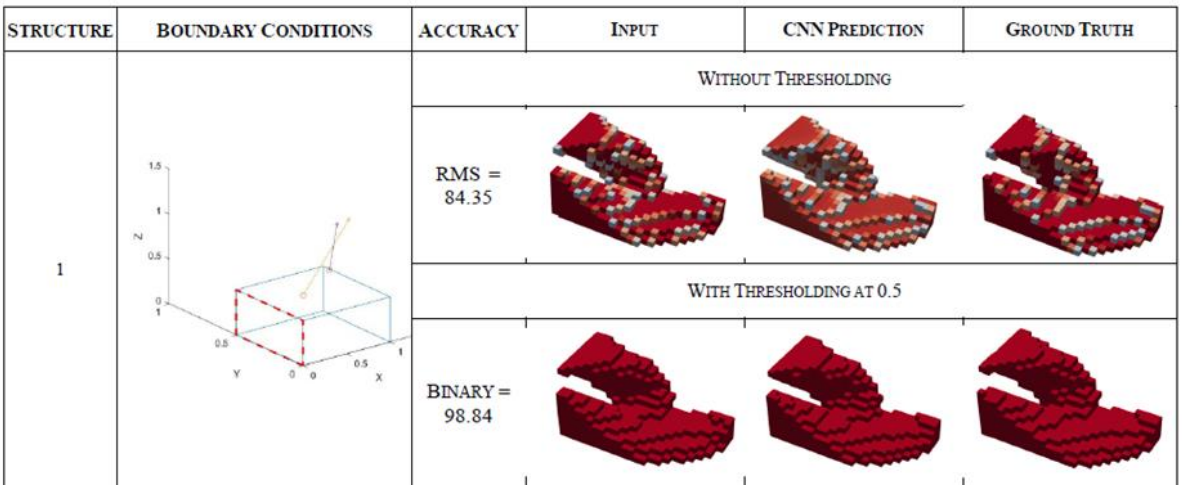


Figure 11. Convolutional Neural Network vs TopOpt Results Comparison with Boundary conditions [54]
(Sınır koşullarıyla Evrişimli Sinir Ağı ve TopOpt Sonuçlarının Karşılaştırılması [54])

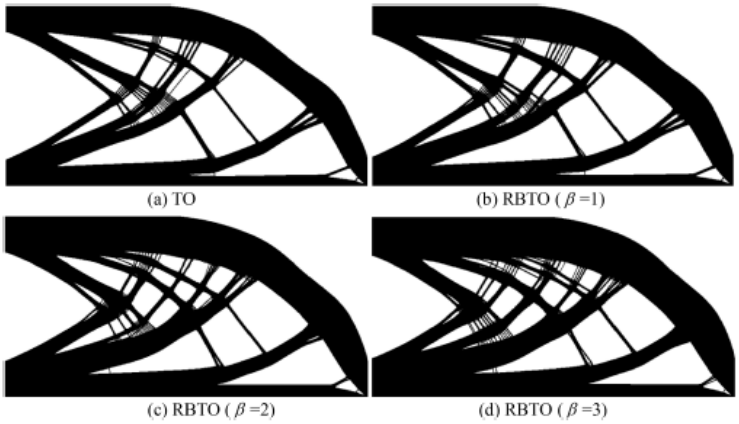


Figure 12. RBTO results versus normal Topology Optimization results [55] (RBTO sonuçları ve normal Topoloji Optimizasyonu sonuçları [55])

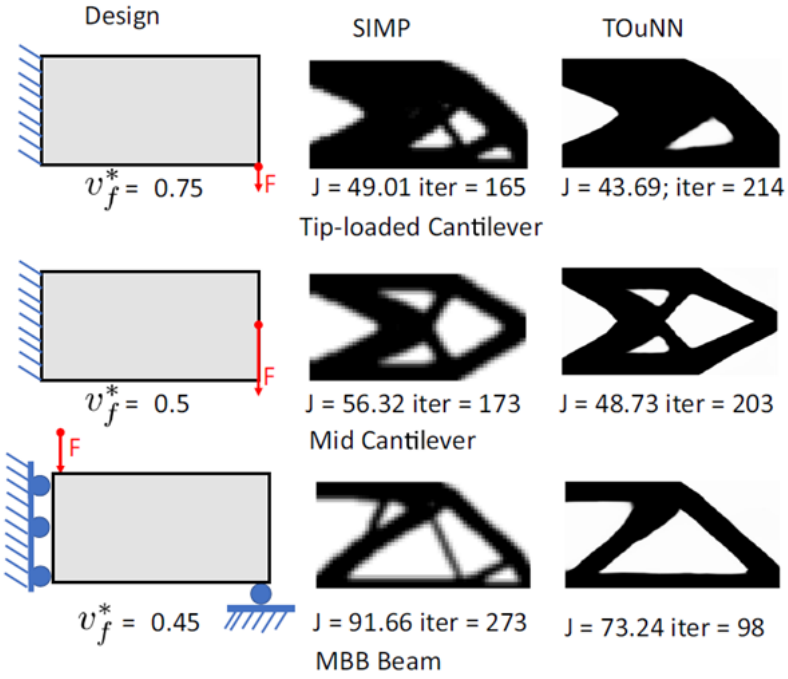


Figure 13. Different boundary conditions optimized comparison between the proposed method and the general optimization program results (Önerilen yöntem ile genel optimizasyon programı sonuçları arasında farklı sınır koşulları optimize edilerek karşılaştırma yapılmıştır)

Xing's [57] article introduces a new method called stochastic gradient online learning and prediction (SGoLap) to speed up structural topology optimization. Moreover, this method uses a one-hidden-layer recurrent neural network (RNN) to learn and predict derivative information, including the second-order derivative of the objective function, as optimization progresses. By doing this, it can selectively skip some of the more computationally expensive steps, such as finite element analysis (FEA) and sensitivity analysis, which saves total computational time. Two different prediction methods based on neural networks are used. The results are shown in Figure 14. The figure compares a standard compliance solving algorithm with the prediction methods from the article, presenting final objective values and their relative differences.

Each of these four works uses neural networks for topology optimization, but their approaches and goals are different. [56] proposes a fundamental change by using neural network activation functions to directly define the density of the material, which creates a design that is not dependent on the finite element mesh and is also fully differentiable. Meng [55] applies this to the field of reliability-based optimization, incorporating uncertainty into their method by combining DNNs with a specialized finite element method to ensure the resulting designs are robust even for enormous and complex problems. In a more practical vein, Banga [54] focuses on speeding up the design process. They use convolutional neural networks (CNNs) that have been pre-trained on intermediate design steps from a standard SIMP optimization, allowing them to quickly generate final designs with a good balance of speed and accuracy. Finally, Xing and Tong [57] introduce an online, recurrent neural network (RNN)-based method. This approach learns as it goes, predicting the necessary gradient and Hessian information in real-time. This dramatically reduces the computational cost of the optimization process itself, eliminating the need for extensive pre-training. Taken together, these studies represent a broad range of applications for neural networks in topology optimization: from creating a new direct formulation [56], to handling uncertainty [55], to speeding up the process using pre-trained data [54], and to accelerating the optimization process in real-time [57].

In this article, Genetic algorithms (GA), Neural Networks (NN), Ant Colony Optimization (ACO), and Particle Swarm Optimization (PSO) are focused on optimizing the topology of materials used in any design based on the force and support types and placements. A comparison table between the algorithms is given in Table 1. Nature-inspired optimization algorithms provide flexible and powerful approaches for addressing complex challenges across critical domains such as healthcare, engineering, and information technology. Techniques like Artificial Neural Networks (ANNs) demonstrate strong capabilities in pattern recognition, enabling applications in areas such as medical diagnosis, while Ant Colony Optimization (ACO) offers efficient solutions to routing and logistics-related problems. At the same time, methods such as Genetic Algorithms (GAs) and Particle Swarm Optimization (PSO) are extensively utilized for design and scheduling tasks, with particular effectiveness in advanced engineering applications, including structural topology optimization. Indeed, the comparison of applications of algorithms can be shown in Table 2 [58- 60].

3. DISCUSSION & CONCLUSIONS (TARTIŞMA & SONUÇLAR)

In this This study reviews non-gradient methods inspired by nature, including Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Ant Colony Optimization (ACO), and Artificial Neural Network Optimization (ANN). Although these methods were examined only for structural optimization with a cantilever beam, they can be applied in many engineering areas.

Firstly, non-gradient-based methods show a better optimal solution than gradient-based methods because the objective is nondifferentiable, and their objective functions can be multiple, such as fitness and weight.

Among the four methods, GA can handle the discrete or multi-objective problems and is suitable for finding global optima. However, it can converge more slowly than PSO and ACO. PSO methods can be ideal for structural problems involving continuous structures. Nevertheless, the traditional PSO may be trapped in a local minima problem, and position and velocity constants may be modified. For the ACO, this method can be effective for discrete problems or truss systems and is better for determining short load paths. The drawback of the method is that its performance heavily depends on the update rules of the pheromone, and ACO is slower than PSO. In a Neural Network, this method can be used to guide the optimization and help run many optimization cases. Indeed, training is one of the critical issues. After training, an ANN can predict quickly, but a wide data repository is a

significant concern for training, which may lead to cost concerns. Another drawback of ANN is that it can be less interpretable due to the complex internal structure and distributed representations. Finally, Neural Networks can be used in cases where real-time design assistance is necessary. In light of this comparison, Particle Swarm Optimization can be selected as the most effective non-gradient method in terms of performance and computation in the beam example.

Although gradient-based methods are typically favored for their efficiency in problems where gradients are easily calculated, non-gradient algorithms offer valuable flexibility and robustness when gradients are complicated or unreliable to compute, such as in overly complex or discrete design spaces. Gradient and non-gradient-based methods can be used simultaneously to overcome difficulties. This hybrid approach could improve the robustness of the solution process and yield more detailed, accurate, and versatile results in topology optimization, especially in applications with complex design constraints or uncertain material properties.

As future work, these methods will be integrated into each other for design and optimization purposes. Another possible area of work is to improve the efficiency and adaptability of methods in complex engineering and real-world problems, as these methods, especially GA and ACO, can face slow convergence rate and computational cost concerns. Therefore, both methods will be integrated with machine learning techniques as they can provide more balance between global and local exploitation. Moreover, adaptive control mechanisms and self-tuning approaches will be crucial to enhance the flexibility and performance in diverse problems.

Problem		top99neo	SGoLap	
			CDLP N_p=10	ALP $\bar{\varepsilon}_f$=3.5%
$A_{300\times100}$ ($\tau_{c_{2D}} = 1\times10^{-5}$)	Topology			
	f (ε_f%)	271.95	271.90 (-0.02%)	271.92 (-0.01%)
$B_{300\times100}$ ($\tau_{c_{2D}} = 1\times10^{-5}$)	Topology			
	f (ε_f%)	227.06	227.06 (0.00%)	227.06 (0.00%)
$B_{1500\times500(a)}$ ($\tau_{c_{2D}} = 1\times10^{-5}$)	Topology			
	f (ε_f%)	228.29	228.20 (0.00%)	228.20 (0.00%)
$B_{1500\times500(b)}$ ($\tau_{c_{2D}} = 1\times10^{-5}$)	Topology			
	f (ε_f%)	170.29	170.29 (0.00%)	170.29 (0.00%)
$C_{300\times100}$ ($\tau_{c_{2D}} = 1\times10^{-5}$)	Topology			
	f (ε_f%)	31.73	31.71 (-0.06%)	31.71 (-0.06%)

Figure 14. Comparison results in different cases between common algorithm the new algorithm [57] (Ortak algoritma ile yeni algoritma arasındaki farklı durumlarda karşılaştırma sonuçları [57])

Table 1. The comparison of non-gradient-based methods (Gradyan tabanlı olmayan yöntemlerin karşılaştırılması)

Method	**Genetic Algorithm (GA)**	**Neural Networks (NN)**	**Ant Colony Optimization (ACO)**	**Particle Swarm Optimization (PSO)**
Inspiration	Natural evolution	Learning Methods of the Human Brain	Ant search, explore, and exploit methods	Behaviour patterns of bird/fish swarms
Search Strategy	**Exploration** (mutation) and **exploitation** (crossover and selection) of a population of solutions.	Gradient-based or other optimization methods (like GA or PSO) to adjust weights and biases.	**Positive feedback** based on pheromone trails, leading to a focus on promising paths.	Particles move through the search space, influenced by their own best-found position and the best position found by the entire swarm.
Problem Types	Combinatorial, discrete, and continuous optimization; practical for complex, non-linear problems.	Supervised, unsupervised, and reinforcement learning; classification, regression, and pattern recognition.	Combinatorial optimization is well-suited explicitly for shortest path problems on graphs.	Continuous optimization; also used for discrete and combinatorial problems.
Strengths	**Robust** for complex, high-dimensional problems. Avoids getting stuck in local optima. Can handle non-differentiable and non-linear functions. Flexible and easy to hybridize.	Exceptional at **pattern recognition** and function approximation. Can learn and generalize from data. Highly effective for complex, non-linear relationships.	Good at finding near-optimal solutions for **path-finding** and routing problems. Naturally parallelizable. Robust to changes in the problem environment.	**Fast convergence** and computationally efficient. Simple to implement. Requires fewer parameters to tune compared to GA. Can handle high-dimensional spaces.
Weaknesses	Can be computationally expensive and slow to converge. Requires careful tuning of parameters (e.g., population size, mutation rate). No guarantee of finding the global optimum.	Requires large amounts of data for training. Prone to getting stuck in local minima (without additional optimization). **The black box** nature makes it hard to interpret the internal logic.	Slower convergence for some problems compared to PSO. Can suffer from stagnation if pheromone values are not managed correctly.	Prone to **premature convergence**, where the entire swarm moves toward a sub-optimal solution. Less effective for problems with many local optima.

Table 2. The comparison between optimization methods and application areas (Optimizasyon yöntemleri ve uygulama alanları arasındaki karşılaştırma)

Algorithm Type	Healthcare & Medicine	Engineering & Manufacturing	Information Technology	Transportation & Logistics
Artificial Neural Networks (ANN)	Analyzing medical scans, diagnosing diseases, discovering new drugs and creating personalized treatment plans based on genomic data.	Improving product quality, predicting equipment failure (predictive maintenance), controlling industrial processes, and operating robotics.	Recognizing patterns in data, understanding human language (NLP), computer image analysis, and strengthening cybersecurity defenses.	Forecasting traffic conditions, enabling autonomous vehicle navigation, optimizing travel routes, and predicting demand for services.
Particle Swarm Optimization (PSO)	Pinpointing regions in medical images, developing optimal treatment plans, and fine-tuning drug dosages for maximum effectiveness.	Enhancing structural and system designs, tuning control systems for better performance, and optimizing the efficiency of power systems.	Selecting the most relevant features in a dataset, clustering data, training other neural networks, and conducting software testing.	Planning the most efficient routes for vehicles, optimizing traffic light timing to reduce congestion, and managing entire fleets of vehicles.
Genetic Algorithms (GA)	Aiding in the design of new pharmaceuticals, creating optimal schedules for treatments and equipment use, and analyzing genetic sequences.	Designing electronic circuits and mechanical parts, optimizing manufacturing schedules, and improving overall system architecture.	Automating software testing, improving code efficiency, selecting key data features for analysis, and configuring complex systems.	Solving complex vehicle routing challenges, designing efficient logistics networks from the ground up, and scheduling transportation tasks.
Ant Colony Optimization (ACO)	Efficiently allocating hospital resources (like staff and beds), managing medical supply chains, and finding the best treatment pathways for patients.	Scheduling tasks in a manufacturing environment, making assembly lines more efficient, and planning preventative maintenance for machinery.	Optimizing data routing in computer networks, discovering insights from large datasets (data mining), and managing tasks in distributed computing.	Finding the best routes for delivery vehicles, designing transportation and logistics networks, and managing real-time traffic flow.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS
(ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***Fatma Nur ŞEN*:** She conducted the literature review, research, editing and writing process.

Literatür taraması, araştırma, düzenleme ve yazma sürecini yürütmüştür.

***Mithat Kutay CAN* :** He conducted the literature review, research, editing and writing process.

Literatür taraması, araştırma, düzenleme ve yazma sürecini yürütmüştür.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Mooneghi, M. A., Kargarmoakhar, R. Aerodynamic mitigation and shape optimization of buildings: review. *Journal of Building Engineering,* 6, (2016), 225-235. doi: 10.1016/j.jobe.2016.01.009

[2] Wang, S. Y., & Tai, K. Graph representation for structural topology optimization using genetic algorithms. *Computers & Structures*, *82*(20–21), (2004), 1609–1622. doi: 10.1016/j.compstruc.2004.05.005

[3] Ahmed, F., Deb, K., Bhattacharya, B., Structural topology optimization using multi-objective genetic algorithm with constructive solid geometry representation. *Applied Soft Computing,* 39, (2016), 240-250. doi: 10.1016/j.asoc.2015.10.063

[4] Bendsøe, M.P. Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural Optimization* 1, 193–202 (1989). doi: 10.1007/BF01650949

[5] Zhou, M., & Rozvany, G. I. N. The COC algorithm, part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *89*(1–3),(1991), 309–336. doi: 10.1016/0045-7825(91)90046-9

[6] Allaire, G., Jouve, F., & Toader, A.-M. A level-set method for shape optimization. *Comptes Rendus. Mathématique*, *334*(12), (2002),1125–1130. doi: 10.1016/s1631-073x(02)02412-3

[7] Wang, M. Y., Wang, X., & Guo, D.. A level set method for structural topology optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *192*(1–2), (2003), 227–246. doi: 10.1016/s0045-7825(02)00559-5

[8] Jan Sokolowski, Antoni Zochowski. On Topological Derivative in Shape Optimization. [Research Report] RR-3170, INRIA. (1997), pp.31.

[9] Bourdin, B., & Chambolle, A. Design-dependent loads in topology optimization. *ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations*, *9*, (2003) 19–48. doi: 10.1051/cocv:2002070

[10] Xie, Y. M., & Steven, G. P. A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Computers & Structures*, *49*(5), (1993), 885–896. doi: 10.1016/0045-7949(93)90035-c

[11] Katoch, S., Chauhan, S.S. & Kumar, V. A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimed Tools Appl* 80, (2021), 8091–8126. doi: 10.1007/s11042-020-10139-6

[12] A. Lambora, K. Gupta and K. Chopra, "Genetic Algorithm- A Literature Review," *2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon)*, Faridabad, India, 2019, pp. 380-384, doi: 10.1109/COMITCon.2019.8862255.

[13] Lingaraj, Haldurai. A Study on Genetic Algorithm and its Applications. I*nternational Journal of Computer Sciences and Engineering*, 4, (2016), 139-143.

[14] De Jong, K. Learning with genetic algorithms: An overview. *Mach Learn* 3, (1988), 121–138. doi: 10.1007/BF00113894

[15] Ohsaki, M., Genetic algorithm for topology optimization of trusses, *Computers&Structures*, 57(2), (1995), 219-225.

[16] Wang, S.Y., Tai, K., Wang, M, Y., An enhanced genetic algorithm for structural topology optimization. I*nt. J. Numer. Meth. Engng*, 65, (2006), 18-44. doi : 10.1002/nme.1435

[17] Chapman, C.D., Structural topology optimization via the genetic algorithm, Master Thesis, Massachusetts Instıtute of Technology, Massachusetts, (1994).

[18] Kaveh, A., Kalatjari, V., Topology optimization of trusses using genetic algorithm,

force method and graph theory. I*nt. J. Numer. Meth. Engng*, 58, (2003), 771-791. doi: 10.1002/nme.800

[19] Kawamura, H., Ohmori, H. & Kito, N. Truss topology optimization by a modified genetic algorithm. *Struct Multidisc Optim* 23, (2002), 467–473. doi: 10.1007/s00158-002-0208-0

[20] Aguilar Maderia, J.F., Rodrigues, H. Pina, H., Multi-objective optimization of structures topology by genetic algorithms. *Advances in Engineering Software*, 36, (2005), 21-28. doi: 10.1016/j.advengsoft.2003.07.001

[21] Wang, S.Y., Tai, K., Structural topology design optimization using Genetic Algorithms with a bit-array representation, Comput. Methods Appl.Mech. Engrg, 194, (2005), 3749-3770. doi:10.1016/j.cma.2004.09.003

[22] Dorigo, M., Birattari., M., Stutzle, T., Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1(4), 2006, 28-39. doi: 10.1109/MCI.2006.329691

[23] Dorigo, M.,Blum, C., Ant colony optimization theory: A survey, *Theoretical Computer Science*,344(2),(2005), 243-278. doi: 10.1016/j.tcs.2005.05.020.

[24] Hasançebi, O. & Çarbas, S., Ant colony search method in practical structural optimization. *Int. J. Optim. Civil Eng*, 1, (2011), 91-105.

[25] Socha, K., Sampels, M., Manfrin, M. Ant Algorithms for the University Course Timetabling Problem with Regard to the State-of-the-Art. In: Cagnoni, S., *et al.* Applications of Evolutionary Computing. EvoWorkshops 2003. Lecture Notes in Computer Science, 2611. Springer, (2003), Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/3-540-36605-9_31

[26] Parpinelli, R. S., Lopes, H. S., & Freitas, A. A., Data mining with an ant colony optimization algorithm. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *6*(4), (2002), 321–332. doi: 10.1109/tevc.2002.802452

[27] Alupoaei, S., & Katkoori, S. Ant Colony System Application to macrocell overlap removal. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, *12*(10), (2004), 1118–1123. doi: 10.1109/tvlsi.2004.832926

[28] L. M. Gambardella, E. Taillard, and G. Agazzi. 1999. MACS-VRPTW: A Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows. Technical Report. Istituto Dalle Molle Di Studi Sull Intelligenza Artificiale.

[29] Guéret, C., Monmarché, N., Slimane, M. Ants Can Play Music. In: Dorigo, M., Birattari, M., Blum, C., Gambardella, L.M., Mondada, F., Stützle, T. (eds) Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence. ANTS 2004. Lecture Notes in Computer Science, vol 3172. Springer, (2004), Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-28646-2_29

[30] Xu, Q., Mao, J., Jin, Z., Simulated annealing-based ant colony algorithm for tugboat scheduling optimization. *Mathematical Problems in Engineering*, (2012). doi: 10.1155/2012/246978.

[31] Kaveh, A., Hassani, B., Shojaee, S., & Tavakkoli, S. M. Structural topology optimization using ANT colony methodology. *Engineering Structures*, *30*(9), (2008), 2559–2565. doi: 10.1016/j.engstruct.2008.02.012

[32] Luh, G.-C., & Lin, C.-Y. Structural topology optimization using ant colony optimization algorithm. *Applied Soft Computing*, *9*(4), (2009), 1343–1353. doi: 10.1016/j.asoc.2009.06.001

[33] Kaveh, A., Talatahari, S., An improved ant colony optimization for the design of planar steel frames. *Engineering Structures*, 32, (2010), 864-873. doi: 10.1016/j.engstruct.2009.12012

[34] Angelo, J.S., Bernardino, H.S., Barbosa, H.J.C., Multi-objective ant colony approaches for structural optimization problems.Proceedings of the Eleventh International Conference on Computational Structures Technology, Stirlingshire, Scotland, 2012.

[35] Wang, D., Tan, D., & Liu, L. Particle Swarm Optimization Algorithm: An overview. *Soft Computing*, *22*(2), (2018), 387–408. doi: 10.1007/s00500-016-2474-6

[36] Jain, N.K., Nangia, U., Jain, J., A Review of particle swarm optimization. *J.Inst.Eng.India Ser. B*, 99(4), (2018), 407-411. doi: 10.1007/s40031-018-0323-y

[37] Zeng, N., Qiu, H., Wang, Z., Liu, W., Zhang, H., & Li, Y. A new switching-delayed-PSO-based optimized SVM algorithm for diagnosis of alzheimer's disease. *Neurocomputing*, *320*, (2018), 195–202. doi: 10.1016/j.neucom.2018.09.001

[38] Jain, I., Jain, V. K., & Jain, R. Correlation feature selection based improved-binary particle swarm optimization for gene selection and cancer classification. *Applied Soft Computing*, *62*, (2018), 203–215. doi: 10.1016/j.asoc.2017.09.038

[39] Zarei, A., Mousavi, SF., Eshaghi Gordji, M. *et al.* Optimal Reservoir Operation Using Bat and Particle Swarm Algorithm and Game Theory Based on Optimal Water Allocation

among Consumers. *Water Resour Manage* 33, (2019), 3071–3093. doi: 10.1007/s11269-019-02286-9

[40] Cao, Y., Ye, Y., Zhao, H., Jiang, Y., Wang, H., Shang, Y., & Wang, J. Remote Sensing of water quality based on HJ-1A HSI imagery with modified discrete binary particle swarm optimization-partial least squares (MDBPSO-PLS) in inland waters: A case in Weishan Lake. *Ecological Informatics*, *44*, (2018), 21–32. doi: 10.1016/j.ecoinf.2018.01.004

[41] Mohebbi, A., Achiche, S., & Baron, L. Integrated and concurrent detailed design of a mechatronic quadrotor system using a fuzzy-based particle swarm optimization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *82*, (2019), 192–206. doi: 10.1016/j.engappai.2019.03.025

[42] Song, M., Chen, K., & Wang, J. Three-dimensional wind turbine positioning using gaussian particle swarm optimization with differential evolution. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *172*, (2018), 317–324. doi: 10.1016/j.jweia.2017.10.032

[43] Shen, J., Han, L. RETRACTED ARTICLE: Design process optimization and profit calculation module development simulation analysis of financial accounting information system based on particle swarm optimization (PSO). *Inf Syst E-Bus Manage* 18, (2020), 809–822. doi: 10.1007/s10257-018-00398-0

[44] Yi, T., Zheng, H., Tian, Y., & Liu, J. Intelligent prediction of transmission line project cost based on least squares support vector machine optimized by particle swarm optimization. *Mathematical Problems in Engineering*, (2018), 1–11. doi: 10.1155/2018/5458696

[45] Luh, G.-C., Lin, C.-Y., & Lin, Y.-S. A binary particle swarm optimization for continuum structural topology optimization. *Applied Soft Computing*, *11*(2), (2011), 2833–2844. doi: 10.1016/j.asoc.2010.11.013

[46] Mortazavi, A., Toğan, V., Simuitaneous size, shape and topology optimization of truss structures using integrated particle swarm optimizer. *Struct Multidisc Optim*, 54, (2016), 715-736. doi: 10.1007/s00158-016-1449-7

[47] Dongare, A. D., Kharde, R. R., & Kachare, A. D. Introduction to artificial neural network. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, *2*(1), (2012), 189-194.

[48] Abdolrasol, M.G.M., Hussain, S.M.S., Ustun, T.S., Sarker, M.R., Hannan, M.A., Mohamed, R., Ali, J.A., Mekhilef, S., Milad, A., Artificial neural networks based optimization techniques: a review. *Electronics*, 10, (2021), 2689. doi: 10.3390/electronics10212689

[49] Lee Sian Choon, Samsudin, A., & Budiarto, R. (n.d.). Lightweight and cost-effective MPEG video encryption. *Proceedings. 2004 International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications*, 2004, 525–526. doi: 10.1109/ictta.2004.1307863

[50] D. Cho, Y. -W. Tai and I. S. Kweon, "Deep Convolutional Neural Network for Natural Image Matting Using Initial Alpha Mattes," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 28, no. 3, March 2019, pp. 1054-1067. doi: 10.1109/TIP.2018.2872925.

[51] LeCun, Y., Bengio, Y. & Hinton, G. Deep learning. *Nature* 521, (2015), 436–444. doi: 10.1038/nature14539

[52] Himmelblau, D.M., Applications of artificial neural networks in chemical engineering. *Korean J. Chem. Eng.*, 17(4), (2000), 373-392.

[53] Adeli, H., Neural networks in civil engineering 1989-2000. Computer-aided civil and infrastructure engineering, 16, (2001), 126-142.

[54] Banga, Saurabh & Gehani, Harsh & Bhilare, Sanket & Patel, Sagar & Kara, Levent. (2018). 3D Topology Optimization using Convolutional Neural Networks. 10.48550/arXiv.1808.07440.

[55] Meng, Z., Lv, S., Gao, Y., Zhong, C., & An, K. Data-driven reliability-based topology optimization by using the extended multi scale finite element method and neural network approach. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *438*, (2025), 117837. doi: 10.1016/j.cma.2025.117837

[56] Chandrasekhar, A., Suresh, K. TOuNN: Topology Optimization using Neural Networks. *Struct Multidisc Optim* 63, (2021), 1135–1149. doi: 10.1007/s00158-020-02748-4

[57] Xing, Y., & Tong, L. A stochastic gradient online learning and prediction method for accelerating structural topology optimization using recurrent neural network. *Engineering Structures*, *338*, (2025), 120507. doi: 10.1016/j.engstruct.2025.120507

[58] Nayak, J., Swapnarekha, H., Naik, B., Dhiman, G., Vimal, S. 25 years of particle swarm optimization: flourishing voyage of two decades. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30, (2023), 1663-1725. doi: 10.1007/s11831-022-09849-x.

[59] Alhijawi, B., Awajan, A. Genetic algorithms: theory, genetic operators, solutions, and applications. Evolutionary Intelligence, 17, (2024), 1245-1256. doi: 10.1007/s12065-023-00822-6

[60] M. R. G. Meireles, P. E. M. Almeida and M. G. Simoes, A comprehensive review for industrial applicability of artificial neural networks, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 50(3), (2003), 585-601. doi: 10.1109/TIE.2003.812470.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1286-1294 (2025)

Baskı Tekniklerinde Teknolojik Dönüşüm ve Dijital Sanata Yansımaları: Dijital Baskı ve Yapay Zekâ Destekli Üretim Süreçleri

Cengiz ŞAHİN[1*]

[1]*Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mimarlık ve Güzel Sanatlar Fakültesi, Görsel İletişim Tasarımı Bölümü, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/07/2025
Düzeltme: 24/07/2025
Kabul: 28/07/2025

Anahtar Kelimeler

Baskı Teknolojileri
Yapay Zekâ,
3d Baskı
Blockchain

Article Info

Research article
Received: 07/07/2025
Revision: 24/07/2025
Accepted: 28/07/2025

Keywords

Printing Technologies
Artificial İntelligence
3D Printing
Blockchain

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Dijital sanat ve baskı teknolojilerinde yaşanan yenilikler; yapay zekâ, 3D baskı, ekolojik baskı ve blockchain uygulamaları ile kültürel, teknik ve ekonomik dönüşümler incelenmiştir. / Innovations in digital art and printing technologies are examined through artificial intelligence, 3D printing, ecological printing, and blockchain applications, revealing cultural, technical, and economic transformations.



Şekil A: *Dijital sanat ve baskı teknolojilerinin etkileşimi /* ***Figure A:*** *Interaction between digital art and printing technologies*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Dijital sanat, yapay zekâ, VR/AR ve blockchain teknolojileriyle yeni ifade biçimleri kazanmıştır. / Digital art has gained new forms of expression through AI, VR/AR, and blockchain technologies.*
- *Baskı teknolojilerinde dijital, 3D ve ekolojik yaklaşımlar verimlilik ve sürdürülebilirlik sağlamaktadır. / Digital, 3D, and ecological approaches in printing technologies provide efficiency and sustainability.*
- *Blockchain, sanat eserlerinin orijinalliğini ve telif haklarını korumada önemli bir araçtır. / Blockchain is a key tool for protecting authenticity and copyrights of artworks.*
- *Teknoloji entegrasyonu, sanat ve baskı sektörlerinde üretim ve pazarlama stratejilerini kökten değiştirmektedir. / Technology integration fundamentally changes production and marketing strategies in art and printing industries.*

Amaç (Aim): *Bu çalışmanın amacı, dijital sanat ve baskı teknolojilerindeki yenilikleri analiz ederek geleceğe yönelik eğilimleri ortaya koymaktır. / The aim of this study is to analyze innovations in digital art and printing technologies and to reveal future trends.*

Özgünlük (Originality): *Çalışma, dijital sanat ve baskı teknolojilerinin kesişiminde gelişen yeni üretim ve ifade biçimlerini disiplinlerarası bir bakış açısıyla ele alması bakımından özgündür. / The study is original in addressing new forms of production and expression emerging at the intersection of digital art and printing technologies from an interdisciplinary perspective.*

Bulgular (Results): *Dijitalleşme, sanat ve baskı sektörlerinde hız, esneklik, kişiselleştirme ve sürdürülebilirlik avantajları sağlamaktadır. / Digitalization provides advantages of speed, flexibility, personalization, and sustainability in the fields of art and printing.*

Sonuç (Conclusion): *Dijital sanat ve baskı teknolojilerinin entegrasyonu, üretim süreçlerini, pazarlama stratejilerini ve sanatın toplumsal etkilerini köklü biçimde dönüştürmektedir. / The integration of digital art and printing technologies fundamentally transforms production processes, marketing strategies, and the social impact of art.*

*Corresponding author, e-mail: cengizsahin@aybu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1736712

GU J Sci, Part C, 13(3): 1286-1294 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Baskı Tekniklerinde Teknolojik Dönüşüm ve Dijital Sanata Yansımaları: Dijital Baskı ve Yapay Zekâ Destekli Üretim Süreçleri

Cengiz ŞAHİN[1*]

[1]*Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mimarlık ve Güzel Sanatlar Fakültesi, Görsel İletişim Tasarımı Bölümü, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/07/2025
Düzeltme: 24/07/2025
Kabul: 28/07/2025

Anahtar Kelimeler

Baskı Teknolojileri,
Yapay Zekâ,
3d Baskı,
Blockchain

Öz

Bu çalışmada, dijital sanat ve baskı teknolojilerindeki yenilikçi uygulamaları disiplinlerarası bir bakış açısıyla ele alınarak, bu alanlardaki dönüşümün teknik, kültürel ve ekonomik boyutları incelenmiştir. Çalışma, öncelikle dijital sanatın tarihsel evrimine odaklanarak, bilgisayar destekli tasarım, yapay zekâ, sanal ve artırılmış gerçeklik gibi teknolojilerin sanatsal ifade biçimlerini nasıl dönüştürdüğünü analiz etmektedir. Özellikle 1990 sonrası hız kazanan dijitalleşme sürecinin, geleneksel sanat anlayışını nasıl yeniden şekillendirdiği ve izleyici etkileşimini artıran yeni sanat formlarının nasıl ortaya çıktığı vurgulanmaktadır. Ayrıca, baskı teknolojilerindeki yenilikçi yaklaşımların; dijital baskı, 3D baskı, ekolojik baskı çözümleri ve akıllı mürekkep uygulamaları gibi gelişmelerin üretim süreçlerine etkisini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, geleneksel yöntemlerle karşılaştırmalı analizler sunularak, dijital teknolojilerin sağladığı hız, esneklik ve sürdürülebilirlik avantajları ortaya konmaktadır. Ayrıca, blockchain teknolojisinin dijital sanat eserlerinin orijinalliğini koruma ve telif haklarını güvence altına alma potansiyeli tartışılmaktadır. Bu çalışmada, dijital sanat ve baskı teknolojilerinin bütünleşmesinin ortaya çıkardığı işbirlikleri incelenerek, geleceğe yönelik eğilimlerin öngörülmesi amaçlanmıştır. Özellikle artırılmış gerçeklik uygulamaları, kişiselleştirilmiş üretim modelleri ve çevre dostu malzemelerin öne çıkacağı yapılan çalışmada ön plana çıkmaktadır. Sonuç olarak, teknolojik ilerlemelerin sanat ve üretim pratiklerinin kökten değiştiği sistematik bir şekilde ortaya çıkmıştır.

Technological Transformation in Printing Techniques and Its Impact on Digital Art: Digital Printing and AI-Supported Production Processes

Article Info

Research article
Received: 07/07/2025
Revision: 24/07/2025
Accepted: 28/07/2025

Keywords

Printing Technologies
Artificial Intelligence
3D Printing,
Blockchain

Abstract

This interdisciplinary study examines innovative applications in digital art and printing technologies, exploring the technical, cultural and economic dimensions of transformation in these fields. It focuses primarily on the historical evolution of digital art, analyzing the impact of technologies such as computer-aided design, artificial intelligence, virtual reality and augmented reality on artistic expression. It illustrates how the digitalization process, which gained momentum after 1990, has reshaped traditional notions of art and given rise to new art forms that encourage audience engagement. The study also reveals the impact of innovative printing technology approaches, such as digital printing, 3D printing, ecological printing solutions, and smart ink applications, on production processes. Comparative analyses with traditional methods are presented to highlight the advantages of speed, flexibility and sustainability offered by digital technologies. Furthermore, it discusses the potential of blockchain technology to protect the authenticity of digital artworks and secure copyrights. The study aims to predict future trends by examining collaborations that have emerged from the integration of digital art and printing technologies. Augmented reality applications, personalized production models, and environmentally friendly materials are particularly highlighted. The study systematically demonstrates that technological advances have fundamentally changed art and production practices.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dijital sanat ve baskı teknolojilerinde yaşanan yenilikler, günümüz sanat teknoloji dengesinde önemli bir yer tutmaktadır. Sanatın dijital ortamlara taşınması, geleneksel sanat tanımlarının yeniden gözden geçirilmesinin yanı sıra baskı teknolojileri alanında da devrim niteliğinde gelişmelere yol açmıştır. Bu çalışmada, dijital sanatın evriminden başlayarak baskı teknolojilerinde kullanılan inovatif

*Corresponding author, e-mail: cengizsahin@aybu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1736712

yaklaşımlar, mevcut uygulamalar ve sektöre yön veren eğilimler detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Dijital sanatın tarihsel gelişimi, teknolojik ilerlemeler ışığında evrimleşmiş ve sanat üretim süreçleri, izleyici ile etkileşim biçimleri, dağıtım yöntemleri gibi pek çok alanda değişimi ortaya çıkarmıştır [1]. Bunun yanı sıra, baskı teknolojilerinde kullanılan yeni materyaller, akıllı baskı sistemleri, 3D baskı çözümleri ve ekolojik baskı yaklaşımları, hem üretim hem de tüketici perspektifinde çeşitli avantajlar sağlamaktadır [2].

Bu çalışmada, dijital sanatın ve baskı teknolojilerindeki yenilikçi çözümlerin; teknolojik altyapılar, uygulama örnekleri, pazar dinamikleri ve geleceğe yönelik eğilimlerin analizi yapılmıştır. Çalışmanın amacı, sektördeki gelişmeleri ortaya koymak, sektöre teknik detaylar üzerinden akademik bir perspektif sunmak ve yenilikçi teknolojilerin sanat ve baskı dünyasında ortaya çıkardığı dönüşümü kapsamlı bir şekilde değerlendirerek literatüre kazandırmaktır.

2. YÖNTEM (METHODS)

Bu çalışma, dijital sanat ve baskı teknolojilerindeki yenilikçi uygulamaları kapsamlı bir şekilde incelemek amacıyla tematik literatür incelemesine dayalı nitel bir araştırma olarak tasarlanmıştır. Araştırmanın metodolojik çerçevesi, öncelikle disiplinlerarası bir bakış açısıyla konuyu ele almak üzere belirlenen tematik sınırların tanımlanmasıyla oluşturulmuştur. Veri toplama sürecinde, Web of Science, Scopus ve ulusal akademik veri tabanları gibi güvenilir kaynaklar taranmış; anahtar kelime olarak "dijital sanatın evrimi", "akıllı baskı sistemleri", "3D baskı uygulamaları", "yapay zekâ destekli sanat" ve "blockchain tabanlı telif hakları" gibi terimler kullanılmıştır. Tarama, özellikle 2000-2025 yılları arasında yayımlanmış hakemli makaleler, kitaplar ve endüstri raporları ile sınırlandırılmıştır.

Toplanan verilerin analizinde tematik içerik analizi yöntemi benimsenmiş, literatürdeki bulgular dijital sanatın tarihsel dönüşümü, baskı teknolojilerindeki teknik yenilikler ve bu iki alanın kesişiminde ortaya çıkan entegrasyon modelleri şeklinde üç ana tema altında sınıflandırılmıştır. Bu temaların her biri, alt başlıklarla desteklenerek detaylandırılmış ve sektörel uygulama örnekleriyle ilişkilendirilmiştir. Karşılaştırmalı analiz için geleneksel ve dijital yöntemlerin teknik, ekonomik ve ekolojik parametreleri tablo halinde özetlenmiştir. Bu metodoloji, dijital ve geleneksel sanat-baskı pratikleri arasındaki etkileşimi bütüncül bir yaklaşımla ele almayı hedefleyen gelecek araştırmalar için de bir model oluşturmaktadır.

3. BASKI TEKNOLOJİLERİNDE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR (INNOVATIVE APPROACHES IN PRINTING TECHNOLOGIES)

Son yıllarda baskı teknolojilerinde yaşanan yenilikler, üretim ve tasarım süreçlerinde devrim niteliğinde gelişmeler sağlamıştır. Geleneksel baskı yöntemlerinin ötesine geçilerek, dijital baskı, 3D baskı ve akıllı baskı teknolojileri gibi inovatif yöntemler öne çıkmıştır.

3.1. Dijital Baskı Teknolojilerinin Gelişimi (The Development of Digital Printing Technologies)

Dijital baskı teknolojileri, son yıllarda hem donanım hem de yazılım alanlarındaki hızlı gelişmeler sayesinde matbaacılık ve görsel iletişim sektörlerinde önemli bir dönüşüm yaşamıştır. Özellikle yüksek çözünürlüklü baskı makineleri, gelişmiş renk yönetim sistemleri ve kişiselleştirilmiş üretim olanakları sayesinde dijital baskı, geleneksel ofset ve flekso baskıya güçlü bir alternatif haline gelmiştir. Dijital baskı teknikleri, bilgisayar ortamında hazırlanan tasarım ve görsellerin gelişmiş baskı makineleri aracılığıyla farklı malzemeler üzerine hızlı ve yüksek kalitede basılmasını sağlayan modern yöntemlerdir [3]. Bu teknoloji, yüksek çözünürlük, renk doğruluğu ve esnek üretim gibi avantajlar sunarken, aynı zamanda diğer baskı tiplerine göre maliyet ve zaman açısından da önemli tasarruflar sağlamaktadır [4]. Dijital baskı sayesinde, küçük serilerde bile yüksek kaliteli ürünler üretilebilmekte, kişiselleştirilmiş tasarımlar ön plana çıkmaktadır. Bu tekniklerde, baskı kalitesini etkileyen en önemli unsurlardan biri, kullanılan tram (screening) yapısıdır. Dijital baskı sistemlerinde, farklı nokta yapıları ve tram yöntemleri, renk değerleri, nokta kazancı ve renk tutarlılığı gibi temel baskı parametrelerinde belirgin değişiklikler oluşturabilmektedir [3].

Dijital baskı teknolojileri, sanat dünyasında da üretim ve sunum biçimlerini kökten değiştirerek sanatçılara büyük bir özgürlük ve rahat çalışma alanı sağlamıştır. Sanatçılar, dijital ortamda ürettikleri eserleri yüksek çözünürlük ve renk kalitesi ile farklı yüzeylere aktarmaktadır. Bu yöntemlerle; kâğıt, tuval, kumaş, metal veya cam gibi çok çeşitli malzemeler üzerinde hızlıca ve yüksek kalitede basılabilmektedir. Dijital baskı, sanatçıların kolaj, foto-manipülasyon veya bilgisayar destekli illüstrasyon gibi çok katmanlı ve interaktif işler üretmesine olanak tanırken, bu eserlerin sergi ve müze ortamlarında kolayca

çoğaltılıp taşınabilmesi, sanatın daha geniş kitlelere ulaşabilmesini sağlamaktadır [5]. Tablo 1' de dijital baskı teknolojilerinin avantajları ve dezavantajları özetlenerek, geleneksel baskı yöntemleriyle karşılaştırması yapılmıştır. Tablo 1 incelendiğinde daha yüksek üretim hızlarında, kişiselleştirilmiş ve ekolojik baskıların mümkün olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Dijital Baskı ile Geleneksel Baskı Teknolojileri (Digital Printing and Traditional Printing Technologies) [4]

Özellik	Dijital Baskı	Geleneksel Baskı
Üretim Hızı	Yüksek, hızlı dönüşümlü	Orta, detaylı hazırlık süreci gerektirir
Maliyet	Küçük serilerde avantajlı, kişiselleştirmeye uygun	Yüksek başlangıç maliyetleri, büyük serilerde avantajlı
Kalite	Yüksek renk doğruluğu, keskin detaylar	Renk sapmaları, manuel müdahaleye bağlı
Ekolojik Etki	Daha düşük atık, çevre dostu mürekkep kullanımı	Geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek atık üretimi
Esneklik	Tasarım değişikliklerine hızlı adapte olabilme	Tasarım değişikliklerinde zaman kaybı yaşanır

3.2. 3D Baskı ve Endüstriyel Uygulamaları (3D Printing and Industrial Applications)

3D baskı teknolojisi, üç boyutlu dijital modellerin fiziksel objelere dönüştürülmesini sağlamaktadır. Bu teknoloji, prototip üretiminden seri üretime kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Endüstriyel tasarım, tıp sektörü, otomotiv ve havacılık gibi birçok alanda verimliliği artıran 3D baskı, ürün geliştirme süreçlerinde de önemli rol oynamaktadır. Örneğin, medikal alanda 3D baskı ile özelleştirilmiş protezler ve implantlar üretilirken, sanat dünyasında interaktif heykeller ve enstalasyonlar oluşturulabilmektedir. Günümüzde 3D baskı teknolojisi, hem kullanılan malzemeler hem de üretim süreçleri açısından sürekli olarak yenilenmektedir. Plastik ve metal gibi geleneksel malzemelerin yanı sıra, biyolojik içerikli malzemeler, reçineler ve kompozitler de bu alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bu gelişmeler, özellikle havacılık, otomotiv, tıp ve çevre teknolojileri gibi alanlarda daha hafif, dayanıklı ve biyouyumlu ürünlerin üretilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca, yeni geliştirilen baskı teknikleri sayesinde, daha karmaşık ve detaylı tasarımlar kısa sürede ve farklı malzemelerle üretilebilmektedir. Tasarım yazılımlarındaki ilerlemeler ve otomasyonun artması, baskı süreçlerinde hata payını azaltırken, üretim hızını ve verimliliğini de artırmaktadır. Sürdürülebilirlik açısından ise, doğada çözünebilen malzemelerin kullanılması ve enerji tüketiminin azaltılması yönünde önemli adımlar atılmaktadır [6].

3D baskı teknolojisinin sağladığı avantajlar ve geniş kullanım alanları, onu çağdaş üretim ve tasarım süreçlerinin vazgeçilmez bir parçası haline getirmiştir. Sağlık sektöründe, kişiye özel protez ve implantların hızlı ve ekonomik biçimde üretilmesi mümkün olurken; sanayi alanında ise, karmaşık ve geleneksel yöntemlerle yapılması zor olan parçalar kolaylıkla üretilebilmektedir. Mimarlık ve inşaatta, özgün formlara sahip yapıların kısa sürede inşa edilmesi sağlanırken, eğitim ve araştırma alanlarında ise düşük maliyetli prototipler geliştirmek kolaylaşmıştır. Moda ve sanat dünyasında ise, kişiselleştirilmiş ve yenilikçi eserler ortaya koymak için 3D baskıdan yararlanılmaktadır. Bu teknolojinin sunduğu hız, esneklik, özelleştirme ve çevre dostu üretim olanakları, hem endüstriyel hem de sanatsal uygulamalarda önemli fırsatlar ortaya çıkarmaktadır [6].

3.3. Ekolojik Baskı Uygulamaları (Ecological Printing Applications)

Günümüzde çevresel etkilerin giderek daha fazla önem kazanması, baskı teknolojilerinde de ekolojik yaklaşımların ön plana çıkmasına neden olmuştur. Ekolojik baskı, çevre dostu bir yaklaşım sunan ve doğadan elde edilen bitki, taş, toprak gibi organik malzemelerle çeşitli yüzeylere desen ve renk aktarma imkânı tanıyan yenilikçi bir baskı tekniğidir. Bu yöntemde, kullanılan doğal malzemelerin ve tasarımcının yaratıcı dokunuşlarının etkisiyle her bir baskı çalışması kendine özgü ve tekrarı olmayan bir nitelik kazanır [7]. Kimyasal boyalar yerine bitkilerden veya doğal kaynaklardan elde edilen boyar maddelerle uygulanan bu teknik, sürdürülebilir üretimi desteklerken aynı zamanda özgün ve estetik sonuçlar ortaya koyar. Geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımı, toksik olmayan mürekkep ve boyaların tercih edilmesi ile sürdürülebilir baskı çözümleri kapsamında değerlendirilebilir. Bu yönüyle, ekolojik baskı teknolojileri hem çevre dostu hem de ekonomiye katkıda bulunan bir yaklaşım olarak dikkat çekmektedir. Ekolojik baskı, yalnızca tekstil sektöründe değil, kâğıt, pamuk, keten vb. farklı yüzeylerde ve deneysel tipografi gibi sanatsal alanlarda da geniş bir kullanım alanına sahiptir [8-10].

3.4. Baskı Teknolojilerinde Otomasyon ve Akıllı Sistemler (Automation and Smart Systems in Printing Technologies)

Baskı endüstrisi, dijitalleşme ve otomasyonun etkisiyle son yıllarda büyük bir dönüşüm

yaşamaktadır. Baskı süreçlerinde otomasyonun yaygınlaşması, üretim verimliliğini artırmış ve insan hatasını minimize etmiştir. Akıllı baskı sistemleri, makine öğrenimi ve yapay zekâ teknolojileri ile entegre edilerek, kalite kontrol süreçlerini gerçek zamanlı olarak optimize etmektedir. Bu teknolojiler sayesinde, üretim hattında yaşanan aksaklıklar hızlıca tespit edilip giderilebilmekte, dolayısıyla üretim maliyetleri azaltılmaktadır. Özellikle yapay zekâ destekli otomasyon sistemleri, baskı süreçlerinde verimliliği artırmakta ve insan hatasını en aza indirgemektedir. Akıllı makineler, baskı işlerinin otomatik olarak sıralanması, renk yönetimi ve bakım gibi görevleri üstlenerek üretim sürelerini kısaltmakta ve kaliteyi standartlaştırmaktadır. Bu gelişmeler sayesinde baskı firmaları, kişiselleştirilmiş ve düşük tirajlı baskı taleplerine daha hızlı yanıt verebilmekte, aynı zamanda sürdürülebilirlik hedeflerine de daha kolay ulaşabilmektedir. Gelecekte baskı sektöründe rekabet avantajı elde etmek isteyen firmaların, dijital teknolojilere ve veri odaklı otomasyon sistemlerine yatırım yapmaları gerekmektedir. Nesnelerin interneti (IoT) ve bulut tabanlı çözümler, baskı makinelerinin uzaktan izlenmesini ve yönetilmesini mümkün kılarak operasyonel esnekliği artırmaktadır. Ayrıca, çevre dostu malzemelerin ve enerji verimli üretim tekniklerinin benimsenmesi, sektörde sürdürülebilir büyümenin önünü açmaktadır. Tüm bu yenilikler, baskı endüstrisinin yalnızca üretim süreçlerinde değil, müşteri deneyimi ve hizmet sunumunda da dijitalleşmeye hızla adapte olduğunu göstermektedir [11].

4. DİJİTAL SANAT ve BASKIDA KULLANILAN YENİ TEKNOLOJİLER (NEW TECHNOLOGIES USED IN DIGITAL ART AND PRINTING)

Dijital sanat ve baskı teknolojilerindeki yenilikçi yöntemler, hem teorik hem de uygulamalı anlamda önemli dönüşümlere neden olmaktadır.

4.1. Yapay Zekâ Destekli Sanat Üretimi (Art Production Supported by Artificial Intelligence)

Yapay zekâ, dijital sanat üretiminde devrim niteliğinde bir araç haline gelmiştir. Algoritmalar, sanatçıların stil analizlerinden türetilen verilerle otomatik eserler üretebilmekte veya mevcut sanatsal çalışmaları zenginleştirebilmektedir. Örneğin, "deep learning" (derin öğrenme) teknikleri kullanılarak, sanatçıların geçmiş eserlerine benzer yeni kompozisyonlar oluşturulabilmektedir. Bu teknoloji, sanatın üretim süreçlerini hızlandırıp farklı estetik boyutlar kazandıracak güce sahiptir. Spector ve Alpern, yapay zekânın sanat üretiminde kullanılmasının yalnızca teknik bir süreç olmadığını, aynı zamanda kültürel ve eleştirel boyutları da barındırdığını vurgulamıştır. Yazarlar bu çalışmalarında, otomatik sanat eseri üretimi için geliştirilen algoritmaların, estetik değerleri ve kültürel normları dikkate alacak şekilde tasarlanmasının önemine dikkat çekmişlerdir. Yapay zekâ sistemlerinin, sanatsal üretimde yaratıcılığı simüle edebilmesi için hem eleştirel düşünceyi hem de kültürel bağlamı içselleştirmesi gerektiğini öne sürmüşlerdir. Bu yaklaşım, yapay zekâ destekli sanatın yalnızca rastgele üretimden ibaret olmadığını; aksine, anlam ve eleştiriyle bütünleşmiş, daha derin ve özgün eserler ortaya koyabileceğini ortaya koymuştur [12].

Yapay zekâ, sanat üretiminde yeni ifade biçimleri ve yaratıcı süreçler ortaya çıkararak sanatçılar için benzersiz olanaklar sunmuştur. Yapay zekânın yalnızca bir araç olmanın ötesine geçerek, sanat eserlerinin biçimlenişinde aktif bir ortak ve yaratıcı unsur haline gelmiştir. Makine öğrenimi ve yapay zekâ; sanat eserlerinin oluşturulmasında algoritmik kompozisyon, görsel analiz, otomatik üretim, adaptif davranışlar ve izleyiciyle etkileşimli sanat uygulamaları gibi çeşitli yöntemlerle kullanılmaktadır. Bu perspektif, sanat ve teknolojinin kesişiminde yeni estetik anlayışların ve üretim yöntemlerinin gelişmesine öncülük etmektedir [13].

Yapay zekâ tekniklerinin özellikle derin öğrenme ve yeni nesil algoritmalarla birlikte sanat alanında daha önce görülmemiş bir özerklik ve yaratıcılık potansiyeli sunduğu ifade değerlendirilmektedir. Gelecekte, yapay zekâ sistemlerinin yalnızca insan sanatçılara araç olmakla kalmayıp, kendi başına anlam, niyet ve estetik değer üretebilen özerk yaratıcı aktörlere dönüşmesi mümkündür. Bu gelişme, sanatın otantiklik, sahiplik ve niyet gibi temel kavramlarını yeniden tanımlayacak; insan ve makine arasındaki yaratıcı işbirliğini çok daha karmaşık ve çok katmanlı bir hale getirecektir. Bütün bu yönleriyle, yapay zekâ destekli sanat üretimi, sanatın doğasını ve toplumsal algısını köklü bir biçimde dönüştürme potansiyeline sahiptir [14].

4.2. Artırılmış Gerçeklik (AR) ve Sanal Gerçeklik (VR) Uygulamaları (Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) Applications)

Artırılmış gerçeklik (AR) ve sanal gerçeklik (VR) teknolojileri, dijital sanatın deneyimsel yönünü güçlendirmekte ve sanat eserlerinin yalnızca izlenmesini değil, aynı zamanda etkileşimli hale gelmesini sağlamaktadır. Örneğin, bir müze ziyareti

sanal ortama taşınabilir ya da bir sanat enstalasyonu artırılmış gerçeklik sayesinde daha dinamik ve katılımcı bir biçimde izleyiciyle buluşturulabilir. Bu tür uygulamalar, sanatın mekânsal ve duygusal deneyimini zenginleştirerek izleyiciye çok boyutlu ve sürükleyici bir sanat deneyimi sunar.

AR ve VR teknolojileri, sanat eserlerinin dijital ortamda yeniden yaratılmasını, izleyicinin eserin içine dâhil olmasını ve çok boyutlu, interaktif deneyimler yaşamasını mümkün kılar [15]. Özellikle müzelerde ve kültürel miras alanlarında, ziyaretçilere eserlerin tarihsel bağlamını ve detaylarını derinlemesine keşfetme olanağı sunan bu teknolojiler, sanatçılara da yeni ifade biçimleri ve yaratıcı yöntemler geliştirme imkânı tanır. VR ve AR uygulamaları yalnızca görsel sanatlarda değil, aynı zamanda performans sanatlarında ve enstalasyonlarda da yeni ifade biçimlerinin ortaya çıkmasına olanak tanımaktadır. Bu teknolojiler sayesinde sanatçılar, hayal güçlerini dijital ortamda sınırsızca ifade edebilirken, sanatseverler de eserlerle daha etkileşimli bir deneyim yaşayabilmektedir [15-16].

AR teknolojisiyle sanatçılar, fiziksel sanat eserlerine dijital katmanlar ekleyerek izleyicilere animasyonlar, sesler ve açıklamalar gibi ek içerikler sunabilmekte; bu sayede eserlerin anlamı ve arka planı hakkında daha derin bilgiler aktarılabilmektedir. VR ise izleyiciyi tamamen sanal bir sanat evrenine taşıyarak, fiziksel olarak var olmayan üç boyutlu sanat galerilerinde gezme, sanal heykelleri farklı açılardan inceleme ve hatta sanat eserleriyle doğrudan etkileşime geçme imkânı tanımaktadır. Sanatçılar VR ortamında fiziksel dünyada mümkün olmayan ölçeklerde ve formlarda eserler üretebilmekte, izleyiciler ise bu eserlerin içinde dolaşarak sanatla birebir ve etkileşimli bir ilişki kurabilmektedir. Bu teknolojiler sanat eğitiminde de kullanılmakta; öğrenciler sanal ortamlarda eser analizleri yapabilmekte veya AR ile sanat tarihi bilgisini zenginleştirebilmektedir. Sonuç olarak, AR ve VR, sanatın hem yaratım hem de sunum biçimlerini kökten değiştirerek, sanatçı ve izleyici arasındaki etkileşimi çok daha katılımcı ve dinamik bir hale getirmektedir [17].

4.3. Akıllı Mürekkep ve Sensör Teknolojileri (Smart Ink and Sensor Technologies)

Baskı sektöründe akıllı mürekkep ve sensör teknolojileri, hem kaliteyi artırmakta hem de baskı sürecinin kontrolünü kolaylaştırmaktadır. Mürekkep içerisinde yer alan nano-sensörler, baskı kalitesini anlık olarak izleyebilmekte, renk yoğunluğu ve materyal uyumluluğunu sağlamak için veri toplayabilmektedir. Bu teknikler, üretim sürecinde oluşabilecek hataların erken tespit edilmesine olanak tanıyarak, çıktının tamamında yüksek standartların korunmasını sağlamaktadır.

Akıllı mürekkep teknolojisi, baskı sektöründe son yıllarda öne çıkan yenilikler arasında yer almaktadır. Bu teknoloji, yazıcıya entegre edilen akıllı sistemler sayesinde mürekkep seviyelerini ve kullanım miktarını izleyebilir, mürekkep dağıtımını daha verimli şekilde yönetebilir ve hatta mürekkep azaldığında otomatik olarak yeni sipariş verebilir. Özellikle büyük ölçekli baskı yapan işletmelerde, bu sistemler sayesinde atık azalırken maliyetler düşmekte ve verimlilik artmaktadır. Ayrıca, iletken mürekkeplerin geliştirilmesiyle birlikte, basılı materyallerin elektrik iletebilmesi sağlanmıştır. Bu durum etkileşimli baskı, basılı devreler gibi birçok yeni uygulamanın önünü açmıştır. Akıllı mürekkep teknolojisi, sadece baskı kalitesini artırmakla kalmayıp, endüstride sürdürülebilirlik ve akıllı otomasyon açısından da önemli bir dönüşüm yaratmaktadır [18]. Akıllı mürekkepler ve kaplamalar, özellikle ambalaj sektöründe büyük fırsatlar sunan yenilikçi malzemeler olarak öne çıkmaktadır. Mikro baskı, nano mürekkep ve grafen gibi teknolojiler sayesinde; izlenebilirlik, seri numaralandırma, durum takibi ve promosyon amaçlı termo veya foto-kromik mürekkepler gibi uygulamalar mümkün hale gelmiştir [19].

Akıllı mürekkepler, geleneksel baskı teknolojilerinin ötesine geçerek sensör işlevi gören ve çevresel uyarılara yanıt verebilen fonksiyonel yüzeylerin oluşturulmasına olanak tanır. Bu mürekkepler; sıcaklık, pH, nem veya biyokimyasal ajanlar gibi dış etkenlere karşı renk değiştirme, elektriksel iletkenlikte değişim veya optik sinyal üretme gibi çeşitli özellikler sergileyebilir. Baskı teknolojileriyle entegre edilen akıllı mürekkepler sayesinde, düşük maliyetli, esnek ve geniş alanlara uygulanabilen sensörler ve izleme sistemleri geliştirilebilmektedir. Bu teknoloji, özellikle giyilebilir elektronikler, biyomedikal tanı cihazları ve akıllı ambalaj uygulamalarında büyük bir potansiyele sahiptir [20].

Özellikle termoelektrik mürekkepler, içeriklerinde bulunan nano boyutlu termoelektrik malzemeler ve iletken ajanlar (örneğin karbon nanotüpler) sayesinde elektriksel iletkenliği artırmakta ve baskı kalitesini optimize etmektedir. Bu tür mürekkeplerle üretilen sensörler ve enerji toplayıcı devreler, düşük maliyetli ve yüksek hızlı baskı teknikleriyle esnek yüzeylere uygulanabilmekte; böylece giyilebilir sağlık izleme sistemleri gibi alanlarda sürekli ve güvenilir veri toplama olanağı

sunmaktadır [21]. Akıllı mürekkeplerin seçici ve hassas yanıt verebilme yeteneği, baskı tekniklerinin yüksek üretim hızı ve ölçeklenebilirliği ile birleştiğinde, yeni nesil fonksiyonel materyallerin ve cihazların geliştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır [20].

4.4. Blockchain Teknolojisinin Sanat ve Baskı Dünyasında Kullanımı (The Use of Blockchain Technology in the World of Art and Printing)

Blockchain teknolojisi, dijital sanat eserlerinin özgünlüğünü ve telif hakkı güvenliğini garanti altına almak için kullanılmaktadır. Her bir dijital eserin benzersiz bir tanımlayıcısı oluşturularak, eserin kime ait olduğunun ve nasıl işlendiğinin doğrulanması sağlanmaktadır. Bu teknolojinin baskı sektöründe de kullanılması, üretim süreçlerinin izlenebilirliği ve şeffaflığının artırılması açısından önem taşımaktadır.

Blockchain teknolojisi, sanat dünyasında yalnızca bir finansal araç olmanın ötesine geçerek, sanatın üretimi, dağıtımı ve sahipliğinde köklü dönüşümlere olanak tanıyan yenilikçi bir altyapı sunmaktadır. Blockchain'in şeffaflık ve merkeziyetsizlik gibi temel özellikleri, sanat eserlerinin özgünlük ve mülkiyetinin doğrulanmasında güvenilir bir zemin oluşturmaktadır. Bu sayede sanatçılar, küratörler ve koleksiyonerler için yeni iş birliği ve değer üretme biçimlerinin önü açılmaktadır. Farklı disiplinlerden sanatçılar ve teorisyenler, blockchain'in yalnızca teknik bir inovasyon değil, aynı zamanda kültürel, politik ve estetik bir fenomen olarak ele alınması gerektiğini savunuyor. Bu teknoloji sayesinde sanat ortamında yeni yaratıcı ifade biçimleri, katılımcı modeller ve alternatif ekonomik ekosistemler teşvik edilmektedir. Böylece blockchain, sanat dünyasında otorite, özgünlük ve değer kavramlarının yeniden tartışılmasına olanak sağlayan bir araç olarak öne çıkmaktadır [22].

Whitaker' da blockchain'in sanat ve yaratıcı endüstrilerde yalnızca finansal işlemleri değil, aynı zamanda sanat eserlerinin sahipliği, özgünlüğü ve desteklenmesiyle ilgili yapısal dönüşümleri beraberinde getirdiğini belirtmektedir. Blockchain'in merkeziyetsiz ve dağıtık defter yapısı, sanat eserlerinin mülkiyetinin doğrulanmasında güvenilir bir altyapı sunmakta; böylece geleneksel olarak müzeler, galeriler veya devlet kurumları tarafından yürütülen bu tür işlemler, artık merkezi otoritelere ihtiyaç duymadan gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca blockchain, sanat eserlerinde paylı (fraksiyonel) sahiplik ve dijital sanat eserlerinde kıtlık yaratma imkânı sunarak, sanat piyasasında yeni ekonomik modellerin ve kolektif destek yapılarının ortaya çıkmasına olanak tanımaktadır. Bu gelişmeler, sanatın demokratikleşmesine ve daha geniş kitlelerce erişilebilir olmasına katkı sağlayabileceği gibi, kültürel varlıkların daha fazla ticarileşmesine de yol açabilmektedir [23].

Dijitalleşmenin sanat eserlerinin üretim ve dağıtımında yeni olanaklar sunduğu günümüzde ise, telif hakkı koruması ve adil gelir paylaşımı gibi önemli sorunlar da ortaya çıkmaktadır. Bu noktada, blockchain teknolojisi sanat dünyası için umut verici bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bajac ve Lakatoš'a göre, özellikle Ethereum gibi açık kaynaklı blockchain platformları ve akıllı sözleşmeler sayesinde, sanat eserlerinin daha etkili bir şekilde korunması, dağıtılması ve gelirinin adil şekilde sanatçılara ulaşması mümkün hale gelmiştir. NFT'ler (Non-Fungible Tokens) sayesinde dijital sanat eserlerinde benzersizlik ve kıtlık kavramları yeniden tanımlanırken, eserlerin mülkiyeti ve telif hakları blockchain üzerinde şeffaf ve değiştirilemez biçimde kayıt altına alınabilmektedir. Böylece sanatçılar, aracıya ihtiyaç duymadan eserlerini küresel ölçekte sunabilir, haklarını koruyabilir ve adil bir şekilde gelir elde edebilirler. Blockchain'in sunduğu merkeziyetsizlik, şeffaflık ve güvenlik gibi avantajlar, sanat ekosisteminde yeni bir değer zinciri ve daha sürdürülebilir bir ekonomik modelin önünü açmaktadır [24].

4.5. Teknoloji Entegrasyonunun Sanat ve Baskı Süreçlerine Etkileri (The Effects of Technology Integration on Art and Printing Processes)

Yeni teknolojilerin entegrasyonu, sanat ve baskı sektörlerinde yalnızca üretim süreçlerini değil, aynı zamanda dağıtım, pazarlama ve tüketici deneyimini de kökten dönüştürmektedir. Dijital sanat eserlerinin çevrimiçi platformlar üzerinden paylaşılması, sanatçılar ile izleyiciler arasında doğrudan ve interaktif bir iletişim kurulmasına olanak tanırken, farklı lisanslama modelleriyle sanatçıların haklarını koruması ve gelir elde etmesi kolaylaşmıştır. Baskı endüstrisinde ise otomatik kalite kontrol sistemleri ve akıllı baskı makineleri, üretim verimliliğini artırmakta ve sektöre önemli bir rekabet avantajı sağlamaktadır. Endüstri 4.0'ın etkisiyle, basım ve yayıncılık sektöründeki tüm üretim hatları dijitalleşmekte, böylece süreçler daha hızlı, esnek ve verimli hale gelmektedir [25].

Dijital teknolojilerin baskı sektörüne entegrasyonu, geleneksel üretim odaklı iş modellerini hizmet odaklı yapılara dönüştürmüş ve sektörde büyük bir dönüşüm yaratmıştır. Dijital baskı teknolojileri,

küçük tirajlarda ekonomik üretim, kişiselleştirilmiş baskı imkânı ve üretim süreçlerinde hız ile esneklik gibi avantajlar sunmaktadır. Bu değişim, müşteri taleplerine daha hızlı yanıt verilmesini sağlarken, firmaların rekabet gücünü de artırmaktadır. Ancak teknolojik dönüşüm, büyük ölçekli işletmeler için adaptasyonu kolaylaştırırken, küçük ve mikro işletmeler açısından rekabet baskısı ve finansal sürdürülebilirlik gibi yeni zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Sonuç olarak, teknoloji entegrasyonu baskı sektöründe verimlilik ve yenilik fırsatları sunmakta; şirketleri iş modellerini ve altyapılarını yeniden yapılandırmaya zorlamaktadır [26].

Tasarım ve baskı hizmetlerinde dijital dönüşüm, hem sanat hem de baskı teknolojilerinde önemli yenilikler ve kolaylıklar sağlamaktadır. Geleneksel baskı süreçlerinin dijitalleşmesiyle birlikte, müşteri siparişlerinden ödeme ve üretim takibine kadar tüm iş akışları çevrim içi platformlarla daha hızlı, şeffaf ve kullanıcı odaklı hale gelmiştir. Özellikle tasarım odaklı düşünme yaklaşımıyla geliştirilen dijital çözümler, kişiselleştirme, erişilebilirlik ve verimlilik gibi avantajlar sunarken, sanatçıların ve müşterilerin ihtiyaçlarına daha yaratıcı ve esnek yanıtlar verilmesini mümkün kılmaktadır. Böylece sanat ve baskı teknolojilerinin dijitalleşmesi, hem yaratıcı süreçlerin zenginleşmesini hem de medya sektöründe daha erişilebilir, demokratik ve dinamik bir yapının oluşmasını desteklemektedir [27-28].

Tasarım ve baskı hizmetlerinde dijital dönüşüm, hem sanat hem de baskı teknolojilerinde önemli yenilikler ve kolaylıklar sağlamaktadır. Geleneksel baskı süreçlerinin dijitalleşmesiyle birlikte, müşteri siparişlerinden ödeme ve üretim takibine kadar tüm iş akışları çevrimiçi platformlar aracılığıyla daha hızlı, şeffaf ve kullanıcı odaklı bir hale gelmektedir. Dijitalleşme, baskı sektöründe sadece üretim süreçlerini değil, aynı zamanda müşteri deneyimini ve çalışanların iş süreçlerini de dönüştürmektedir. Özellikle tasarım odaklı düşünme (design thinking) yaklaşımıyla geliştirilen dijital çözümler, sanat ve baskı teknolojilerinde kişiselleştirme, erişilebilirlik ve verimlilik gibi avantajlar sunarken, sanatçıların ve müşterilerin ihtiyaçlarına daha yaratıcı ve esnek yanıtlar verilmesini mümkün kılmaktadır

Sanat ve baskı teknolojilerinin dönüşümü, dijitalleşmenin etkisiyle medya sektöründe kapsamlı bir değişim sürecini beraberinde getirmiştir. Dijital teknolojilerin baskı ve yayıncılık alanına entegrasyonu, geleneksel basılı medyanın üretim, dağıtım ve içerik sunumunda köklü yenilikler yapılmasını zorunlu kılmıştır. Özellikle dijital medya araçlarının yaygınlaşmasıyla birlikte, sanat eserlerinin ve yaratıcı içeriklerin çok daha geniş kitlelere hızlı ve etkili bir şekilde ulaşması mümkün hale gelmiştir. Bu süreçte, baskı teknolojileri de dijitalleşmeden payını alarak, daha hızlı üretim, maliyet avantajı, kişiselleştirilmiş içerik sunumu ve çevrim içi platformlar aracılığıyla interaktif deneyimler sağlamaktadır. Sanatçılar ve tasarımcılar için dijitalleşme, eserlerini daha özgürce ifade edebilecekleri, farklı disiplinlerle iş birliği yapabilecekleri ve yeni anlatım biçimleri geliştirebilecekleri bir ortam yaratmıştır. Ayrıca, dijital dönüşüm sayesinde medya kuruluşları yönetim, içerik üretimi ve dağıtımda daha kapsayıcı, eşitlikçi ve yenilikçi yaklaşımlar benimseyerek sektörde toplumsal çeşitliliğin ve temsilin artmasına katkı sağlamıştır. Sonuç olarak, sanat ve baskı teknolojilerinin dijitalleşmesi, hem yaratıcı süreçlerin zenginleşmesini hem de medya sektörünün daha erişilebilir, demokratik ve dinamik bir yapıya kavuşmasını desteklemiştir [28].

Hem dijital sanat hem de baskı teknolojilerinde kullanılan yeni teknolojilerin uygulanması, güçlü bir teknik alt yapı gerektiriyor. Bu alanlarda, yazılım ve donanım entegrasyonunun yanı sıra, veri güvenliği, yüksek bant genişliği ve gerçek zamanlı kontrol sistemleri gibi kritik unsurlar ön plana çıkacaktır. İnovasyon yönetimi stratejileri ile bu teknolojilerin doğru bir şekilde entegre edilmesi hem sektörel büyümeyi hem de teknolojik uyum sürecini hızlandıracaktır.

Tablo 2. Dijital sanat ve baskı teknolojilerinde ekonomik etki karşılaştırması (Economic impact comparison in digital art and printing technologies)

Kategori	**Dijital Sanat**	**Baskı Teknolojileri**
Pazar Büyüklüğü	Küresel platformlarla hızla genişliyor	Özelleştirilmiş çözümlerle niş pazarlara hitap ediyor
Gelir Dağılımı	Telif hakları ve NFT satışları ön planda	Seri üretimden elde edilen toplu gelir
İş birliği ve Rekabet	Sanatçı iş birlikleri artıyor	Teknoloji entegrasyonu ve ortak Ar-Ge projeleri
Yatırım ve İnovasyon	Yeni sanat teknolojilerine yatırım artışı	Otomasyon, akıllı sistemlere yatırımlar önde

4.6. Geleceğin Teknolojik Eğilimleri (Future Technological Trends)

Gelecekte, dijital sanat ve baskı teknolojilerinde görülmesi beklenen başlıca eğilimler arasında şunlar yer almaktadır:

- Artırılmış Gerçeklik Uygulamaları: Sanat eserlerinin mekânsal ve duygusal deneyimlerini artıracak daha gelişmiş AR sistemlerinin entegrasyonu.
- Kişiselleştirilmiş Üretim Modelleri: Her bireyin zevkine göre özelleştirilebilen dijital tasarım ve baskı çözümlerinin yaygınlaşması.
- Yeni Nesil Malzemeler: Özellikle ekolojik baskı teknolojilerinde, çevre dostu ve sürdürülebilir malzemelerin geliştirilmesi.
- Blockchain ve Lisanslama Sistemleri: Dijital sanat eserlerinin güvenliği, telif haklarının verimliliği ve orijinalliğinin kanıtlanması için blockchain tabanlı sistemlerin daha yaygın kullanımı.
- Entegre Çok Alanlı Yaklaşımlar: Sanat, mühendislik ve bilgi teknolojilerinin kesişiminde, tamamen entegre üretim modellerinin geliştirilmesi.

3. BULGULAR (CONCLUSIONS)

Dijital sanat ve baskı teknolojilerinde ortaya çıkan yenilikçi uygulamalar, sadece teknik bir dönüşümü değil, aynı zamanda sosyal, kültürel ve ekonomik boyutlarda da devrim niteliğinde gelişmeleri beraberinde getirmektedir. Bu makalede; dijital sanatın evriminden, baskı teknolojilerindeki inovatif yaklaşımlara, uygulama örneklerinden teknik entegrasyon süreçlerine kadar geniş bir yelpazede analiz yapılmıştır.

- Dijital sanat, geleneksel tanımların ötesine geçerek, yapay zekâ destekli üretim, VR/AR uygulamaları ve blockchain teknolojileri ile yeni bir boyut kazanmıştır.
- Baskı teknolojileri, dijitalleşme, 3D baskı ve ekolojik üretim yöntemleri ile hem verimlilik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır.
- Ekonomik açıdan, dijital sanat pazarında NFT ve telif haklarına dayalı yeni gelir modelleri ortaya çıkarken, baskı sektöründe kişiselleştirilmiş üretim modelleri ile rekabet gücü artmaktadır.
- Dijital sanat ve baskı teknolojilerinin entegre edilmesi ile ortaya çıkan sinerjinin hem üretim süreçlerini hem de pazarlama stratejilerini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.
- Gelecekte, AR uygulamaları, akıllı baskı sistemleri, ekolojik malzeme kullanımı ve blockchain tabanlı sistemlerin daha da yaygınlaşması beklenmektedir.

Genel olarak, dijital sanat ve baskı teknolojileri alanındaki yenilikçi yaklaşımlar, teknolojik alt yapının güçlendirilmesi ve yeni ekonomik modellerin geliştirilmesiyle, sanat ve üretim dünyasında köklü değişiklikler yaratmaktadır. Bu dönüşüm, sadece teknik yenilikleri değil, aynı zamanda sanatın ve üretimin toplum üzerindeki etkilerini yeniden tanımlamakta, kültürel bir devrimin de habercisi olmaktadır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandığı materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan eder.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Cengiz ŞAHİN: Tüm çalışma tek yazar tarafından yürütülmüş olup; araştırma fikrinin geliştirilmesi, literatür taraması, veri analizi, sonuçların değerlendirilmesi ve makalenin yazımı yazar tarafından gerçekleştirilmiştir

The entire study was conducted by a single author; including the development of the research idea, literature review, data analysis, evaluation of the results, and the writing of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Özcan, M., & Keskin, B. (2020). Dijitalizasyon Bağlamında Sosyal Dönüşüm. OPUS International Journal of Society Researches, 16(29), 2214-2229. https://doi.org/10.26466/opus.775748

[2] Aydemir, C., Yenidoğan, S., & Tutak, D., (2023). Sustainability In The Print And Packaging Industry. Cellulose Chemistry and Technology, vol.57, no.5-6, 565-577.

[3] Özomay, Z., Şahin, C. & Keskin, B. (2021). Investigation of the effect of different screening structures on print quality in digital printing system. Politeknik Dergisi, 24(3), 1213-1217

[4] Şeker, U., & Şahin, C., (2005). Dijital Baskı Sistemi İle Ofset Baskı Sisteminin

Karşılaştırılması. I. Uluslararası Mesleki Ve Teknik Eğitim Teknolojileri Kongresi, Ankara, Turkey

[5] Keskin, B., & Pazarlıoğlu, M., (2024). Dijital Baskı Teknolojileri Ve Sanat Alanında Kullanımı. Sanatsal Baskı Teknikleri ve Uygulamaları (pp.113-135), Ankara: Sonçağ Yayıncılık.

[6] Meral, G. (2024). 3D Baskı Teknolojileri. Keskin B., Şahin C, Meral G, (Editör), Sanatsal Baskı Teknikleri Ve Uygulamaları: Akademik Yaklaşımlar. Soncağ Akademi, Ankara, ss.145-149.

[7] Feldberg, W.. (2014). Revealing the eco print: Contact dyeing with plants on textiles. Journal for Weavers, Spinners and Dyers. 17-21

[8] Flint, I. (2010). Eco Colour: Botanical Dyes for Beautiful Textiles (ss. 56-67). Murdoch Books

[9] Özgüney, A. T., Seçim, P., Demir, A., Gülümser, T., et al. (2015). Ecological Printing of Madder Over Various Natural Fibres. Textile and Apparel, 25(2), 166-171.

[10] Güler, G. (2024). Ekolojik Baskı ile Deneysel Tipografi Uygulamaları. Keskin B., Şahin C, Meral G, (Editör), Sanatsal Baskı Teknikleri Ve Uygulamaları: Akademik Yaklaşımlar. Soncağ Akademi, Ankara, ss.159-162, 2024

[11] Ricoh (2020). The Future of the Printing Industry. https://www.ricoh.com.ph/blogs/the-future-of-the-printing-industry E.T. 20.05.2025

[12] Spector, L., & Alpern, A. (1994). Criticism, Culture, and the Automatic Generation of Artworks. In Proceedings of the Twelfth National Conference on Artificial Intelligence, AAAI-94 (pp. 3-8). AAAI Press/The MIT Press.

[13] Allen, R. W. (Ed.). (2019). Art Machines: International Symposium on Computational Media Art. Proceedings. School of Creative Media, City University of Hong Kong.

[14] McCormack, J., Gifford, T., & Hutchings, P. (2019). Autonomy, Authenticity, Authorship and Intention in computer generated art. In EvoMUSART 2019: 8th International Conference on Computational Intelligence in Music, Sound, Art and Design, Leipzig, Germany.

[15] Peddie, J. (2013). The History of Visual Magic in Computers: How Beautiful Images are Made in CAD, 3D, VR and AR (ss. 236-238). Springer.

[16] Dieck, M. C. t., & Jung, T. (Eds.). (2019). Augmented Reality and Virtual Reality: The Power of AR and VR for Business (ss. 113-127; 191-202). Springer.

[17] Billinghurst, M., Clark, A., & Lee, G. (2015). A Survey of Augmented Reality. Foundations and Trends® in Human–Computer Interaction, 8(2-3), 73–272. (ss. 207-209).

[18] URL-1: Inkjets.com E.Adresi: https://www.inkjets.com/blogs/printer-ink-guides/the-future-of-printing-innovation-and-trends-in-printer-ink-technology?srsltid=AfmBOorHL6araZFT4jcuuljs_j4gbAAmfOpfF5q 2zVJloZAuNgRB3jHy Erişim Tarihi: 01.06.2025

[19] URL-2: Packaging Europe: Smart Inks and Coating. E.Adresi: https://packagingeurope.com/smart-inks-and-coatings/5024.article Erişim Tarihi: 01.06.2025

[20] Wang, H., Li, B.,Ding, F., Ma, T. (2020). Improvement of properties of smart ink via chitin nanofiber and application as freshness indicator, Progress in Organic Coatings,149, 105921

[21] Lee, J., Kim, H. J., Chen, L., Choi, S. H., Mathur, G. N., & Varadan, V. K. (2013). Development of Thermoelectric Inks for the Fabrication of Printable Thermoelectric Generators Used in Mobile Wearable Health Monitoring Systems. SPIE Proceedings.

[22] Catlow, R., Garrett, M., Jones, N., & Skinner, S. (Ed.). (2017). Artists Re:Thinking the Blockchain. Torque Editions & Furtherfield.

[23] Whitaker, A. (2019). Art and blockchain: A primer, history, and taxonomy of blockchain use cases in the arts. Artivate, 8(2), 21-46.

[24] Bajac, M., & Lakatoš, A. (2023). Blockchain technologies and the future of art. Social Informatics Journal, 2(2), 19-27.

[25] Gamprellis, G., Politis, A. E., Sofias, Y., Tsigonias, A., Vonitsanos, G., Tsigonias, M., & Macro, K. L. (2021, September). Challenges for the printing industry in the modern digital and meta-pandemic era. In Advances in Printing and Media Technology: Proceedings of the 47th International Research Conference of iarigai. Athens, Greece (pp. 19-23).

[26] Guzikova, L. A. (2019). How Printing Industry Meets Technological and Financial Challenges. UBT International Conference.

[27] Octaviani, S., & Rakhmawati, N. A. (2024). Digital transformation printing service using design thinking. 2024 IEEE International Symposium on Consumer Technology (ISCT), 471–474.

[28] Print and Digital Media Transformation Task Team (2013). Report on the Transformation of Print and Digital Media. Print & Digital Media SA.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1295-1304 (2025)

Göknar, Doğu Kayını ve Afrika Maunu Türlerinin Makro ve Mikro Yapılarının Analizi

Çiğdem ÇİÇEK[1*]

[1]*Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağaçişleri Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru:13/08/2025
Düzeltme: 10/09/2025
Kabul: 15/09/2025

Anahtar Kelimeler

Göknar
Doğu Kayını
Afrika Maunu
Odun Anatomisi
Mikroskobik Analiz
Damar Çapı
Trakeid
Biyolojik Dayanıklılık

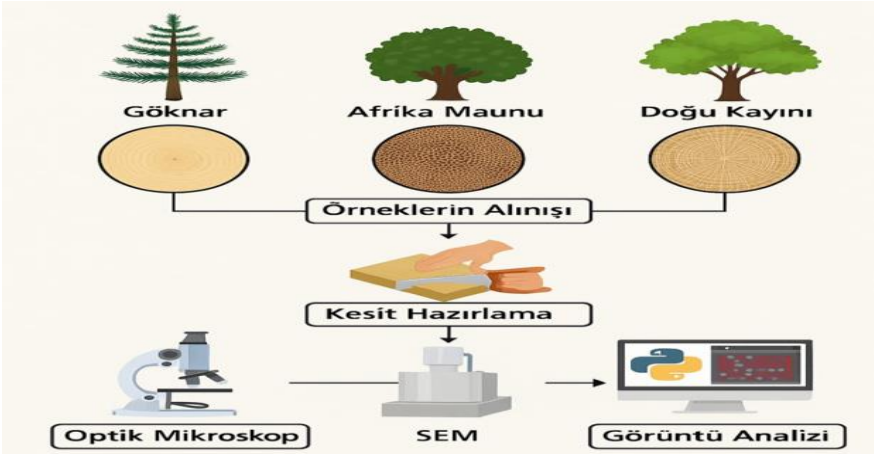
Article Info

Research article
Received: 13/08/2025
Revision: 10/09/2025
Accepted: 15/09/2025

Keywords

Silver Fir
Oriental Beech
African Mahogany
Wood Anatomy
Microscopic Analysis
Vessel Diameter
Tracheid
Biological Durability

Grafik Özet (Graphical Abstract)



Şekil A:*.Grafik Özet /* ***Figure A:*** *Graphical Abstract*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Göknar, Doğu Kayını ve Afrika Maunu karşılaştırmalı incelenmiştir. Fir, Oriental Beech, and African Mahogany were comparatively examined.*
- *Optik mikroskop ve SEM ile detaylı hücresel analiz yapılmıştır. Detailed cellular analysis was conducted using optical microscopy and SEM.*
- *Hücresel yapı ile endüstriyel kullanım ilişkisi ortaya konmuştur. The relationship between cellular structure and industrial application was revealed.*
- *Tür seçimine yönelik bilimsel katkı sağlanmıştır. A scientific contribution was provided for species selection.*

Amaç (Aim): *Bu çalışma, Göknar, Doğu Kayını ve Afrika Maunu türlerinin makro ve mikroyapılarını karşılaştırmalı olarak incelemeyi ve bu yapıların malzeme performansına etkilerini ortaya koymayı amaçlamaktadır. / This study aims to comparatively investigate the macro- and microstructures of Fir, Oriental Beech, and African Mahogany species and to reveal the effects of these structures on material performance.*

Özgünlük (Originality): *Çalışma, farklı ekolojik kökene sahip üç odun türünü hem klasik odun anatomisi hem de modern görüntü analizi yöntemleriyle bütüncül olarak karşılaştıran ilk araştırmalardan biridir. / The study is among the first to comparatively analyze three wood species from different ecological origins through an integrated approach combining classical wood anatomy and modern image analysis techniques.*

Bulgular (Results): *Göknar yüksek işlenebilirlik fakat düşük dayanıklılık, Doğu Kayını güçlü mekanik performans fakat sınırlı doğal direnç, Afrika Maunu ise estetik ve boyutsal stabilite ile orta düzey dayanıklılık göstermektedir. / Fir exhibits high workability but low durability, Oriental Beech demonstrates strong mechanical performance but limited natural resistance, while African Mahogany offers aesthetics and dimensional stability with moderate durability.*

Sonuç (Conclusion): *Her türün kendine özgü anatomik yapısı, farklı endüstriyel uygulamalara uygunluğunu belirlemektedir. Bu yapı–performans ilişkisi, ahşap türü seçiminde bilimsel bir temel sunmaktadır. / The unique anatomical structure of each species determines its suitability for different industrial applications. This structure–performance relationship provides a scientific basis for wood species selection.*

*Corresponding author, e-mail: cigdemcicek891@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1763534

GU J Sci, Part C, 13(3): 1295-1304 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Göknar, Doğu Kayını ve Afrika Maunu Türlerinin Makro ve Mikro Yapılarının Analizi

Çiğdem ÇİÇEK[1*]

[1]*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaçişleri Endüstri Mühendisliği, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru:13/08/2025
Düzeltme: 10/09/2025
Kabul: 15/09/2025

Anahtar Kelimeler

Göknar
Doğu Kayını
Afrika Maunu
Odun Anatomisi
Mikroskobik Analiz
Damar Çapı
Trakeid
Biyolojik Dayanıklılık

Öz

Bu çalışma, farklı coğrafi kökenlere ve anatomik yapılara sahip olan Göknar (*Abies alba*), Doğu Kayını (*Fagus orientalis*) ve Afrika Maunu (*Khaya ivorensis*) türlerine ait odun dokularının çok düzeyli yapısal özelliklerini karşılaştırmalı olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, her tür için makroskobik (renk, damar tipi, ışın yapısı) ve mikroskobik (trakeid, damar, parankima hücreleri) karakteristikler detaylı biçimde analiz edilmiştir. Örnekler, 400x büyütmeli optik mikroskop ve 1000x–2000x büyütme aralıklı taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiş; hücre çapları Python tabanlı görüntü analiz yöntemleri ile ölçülerek istatistiksel histogramlarla desteklenmiştir.

Elde edilen bulgular, Göknar'ın yalnızca trakeid içeren homojen yapısı sayesinde yüksek işlenebilirlik sunduğunu, ancak düşük biyolojik dayanıklılığa sahip olduğunu ortaya koymuştur. Doğu Kayını'nın diffüz-porous damar yapısı, geniş ışınları ve orta lif çeper kalınlığı, onu yüksek mekanik dayanım gerektiren uygulamalar için uygun hale getirmektedir. Afrika Maunu ise geniş damar çapları, belirgin parankima şeritleri ve doğal ekstraktif içeriğiyle, özellikle estetik ve boyutsal kararlılık gerektiren uygulamalarda ön plana çıkmaktadır.

Bu karşılaştırmalı analiz, her üç türün hücresel yapı özelliklerinin, malzeme performansı ve endüstriyel kullanım alanlarıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Elde edilen veriler, hem ahşap biliminde tür seçimine yönelik bilimsel karar süreçlerine katkı sağlamakta hem de doğal malzeme temelli tasarımlarda yapı-performans ilişkisini bütüncül olarak değerlendirme imkânı sunmaktadır.

Analysis of the Macro and Micro Structures of Silver Fir, Oriental Beech, and African Mahogany Species

Article Info

Research article
Received: 13/08/2025
Revision: 10/09/2025
Accepted: 15/09/2025

Keywords

Silver Fir
Oriental Beech
African Mahogany
Wood Anatomy
Microscopic Analysis
Vessel Diameter
Tracheid
Biological Durability

Abstract

This study aims to comparatively examine the multi-level structural characteristics of wood tissues from three species—Silver Fir (*Abies alba*), Oriental Beech (*Fagus orientalis*), and African Mahogany (*Khaya ivorensis*)—which differ in geographic origin and anatomical structure. In this context, both macroscopic (color, vessel type, ray structure) and microscopic (tracheids, vessels, parenchyma cells) characteristics were analyzed in detail for each species. The samples were examined using an optical microscope with 400x magnification and a scanning electron microscope (SEM) with a magnification range of 1000x–2000x; cell diameters were measured using Python-based image analysis methods and supported with statistical histograms.

The findings revealed that Silver Fir offers high workability due to its homogeneous structure composed solely of tracheids but has low biological durability. The diffuse-porous vessel structure, wide rays, and high fiber wall thickness of Oriental Beech make it suitable for applications requiring high mechanical strength. African Mahogany, on the other hand, stands out in applications that demand aesthetic appeal and dimensional stability, thanks to its large vessel diameters, prominent parenchyma bands, and natural extractive content.

This comparative analysis demonstrates that the cellular structural characteristics of all three species are directly related to their material performance and industrial application areas. The data obtained contribute to scientific decision-making processes in wood species selection within wood science and offer a holistic approach to evaluating the structure–performance relationship in natural material-based designs.

*Corresponding author, e-mail: cigdemcicek891@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1763534

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ahşap, yüzyıllardır insanlık tarihinde gerek mühendislikte gerekse mimaride temel bir yapı malzemesi olarak kullanılmakta olup, biyolojik kökenli, yenilenebilir ve doğal bir kompozit olması nedeniyle günümüzde de önemini korumaktadır. Bu çok yönlü malzemenin yaygın şekilde tercih edilmesinin ardında, eşsiz yapı ve fonksiyon özellikleri yatmaktadır. Ahşabın hem estetik hem de işlevsel olarak değerlendirilmesini sağlayan bu özellikler, özellikle farklı türler arasında belirgin varyasyonlar göstermektedir. Göknar (*Abies alba* Mill.), doğu kayını (*Fagus orientalis* Lipsky) ve Afrika maunu (*Khaya ivorensis* A.Chev.) gibi türler, sahip oldukları farklı anatomik, fiziksel ve kimyasal nitelikler sayesinde yalnızca doğal habitatlarında değil, aynı zamanda küresel ölçekte pek çok sektörde kullanım imkânı sunmaktadır [1-3].

Bu türlerin her biri farklı endüstriyel alanlarda öne çıkmaktadır. Hafifliği ve homojen dokusuyla göknar, inşaat ve yapısal uygulamalarda tercih edilirken; yüksek yoğunluğu ve geniş ışın yapısıyla kayın, mobilya ve zemin kaplamaları için uygundur. Afrika maunu ise zengin renk geçişleri, çapraz damar dizilimi yapısı ve biyolojik dayanıklılığı sayesinde hem lüks iç mekân tasarımlarında hem de denizcilik gibi özel alanlarda kullanılmaktadır [2-4]. Bu farklılıklar yalnızca kullanım alanlarına değil, aynı zamanda işlenebilirlik, dayanıklılık ve estetik performans gibi kriterlere de doğrudan etki etmektedir.

Ahşabın makroskobik (renk, trahe yapısı, ışınlar) ve mikroskobik (trakeid, lif, damar, parankima) düzeydeki yapısal özellikleri, türler arası karşılaştırmalar açısından büyük önem arz etmektedir. Örneğin *Fagus sylvatica* türünde yapılan araştırmalar, damar çapı ve yoğunluğunun çevresel faktörlere göre önemli ölçüde değişebildiğini göstermektedir [5, 6]. Benzer şekilde, yıllık halka yapısı ve ksilem gelişiminin de bölgesel iklim koşullarından etkilendiği bilinmektedir [7, 8].

Göknar, trakeid ağırlıklı hücre yapısı ve düşük yoğunluğuyla hafif yapısal elemanlarda; kayın, kalın çeperli lifleri ve dağınık traheli damar organizasyonu ile yüksek mekanik performans gereken uygulamalarda; maun ise büyük trahe çapı **ve** apotraheal bantlı parankima yapısıyla boyutsal kararlılığı ön planda tutan alanlarda öne çıkar. [9]. Ayrıca, türlerin farklı öz ışın yapıları ve damar dizilimleri, hem kuruma davranışını hem de yüzey işlemesini etkileyerek nihai ürünün performansına yön verir. Yoğunluk, mekanik dayanım ve doğal dayanıklılık gibi teknik parametreler, bu türlerin hangi endüstriyel uygulamalara uygun olduğunu belirlemede kritik rol oynar. Kayın, yüksek eğilme direnci (MOR, Modulus of Rupture) **ve** elastikiyet modülü (MOE, Modulus of Elasticity) değerleriyle döşeme ve bükme mobilya elemanlarında ideal bir malzeme iken, maun hem görsel çekiciliği hem de ekstraktif madde içeriği sayesinde biyolojik zararlılara karşı direnç göstererek uzun ömürlü çözümler sunar [3, 4]. Buna karşılık, göknarın düşük yoğunluğu doğal dayanıklılığını sınırlandırmaktadır. İşlenebilirlik açısından ise homojen trakeid yapısı kolaylık sağlasa da, erken (ilkbahar) ve geç (yaz) odunu arasındaki belirgin yoğunluk farkı, işleme sırasında yüzey düzgünlüğü ve yırtılma gibi sorunlara yol açabilmektedir. Türlerin bu özellikleri, kimyasal bileşimleri ve mikroskobik organizasyonlarıyla doğrudan ilişkilidir [10].

Bu bağlamda, mevcut çalışmanın temel amacı, göknar, doğu kayını ve Afrika maunu gibi farklı ekolojik kökenlere sahip üç önemli ağaç türünün makro ve mikroskobik yapılarını çok düzeyli bir bakış açısıyla karşılaştırmak ve bu yapıların malzeme performansları üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır. Literatürde bu üç türün karşılaştırmalı olarak değerlendirildiği çalışmalar sınırlı olup, bu araştırma hem mevcut bilgi birikimini sentezleme hem de türler arası yapı-performans ilişkisine dair özgün katkılar sunma potansiyeli taşımaktadır [3, 4, 7].

2. MATERYAL VE YÖNTEMLER (MATERIAL AND METODS)

Bu çalışmada, Göknar (Abies alba Mill.), Doğu Kayını (Fagus orientalis Lipsky) ve Afrika Maunu (Khaya ivorensis A.Chev.) türlerine ait odun örnekleri değerlendirilmiştir. Tür teşhisleri, makroskobik özellikler (renk, trahe yapısı, ışın genişliği) ve mikroskobik hücresel karakteristikler (trakeid, lif, trahe ve parankima düzeni) dikkate alınarak yapılmış, IAWA Committee (1989) kriterleri ve Schweingruber (2007) tanımlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Göknar örnekleri Doğu Karadeniz Bölgesi'nden, Doğu Kayını örnekleri Bolu-Yedigöller yöresinden sağlanmıştır. Afrika Maunu örnekleri ise Türkiye'ye ithal edilen kereste partisinden, Ankara'da faaliyet gösteren bir mobilya fabrikasından temin edilmiştir. Çatlak, mantar veya böcek zararı bulunmayan, kusursuz odun parçaları seçilmiş ve laboratuvar ortamında uygun boyutlarda hazırlanarak enine kesitler alınmıştır.

Mikroskobik incelemeler için odun örnekleri, odun anatomisi çalışmalarında yaygın kullanılan standart yöntemlere (IAWA Committee, 1989; Johansen, 1940) uygun olarak hazırlanmıştır. Örnekler küçük bloklar halinde kesilmiş, %50–70 etanol serilerinde sabitlenerek dehidrasyonu sağlanmış ve mikrotom kullanılarak 15–20 µm kalınlığında enine kesitler alınmıştır. Kesitler safranin-fast green kombinasyonu ile boyanmış, gliserin-jel ile kalıcı preparatlar haline getirilmiştir. Her tür için hazırlanan kesitler Leica DM750 optik mikroskop sistemi kullanılarak 400x büyütme altında değerlendirilmiş; trakeid, trahe, lif ve ışın hücrelerinin genel dağılımı analiz edilmiştir. Daha yüksek çözünürlüklü hücresel yapıların gözlemi için ise JEOL JSM-6510LV taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile 1000x–2000x büyütme aralığında detaylı görüntüler elde edilmiştir.

Hücresel morfometrik ölçümler (trahe çapı, hücre çeper kalınlığı, porozite oranı), odun anatomisi için önerilen standart kriterler (IAWA Committee, 1989) dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Her tür için enine kesitlerden rastgele seçilen en az 50 hücre üzerinde ölçümler yapılmıştır. Trahe ve trakeid çaplarının belirlenmesi için Python tabanlı OpenCV ve Scikit-Image kütüphaneleri kullanılmıştır. Hücre boşlukları cv2.findContours fonksiyonu ile tespit edilmiş, regionprops fonksiyonları ile geometrik ölçümler yapılmıştır. Ölçüm hatası ±1.5 µm olarak belirlenmiştir. Yoğunluk ölçümü bu çalışmada doğrudan yapılmamış, ancak literatürde verilen değerler (Göknar: ~0.40–0.45 g/cm³, Kayın: ~0.70–0.75 g/cm³, Maun: ~0.60–0.65 g/cm³) karşılaştırma amacıyla dikkate alınmıştır. Enine kesitlerden elde edilen boşluk oranları ve hücre çeper kalınlıkları ile yoğunluk arasındaki bilinen ilişki tartışma bölümünde açıklanmıştır. Çalışma kapsamındaki ağaç türlerinin temel özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. İncelenen ağaç türlerinin temel özellikleri (Makroskobik, mikroskobik ve teknik parametrelerin karşılaştırmalı özeti) (The basic properties of the examined tree species (Comparative summary of macroscopic, microscopic and technical parameters))

Özellik	Göknar (Abies alba)	Doğu Kayını (Fagus orientalis)	Afrika Maunu (Khaya ivorensis)
Yayılış	Doğu Karadeniz, Kuzey Anadolu	Doğu Avrupa ve Batı Asya	Batı ve Orta Afrika
Renk	Açık krem	Kırmızımsı kahverengi	Koyu kırmızı-kahverengi
Trahe Tipi	Trahe yok, trakeid hâkim	Diffüz-porous	Yarı-halkasal
Işınlar	1–2 seriatlı, homoselüler	1–7 seriatlı, multiseriat	1–3 seriatlı, heteroselüler
Hücre Tipi	Trakeid	Lif, trahe, parankima	Geniş trahe, lif, bantlı/apotraheal & paratraheal parankima
Trahe/Trakeid Çapı (µm)	Trakeid: 7–13	Trahe: 30–44	Trahe: 180–300
Lif Çeper Kalınlığı	İnce	Kalın	Orta
Porozite (%)	Düşük	Orta	Yüksek
Yoğunluk (g/cm³)	0.40–0.45	0.70–0.75	0.60–0.65
Doğal Dayanıklılık	Düşük (Sınıf V)	Düşük (Sınıf IV–V)	Orta (Sınıf III)
Kullanım Alanları	İnşaat, ses enstrümanları	Mobilya, parke, iç mekân dekorasyonu	Lüks mobilya, denizcilik, kaplama

3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME (FINDINGS AND EVALUATION)

3.1 Doğu kayını (Fagus Orientalis)

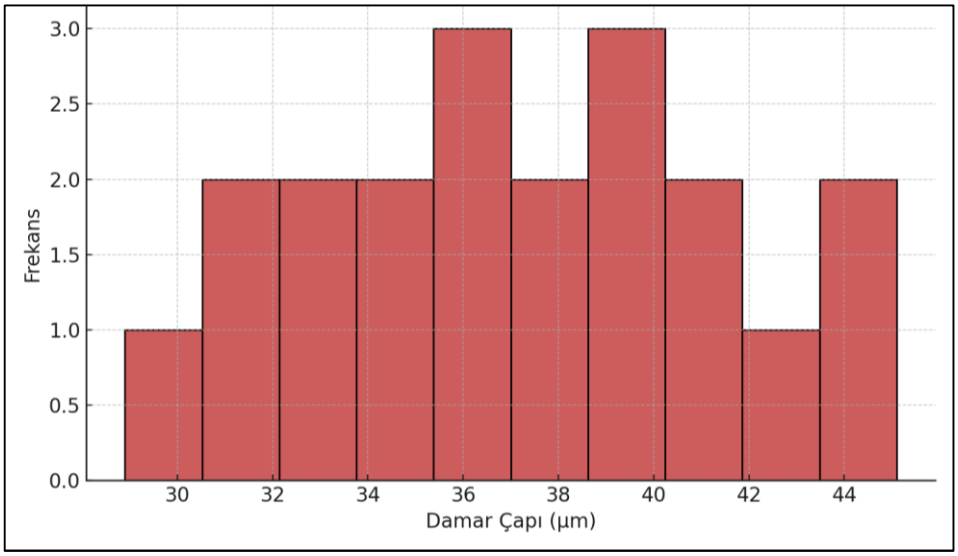
Doğu Kayını, makroskobik düzeyde homojen dokulu ve kırmızımsı-kahverengi tonlara sahip, diffüz-porous trahe yapısına sahip bir tür olarak tanımlanır. Öz odun ve diri odun arasında belirgin bir renk farkı bulunmaz; olgun odun karakterindedir. Yıllık halka sınırları genellikle belirsizdir, ancak büyüme koşullarına bağlı olarak dar veya geniş olabilir. Öz ışınları geniş, çok sıralı

(multiseriat) yapısıyla çıplak gözle dahi ayırt edilebilir. Tekstürü ince, liflerin gidişi ise genellikle düzgün olup yüzey işlemleri için elverişlidir. Bu özellikler, kayının makroskobik tanısında önemli kriterler sunar. Makroskobik incelemeye ilişkin temsilci görüntüler Şekil 1'te verilmiştir; burada öz–diri odun ayrımı, ışın yapıları ve yıllık halka dizilimleri işaretlenmiştir.

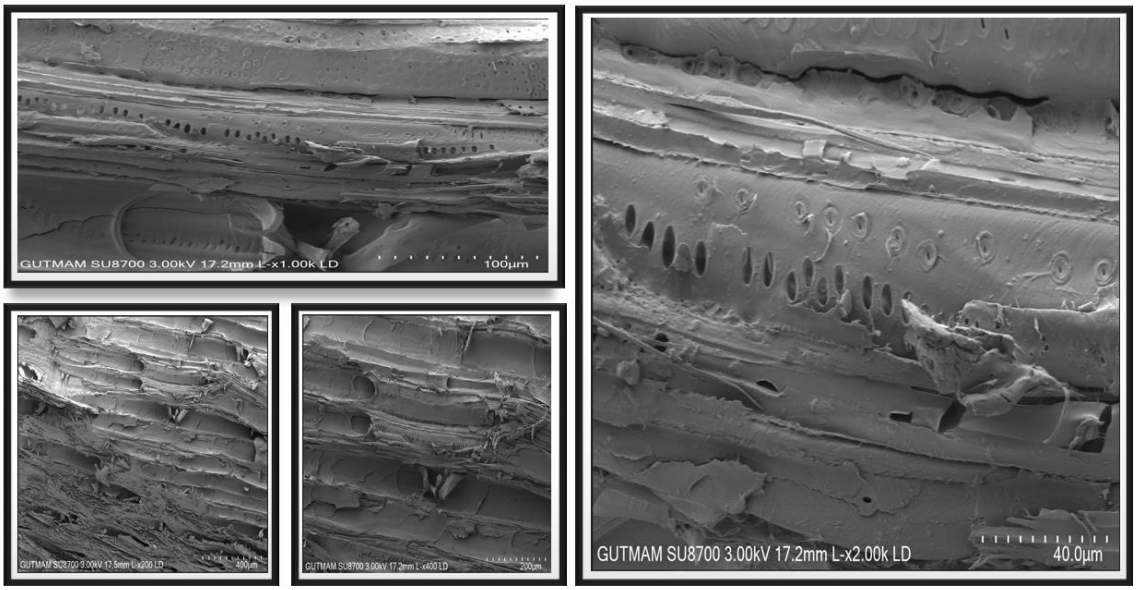
Mikroskobik analizlerde, trahe çaplarının (lümen uzun ve kısa eksen ortalaması alınarak) 30–44 µm aralığında yoğunlaştığı saptanmıştır. Ölçümler, farklı yıllık halkalardan rastgele seçilen en az 50 trahe üzerinde yapılmış ve değerler ortalama ± standart sapma olarak sunulmuştur (Şekil 2). Bu yöntem, IAWA Committee (1989) kriterlerine dayandırılmıştır. Python tabanlı dijital ölçüm yazılımları (OpenCV, Scikit-Image) ile yarı-denetimli analizler gerçekleştirilmiş, elde edilen histogram dağılımı 35–40 µm aralığında pik frekans göstermiştir. Ortalama trahe çapı 33.1 µm, standart sapma ise düşük seviyededir; bu durum trahe çaplarının homojen dağıldığını işaret eder. Lif hücrelerinin çeper kalınlıkları orta düzeyde olup yoğun lif dizilimi yapının mekanik direncini artırmaktadır.



Şekil 1. Doğu Kayını'na ait 400x optik mikroskop görüntüsü (teğet kesit): Diffüz-porous damar yapısı ve çok sıralı ışınların genel dağılımı görülmektedir. (Optical microscope image of Oriental Beech at 400x magnification (tangential section): The diffuse-porous vessel structure and the general distribution of multiseriate rays can be observed)



Şekil 2. Doğu Kayını'nın damar çapı histogramı: Damar çaplarının büyük bölümü 35–40 µm aralığında toplanmıştır. (Histogram of vessel diameter in Oriental Beech: The majority of vessel diameters are clustered in the 35–40 µm range.)



Şekil 3. SEM görüntüsü: Damar boşlukları net şekilde gözlenmekte, hücre çeperlerinin görece ince olduğu izlenmektedir. (SEM image: Vessel lumina are clearly observed, and the cell walls appear to be relatively thin.)



Şekil 4. Afrika Maunu'na ait optik mikroskop görüntüsü (400x, enine kesit): Damarlar düzgün konturda, yoğunluğu eş dağılımlı, parankima şeritleri belirgin. (Optical microscope image of Khaya ivorensis (400x, cross section): Vessels have regular contours, evenly distributed density, and distinct parenchyma bands.)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri incelendiğinde, geniş lumenlere sahip damar hücrelerinin, nispeten ince çeperlerle çevrelendiği dikkat çekmektedir (Şekil 3 ve Şekil 4). Bandlı parankima dokusu bu türde yaygın değildir; ışın ve liflerin homojen dağılımı yanal iletimi destekleyen bir yapı sunar. Mikroyapısal porozite ise orta seviyededir. Geniş damar yapısı, kayının iletim kapasitesini yükseltirken, bu özellik aynı zamanda mantar ve böcek saldırılarına karşı doğal dayanıklılığın düşük olmasına neden olabilir.

Bu yapısal özellikler doğrultusunda Doğu Kayını, diffüz-porous trahe yapısı ve geniş öz ışınlarıyla öne çıkan anatomik bir türdür. Lif yoğunluğu ve çeper

kalınlıkları mekanik direnç açısından avantaj sağlarken, doğal dayanıklılığı sınırlıdır. Bu nedenle emprenye işlemleri olmaksızın dış mekân koşullarına uygun değildir. Buna karşılık iç mekân uygulamalarında, özellikle mobilya ve parke sektöründe hem görsel hem de mekanik açıdan tercih edilen bir malzeme olma potansiyeline sahiptir.

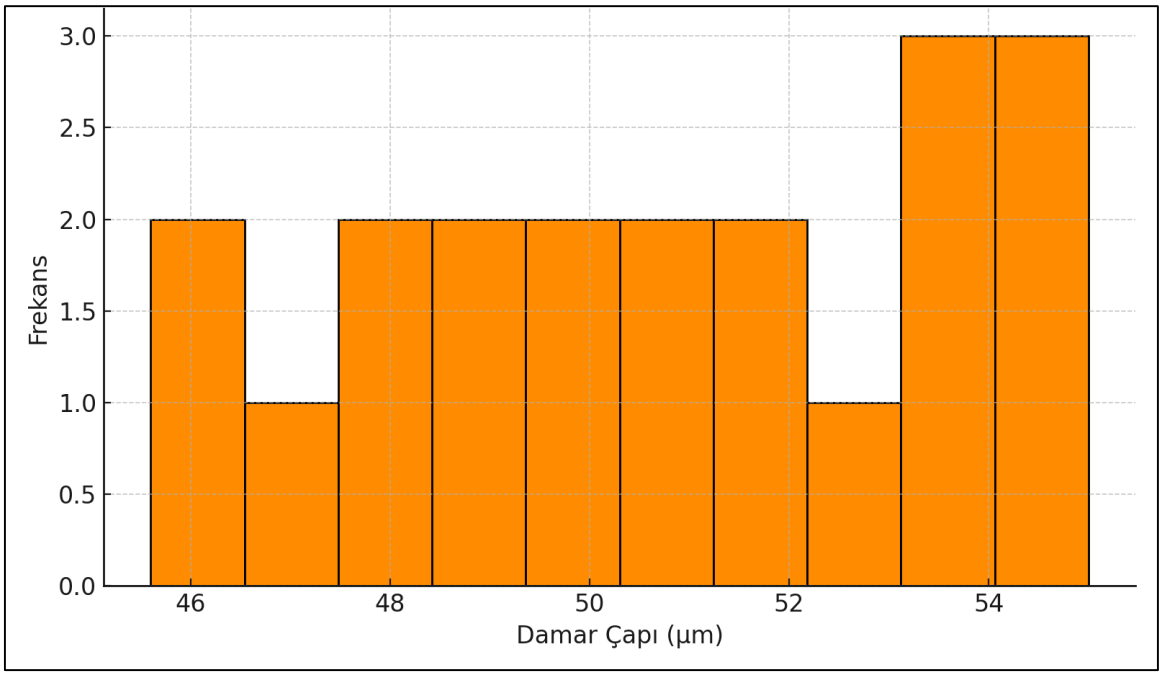
3.2 Afrika maunu (Khaya ivorensis)

Afrika Maunu, tropik kökenli, ticari önemi yüksek bir sert ağaç türü olup hem yapısal hem de dekoratif uygulamalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Makroskobik olarak koyu kırmızı-kahverengi kalp odunu ve yarı-halkasal damar dizilimi ile ayırt edilir. İnterlocked grain (çapraz damar dizilimi) yapısı, onu hem estetik hem de boyutsal olarak stabil bir malzeme haline getirir. Özellikle yüksek nemli ortamlarda bile formunu koruyabilmesi, bu türü denizcilik ve dış mekân uygulamaları için cazip kılar.

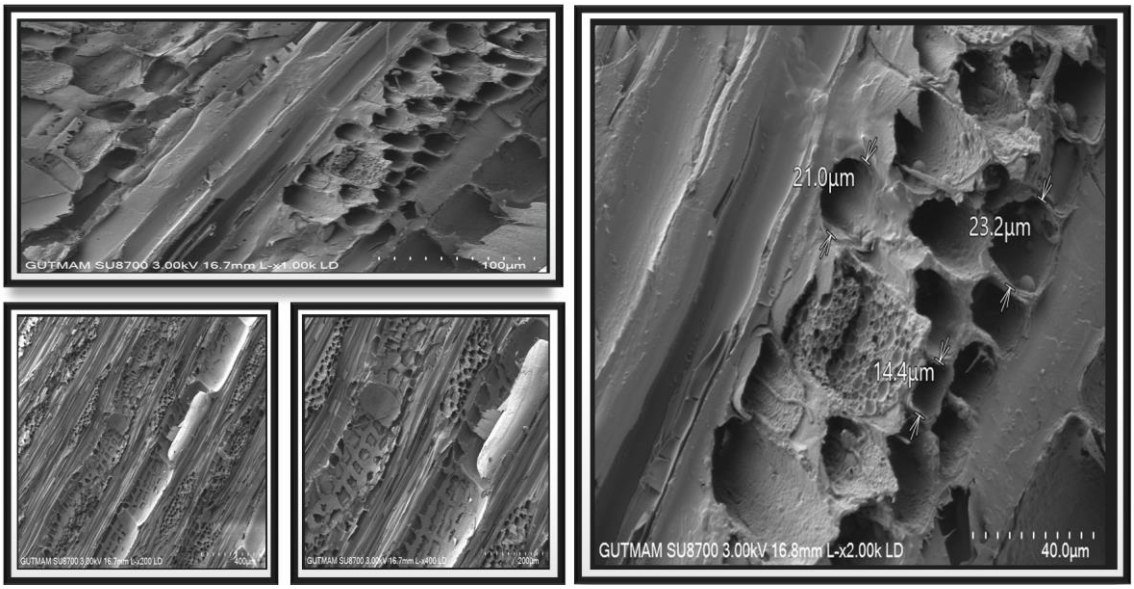
Optik mikroskop analizleri (400x büyütme) sonucunda, Afrika Maunu'na ait damar çaplarının 46–55 µm aralığında yoğunlaştığı saptanmıştır (Şekil 4). Histogram dağılımı, damar çaplarının özellikle 50–55 µm aralığında en yüksek frekansa ulaştığını göstermekte; bu durum, düzenli damar diziliminin bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Şekil 5). Ölçümlere göre ortalama damar çapı 49.8 µm olup, kayın ve göknara kıyasla daha büyük çaplı damar yapısına sahiptir. Damarların çevresinde parankima hücrelerinin oluşturduğu bantlar dikkat çekicidir; bu yapı, hem su iletimi hem de fiziksel dayanım açısından önemli katkılar sunmaktadır.

SEM analizlerinde (2000x büyütme) damar lumenlerinin çaplarının 14.4–23.2 µm aralığında değiştiği ve ortalama 19.9 µm olduğu ölçülmüştür (Şekil 6). Damar geometrisi oval ve düzgün konturludur. Parankima dokusunun yoğunluğu, hücre duvarlarının kalınlığından ziyade iç yapının homojenliğini sağlamaya yöneliktir. Bu yapı aynı zamanda liflerin aralarındaki mekanik kilitlenmeyi optimize eder. Gözenek yapısı ve hücresel organizasyon, Afrika Maunu'nun özgül enerji sönümleme kapasitesine olumlu katkı sağlayan bir diğer faktördür.

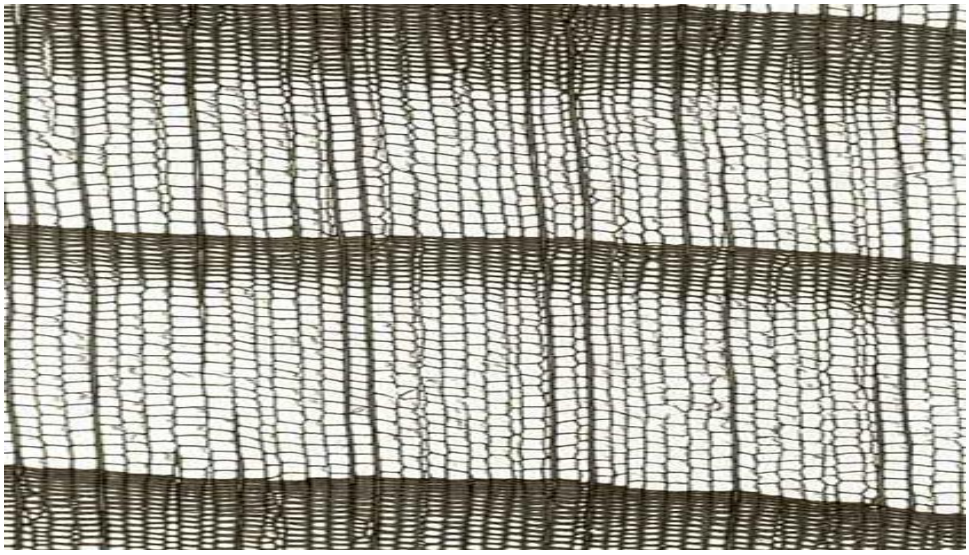
Mikro yapısal olarak, Afrika Maunu liflerinin ortalama çeper kalınlığı 2.1 ± 0.4 µm olarak ölçülmüş olup, bu değer Doğu Kayını'nda ölçülen ortalama çeper kalınlığından (3.4 ± 0.5 µm) daha düşüktür. Buna karşılık lif çaplarının dağılımı daha homojen olup ortalama 18.6 ± 2.3 µm olarak hesaplanmıştır. Lifler arasındaki parankimatik alanlar düzenli bir biçimde yerleşmiş olup, bu yapı malzemenin doğal darbe dayanımını artırıcı bir faktör olarak değerlendirilebilir. Dolayısıyla Afrika Maunu, estetik özelliklerinin yanı sıra işlevsel ve biyolojik dayanıklılığıyla da öne çıkan bir türdür.



Şekil 5. Damar çapı histogramı: En yüksek frekans 50–55 µm aralığında gözlenmiştir. (essel diameter histogram: The highest frequency was observed in the 50–55 µm range.)



Şekil 6. Afrika Maunu'na ait SEM görüntüleri. Trahe hücrelerinin lümen çapları 14.4–23.2 µm arasında değişmektedir. Parankima hücreleri, trahelerin çevresinde yoğun ve düzenli bantlar halinde yerleşmiş olup homojen bir dağılım göstermektedir. (SEM images of African Maun: The lumen diameters of the tracheary elements range between 14.4–23.2 µm. The parenchyma cells are arranged in dense and regular bands around the tracheae, showing a homogeneous distribution.)



Şekil 7. Göknar'a ait 400x optik mikroskop görüntüsü: Sadece trakeidlerden oluşan homojen hücre dizilimi izlenmektedir. (Optical microscope image of Fir at 400x magnification: A homogeneous cell arrangement consisting only of tracheids is observed.)

3.3 Göknar (Abies Alba)

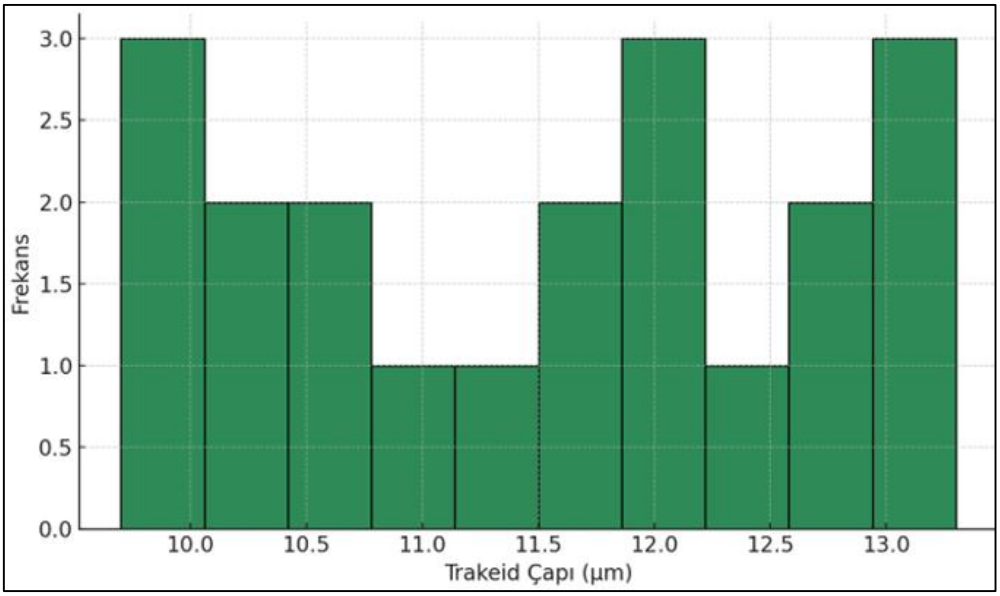
Göknar, iğne yapraklı ağaç türleri arasında yer alan ve hücre yapısının büyük çoğunluğu trakeidlerden oluşan homojen dokulu bir odundur. Makroskobik düzeyde açık krem tonlarına sahip olup, öz–diri odun ayrımı belirgin değildir. Göknar odununda reçine kanalı bulunmaz. Yapısal özellikleri, onu işlenebilirliği yüksek bir malzeme haline getirse de doğal dayanıklılığı sınırlıdır. Damar dokusu içermediğinden göknarın tüm iletim ve destek işlevleri trakeidler aracılığıyla, ayrıca öz ışınlarının yardımıyla gerçekleşir.

Optik mikroskop analizlerinde (400x büyütme), göknar örneklerinde trakeid çaplarının 7–13 µm aralığında değiştiği tespit edilmiştir (Şekil 7). Histogram analizine göre, en yoğun frekansın 10–12 µm aralığında toplandığı gözlemlenmiş olup, bu dağılım türün yapısal homojenliğini

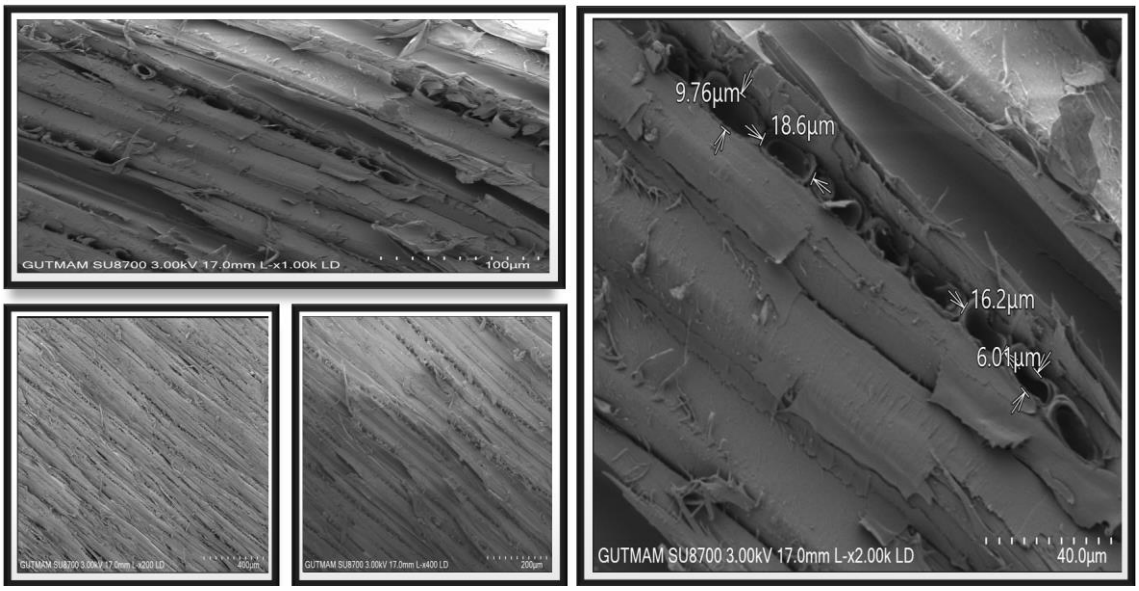
desteklemektedir (Şekil 8). Ortalama trakeid çapı 8.02 µm olarak hesaplanmıştır. Bu değer, Afrika Maunu ve Doğu Kayını ile kıyaslandığında daha küçük çaplı bir iletim sistemi olduğunu göstermektedir. Lifler (trakeidler) düz hatlı, ince çeperli ve paralel dizilimlidir. Bu durum, yapının elastikiyetini artırırken, yüksek mekanik dayanım gerektiren uygulamalarda sınırlayıcı olabilir.

SEM analizlerinde (2000x büyütme), göknar trakeidlerinin düzgün dizildiği, lumen açıklıklarının 6.01–18.6 µm arasında değiştiği ve hücre çeperlerinin ince olduğu belirlenmiştir (Şekil 9). En dar lumen çapı 6.01 µm, en geniş ise 18.6 µm olarak ölçülmüştür. Lifler arasında bandlı parankima dokusu bulunmamakta; hücresel yapı tamamen trakeidlerden oluşmaktadır. Bu yapı, ahşap düşük ısı iletkenliğine sahiptir (0.10–0.14 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). ve akustik rezonans özelliği sağlaması bakımından ses panelleri ve müzik aletleri gibi özel uygulamalarda avantajlıdır.

Göknar odununun düşük yoğunluğu ve düşük ekstraktif içeriği, işlenebilirliği artırırken biyolojik dayanıklılığı sınırlamaktadır. Bu nedenle, açık ortam uygulamaları için emprenye işlemleri gerekebilir. Homojen hücre yapısı, kuruma sırasında deformasyon riskini azaltarak boyutsal stabilite açısından avantaj sağlar.



Şekil 8. Trakeid çapı histogramı: En yoğun dağılım 10–12 µm arasında, dağılım dengeli. (Tracheid diameter histogram: The highest concentration is between 10–12 µm, with a balanced distribution.)



Şekil 9. SEM görüntüsü: Trakeid lumen çapları 6.01–18.6 µm aralığında, çeper yapıları ince ve düz. (SEM image: Tracheid lumen diameters range from 6.01 to 18.6 µm, with thin and smooth wall structures.)

4. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Bu çalışma kapsamında Doğu Kayını, Afrika Maunu ve Göknar türlerine ait odun dokuları çok düzeyli (makroskobik ve mikroskobik) bir perspektifle değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, her türün kendine özgü hücresel mimarisinin, makro ölçekteki fiziksel-mekanik özelliklerini belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Bulgular, literatürde daha önce raporlanmış tür özellikleri ile uyumlu olmakla birlikte, bazı noktalarda yeni karşılaştırmalı analizler sunmaktadır [3,11].

Doğu Kayını, diffüz-porous damar dizilimi, geniş multiseriat ışın yapısı ve orta çaplı damar hücreleriyle tanımlanabilir. Damar çapı histogramı ve SEM görüntüleri, kayının yüksek iletim kapasitesine sahip ancak ince çeperli hücre yapısıyla düşük doğal dayanıklılık gösterdiğini doğrulamaktadır. Buna karşılık, mekanik dayanımı yüksek olan kayın, iç mekân uygulamaları ve bükülmüş mobilya elemanları gibi yük taşıyan sistemler için uygundur.

Afrika Maunu ise geniş damar çapları, belirgin parankima bantları ve yüksek porozite oranıyla öne çıkmaktadır. Mikroskobik düzeydeki lumen geometrisi, düzenli ve geniş olup bu durum enerji sönümleme kabiliyetini ve boyutsal kararlılığı desteklemektedir. Ayrıca, hücre içi ekstraktif maddeler sayesinde mantar ve böceklere karşı gösterdiği orta derece dayanıklılık, maunun dış mekân ve denizcilik uygulamalarındaki kullanımını desteklemektedir. SEM ile ölçülen lümen değerleri (14.4–23.2 µm) ile optik mikroskop değerleri (46–55 µm) arasındaki fark, kullanılan büyütme düzeyi ve ölçüm alanının farklılığından kaynaklanmaktadır. SEM ölçümleri daha çok lümen iç yapısına, optik mikroskop ise genel trahe çapına odaklandığından bu farklılık normaldir. Literatürde Khaya ivorensis için raporlanan 100–200 µm aralığı, ölçüm ekseni (tangansiyel/radyal) ve numune hazırlama farklılıklarıyla açıklanabilir.

Göknar türü ise iğne yapraklı ağaçlar arasında tipik bir örnek olup, yalnızca trakeid hücrelerinden oluşmaktadır. Trakeid çaplarının küçük ve homojen dağılımı, SEM analizlerinde doğrulanmış; bu yapı göknarın düşük yoğunluk ve yüksek işlenebilirlik özelliklerini açıklamaktadır. Ancak damar içermemesi ve zayıf ekstraktif içeriği nedeniyle biyolojik dayanıklılığı düşüktür. Bu durum, onu emprenye gerektiren ancak form stabilitesi önemli olan uygulamalar için uygun kılmaktadır.

Üç tür arasındaki temel farklardan biri de ışın yapılarında gözlenmiştir. Kayın çok sıralı ve geniş ışınlarıyla yanal iletimde yüksek performans sergilerken, göknar dar ve homoselüler ışın yapısına sahiptir. Maunun ise 1–3 seriatlı heteroselüler ışınları, estetik şerit etkisi oluşturmakla birlikte iletimde sınırlı katkı sağlar.

Bu çalışmada yoğunluk doğrudan ölçülmemiştir. Ancak enine kesitlerden elde edilen boşluk oranları ve hücre çeper kalınlıkları, yoğunluk ile doğrudan ilişkili parametrelerdir. Dolayısıyla türler arasındaki yoğunluk farklılıkları literatür değerleriyle birlikte değerlendirildiğinde, anatomik verilerle uyumlu bir tablo ortaya çıkmaktadır.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada Göknar (*Abies alba*), Doğu Kayını (*Fagus orientalis*) ve Afrika Maunu (*Khaya ivorensis*) türlerinin odunsu dokuları, makroskobik ve mikroskobik düzeyde karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Doğu Kayını, diffüz-porous trahe yapısı ve geniş multiseriat öz ışınlarıyla tanımlanmıştır. Lif çeper kalınlıklarının görece yüksek oluşu, mekanik dayanım açısından avantaj sağlamaktadır.
- Afrika Maunu, yarı-halkasal trahe dizilimi, geniş trahe çapları ve belirgin parankima bantlarıyla boyutsal kararlılık ve estetik görünüm açısından öne çıkmaktadır.
- Göknar ise trakeid ağırlıklı yapısı sayesinde homojen hücresel organizasyona sahiptir. Bu durum kuruma sırasında boyutsal stabiliteye katkı sağlamaktadır

Sonuç olarak, her üç türün de kendine özgü hücresel organizasyonları, farklı endüstriyel alanlara uygunluklarını belirlemektedir. Bu yapı–performans ilişkileri, ahşap türü seçiminde bilimsel bir temel sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, bu türlerin ısıl modifikasyon ve nano-emprenye yöntemleriyle biyolojik ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi, ayrıca hibrit kompozit üretiminde takviye malzemesi olarak kullanım potansiyellerinin araştırılması önerilmektedir. Bunun yanında, farklı ekolojik bölgelerden alınacak örneklerle çevresel faktörlerin odun anatomisine etkilerinin incelenmesi ilerideki araştırmalara katkı sağlayacaktır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI
(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan eder.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

***Çiğdem ÇİÇEK*:** Tek yazarlı makale.

Single author article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Barnett JR. Reactivation of the cambium in Aesculus hippocastanum L.: A transmission electron microscope study. Annals of Botany. 1992; 70(2): 169-177.

[2] Carvalho AM, Silva BTB, Latorraca JVF. Avaliação da usinagem e caracterização das propriedades físicas da madeira de mogno africano (Khaya ivorensis A. Chev.). Cerne 2010; 16(1): 106-114.

[3] França TSFA, Arantes MDC, Paes JB, Vidaurre GB, Oliviera JTS, Barauna EEP. Caracterização anatômica e físico-mecânica das madeiras de duas espécies de mogno africano. Cerne 2015; 21(1): 20-25.

[4] Silva JGM, Vidaurre GB, Arantes MDC, Batista DC, Soranso DR, Billo DF. Qualidade da madeira de mogno africano para a produção de serrados. Scientia Forestalis 2016;44: 181–190.

[5] Sass U, Eckstein D. The variability of vessel size in beech (Fagus sylvatica L.) and its ecophysiological interpretation. Trees 1995; 9: 247–252.

[6] Dittmar, C, Zech W, Elling W. Growth variations of common beech (Fagus sylvatica L.) under different climatic and environmental conditions in Europe—a dendroecological study. Forest Ecology and Management. 2003; 173: 63–78.

[7] Čufar K, Prislan P, de Luis M, Gričar J. Tree-ring variation, wood formation and phenology of beech (Fagus sylvatica) from a representative site in Slovenia, SE Central Europe. Trees 2008; 22(6): 749–758.

[8] Gruber A, Baumgartner D, Zimmermann J, Oberhuber W. Temporal dynamics of wood formation in Pinus cembra along the alpine treeline ecotone and the effect of climate variables. Trees 2009; 23: 623–635.

[9] Schweingruber FH, Wood structure and environment. Springer Series in Wood Science. Springer, 2007.

[10] Chaffey N. An introduction to the problems of working with trees. In N. Chaffey (Ed.), Wood formation in trees: Cell and molecular biology techniques (pp. 9–16). Taylor & Francis, 2002.

[11] Dünisch O, Rühmann O. Kinetics of cell formation and growth stresses in the secondary xylem of Swietenia mahagoni Jacq. and Khaya ivorensis A. Chev. (Meliaceae). Wood Science and Technology 2006; 40: 49–62.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1305-1314 (2025)

Influence of Heating Media on Mechanical and Microstructural Properties of CP Titanium Alloy

Erdem MERMER[1*] Nurdan EVCİMEN[1] Hanifi ÇİNİCİ[2]

[1]*TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara, Türkiye*

[2]*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 29/07/2025
Revision: 16/09/2025
Accepted: 22/09/2025

Keywords

CP Titanium
Discoloration
Microstructure
Fatigue
Hydrogen Content

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29/07/2025
Düzeltme: 16/09/2025
Kabul: 22/09/2025

Anahtar Kelimeler

CP Titanyum
Renk Değişimi
Mikroyapı
Yorulma
Hidrojen Miktarı

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this work, CP Ti alloys were heat treated in atmosphere-controlled and vacuum media. The effects of different heating media in terms of mechanical and microstructural features were investigated. / Bu çalışmada, CP Ti alaşımları atmosfer kontrollü ve vakumlu ortamlarda ısıl işleme tabi tutulmuştur. Farklı ısıtma ortamlarının mekanik ve mikro yapısal özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

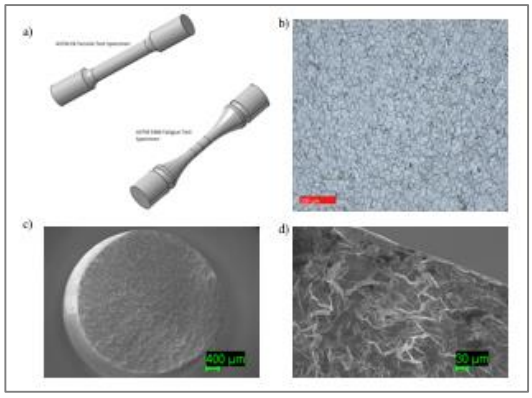


Figure A: *a) Sample types, b) Microstructure, c) Fracture macrography, d) Fracture surface /*
Şekil A: *a) Numune tipleri, b) Mikroyapı, c) Kırılma makrografisi, d) Kırılma yüzeyi*

Highlights (Önemli noktalar)

- *Microstructure was observed identical in atmosphere-controlled and vauum heating media. / Atmosfer kontrollü ve vakum ısıtmalı ortamlarda mikro yapının çok yakın olduğu gözlemlenmiştir.*
- *The vacuum-heat treated samples showed 7 % higher tensile and yield strength. / Vakum ortamında ısıl işlem görmüş numuneler %7 daha yüksek çekme ve akma mukavemeti gösterdi.*
- *The vacuum-heat treated samples illustrated nearly 50 % higher fatigue life at highest stress level. / Vakum ortamında ısıl işlem görmüş numuneler, en yüksek gerilim seviyesinde yaklaşık %50 daha yüksek yorulma ömrü göstermiştir.*

Aim (Amaç): *To investigate the effects of heating media on mechanic and microstructural properties on CP Ti alloy. / CP Ti alaşımının mekanik ve mikro yapısal özellikleri üzerinde ısıtma ortamlarının etkilerini araştırmak.*

Originality (Özgünlük): *This study provides more detailed information on fatigue life of CP Ti alloys in case of discoloration. / Bu çalışma, renk bozulması durumunda CP Ti alaşımlarının yorulma ömrü hakkında daha ayrıntılı bilgi sağlamaktadır.*

Results (Bulgular): *Oxygen and hydrogen impurity content in vacuum heat-treated samples are very close to base metal. On the other hand, hydrogen content is increased in atmosphere-controlled heating media by nearly 20 ppm and oxygen 50 ppm. / Vakum altında ısıl işlem görmüş numunelerdeki oksijen ve hidrojen safsızlık içeriği, baz metale oldukça yakındır. Öte yandan, atmosfer kontrollü ısıtma ortamında hidrojen içeriği yaklaşık 20 ppm, oksijen içeriği ise 50 ppm artmaktadır.*

Conclusion (Sonuç): *Discoloration was linked to hydrogen and oxygen content increment. Reduction in mechanical properties are attributed to hydrogen content of atmosphere-controlled heat-treated samples. / Renk bozulmasının, hidrojen ve oksijen içeriğindeki artışla bağlantılı olduğu görülmüştür. Mekanik özelliklerdeki azalma ise atmosfer kontrollü ısıl işlem görmüş numunelerin hidrojen içeriğinden kaynaklanmaktadır.*

*Corresponding author, e-mail: mermererdem84@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1753596

GU J Sci, Part C, 13(3): 1305-1314 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Influence of Heating Media on Mechanical and Microstructural Properties of CP Titanium Alloy

Erdem MERMER[1*] Nurdan EVCİMEN[1] Hanifi ÇİNİCİ[2]

[1]*TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara, Türkiye*

[2]*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 29/07/2025
Revision: 16/09/2025
Accepted: 22/09/2025

Keywords

CP Titanium
Discoloration
Microstructure
Fatigue
Hydrogen Content

Abstract

Commercially pure titanium alloys are used as structural materials in aerospace industry. These alloys are mainly exposed to stress relief after forming operations. Heat treating of commercially pure titanium (CP Ti) alloys are generally carried out in air, atmosphere-controlled and vacuum atmospheres. This study investigates the effect of heating media on mechanical and microstructural features of CP Ti alloys. The samples were subjected to stress relief treatment by different heating media. The heating media are vacuum and atmosphere-controlled atmospheres. Discoloration was observed in atmosphere-controlled heating media. The microstructure was not influenced by heating media either near the surface or at core. Although discoloration was detected, alpha case formation was not noticed. The samples heat-treated in vacuum atmosphere showed approximately 7% higher tensile and yield strength whereas elongation percentage was not changed. Fatigue test was performed at 310, 350 and 370 MPa stress levels. The fatigue life of vacuum heat-treated samples is higher than atmosphere-controlled heat-treated samples at all stress levels. When stress level increased up to 375 MPa, the difference in fatigue life is nearly 50%. Oxygen and hydrogen contents were not changed so much in vacuum heat-treated samples whereas oxygen content was increased by 50 ppm and hydrogen content by 20 ppm in atmosphere-controlled heat-treated specimens. Increment in hydrogen content decreased mechanical properties.

Isıtma Ortamının CP Titanyum Alaşımının Mekanik ve Mikroyapı Özellikleri Üzerindeki Etkisi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29/07/2025
Düzeltme: 16/09/2025
Kabul: 22/09/2025

Anahtar Kelimeler

CP Titanyum
Renk Değişimi
Mikroyapı
Yorulma
Hidrojen Miktarı

Öz

Titanyum alaşımları, yüksek mukavemetleri, yüksek sertlikleri ve düşük ısıl iletkenlikleri Ticari olarak saf titanyum alaşımları havacılık ve uzay endüstrisinde yapısal malzeme olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımlar çoğunlukla şekillendirme işlemlerinden sonra gerilim giderme ısıl işlemine maruz kalırlar. Ticari olarak saf titanyum (CP Ti) alaşımlarının ısıl işlemleri genellikle hava, atmosfer kontrollü ve vakum atmosferlerinde gerçekleştirilir. Bu çalışma, ısıl işlem ısıtma ortamının CP Ti alaşımlarının mekanik ve mikro yapısal özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Numuneler farklı ısıtma ortamları ile gerilim giderme işlemine tabi tutulmuştur. Isıtma ortamları vakum ve atmosfer kontrollü atmosferlerdir. Atmosfer kontrollü ısıtma ortamlarında ısıl işlem gören numunelerde renk değişimi gözlenmiştir. Mikro yapı incelendiğinde ne yüzeye yakın ne de çekirdek bölgelerinde ısıtma ortamına bağlı değişim gözlenmemiştir. Atmosfer kontrollü ortamda ısıl işlem göre numunelerde renk değişimi gözlenmesine rağmen, alfa fazı oluşumu görülmemiştir. Vakum atmosferinde ısıl işlem görmüş numuneler yaklaşık %7 daha yüksek çekme ve akma dayanımı gösterirken, uzama yüzdeleri benzer değerler göstermiştir. Yorulma testi 310, 350 ve 370 MPa gerilme seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Vakum altında ısıl işlem görmüş numunelerin yorulma ömrü, tüm gerilim seviyelerinde atmosfer kontrollü ısıl işlem görmüş numunelerden daha yüksektir. Gerilim seviyesi 375 MPa'a kadar çıktığında, yorulma ömründeki fark yaklaşık %50 olarak gözlenmiştir. Vakumla ısıl işlem görmüş numunelerde oksijen ve hidrojen içerikleri çok fazla değişmezken, atmosfer kontrollü ısıl işlem görmüş numunelerde oksijen içeriği 50 ppm, hidrojen içeriği ise 20 ppm artmıştır. Hidrojen içeriğindeki artış mekanik özellikleri azaltmıştır.

*Corresponding author, e-mail: mermererdem84@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1753596

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Many of the materials required for aerospace applications are high-performance materials that can sustain very high thermal cycling, corrosive environments, high mechanical stresses, and weight restrictions, while maintaining strength over long operational periods [1,2]. In this challenging context, titanium alloys have emerged as important materials due to their ideal balance of strength-to-weight ratio and corrosion resistance [3,4]. CP Ti maintains its mechanical strength from cryogenic temperatures to 300°C, allowing it to be used in a wide range of aerospace applications [5]. Although they are not as temperature resistant as some titanium alloys, enough performance can be provided by CP Ti grades on many structural and non-structural aerospace components used within this temperature range [6]. The heat treatment process is essential for improving the properties of CP Ti for aerospace applications. However, it has fewer options than the respective treatment for titanium alloys due to the very low proportion of alloying additions [7,8]. Stress relieving, recrystallizing, and controlling the grain structure, rather than phase transformations, are the primary heat treatment processes applicable to CP Ti [9]. Stress-relief annealing is the most frequently performed heat treatment on CP Ti aerospace parts. This operation is carried out at temperatures ranging between 480 and 595°C (900 and 1100°F) for 15 min−4 h, depending on the part thickness [10]. Processing allowed it to reduce manufacturing-induced residual stresses, and the mechanical properties and microstructure were relatively unaffected [11]. For dimensionally stable aerospace systems, stress relief annealing is an essential processing technique to prevent distortion in service [12]. The process is especially significant in the case of thin-walled components, such as ducting, brackets, and sheet-metal assemblies, which, due to the presence of residual stresses, may fail at earlier stages of life or undergo dimensional variation under operational loads [13]. The heat treatment of CP Ti requires conscientious atmosphere control. The high reactivity of CP Ti with oxygen, nitrogen, and hydrogen makes the heat treatment of this alloy sensitive to atmosphere conditions [14]. Hydrogen especially affects the mechanical performance of titanium alloys known as hydrogen embrittlement. Hydrogen can enter titanium through heat treatment, welding operations and moisture environments. Hydrogen atoms diffuse through the lattice and form titanium hydrides resulting in changing mechanical behavior [15]. Vacuum or controlled atmosphere (argon) heat treatments are necessary to avoid contamination that would compromise the mechanical properties and corrosion resistance. Even trace pollution would be highly detrimental to fatigue properties; hence, atmospheric control is of great importance for aerospace applications [16]. The alpha case, which occurs during the pick-up of oxygen and nitrogen during heat treatment, must be prevented or controlled [17]. This hardened surface layer has lower ductility and fatigue resistance, which may eliminate the reliability of the parts in aerospace service [18]. Mechanical or chemical removal is usually necessary before the component can be used where an alpha case is formed. Not as sensitive to cooling rates as most titanium alloys because they contain no phase transformation [19]. However, cooling speed may affect the final structure size and the level of stress relaxation [20]. Furnace cooling is used for maximum stress relief and grain growth, whereas air cooling further accelerates processing with somewhat higher residual stress levels [21]. For applications in aerospace components that experience thermal cycling, controlled cooling rates are necessary to maintain microstructural stability and uniform mechanical properties throughout the part's life [22]. Mpumlwan et.al [23] studied high temperature heat treatment cycles of CP Ti and found that the microstructure was negatively affected whereas tensile strength and hardness were developed. Park et.al applied cyclic heat treatment to electron beam manufactured CP Ti alloys up to 1000 °C. After heat treatment, they observed that mechanical properties were diminished whereas grain size was refined. Lee et.al [24] worked on rapid electric current heat treatment on CP Ti alloy. According to their findings, electrically heat-treated samples demonstrated more uniform grain size and mechanical properties were improved when compared with conventional heat treatment. In a study [25], CP Ti alloys were exposed to annealing at 700 °C and 900 °C. At higher annealing temperature oxidation was detected and mechanical properties were reduced. Park [26] repeated heat treatment on CP Ti alloys up to 7 cycles. After the cycles, the grain size was diminished, tensile strength was developed, and elongation was held. Mguni studied the effects of oxygen and hydrogen on mechanical properties of CP Ti and Ti6Al4V alloys. They observed that hardness and compressive strengths were improved by increasing quench temperature [27]. An et.al [28] worked on fatigue behavior of CP Ti under cryogenic low cycle fatigue where they observed that cryogenic conditions increase fatigue life. However, according to our knowledge, there is not enough information on how mechanical properties of CP Ti alloys are affected in case of discoloration. This study makes an important contribution to literature by

investigating the effects of discoloration, analyzing microstructures and mechanical values and setting an example for industrial applications.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

The chemical composition of the CP Ti alloys used in this study was determined by X-Ray Fluorescence (XRF) and the analysis results are given in Table 1. The analysis results were found to be in compliance with the AMS 4901 standard [29] used in the aerospace industry. Two different sample types were prepared. One sample type is fatigue test specimen according to ASTM E466 M16, the other sample type was prepared for tensile testing according to ASTM E8. The drawings of the samples are shown in Figure 1. In this study, Cp Ti alloys were heat treated in atmosphere controlled and vacuum furnaces. Inert gas, argon mixture was present in an atmosphere-controlled furnace. Stress relief treatment was applied at 540 °C and the soaking time is 150 minutes for both heating media. Furnace cooling was employed below 200 °C for 8 hours. Load thermocouple was used to control the temperature of the parts.

Table 1. Chemical composition of CP Ti alloy (CP Ti alaşımının kimyasal kompozisyonu)

Element	Ti	Cr	Co
Results (wt. %)	99.85	0.08	0.02

After heat treatment, the samples were subjected to tensile and fatigue testing. Tensile Testing was carried out with Instron 5985 equipped with automatic extensometer. Strain-controlled method given in ASTM E8, which are 0.005 mm/mm/min-1 strain rate until yield strength, and 0.05 mm/mm/min-1 strain rate until fracture was utilized. Fatigue Testing was performed according to EN 6072 standard with Instron 8801 Equipment and the parameters are 310,350,375 MPa as maximum stress values, R=0.1, 20 Hz frequency and Kt=1.0. To examine the microhardness properties, the materials were prepared metallographically. Sample cutting was performed with ATM Brilliant 250 device and the cut samples were bakelite with Struers CitoPress 30 device. The samples were also sanded and polished using Struers Laboforce-100 device. Optical microscopy examinations were performed with Zeiss Smartzoom 5 microscope and scanning electron microscope (SEM) analysis were conducted by Zeiss EVO 10. Impurities content in terms of H and O was measured by LECO ONH836 equipment.

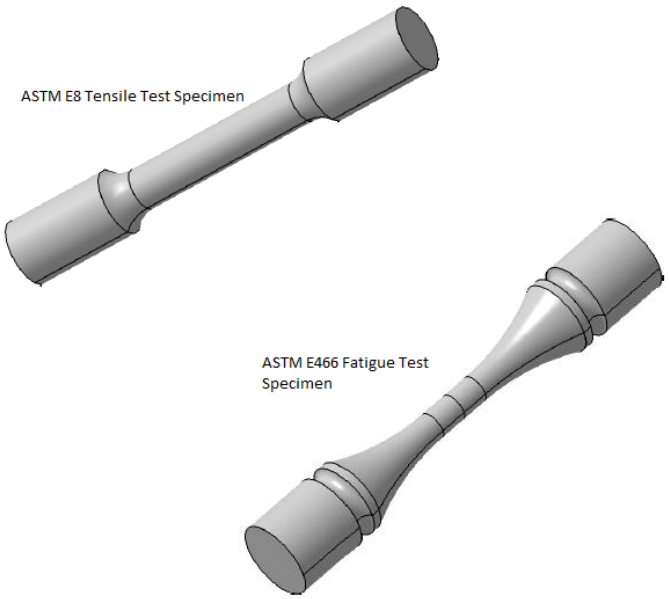


Figure 1. Drawings of the CP-Ti test samples (CP Ti test numunelerinin çizimleri)

2. RESULTS and DISCUSSION (BULGULAR ve TARTIŞMA)

Figure 2a) illustrates the samples before heat treatment. One set of samples were heat treated in an atmosphere-controlled furnace where the surface of the samples has discoloration after heat treatment as shown in Figure 2b) that is a sign of oxidation. It is known that oxidation may reduce mechanical properties and may form alpha case leading to brittle nature on the surface [30]. On the other hand, the samples heated in vacuum atmosphere are metallic gray implying that the surfaces of these samples were not oxidized as shown in Figure 2c.



Figure 2. a) Samples before heat treatment, b) Atmosphere-controlled heat-treated samples b) Vacuum heat-treated samples (a) Isıl işlem öncesi numuneler, b) Atmosfer kontrollü ortamda ısıl işlem görmüş numuneler, b) Vakum ortamında ısıl işlem görmüş numuneler)

As seen in Figure 3, the microstructural analysis was performed both near the surface and at the core. Both regions of the samples show identical microstructure that consists of equiaxed alpha grains. Alpha case, generally formed on the surface as oxide scale, was not observed on the surface of both samples so it can be deduced there was not enough oxygen environment for alpha case formation [31].

Tensile testing results are presented in Table 2. The results are given as average where 5 samples of each set were tested. The average yield strength of atmosphere-controlled heat-treated samples is 520 MPa whereas vacuum heat-treated samples have an average of 558 MPa yield strength. The same trend is observed in tensile strength of the samples where vacuum heat-treated samples show an average of 40 MPa higher than the atmosphere-controlled heat-treated samples. The reason may originate from hydrogen and oxygen content of the heat-treated samples in different heating media. Although there is difference in strength values, elongation of the samples has not affected. Shi et. al [32] suggested that oxygen does not have a significant effect on grain refinement so microstructure similarity could be explained. Also, according to this study,

increment in oxygen concentration may increase yield strength without altering elongation below 0.8 wt. %. On the other hand, the harmful results of hydrogen on CP titanium happen at lower hydrogen concentrations and are much more effective [ref 3]. Therefore, lower tensile properties of atmosphere-controlled heat-treated specimens could be explained by increment in hydrogen content.

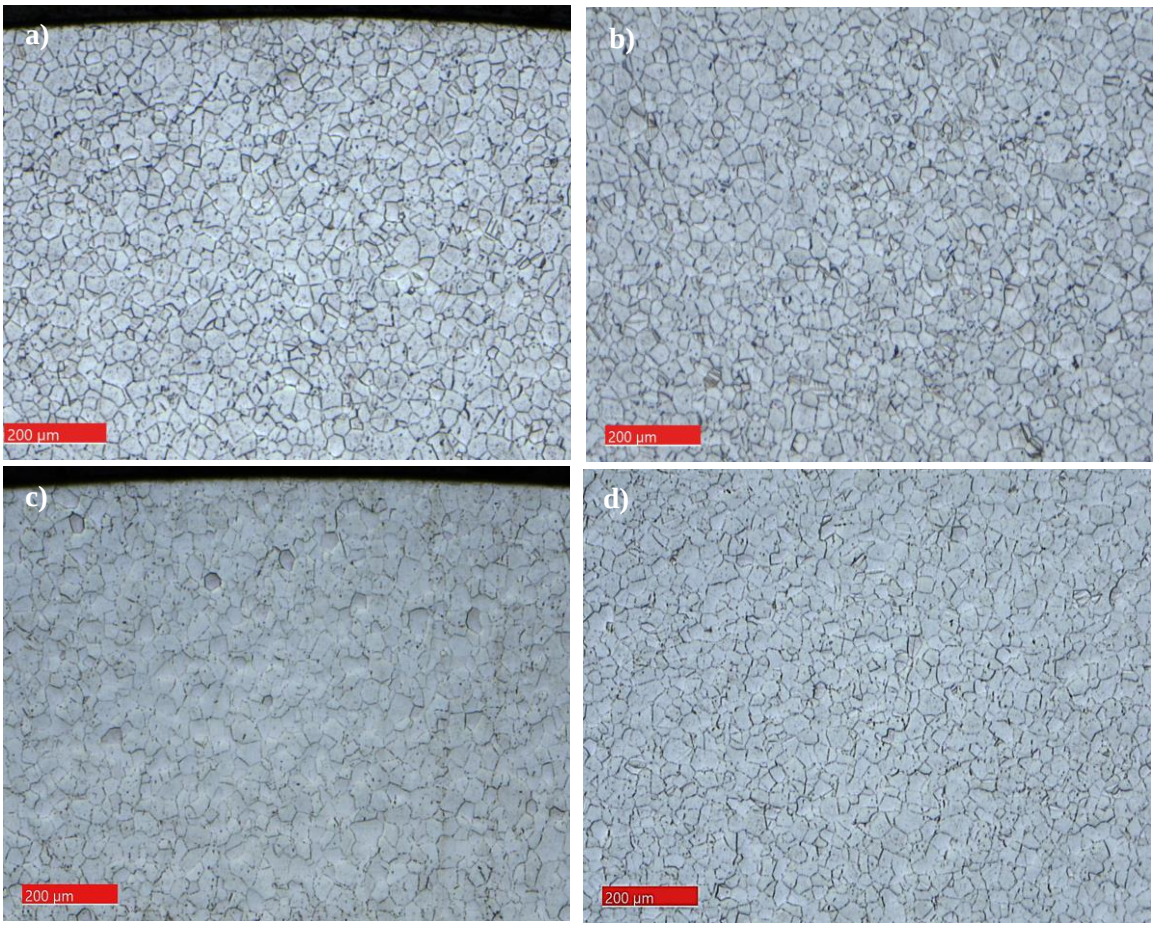


Figure 3. a) Vacuum heat-treated sample near surface area, b) Vacuum heat-treated sample core area, c) Atmosphere-controlled heat-treated sample near surface area, d) Atmosphere-controlled heat-treated sample core area (a) Vakum ortamında ısıl işlem görmüş numunenin yüzey alanına yakın kısmı, b) Vakum ortamında ısıl işlem görmüş numunenin çekirdek alanı, c) Atmosfer kontrollü ortamda ısıl işlem görmüş numunenin yüzey alanına yakın kısmı, d) Atmosfer kontrollü ortamda ısıl işlem görmüş numunenin çekirdek alanı)

Table 2. Tensile properties of the samples after heat treatment (Isıl işlem sonrası numunelerin çekme sonuçları)

Property (Avg.)	Atmosphere-controlled heat-treated samples	Vacuum Heat-Treated Samples
Yield Strength (MPa)	520	558
Tensile Strength (MPa)	629	669
Elongation (%)	30.92	30.98

Fatigue tests were employed at 310,350 and 375 MPa stress levels. The stress levels were below yield strength due to investigating high cycle fatigue (HCF) properties. The results are given in Figure 4. The fatigue life of vacuum heat-treated samples is higher than the samples heat treated in atmosphere-controlled heating media at all stress levels. When looked at detailed at the graph, the fatigue life difference is getting smaller at 310 MPa stress level but the difference is getting higher at higher stress levels. When stress level is enhanced to 375 MPa, fatigue life difference is nearly 50 %. The trend is similar to the study given in the literature [33]. The fatigue life of vacuum heat-treated samples matches well with values of previous study done by Hosseini et.al [34]. To understand the failure mechanism of the samples, scanning electron microscope (SEM) analysis was conducted.

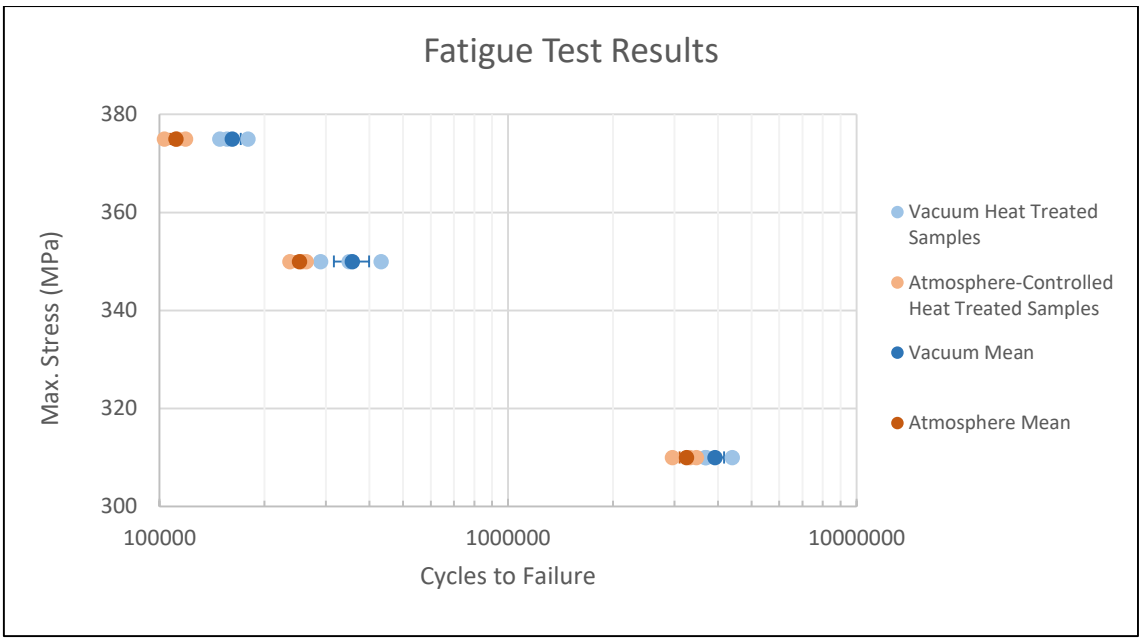


Figure 4. Fatigue test results (Yorulma testi sonuçları)

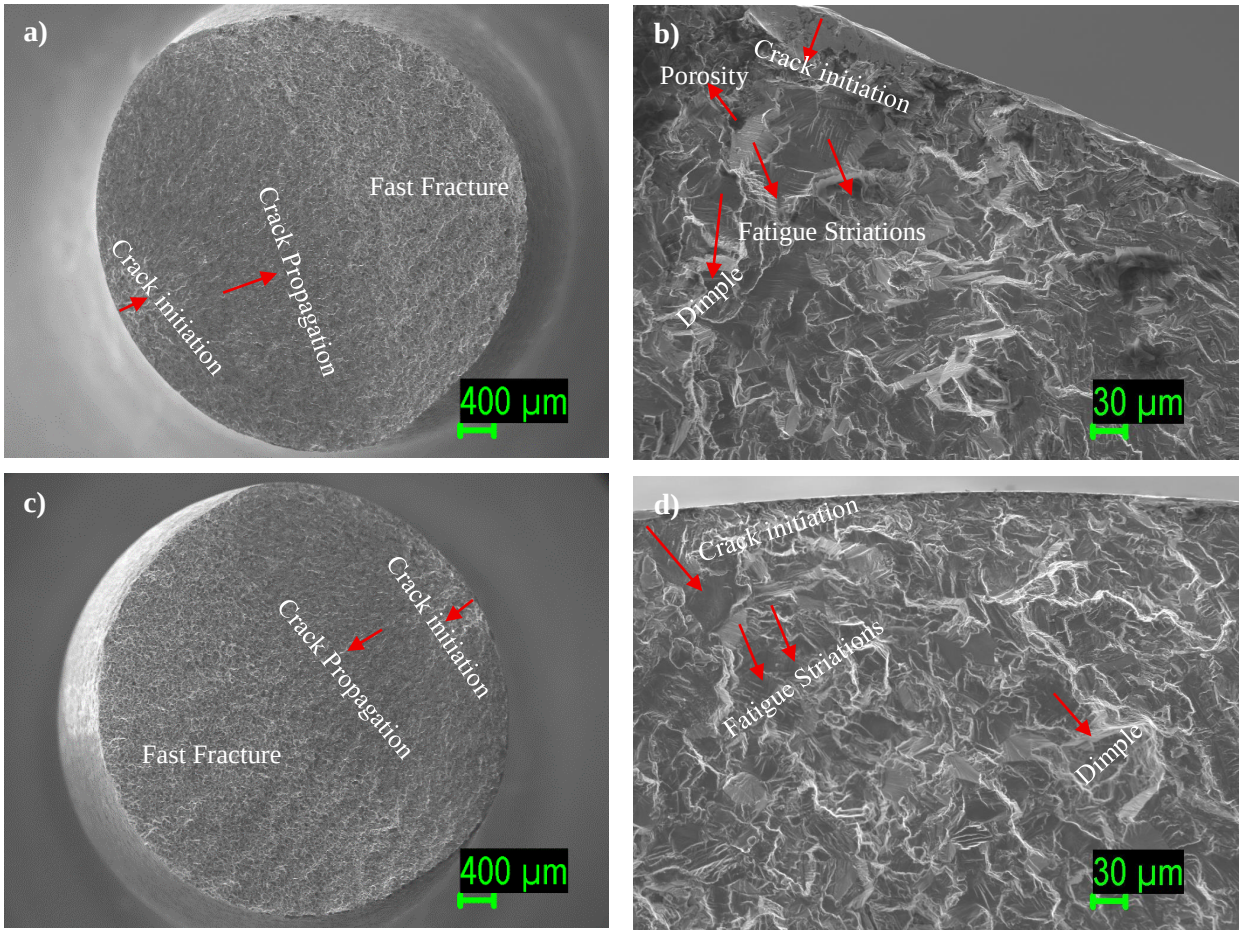


Figure 5. a) Atmosphere-controlled heat-treated sample fatigue macrography, b) Atmosphere-controlled heat-treated sample detailed crack initiation area, c) Vacuum heat-treated sample fatigue macrography, d) Vacuum heat-treated sample detailed crack initiation area (a) Atmosfer kontrollü ortamda ısıl işlem görmüş numunenin yorulma makrografisi, b) Atmosfer kontrollü ortamda ısıl işlem görmüş numunenin detaylı çatlak başlangıç alanı, c) Vakum ortamında ısıl işlem görmüş numune yorulma makrografisi, d) Vakum ısıl işlem görmüş numunenin detaylı çatlak başlangıç alanı)

As shown in Figure 5, failure mechanisms are the same in both vacuum and atmosphere-controlled heat-treated samples. Crack initiation, crack propagation and fast fracture areas were observed in

macro view of the samples. When comparing detailed views of atmosphere-controlled heat treated and vacuum heat-treated samples, crack initiation, regions, fatigue striations can be observed. The main difference of the samples is that porosity is observed in atmosphere-controlled heat-treated specimen that may originate from impurities such as H and O of the sample [35]. The impurities may reduce fatigue life of atmosphere-controlled heat-treated specimens when compared to vacuum heat-treated samples.

Table 3. Analysis results of impurity elements (Safsızlık elementlerinin analiz sonuçları)

Impurity	Base Metal	Vacuum heat-Treated Samples	Atmosphere-controlled heat-treated samples
O (ppm)	440±5	461±5	488±5
H (ppm)	77±1	80±1	98±1

Hydrogen and oxygen impurities are the main reasons for discoloration after heat treatment. However, oxygen and hydrogen are permitted in material specifications to a certain limit. Oxygen is permitted up to 0.40 % and hydrogen is allowed up to 0.015 %. In addition, oxygen content is controlled due to enhancement of mechanical properties. On the other hand, hydrogen is associated with diminishing strength and fatigue life [36,37]. To comprehend the situation, base metal and heat-treated samples in different heating media are subjected to impurities testing by LECO ONH836 equipment. Tests were performed with five samples for each condition, and the average value was taken. The standard deviation is ±1 ppm for hydrogen content and ±5 ppm for oxygen content so they are negligible. The results are given in Table 3. As it is seen in Table 3, oxygen and hydrogen impurity content in vacuum heat-treated samples are very close to base metal that implied vacuum heating media prevented formation of oxygen and hydrogen considerably. On the other hand, hydrogen content increased in atmosphere-controlled heating media by nearly 20 ppm and oxygen 50 ppm. So, discoloration is linked to hydrogen and oxygen content increment. Reduction in mechanical properties are attributed to hydrogen content of atmosphere-controlled heat-treated samples.

3. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

CP Ti alloys were treated in atmosphere controlled and vacuum atmospheres. Discoloration has been observed in atmosphere-controlled heat-treated samples, on the other hand vacuum heat-treated samples showed no discoloration. Microstructure and mechanical properties in terms of tensile and fatigue have been examined. Atmosphere-controlled and vacuum heat-treated samples illustrated identical microstructures. Tensile properties were compared after microstructure testing. The difference in tensile and yield strength values was about 7% on the other hand, elongation percentages were nearly similar. Vacuum heat-treated samples showed higher strength values than atmosphere-controlled specimens. The differences in strength values were linked to impurity content of the samples. Although oxygen content has some increment effects on strength, increment in hydrogen content decreased mechanical properties.

Fatigue testing was performed at stress levels of 310, 350, and 370 MPa that are below yield stress. fatigue tests were conducted. At all stress levels, the fatigue life was reduced. Fatigue life was reduced by almost 50% when stress levels are raised to 375 MPa. To understand the differences, failure mechanisms were examined by SEM. Fatigue striations and dimples were observed in both samples. The main difference was in atmosphere-controlled heat-treated specimens where porosity was also observed that might originate from increment in impurity contents. This was also proved by impurity analysis. Atmosphere-controlled heat-treated samples had nearly higher 20 ppm in hydrogen and 50 ppm in oxygen when compared to base metal. Mechanical properties decreased as the hydrogen content increased.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

The authors acknowledge the support provided by Turkish Aerospace (TUSAŞ).

Yazarlar, Türk Havacılık ve Uzay Sanayii (TUSAŞ)'ın sağladığı destek için teşekkürlerini sunar.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require

ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***Erdem MERMER*:** He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

***Nurdan EVCİMEN*:** She analyzed the results and performed the writing process.

Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

***Hanifi ÇİNİCİ*:** He reviewed the article.

Makaleyi gözden geçirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Z. Shi, Z. Liang, Z. Huang, A. He, S. Qiao, A. Tong, Y. Zhang, Y. Luo, M. Wang, J. He, B. Wang, J. Wang, T. Ye, J. Qian, C. Xu, F. Chen, S. Sun, K. Wang, W. Xu, Revolutionizing fiber materials for space: Multi-scale interface engineering unlocks new aerospace frontiers, Mater. Today Com. 88 (2025) 643-704. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2025.06.010.

[2] R. Soni, R. Verma, R. Kumar Garg, V. Sharma, A critical review of recent advances in the aerospace materials, Mater. Today Proc. 113 (2024) 180–184. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.108.

[3] H. Ada, A.Q.J. El Rubaye, E. Asikuzun Tokeser, A. Mavi, Y. Kaplan, S. Aksöz, Coating of Ti6Al4V alloys by physical vapor deposition method and micro-scratch and corrosion test investigations of coated samples. Journal of Advanced Applied Sciences, 2(1) (2023),36-45.https://doi.org/10.29329/jaasci.2023.562.05.

[4] S.Aksöz, Ü.Demir, H. Ada, .Gökmeşe, Bülent Bostan, NiTi Şekil Bellekli Alaşım Tozlarına Mekanik Alaşımlama Yöntemi Kullanılarak Elementel Ni Ve Ti Tozlarının İlavesinin Mikroyapısal İncelenmesı. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5(1), (2017) 99-106. https://doi.org/10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.303418.

[5] A.P.B.T. Mouritz, Titanium alloys for aerospace structures and engines, Introd. to Aerosp. Mater., Woodhead Publishing, 2012: pp. 202–223. https://doi.org/10.1533/9780857095152.202.

[6] M. Peters, J. Kumpfert, C.H. Ward, C. Leyens, Titanium Alloys for Aerospace Applications, Adv. Eng. Mater. 5 (2003) 419–427. https://doi.org/10.1002/adem.200310095.

[7] G. Lütjering, Influence of processing on microstructure and mechanical properties of (α+β) titanium alloys, Mater. Sci. Eng. A 243 (1998) 32–45. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00778-8.

[8] W.J. Evans, Optimising mechanical properties in alpha+beta titanium alloys, Mater. Sci. Eng. A 243 (1998) 89–96. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00784-3.

[9] W.J. Kim, S.J. Yoo, J.B. Lee, Microstructure and mechanical properties of pure Ti processed by high-ratio differential speed rolling at room temperature, Scr. Mater. 62 (2010) 451–454. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.12.008.

[10] AMS 2801, Heat Treatment of Titanium Alloy Parts, 2024.

[11] F.H. Froes, Titanium: Physical Metallurgy, Processing, and Applications, ASM International, 2015. https://doi.org/10.31399/asm.tb.tpmpa.9781627083188.

[12] Y. Xiong, P. Karamched, C.-T. Nguyen, D.M. Collins, C.M. Magazzeni, E. Tarleton, A.J. Wilkinson, Cold creep of titanium: Analysis of stress relaxation using synchrotron diffraction and crystal plasticity simulations, Acta Mater. 199 (2020) 561–577. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.08.010.

[13] P.J. Withers, Residual stress and its role in failure, Reports Prog. Phys. 70 (2007) 2211. https://doi.org/10.1088/0034-4885/70/12/R04.

[14] G. Lütjering, J.C. Williams, Commercially Pure (CP) Titanium and Alpha Alloys, Engineering materials and processes, Springer, Heidelberg, 2003: 149–175. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71398-2_4.

[15] C.L Briant, Z.F Wang, N Chollocoop, Hydrogen embrittlement of commercial purity titanium, Corrosion Science, Volue 44, Issue 8, 2002, Pages 1875-1888,

https://doi.org/10.1016/S0010938X(01)00159-7.

[16] R. Elshaer, K. Ibrahim, A. Barakat, R. Reda, Effect of Heat Treatment Processes on Microstructure and Mechanical Behavior of TC21 Titanium Alloy, Open J. Met. 07 (2017) 39–57. https://doi.org/10.4236/ojmetal.2017.73004.

[17] R.S. Uwanyuze, J.E. Kanyo, S.F. Myrick, S. Schafföner, A review on alpha case formation and modeling of mass transfer during investment casting of titanium alloys, J. Alloys Compd. 865 (2021) 158558. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158558

[18] Q. Gaillard, F. Steinhilber, A. Larguier, X. Boulnat, J.-Y. Buffiere, G. Martin, S. Dancette, S. Cazottes, R. Dendievel, C. Desrayaud, Alpha-case promotes fatigue cracks initiation from the surface in heat treated Ti-6Al-4V fabricated by Laser Powder Bed Fusion, Int. J. Fatigue 190 (2025) 108621. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108621.

[19] J.L. Milner, F. Abu-Farha, C. Bunget, T. Kurfess, V.H. Hammond, Grain refinement and mechanical properties of CP-Ti processed by warm accumulative roll bonding, Mater. Sci. Eng. A 561 (2013) 109–117. https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.10.081.

[20] I. Eipert, G. Sivaswamy, R. Bhattacharya, M. Amir, P. Blackwell, Improvement in Ductility in Commercially Pure Titanium Alloys by Stress Relaxation at Room Temperature, Key Eng. Mater. 611–612 (2014) 92–98. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.92.

[21] B.R. Sridhar, G. Devananda, K. Ramachandra, R. Bhat, Effect of machining parameters and heat treatment on the residual stress distribution in titanium alloy IMI-834, J. Mater. Process. Technol. 139 (2003) 628–634. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00612-5.

[22] T. Ahmed, H.J. Rack, Phase transformations during cooling in α+β titanium alloys, Mater. Sci. Eng. A 243 (1998) 206–211. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00802-2.

[23] D. Mpumlwana, V. Msomi, C.J.S. Fourie, Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties of a 3 mm Commercially Pure Titanium Plate (CP-Ti Grade 2), J. Eng. 2021 (2021) 6646588. https://doi.org/10.1155/2021/6646588.

[24] C.H. Lee, S.-W. Choi, P.L. Narayana, T.A. Nguyet Nguyen, S.-T. Hong, J.H. Kim, N. Kang, J.-K. Hong, Effect of Electric Current Heat Treatment on Commercially Pure Titanium Sheets, Metals (Basel). 11 (2021). https://doi.org/10.3390/met11050783.

[25] L.D.K. Catherine, D.B.A Hamid, The effect of heat treatment on the tensile strength and ductility of pure titanium grade 2, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 429 (2018) 12014. https://doi.org/10.1088/1757-899X/429/1/012014.

[26] H.-K. Park, T.-W. Na, J.M. Park, Y. Kim, G.-H. Kim, B.S. Lee, H.G. Kim, Effect of cyclic heat treatment on commercially pure titanium part fabricated by electron beam additive manufacturing, J. Alloys Compd. 796 (2019) 300–306. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.335.

[27] N. Mguni, M.N. Mathabathe, M.B. Shongwe, A.S. Bolokang, Comparison study on the effect of oxygen, nitrogen and hydrogen absorption on phase transformation and mechanical properties of quenched CP Ti and Ti6Al4V alloy, Materials Chemistry and Physics, Volume 330, 2025, 130111, https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.130111

[28] J.S. An, M.J. Jo, A. R. Jo, M.S. Jeong, D.K. Kim, Y.H. Moon, S.K. Hwang, Fatigue behavior and microstructural evolution of CP-Ti under cryogenic low-cycle fatigue, Materials Characterization, 228 (2025), 115407, https://doi.org/10.1016/j.matchar.2025.115407.

[29] AMS 4901, Titanium Sheet, Strip, and Plate, Commercially Pure, Annealed, 70.0 ksi (485 MPa), 2025.

[30] P.A. Blenkinsop, High Temperature Titanium Alloys., 1 (1986) 189–208. https://doi.org/10.1201/9781420037678-7.

[31] R.R. Boyer, An overview on the use of titanium in the aerospace industry, Mater. Sci. Eng. A 213 (1996) 103–114. https://doi.org/10.1016/0921-5093(96)10233-1.

[32] X. Shi, X. Wang, B. Chen, J. Umeda, A. Bahador, K. Kondoh, J. Shen, Precision control of oxygen content in CP-Ti for ultra-high strength through titanium oxide decomposition: An in-situ study, Materials & Design, Volume 227, 2023, 111797, https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111797.

[33] N. E. Paton and J. C. Williams: in 'Hydrogen in metals', (ed. I. M. Bernstein and A. W. Thompson), 409-431; 1974, Metals Park, OH, ASM. https://doi.org/10.1016/0036-9748(75)90487-1

[34] S. Hosseini, M. Farajollahi, M. Ebrahimi, Residual stress, fatigue behavior, and mechanical properties of equal-channel angular pressed commercial pure titanium, Journal of Materials Research and Technology, 28 (2024), 3297-3305, https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.265.

[35] J. L. Robinson and c. J. Beevers: in 'Titanium science and technology', (ed. R. I. Jaffee and H. M. Burte), Vol. 2, 1245-1256; 1973, New York, Plenum Press

[36] R.I. Jaffee, The physical metallurgy of titanium alloys, Prog. Met. Phys. 7 (1958) 65–163. https://doi.org/10.1016/0502-8205(58)90004-2.

[37] H. Luo, C. Dong, Z. Liu, M. Maha, X. li, Characterization of hydrogen charging of 2205 duplex stainless steel and its correlation with hydrogen-induced cracking, Mater. Corros. 64 (2013). https://doi.org/10.1002/maco.201106146.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1315-1330 (2025)

Investigation of Thermal Comfort and Optimum Supply Water Temperature in the Double Layered Thermally Activated Building System

Oğuzhan ÇALIŞIR[1], Müjdat ÖZTÜRK[2], Gamze GENÇ[3]*

[1]*OCM Energy and Technology Co., Department of Research and Development, 38150 Kayseri, Türkiye*

[2]*Kırşehir Ahi Evran University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, 40100 Kırşehir, Türkiye*

[3]*Erciyes University, Engineering Faculty, Department of Energy Systems Engineering, 38039 Kayseri, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 16/07/2025
Revision: 04/08/2025
Accepted: 09/08/2025

Keywords

Thermally Activated Building System (TABS)
Double Layered Thermally Activated Building System (DLTS)
Thermal Comfort
Energy Efficiency
Optimization

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 16/07/2025
Düzeltme: 04/08/2025
Kabul09/08/2025

Anahtar Kelimeler

Termal Aktif Bina Sistemi (TABS)
Çift Katmanlı Termal Aktif Bina Sistemi (DLTS)
Isıl Konfor
Enerji Verimliliği
Optimizasyon

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

The study optimizes supply water temperature in a Double Layered Thermally Activated Building System (DLTS) using GRG algorithm, ensuring thermal comfort and energy efficiency./ Bu çalışma, Çift Katmanlı Isıl Aktif Bina Sistemi'nde (DLTS) GRG algoritması ile besleme suyu sıcaklığını optimize ederek ısıl konfor ve enerji verimliliğini sağlamaktadır.

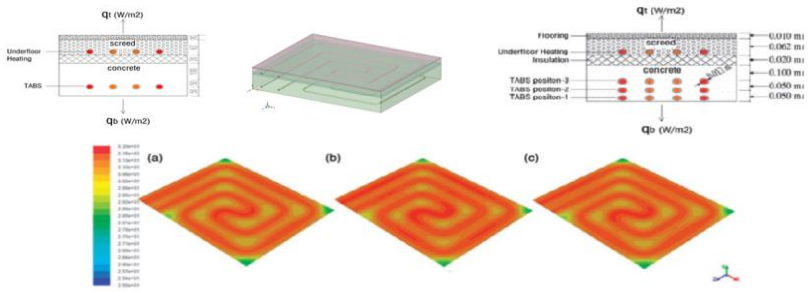


***Figure A**: DLTS system configuration and simulation results / **Şekil A:** DLTS sisteminin konfigürasyonu ve simülasyon sonuçları*

Highlights (Önemli noktalar)

- *GRG optimization identified 26.66°C as the optimum supply water temperature. / GRG optimizasyonu, optimum besleme suyu sıcaklığını 26.66°C olarak belirlemiştir.*
- *PPD values remain below 12.14% for Class C comfort, meeting ASHRAE and ISO standards. / PPD değerleri, C sınıfı konfor için %12.14'ün altında kalarak ASHRAE ve ISO standartlarını karşılamaktadır.*
- *DLTS operates with lower water temperatures than single-layer TABS, providing energy savings. / DLTS, tek katmanlı TABS'a göre daha düşük su sıcaklıklarında çalışarak enerji tasarrufu sağlamaktadır.*

***Aim (Amaç):** This study aims to optimize supply water temperature in a Double Layered Thermally Activated Building System (DLTS) to ensure maximum thermal comfort with minimum energy consumption. / Bu çalışma, Çift Katmanlı Termal Aktif Bina Sistemi'nde (DLTS) besleme suyu sıcaklığını optimize ederek minimum enerji tüketimiyle maksimum ısıl konfor sağlamayı amaçlamaktadır.*

***Originality (Özgünlük):** This study presents a new Double Layer TABS (DLTS) configuration, unlike traditional single-layer systems. The research improves thermal comfort and energy efficiency by optimizing pipe layout and feedwater temperature. / Bu çalışma, geleneksel tek katmanlı sistemlerden farklı olarak yeni bir Çift Katmanlı TABS (DLTS) konfigürasyonu sunmaktadır. Araştırma, boru yerleşimini ve besleme suyu sıcaklığını optimize ederek ısıl konfor ve enerji verimliliğini artırmaktadır.*

***Results (Bulgular):** DLTS provides significant energy savings and improved thermal comfort compared to traditional single-layer TABS. / DLTS, geleneksel tek katmanlı TABS'a göre önemli enerji tasarrufu ve artırılmış ısıl konfor sağlamaktadır.*

***Conclusion (Sonuç):** DLTS provides significant energy savings and improved thermal comfort compared to traditional single-layer TABS. It is applicable for both new buildings and retrofitting projects, contributing to sustainable building practices. / DLTS, geleneksel tek katmanlı TABS'a göre önemli enerji tasarrufu ve artırılmış ısıl konfor sağlamaktadır. Hem yeni binalarda hem de yenileme projelerinde uygulanabilir olup, sürdürülebilir bina uygulamalarına katkı sunmaktadır.*

*Corresponding author, e-mail: gamzegenc@erciyes.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1739629

GU J Sci, Part C, 13(3): 1315-1330 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Investigation of Thermal Comfort and Optimum Supply Water Temperature in the Double Layered Thermally Activated Building System

Oğuzhan ÇALIŞIR[1], Müjdat ÖZTÜRK[2], Gamze GENÇ[3]*

[1]*OCM Energy and Technology Co., Department of Research and Development, 38150 Kayseri, Türkiye*

[2]*Kırşehir Ahi Evran University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, 40100 Kırşehir, Türkiye*

[3]*Erciyes University, Engineering Faculty, Department of Energy Systems Engineering, 38039 Kayseri, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 16/07/2025
Revision: 04/08/2025
Accepted: 09/08/2025

Keywords

Thermally Activated Building System (TABS)
Double Layered Thermally Activated Building System (DLTS)
Thermal Comfort
Energy Efficiency
Optimization

Abstract

The adoption of low-temperature heating systems in buildings has become increasingly popular to reduce energy consumption and enhance energy efficiency. In our previous study, a novel hydronic radiant heating system integrating both Underfloor Heating and Thermally Activated Building Systems (TABS) on the same floor was developed. The optimization process was based on thermal comfort criteria defined in ASHRAE 55 and ISO 7730, using floor surface temperatures obtained via FLUENT/ANSYS simulations. The Generalized Reduced Gradient (GRG) algorithm was employed, with Predicted Mean Vote (PMV) and Predicted Percentage of Dissatisfaction (PPD) indicators to assess thermal comfort. Present study aims to optimize the supply water temperature for the "Double Layered Thermally Activated Building System" (DLTS), ensuring thermal comfort and energy efficiency. Results indicated that for thermal neutrality, the optimum supply water temperature was 26.66°C, and the optimum surface temperature was 23.60°C. The DLTS system met the comfort criteria with PPD values below 12.14 for class C, demonstrating high user satisfaction. This research highlights the potential of DLTS to improve both energy efficiency and thermal comfort in buildings, offering valuable insights for future building system designs.

Çift Katmanlı Termal Aktif Bina Sisteminde Termal Konfor ve Optimum Besleme Suyu Sıcaklığının Araştırılması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 16/07/2025
Düzeltme: 04/08/2025
Kabul09/08/2025

Anahtar Kelimeler

Termal Aktif Bina Sistemi (TABS)
Çift Katmanlı Termal Aktif Bina Sistemi (DLTS)
Isıl Konfor
Enerji Verimliliği
Optimizasyon

Öz

Binalarda düşük sıcaklıklı ısıtma sistemlerinin benimsenmesi, enerji tüketimini azaltmak ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla giderek daha popüler hale gelmiştir. Önceki çalışmamızda, aynı katta hem Yerden Isıtma hem de Termal Olarak Aktive Edilmiş Bina Sistemlerini (TABS) entegre eden yenilikçi bir hidronik radyant ısıtma sistemi geliştirilmiştir. Optimizasyon süreci, ASHRAE 55 ve ISO 7730 standartlarında tanımlanan termal konfor kriterlerine dayalı ve zemin yüzey sıcaklıkları FLUENT/ANSYS simülasyonları ile elde edilmiştir. Termal konforun değerlendirilmesinde Beklenen Ortalama Karar (PMV) ve Öngörülen Memnuniyetsizlik Yüzdesi (PPD) göstergeleri kullanılmış ve Genel Azaltılmış Gradyan (GRG) algoritması uygulanmıştır. Bu çalışmanın amacı, "Çift Katmanlı Termal Aktif Bina Sistemi" (DLTS) için besleme suyu sıcaklığını, hem termal konforu hem de enerji verimliliğini sağlayacak şekilde optimize etmektir. Sonuçlar, termal denge için optimum besleme suyu sıcaklığının 26,66°C ve optimum yüzey sıcaklığının 23,60°C olduğunu göstermiştir. DLTS sistemi, sınıf C için PPD değerlerini 12,14'ün altında tutarak konfor kriterlerini karşılamış ve yüksek kullanıcı memnuniyeti sağlamıştır. Bu araştırma, DLTS'nin binalarda hem enerji verimliliğini hem de termal konforu artırma potansiyelini vurgulamakta ve gelecekteki bina sistemi tasarımları için değerli bilgiler sunmaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The primary aim of technological advancements throughout history has been to provide people with a more comfortable life. One of the most significant types of comfort that directly affects the quality of life and work efficiency is thermal comfort. Therefore, determining whether an environment

*Corresponding author, e-mail: gamzegenc@erciyes.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1739629

provides thermal comfort is of great importance. Thermal comfort or discomfort criteria are expressed by PMV (Predicted Mean Vote) and PPD (Predicted Percentage of Dissatisfaction) values. Maintaining high thermal comfort while reducing energy consumption is crucial for environmental sustainability and energy efficiency.

In this context, radiant cooling and heating systems, which offer energy savings with higher thermal comfort in comparison with conventional systems, have been developed. In particular, underfloor heating systems and thermally activated building systems (TABS), which provide low energy consumption and high thermal comfort, have become prominent in many European countries. TABS is an innovative system that provides heating and cooling through pipes embedded in the walls or floors of buildings. Additionally, low-temperature heating and cooling systems have been reported to significantly enhance building energy performance, offering substantial potential for energy savings [1-3].

Many control algorithms and strategies have been developed to enhance the energy efficiency of these systems and maintain thermal comfort. These include methods such as keeping the supply water temperature constant, adjusting it according to the outdoor temperature, and flux modulation. However, these control strategies have generally been applied to single-layer TABS systems. Radiant heating systems stand out in many European countries in terms of low energy consumption and high thermal comfort. Especially among these most widely used floor heating systems and thermally active building systems (TABS). TABS is a heating and cooling system with pipes embedded in the walls or floors of buildings.

Various studies and algorithms have been carried out for the control of heating systems to ensure lower energy consumption. These studies have been theoretically analyzed through simulations or experiments. Generally, the variables related to the control of TABS are the supply water temperature, volumetric flow rate, and operating time. Apart from these, there are also outdoor temperature, operating temperature, internal loads, and TABS surface temperature. The regulation of supply water temperature can be achieved through a number of different methodologies. The first of these is to keep the supply water temperature constant. In this control system, the TABS is mostly operated at a constant temperature (18/20/22°C) in summer months to prevent condensation, while in winter it is operated between 25°C and 30°C [4]. Olesen and Liedelt [5] stated that in buildings with low heating and low cooling loads, the temperature is set to 22°C, and the system will switch to heating when the room temperature falls below this value, and cooling when it exceeds this value. Thanks to this simple control technique, the system is continuously operated at a constant temperature without the need for complex algorithms. The second control method for supply water is to write the supply water temperature as a function of the outdoor temperature. According to the studies carried out by Olesen and Dossi [6,7], if the supply water temperature is given separately in summer and winter as a function of the outdoor temperature, the supply water temperature is calculated as 22˚C in summer and 25˚C in winter. Controlling the supply water temperature according to the outside temperature provides low energy consumption and acceptable indoor weather conditions. Another control method is flux modulation control. Flux modulation control is to heat or cool per unit area in proportion to the temperature difference between the room air and the floor surface temperatures [8-10]. It has been observed that flux modulation control responds more quickly to sudden changes in internal loads than temperature modulation.

Simmonds [11] suggested controlling the supply water temperature based on the surface temperature of the ground. For underfloor cooling, controlling the floor temperature with a constant supply water temperature of 19-20 ºC was suggested. However, they did not evaluate thermal comfort and energy use. Baumgartner and Brühwiler [12] developed a 3-pipe system (2 outlets and 1 return) via variable supply water temperature for rooms with different heating/cooling loads. In this system, for example, in summer, frequently used rooms with medium cooling loads can operate with lower supply water temperature than empty rooms. The temperature difference between the supply water pipes is adjusted to 1-2 degrees. There is a valve to switch between pipes. This system configuration takes into account the different usage and comfort conditions of offices but requires higher installation costs and more complex control and operating algorithms. Nüβle [13] proposed a low-energy non-residential building using both the central and near-surface TABS system. This TABS configuration works with 3 pipes. One pipe feeds the pipes in the center, while the other feeds the pipes near the surface. This system also requires complex control and operating algorithms. Another form of control is the average water temperature control. The effect of controlling average water temperature (difference between flow and return) was found to be lower in terms of

comfort and auxiliary energy use compared to supply water temperature control [14].

Another approach to controlling the TABS is to adjust the volume flow rate as a function of room temperature. This control system has on-off controls. It is one of the most straightforward and commonly used control strategies of TABS. Zaheer-uddin et al. [15] proposed a multi-step on-off control. Here, a 3-way valve adjusts the supply water temperature of the system. The volumetric flow rate is adjusted to 100%, 50%, or 0% based on the room temperature. The bypass is used to increase the supply water temperature in summer and decrease it in winter. The overall volume flow rate stays constant. This can offer an economic advantage for TABS, but it does not reduce the power consumption or the operating time of the pumps. TABS's working time is another control method. Continuous operation of the TABS in heating or cooling mode increases the additional energy usage, although it gives better results in thermal comfort compared to on-off control. According to the study of Athienitis and Charron [16], in the temperature difference between the setpoint and the actual room temperature, the heating energy proportional control has increased the working time compared to the traditional on-off control. On-off control leads to the system being activated frequently and the room temperature fluctuating. Tötdli et al. [17] proposed an integral approach for controlling TABS. A dynamic thermal chamber model was used to assess the impact of internal loads and solar gains on the heating and cooling load. The control input parameters include outdoor air temperature, supply water temperature, and room temperature. The main control algorithm is to determine the supply water temperature as a function of the 24-hour average outdoor temperature and room temperature. Based on the heating and cooling curves, the supply water temperature is adjusted to meet the load demand. Gwerder et al. [18] proposed the pulse width modulation (PWM) approach to control TABS. In this intermittent model of operation, PWM operates the zone pump intermittently to provide the most efficient control. In the study, two separate PWM solutions were compared and it was concluded that both were sufficient for TABS control. Sourbron and Helsen [19] investigated a model-based predictive controller (MPC) to control TABS and Air Handling Unit (AHU) using MATLAB and TRNSYS to provide thermal comfort with minimum energy consumption. The results revealed that MPC improved energy consumption and thermal comfort compared to traditional control methods. Schmelas et al. [20] proposed a self-learning predictive method based on multiple linear regression (MLR) using MATLAB and TRNSYS for TABS control. The proposed method was compared with traditional control methods. The results showed that thermal comfort was improved according to PMV-PPD requirements and there was no need for parameterization of cooling-heating curves. Qu et al. [21] investigated three different methods for the control of TABS in Beijing. As the basic control method, they examined the supply water temperature depending on the outside air temperature. Another control method is the pre-cooling control during the weekend night hours. The third control method is the optimum control of the supply water temperature. The three control methods were compared in terms of thermal comfort (according to PMV-PPD requirements) and energy consumption. As a result, it was understood that the discomfort of the basic control was high. For this reason, the other two control methods were used together to optimize the supply water temperature. In this way, thermal comfort was improved and energy consumption was reduced by 35%. Michalak [22] conducted measurements for 4 months in an office building in Poland equipped with a thermal active building system to determine PMV, PPD, surface temperature, and vertical temperature distribution. The analysis showed that the TABS system provides good thermal comfort. The measurements revealed that the average surface temperature ranged from 20.6°C to 26.2°C, the average vertical air temperature ranged from 22.5°C to 23.1°C, and the PMV value ranged from 0.52 to 1.50. Stoffel et al. [23] conducted a detailed comparison of the most commonly used advanced building control methods in a single-zone office model (based on ASHRAE 140 and 900) where heating and cooling needs are met by an air handling unit and a thermal active building system. They compared a traditional reinforcement learning-based controller method with advanced model predictive control (MPC) methods (white-box, adaptive gray-box, adaptive black-box andapproximate white-box). They evaluated the results based on annual energy consumption and discomfort. The traditional method is faster in terms of calculation time, but performs worse. The adaptive black-box MPC has demonstrated the best performance among the advanced methods. It shown a performance that is 4.9-8.4% better than others in terms of energy saving, and 7.8-83.8% better in terms of discomfort. Liu et al. [24] simulated a residential building with low energy consumption using a heat pump and TABS, using a software program. They developed an EMPC (Economic Model Predictive Control) method to reduce costs

and energy consumption and compared it to the RBC (Rule-based control) method. The analysis showed that EMPC has lower energy costs compared to RBC. It was also observed that EMPC control can provide optimal heating without compromising thermal comfort and significantly reduces energy consumption at peak load.

All the control methods mentioned to increase thermal comfort are suggested for standard single-layer TABS systems. In standard TABS systems, the control of the supply water temperature is seen to be the simplest and most effective method. Even precise control methods such as MPC proceed by taking this control as the ultimate control parameter for their method.

The novelty of this study is to optimise the thermal analysis results of a double-layer TABS system (DLTS) in terms of thermal comfort, a topic that is not covered in the existing literature. In this context, optimizing the supply water temperatures based on surface temperature has allowed the determination of the limit values for comfort classes A, B, and C according to ASHRAE and ISO 7730 standards. This study highlights the advantages of DLTS systems in terms of energy efficiency and thermal comfort, providing valuable insights for future building system designs.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

2.1. Terminology and Comfort Conditions (Terminoloji ve Konfor Koşulları)

According to ASHRAE and ISO 7730 standards, the general thermal comfort model has two main indicators. These are the predicted percentage of dissatisfied (PPD) and predicted percentage of mean vote (PMV) indicators. PPD is the percentage of discontent in the indoor environment, and PMV is the average comfort value in the environment. PMV is a measure of how people perceive the environment thermally, and on the scale, +3 indicates that it is very hot, 0 is neutral and -3 indicates that it is very cold. PPD value is the measure of how dissatisfied people are with the environment as a percentage of people sharing an environment using the PMV value. The PMV value varies between -3 and +3 values, while the PPD indicator varies between 0-100 values.

The relationship between PMV and PPD is shown in Figure 1. When this figure is examined, the situation where the PMV value approaches zero and the PPD value is at 5% indicates the most ideal ambient condition.

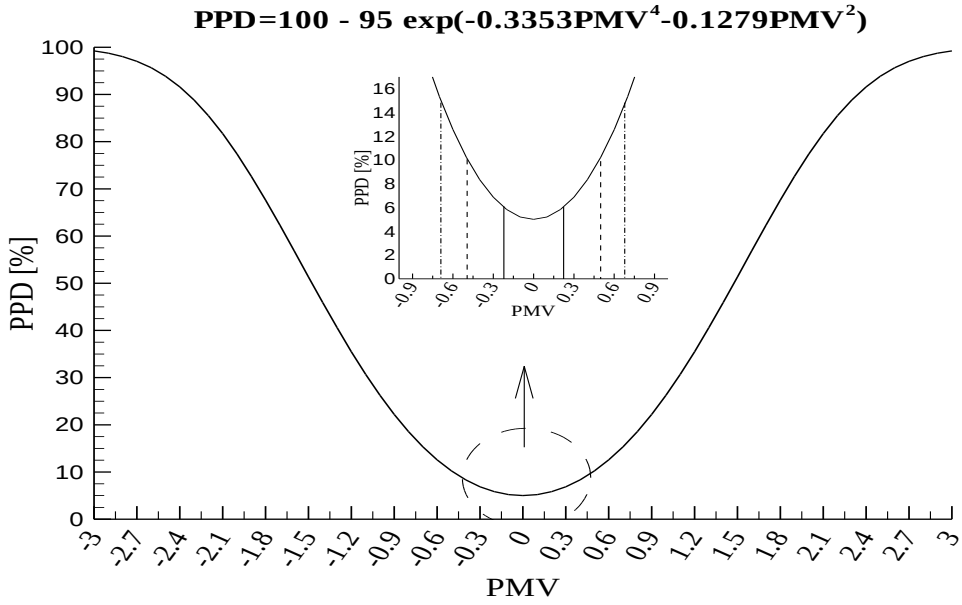


Figure 1. Relationship between PPD and PMV (PPD ve PMV arasındaki ilişki)

The general thermal comfort model, as per the ISO 7730 and ASHRAE 55 standards, includes three comfort classes: A, B, and C. According to these comfort classes, A class is limited to <6 PPD, B class <10 PPD, and C class <15 PPD. Value ranges of PPD and PMV indicators according to comfort classes are shown in Table-1.

Table 1. Thermal comfort classes based on ISO 7730 and ASHRAE 55 standards [25,26] (ISO 7730 ve ASHRAE 55 standartlarına dayalı termal konfor sınıfları)

Comfort Class	PPD Indicator (Percentage of Dissatisfaction)%	PMV Indicator (Comfort = thermal sensitivity)
A	< 6	-0.2 < PMV < 0.2
B	< 10	-0.5 < PMV < 0.5
C	< 15	-0.7 < PMV < 0.7

3. DOUBLE LAYERED THERMALLY ACTIVATED BUILDING SYSTEMS (DLTS) (ÇİFT KATMANLI TERMAL AKTİF BİNA SİSTEMLERİ (DLTS))

3.1. Modeling and numerical results of DLTS (DLTS'nin Modellenmesi ve Sayısal Sonuçları)

A new design has been developed for hydronic radiant heating systems [27]. This newly developed design is a double-layer thermal active building system (DLTS), shown in Figure 2, created by combining underfloor heating and TABS system. Three-dimensional thermal analyzes of this system according to different positions of the pipes and supply water temperatures were made numerically with the FLUENT/ANSYS program [28]. As the pipe material, Pe-Xa pipe, which is 17x2.0 mm in size and which is mostly used in underfloor heating, was chosen. It has been assumed that the pipes were laid in snail type with 0.15 m between them.

Numerical analysis was conducted in steady-state conditions by means of the SIMPLE algorithm and standard k-Ɛ turbulence model. Boundary conditions included fixed ambient temperatures and specified thermal properties for the surfaces. The following boundary conditions and assumptions were considered:

- Top surface heat transfer coefficient is 10 W/m²K.
- Bottom surface heat transfer coefficient is 6 W/m²K.
- It is assumed that the side surfaces are insulated.
- It is assumed that thermal conductivity, viscosity, flow density, and the specific heat coefficient remain constant and do not vary with temperature.
- The ambient temperature is 20℃ on both the top and bottom surfaces.

The heat fluxes and temperature distributions on the top and bottom ambient surfaces for supply water temperatures (30/35/40℃) were studied for each pipe location as described in the DLTS. The pipe materials, positions, and the spacing between pipes were also defined according to typical configurations used in underfloor heating systems. And also analysis is performed with the program to determine the correct pipe position on the Y-axis. For these analyses, three positions were selected on the vertical Y-axis, shown in Figure 3, in the DLTS system, 0.001 m, 0.050 m and 0.100 m, respectively.

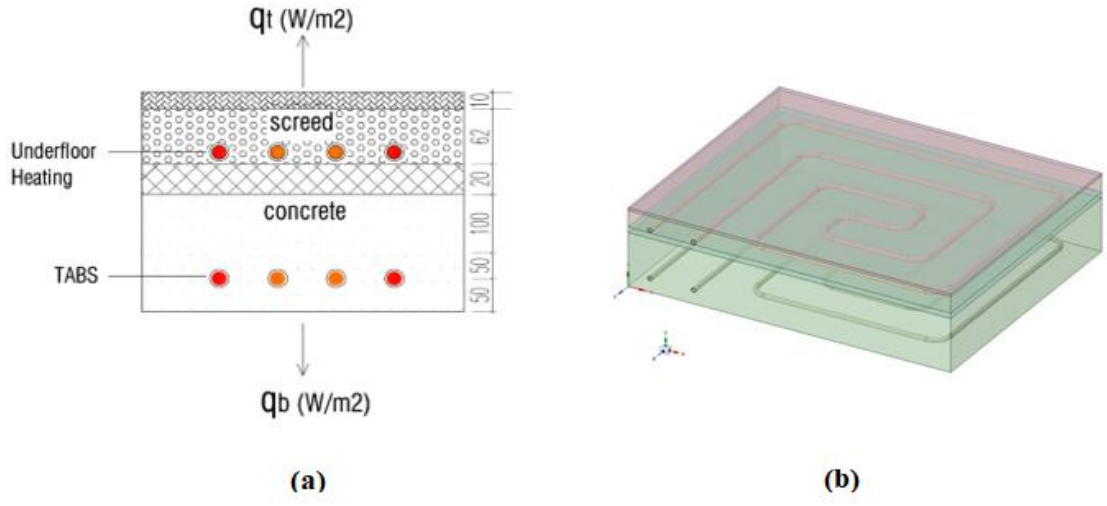


Figure 2. (a) Floor section and (b) isometric numerical view of considered DLTS system [27] ((a) Dikkate alınan DLTS sisteminin zemin kesiti ve (b) izometrik sayısal görünümü)

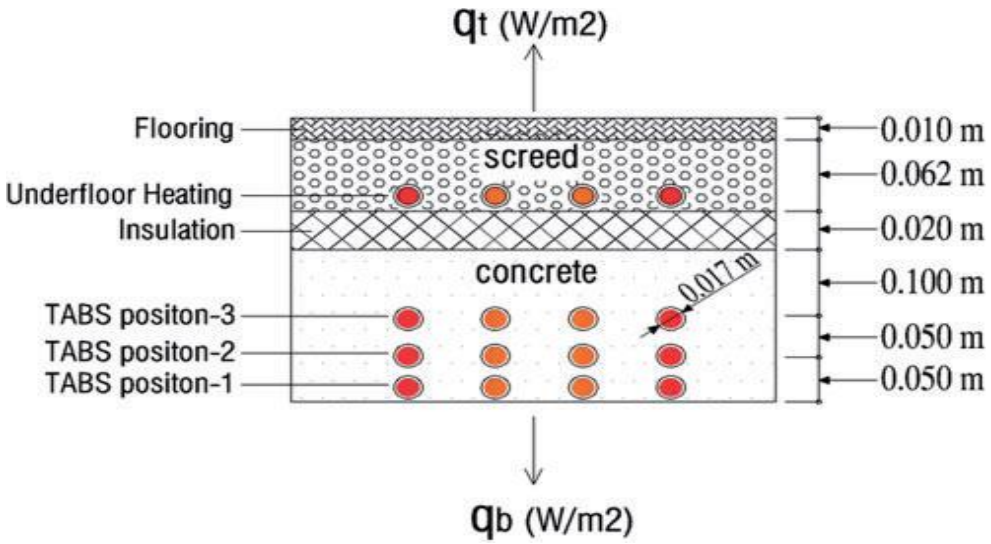


Figure 3. DLTS system's pipe positions 1,2 and 3 (DLTS sisteminin 1, 2 ve 3 numaralı boru konumları)

According to the results of analyses, the situation where the pipe is positioned 0.05 m on the vertical axis is the best position in terms of thermal efficiency. Numerical analyses were performed under steady state conditions. Also, SIMPLE algorithm and standard k-e turbulence model were used in these analyses. Heat fluxes and temperature distributions of the surfaces were investigated at various supply water temperatures (30/35/40°C) for every pipe location, respectively as shown in Table 2.

Table 2. Fluxes and average surface temperatures for every pipe location of TABS at supply water temperatures (30/35/40°C) (Besleme suyu sıcaklıklarında (30/35/40°C) TABS'in her boru konumu için akılar ve ortalama yüzey sıcaklıklar)

	Position-1 (y:0.001 m)			Position-2 (y:0.005 m)			Position-3 (y:0.01 m)		
	T_{inlet} (°C)			T_{inlet} (°C)			T_{inlet} (°C)		
	30	35	40	30	35	40	30	35	40
T_{HF} Average Top surface heat flux (W/m²)	51.5	77.3	103.1	52.2	78.4	104.5	52.1	77.7	103.5
T_S Average Top surface temperature (°C)	25.3	28.0	30.71	25.4	28.1	30.86	25.4	28.1	30.75

In accordance with the EN 1264 standard [29], the maximum surface temperature in the footprint zone is 29°C. From the data in Table 2, it was concluded that a supply water temperature of 40°C is not appropriate for heating, as the average surface temperature surpasses 29°C in all three pipe positions.

Average temperature contours and distributions on the top surface for three different pipe locations (1,2 and 3) at supply water temperature of 40 °C are shown in Figures 4-5. The average temperatures show similar distributions and are above the temperature limit of 29 °C in all three locations.

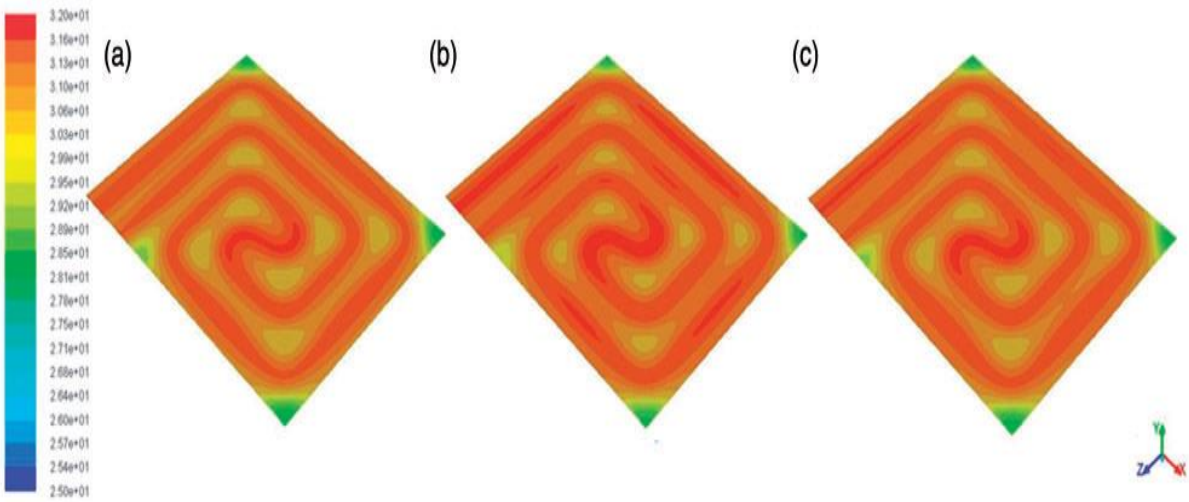


Figure 4. Temperature contours on the top surface for a supply water temperature of 40 °C for three pipe positions (a) 1, (b) 2 and (c) 3 (Üç boru konumu (a) 1, (b) 2 ve (c) 3 için 40 °C'lik bir besleme suyu sıcaklığı için üst yüzeydeki sıcaklık konturları)

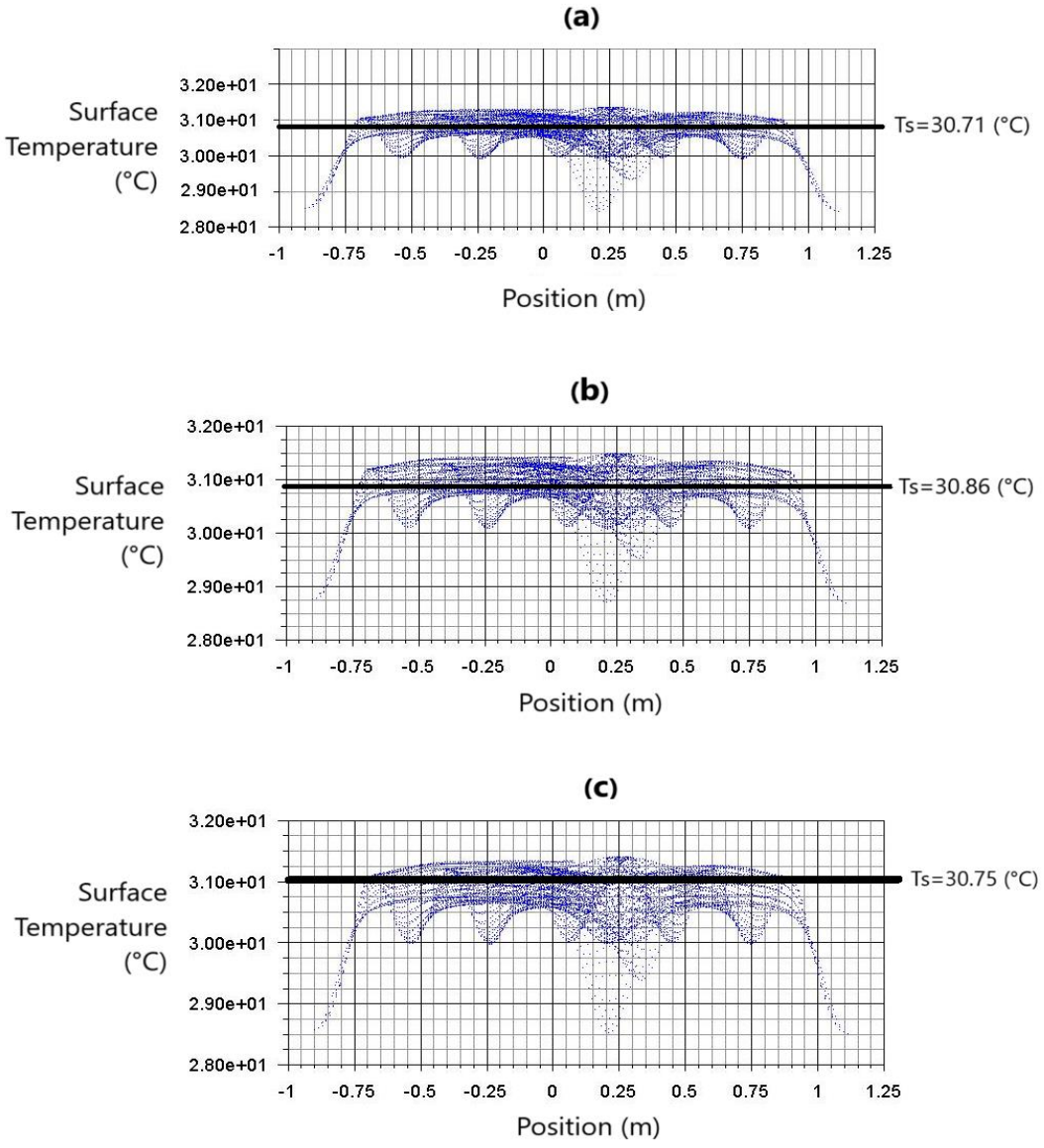


Figure 5. Temperature distributions on the top surface for a supply water temperature of 40 °C for three pipe positions (a) 1, (b) 2 and (c) 3 (Üç boru konumu (a) 1, (b) 2 ve (c) 3 için 40 °C'lik bir besleme suyu sıcaklığı için üst yüzeydeki sıcaklık dağılımları)

Figure 6 shows the optimal pipe positions along the vertical y-axis for different supply water temperatures. The positions giving the maximum heat flux at 40 degrees and 35 degrees supply water temperatures are 0.052 and 0.053 meters, respectively. The pipe position giving the maximum heat flux at 30 degrees supply water temperature is 0.06 meters. Since we want to obtain the maximum heat flux from the reference surface, the positions giving these heat fluxes are accepted as the optimum pipe positions.

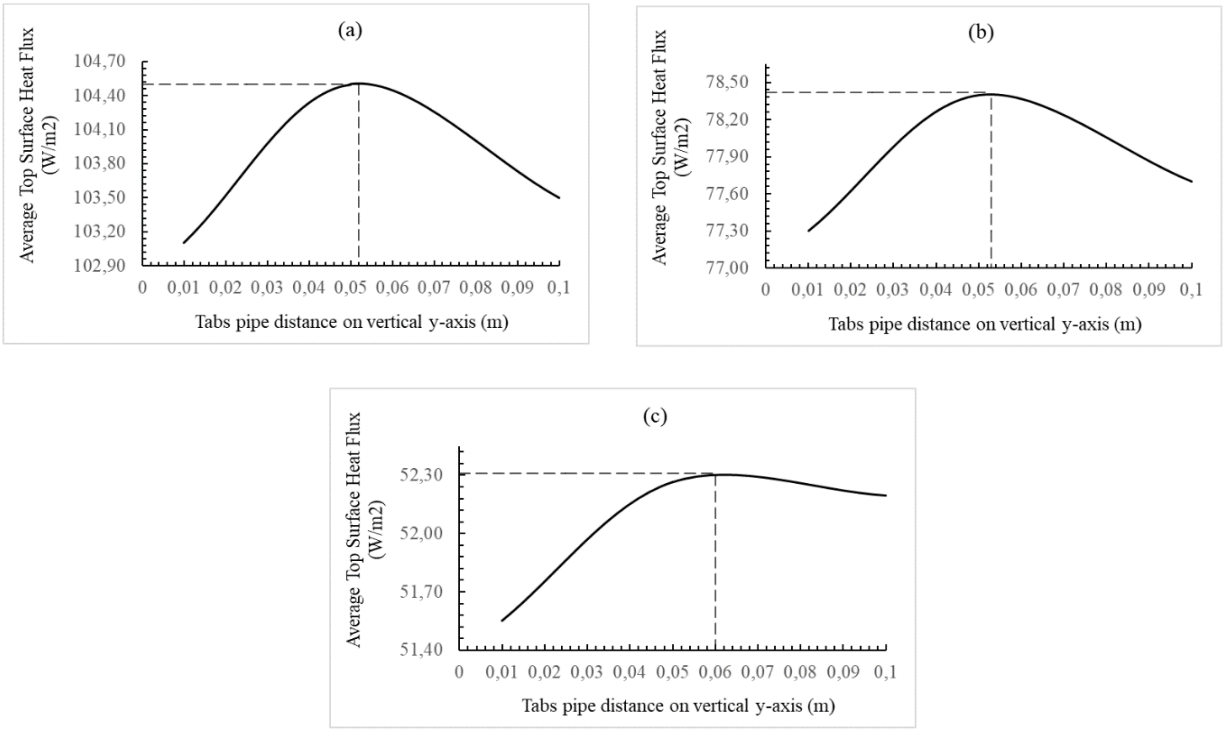


Figure 6. Optimum positions of tabs pipes at different supply temperatures (a) 40°C, (b) 35°C and (c) 30°C (Farklı besleme sıcaklıklarında sekmeli boruların optimum konumları (a) 40°C, (b) 35°C ve (c) 30°C)

Considering the fact that the pipe positions are very close to each other and the difficulty of making precise adjustments in practice, the optimum pipe position was accepted as an average value of 0.05 meters. In this study, this position of the pipe was taken into consideration and the change of the surface temperature according to the supply water temperature was optimized to provide the best thermal comfort and reduce energy consumption.

3.2. Optimization model and solutions in DLTS
(DLTS'de optimizasyon modeli ve çözümleri)

Nonlinear constrained optimization was used as an optimization model in determining the supply water temperature depending on the surface temperature. For the solution, the generalized reduced gradient (GRG) algorithm is used. The GRG algorithm is widely used in engineering for optimization problems and provides reliable results in nonlinear constrained optimization [30-31]. It has proven effective, especially in complex, nonlinear problems where multiple variables require optimization. In this study, the GRG algorithm was chosen to optimize the supply water temperature based on surface temperatures, as this algorithm provides both precise results and a practical solution for engineering applications.

The step-by-step optimization procedure using the GRG algorithm is illustrated in Figure 7. This flowchart summarizes the iterative process applied in determining the optimal supply water temperature, based on surface temperature and thermal comfort constraints. The diagram shows that the PPD-based and supply temperature-based objective functions were solved under relevant comfort class limitations to achieve energy-efficient thermal comfort.

The main idea in the GRG algorithm is to solve the constrained problem by making it unconstrained using the displacement method [32]. In the GRG method, Newton or conjugate gradient method is used to determine the search direction. Also, a Hessian matrix should be used to store data [31].

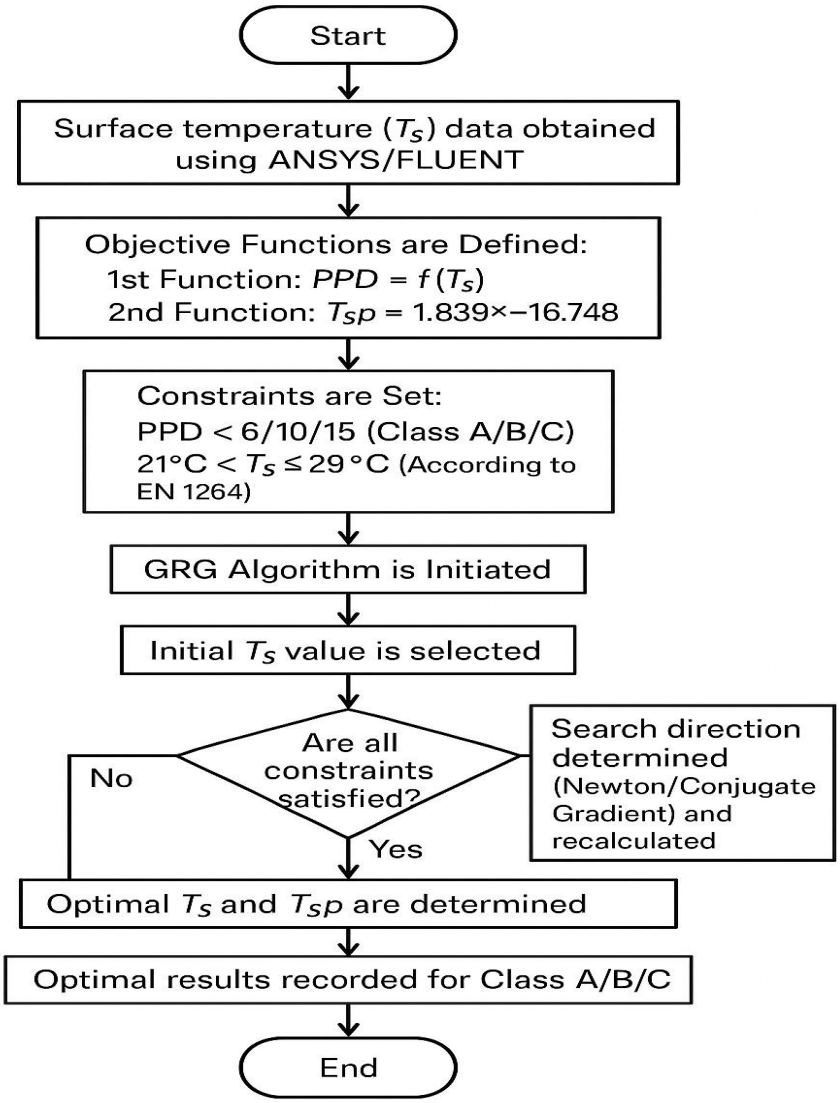


Figure 7. GRG optimization flowchart for supply water temperature (Besleme suyu sıcaklığı için GRG optimizasyon akış şeması)

This study aims to find the optimum values of the supply water temperature for A, B, and C comfort classes according to the specified constraints. For this purpose, two objective functions were used for the solution. To determine the optimum values, non-linear optimization is made with MATLAB and EXCEL Solver by writing objective functions and restrictive parameters.

First objective function is a function of PPD given in Equation 1 depending on the surface temperature (Ts) [33].

$$PPD(T_s) = 100 - 94 \cdot e^{(-1.387+0.118 \cdot T_s - 0.0025 \cdot T_s^2)} \quad (1)$$

The limiting parameters in this function are determined according to the comfort classes in Table-1. Namely: PPD <6 for Class A, PPD <10 for Class B, and PPD <15 for Class C. Also, another limiting parameter is T_s, and PPD is a sign constraint as it cannot be negative. If $T_s \geq 0$ and PPD ≥ 0 it is defined as.

Second objective function supply water temperature (T_{sp}) is a function that depends on the surface temperature. For the DLTS system designed with the FLUENT/ANSYS program, this function is curved to the change values of the surface temperature and the supply water temperature (Figure 8). Establishing a objective function for supply water. The supply water temperature was drawn from the parametric equation obtained without fitting the curve in terms of curve fitting, and it was obtained as in Equation 2 depending on the surface temperature. This equation obtained is

defined as the second objective function in this study.

$$T_{sp}\,(T_s) = 1.839\,.\,T_s - 16.748 \quad (2)$$

The limiting parameter for this second objective function is the maximum value of the surface temperature according to thermal comfort conditions. The limits of maximum surface temperatures according to EN 1264-2 are given in Table 3 [29]. Accordingly, the maximum surface temperature at the first zone, which is the footed zone, is 29°C. Hence the first limiting parameter will be $T_s \leq 29$ [29]. The second constraint is that the room temperature should be 20°C, so the surface temperature should exceed this temperature. Therefore, the second limiting parameter is $T_s > 21$ determined as.

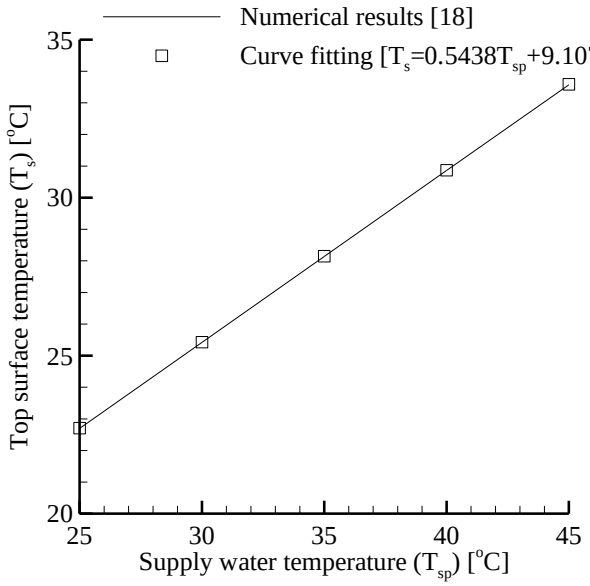


Figure 8. Change of surface temperature depending on the supply water temperature (Besleme suyu sıcaklığına bağlı olarak yüzey sıcaklığının değişimi)

Table 3. Maximum surface temperatures according to EN 1264-20 [29] (EN 1264-20'ye göre maksimum yüzey sıcaklıkları)

Regions	Maximum Surface Temperature [°C]
TYPE-1. ZONE Footed areas	29
TYPE-2. REGION Wet areas (Bathroom-WC etc.)	33
TYPE-3. ZONE Non-footed edge areas	35

4. RESULTS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

PPD is equal to 5.49% in case PMV value is zero which is ideal and representing thermal neutrality. Surface temperature and supply water temperatures corresponding to these values are calculated from Equations 1 and 2 and the results are shown in Table 4. For the system designed in this study for the most ideal ambient conditions, the surface temperature is 23.6°C, while the supply water temperature is 26.66°C.

Table 4. Thermal neutrality surface and supply water temperatures for the condition (Termal denge koşulu için yüzey ve tedarik suyu sıcaklıkları)

Surface Temperature [°C]	Minimum PPD Value [%]	Supply Water Temperature [°C]
23.6	5.49	26.66

Unlike single-layer TABS studies, the DLTS system in this study demonstrated enhanced thermal comfort and energy efficiency by optimizing pipe positioning and water supply temperature. Previous studies on single-layer systems, such as those conducted by Simmonds [11] and Baumgartner & Brühwiler [12], have shown limited thermal performance in similar conditions.

The value of maximum supply water and surface temperatures according to different comfort classes is given in Table 5. In optimization, when maximizing values are found in response to objective functions and restrictive parameters, the maximum surface temperatures against 6 and 10, which are the maximum value of PPD for comfort classes A and B, are calculated as approximately 25.070 and 28.022, while the supply water temperatures are calculated as approximately 29.362 and 34.786, respectively. However, since the surface temperature corresponding to the maximum PPD value of 15 for the C comfort class exceeds the thermal comfort condition of 29°C, the maximum PPD value for the C comfort class in the DLTS that was investigated in this study should be taken as approximately 12.136. The maximum surface temperature corresponding to this value is 29°C and the supply water temperature is 36.583°C.

Table 5. Change of Maximum Supply Water and Surface Temperature according to different comfort classes (Farklı konfor sınıflarına göre Maksimum Besleme Suyu ve Yüzey Sıcaklığının Değişimi)

Comfort class	Max. Surface Temperature [°C]	PPD Value [%]	Maximum Supply Water Temperature [°C]
A	25.07	5.99	29.36
B	28.02	9.99	34.78
C	29	12.13	36.58

As a result of the analysis made according to the restrictive parameters, minimum surface temperature, minimum supply water temperature, and corresponding PPD values for comfort classes A, B and C are given in Table 6. While the minimum supply water temperature in A comfort class is 23.96°C, in B and C comfort class, the restrictive parameter Ts>21, the minimum supply water temperature that satisfies this requirement is 22°C. The PPD value for both classes is approximately 7% and it complies with the standards.

Table 6. Variation of minimum supply water and Surface temperature according to different comfort classes (Farklı konfor sınıflarına göre minimum besleme suyu ve yüzey sıcaklığının değişimi)

Comfort class	Min. Surface Temperature [°C]	PPD Value [%]	Minimum Supplyf Water Temperature [°C]
A	22.13	5.99	23.96
B	21.06	6.99	22
C	21.06	6.99	22

While traditional TABS configurations often necessitate higher supply water temperatures to maintain thermal comfort, the optimised DLTS system in this study achieves thermal comfort at a significantly lower supply water temperature, thereby demonstrating the potential for substantial energy savings in comparison to the findings of earlier research, for example Zaheer-uddin et al. [15].

Figure 9 displays the change of supply water temperature and PPD values according to surface temperature for different comfort classes. As indicated by the figure, since the maximum surface temperature for the C comfort class exceeds 30.1°C, which is the thermal comfort condition for surface temperature based on EN 1264-2 standard [29], the maximum surface temperature will be 29°C for this comfort class. Although the minimum surface temperature is around 17.4°C according to the graph, since this value does not meet the restrictive parameter Ts≥21, the minimum surface temperature is 21.06°C. On the other hand, the minimum supply water temperature is 21.06°C. The maximum supply water temperature is 36.58°C. As per the EN

1264-2 standard, since the maximum surface temperature for wet areas and non-footed edge areas can be 33 and 35°C, respectively, in this case, the maximum supply water temperature can rise to 38.63 ° C (Table-3). Minimum and maximum surface temperatures for comfort class B are 21.06 and 28.02°C, respectively. While the minimum value of the supply water temperature is 22°C, the maximum value is 34.78°C. In comfort class A, the maximum and minimum temperatures of the surface are 22.13°C and 25.07°C, respectively. While the value of the minimum supply water temperature is 23.96°C, the maximum value is 29.36°C.

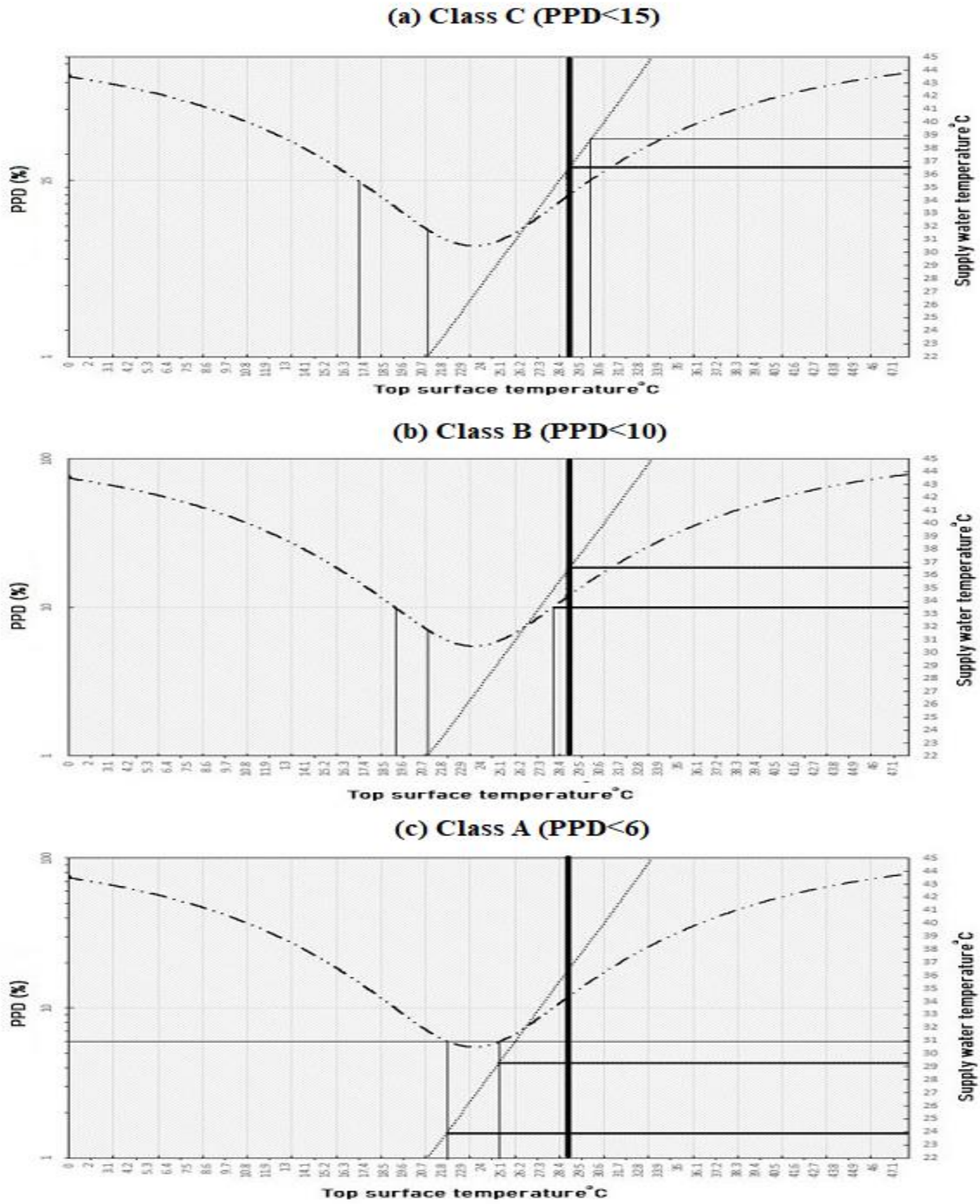


Figure 9. Optimum and limit values for A, B, and C comfort classes (A, B ve C konfor sınıfları için optimum ve sınır değerler)

Table 7 shows the values obtained in heating mode for A, B, and C comfort classes. According to this table, room temperature limit values corresponding to PMV values of A, B, and C classes are given respectively. Minimum and maximum values are 21 and 23°C for comfort class A, 20 and 24°C for comfort class B, and 19 and 25°C for comfort class C. The table also gives the surface temperatures

corresponding to the PMV value for each comfort class and the corresponding supply water temperatures. For the proposed double-layer TABS system, the minimum supply water temperature is 22°C and the maximum supply water temperature is 36.6°C. The optimum supply water temperature for all three classes is 26.66°C and the optimum surface temperature is 23.60°C. In the double-layer TABS system, ideal values for all three classes can be determined according to this table and system design can be made.

Table 7. A, B, and limit values in heating mode in comfort classes C (Konfor sınıfları C'de ısıtma modunda A, B ve sınır değerleri)

	Class A	Class B	Class C
Comfort zone	-0.2 < PMV < 0.2	-0.5 < PMV < 0.5	-0.7 < PMV < 0.7
Indoor room temperature (T_r) Range (ºC)	21 < T_r < 23	20 < T_r < 24	19 < T_r < 25
Top surface temperature (T_s) range (ºC)	22.1 < T_s < 25.1	21.1 < T_s < 28	21.1 < T_s < 29
Supply water temperature (T_{sp}) range (ºC)	24 < T_{sp} < 29.4	22 < T_{sp} < 34.8	22 < T_{sp} < 36.6
Optimum supply water temperature (T_{sp}) (ºC)	26.66	26.66	26.66
Optimum top surface temperature (T_{sp}) (ºC)	23.60	23.60	23.60

Our study aligns with ASHRAE and ISO thermal comfort criteria, similar to prior research by Stoffel et al. [23], but provides improved results with PPD values consistently under 12% for Class C, which is more favorable compared to the typical range found in single-layer TABS studies.

A significant finding of this study is the demonstration of the energy-saving potential of the DLTS system in comparison to traditional single-layer TABS systems. As demonstrated in Table 7, the DLTS system attains optimal thermal comfort under Class A comfort conditions with a supply water temperature of a mere 26.66°C. Conversely, single-layer TABS systems generally necessitate higher supply water temperatures, typically ranging from 30 to 35°C, to attain comparable levels of comfort. This finding indicates that the DLTS system, with its reduced operating temperature, exhibits reduced energy consumption and enhanced system efficiency.

The DLTS system exhibits a double-layer structure that offers distinct advantages over the single-layer system. The former facilitates more even vertical heat distribution and a more uniform surface temperature distribution. This structural feature serves to reduce local overheating or cooling, thereby enabling more efficient heat transfer and more precise control of occupant comfort. Subsequent to analyses conducted with FLUENT/ANSYS, an optimisation study employing the GRG algorithm has evidently demonstrated that DLTS systems have the capacity to meet comfort criteria with minimal thermal input. The findings indicate that DLTS systems are a more efficient and sustainable alternative to single-layer systems in building applications where energy savings and thermal comfort are priorities.

5. CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS (SONUÇLAR VE ÖNERİLER)

The DLTS system presents a promising alternative to traditional heating and cooling systems, offering a solution with lower energy consumption and higher comfort levels. This study introduces an innovative approach by optimizing the Double Layered Thermally Activated Building System (DLTS) for superior thermal comfort and energy efficiency compared to traditional single-layer systems. The supply water temperature optimization process was evaluated in light of the comfort limits set by ASHRAE 55, ISO 7730, and EN1264-2 standards for the DLTS system. The comfort criteria for classes A, B, and C were calculated, and the minimum, maximum, and optimum values for supply water and surface temperatures were determined. The main findings of the study can be summarized as follows:

- **Supply Water Temperatures:** It was observed that the maximum supply water temperature is 36.58°C, and the minimum supply water temperature is 22°C. The maximum surface temperature was found to

be 29°C, while the minimum surface temperature was 21.06°C.

- **Optimum Values:** For all three comfort classes (A, B, and C), the optimum supply water temperature was calculated to be 26.66°C, and the optimum surface temperature was 23.60°C for achieving neutral thermal sensitivity. These values are critical for ensuring the highest level of indoor thermal comfort.
- **PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)**: For class C, the calculated PPD value for the DLTS system was found to be <12.14. This result indicates that the low-temperature system provides a sufficiently high level of comfort and ensures user satisfaction effectively.
- **Optimum Pipe Position:** The optimum positioning of the pipes was determined to be 0.05 meters along the vertical y-axis. This positioning is a crucial design element that enhances both the system's efficiency and comfort.

This study highlights the potential of the Double Layered Thermally Activated Building System (DLTS) to optimize thermal comfort and supply water temperatures, which significantly impacts energy efficiency and user satisfaction in buildings. Moreover, determining the optimum temperature values and pipe positioning are critical factors to consider in the future design of such systems. The optimized supply water temperatures and pipe positioning identified in this research provide valuable guidance for the future implementation of DLTS systems in both new construction and retrofitting projects. By achieving thermal comfort with lower energy consumption, DLTS systems offer a sustainable alternative for reducing buildings' carbon footprints.

Application Areas and Building Utilization

The optimized DLTS design from this study is anticipated to have broad application potential in commercial and residential buildings where energy efficiency and thermal comfort are critical. Integration of DLTS with low-temperature heating systems can make a significant contribution to reducing energy costs, making it an ideal solution for buildings that aim to meet high energy efficiency and green building standards.

Applicability to Existing Buildings

In addition to new construction projects, DLTS systems can also be integrated into existing buildings. Particularly in ground-level or floor zones, implementing these systems can improve indoor comfort levels while also reducing energy consumption. The applicability of DLTS systems to existing buildings presents a valuable opportunity for renovation projects, where the energy efficiency of older buildings can be improved to align with modern buildings.

Suggestions for Future Studies

Future studies could explore the performance of DLTS systems under various climatic conditions and for different types of buildings to expand their applicability. Additionally, integrating DLTS with advanced control algorithms could further improve energy savings and occupant comfort, establishing DLTS as a key component in energy-efficient building designs.

Environmental Impact and Energy Saving Potential

Using optimized water temperatures in DLTS systems has the potential to provide substantial energy savings and reduce the carbon footprint. The widespread adoption of these systems could contribute to environmental sustainability in the building sector. Expanding the use of DLTS systems to achieve energy efficiency would offer economic and environmental benefits and support sustainable building practices.

In conclusion, the DLTS system presents a promising alternative to traditional heating and cooling systems by offering lower energy consumption and higher comfort levels. The study's findings support the applicability of DLTS systems in new construction projects and renovations. By achieving energy savings, DLTS systems provide a sustainable alternative for reducing the carbon footprint of buildings. Future studies exploring the performance of DLTS under various climate conditions would further contribute to expanding DLTS applications across the building sector.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS
(ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The authors of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Oğuzhan ÇALIŞIR: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Kavramsallaştırma, Veri düzenleme, Biçimsel analiz, Araştırma, Metodoloji, Doğrulama, Görselleştirme, Yazma – orjinal taslak, Yazma – inceleme ve düzenleme.

Müjdat ÖZTÜRK: Data curation, Formal analysis, Methodology, Validation, Writing – original draft; Writing – review & editing.

Veri düzenleme, Biçimsel analiz, Metodoloji, Doğrulama, Yazma – orjinal taslak; Yazma – inceleme ve düzenleme.

Gamze GENÇ: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Supervision, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Kavramsallaştırma, Veri düzenleme, Biçimsel analiz, Araştırma, Metodoloji, Denetim, Doğrulama, Görselleştirme, Yazma – orjinal taslak, Yazma – inceleme ve düzenleme.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Yıldız, C. 2024. Binalarda Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 12(1), 176-213.

[2] Dino, İ. G. 2017. Binalarda Güneş Kontrol Yöntemlerinin Optimizasyon Temelli Performans Değerlendirilmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5(3), 71-87.

[3] Gündoğdu, E., Arslan, H. D. 2020. Mimaride Enerji Etkin Cephe Ve Biyomimikri. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 8(4), 922-935.

[4] Kalz, D.E., 2009. Heating and Cooling Concepts Employing Environmental Energy and Thermo-Active Building Systems for Low-Energy Buildings System Analysis and Optimization, Karlsruhe University Faculty of, PhD Thesis, Freiburg, 199 p.

[5] Olesen, B. W., Liedelt, D. 2001. Cooling and heating of buildings by activating their thermal mass with embedded hydronic pipe systems. Proceedings of the ASHRAE-CIBSE, Dublin, Ireland, 3-4.

[6] Olesen, B. W., Dossi, F. C. 2004. Operation and Control of Activated Slab Heating and Cooling Systems. Abstract from Procedings of CIB World Buildings Congress 2004, Toronto, Canada.

[7] Olesen, B.W., Dossi, F.C., 2005. Neue erkenntnisse über regelung und betrieb für die betonkernaktivierung teil 1. HLH, 56 (1): 29-34.

[8] Krarti, M., Ihm, P., 2005. Optimal control strategies for heated radiant floor systems, ASHRAE Transaction, 111(1): 535-546.

[9] Leigh, S.B., 1991. An experimental study of the control of radiant floor heating systems: Proportional flux modulation versus outdoor with indoor temperature offset, ASHRAE Transaction, 97(2): 800-808.

[10] Leigh, S.B., MacCluer, C.R., 1994. A comparative study of proportional flux modulation and various types of temperature modulation approaches for radiant floor heating system control, ASHRAE Transaction, 100(1): 1040-1053.

[11] Simmonds, P., 1994. Control strategies for combined heating and cooling radiant systems, ASHRAE Transaction, 100(1): 1031-1039.

[12] Baumgartner, T., Brühwiler, D., 2003. Tabs für bürohauten, Gebäudetechnik, 3: 24–29.

[13] Nüβle, F., 2004. Randstreifen dynamisieren betonkerntemperierung, HLH, 55 (8): 22-26.

[14] Burkard, T., 2004. Die nutzungsübergabe von systemen zur bauteilaktivierung, HLH, 55 (10): 49-51.

[15] Zaheer-Uddin, M., Zhang, Z.L., Cho, S.H., 2002. Augmented control strategies for radiant floor heating systems, International Journal of Energy Research, 26(1): 79-92.

[16] Athienitis, A.K., Charron, R., 2006. Design and optimization of net zero energy solar homes, ASHRAE Transaction, 112(2): 285-295.

[17] Tödtli, J., Gwerder M., Renggli, F., Gütensperger, W., Lehman, B., Dorer, V., Haas, A., Hildebrandt, K., 2008. Regelung und Steuerung von Thermoaktiven Bauteilsystemen, 15. Schweizerisches Status Seminar Energie und Umweltforschung im Bauwesen, pp 171-179. September 2008, Zurich.

[18] Gwerder, M., Tödtli, J., Lehmann, B., Dorer, V., Güntensperger, W., & Renggli, F., 2009.

Control of thermally activated building systems (TABS) in intermittent operation with pulse width modulation. Applied Energy, 86(9): 1606-1616

[19] Sourbron, M., Helsen, L. 2013. Slow thermally activated building system and fast air handling unit join forces through the use of model based predictive control. In Proceedings of the CLIMA 2013 Congress, Prague, Czech Republic (pp. 16-19).

[20] Schmelas, M., Feldmann, T., Bollin, E. 2014. Adaptive and predictive control of thermally activated building systems. In Proc. ASHRAE/IBPSA-USAInternational Building Performance Simulation Conference (pp. 72-79).

[21] Qu, S., Su, S., Li, H., Hu, W., 2019. Optimized control of the supply water temperature in the thermally activated building system for cold climate in China. Sustainable Cities and Society, 51: 101742.

[22] Michalak, P., 2021. Selected Aspects of Indoor Climate in a Passive Office Building with a Thermally Activated Building System: A Case Study from Poland. Energies, 14(4): 860.

[23] Stoffel, P., Maier, L., Kümpel, A., Schreiber, T., Müller, D., 2023. Evaluation of advanced control strategies for building energy systems. Energy and Buildings, 280: 112709.

[24] Liu, D., Yang, X., Guan, W., Tian, Z., Zong, Y., Tang, R. 2023. Model predictive control for heat flexibility activation of the Thermally Activated Building System. In Building Simulation Conference Proceedings, 18: 3284-3288.

[25] ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 2013.

[26] ISO, ISO 7730-2005, Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. International Standard Organization. Geneva, 2005.

[27] Calisir, O., Ozturk, M., Genc, G., 2021. Investigation Of Thermal Performance Of Double Layered Thermally Activated Building System In Heating Mode. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.

[28] ANSYS "ANSYS FLUENT (V18.2)," Ansys Inc., Canonsburg, PA, 2017.

[29] EN 1264-2: 2008. Water Based Surface Embedded Heating and Cooling Systems – Part 2: Floor heating: Prove methods for the determination of the thermal output of floor heating systems using calculation and test methods.

[30] El Mouatasim, Abdelkrim, 2010. Two-phase generalized reduced gradient method for constrained global optimization. Journal of Applied Mathematics, 2010: 976529.

[31] Hashemi, S.H., Mousavi Dehghani, S.A., Samimi, S.E. et al., 2020. Performance comparison of GRG algorithm with evolutionary algorithms in an aqueous electrolyte system. Modeling Earth Systems and Environment.

[32] Faluyi, F., and C. Arum, 2012. Design optimization of plate girder using generalized reduced gradient and constrained artificial bee colony algorithms. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2(7), 304-312.

[33] Orosa, J.A. and Oliveira, A.C. 2012. Passive methods as a solution for improving indoor environments. 2012: Springer Science & Business Media.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1331-1344 (2025)

Estimating Object Location in RF Communication by Using RSSI Values Through k-NN and Deep Learning Techniques

Nihat DALDAL[1*], Mohammed ZAIB[1]

[1]*Bolu Abant İzzet Baysal University, Department of Electrical and Electronics Engineering, BOLU, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 24/05/2025
Revision: 23/07/2025
Accepted: 14/08/2025

Keywords

RSSI
RF Positioning
Object localization
Indoor localiziation
Outdoor localiziation
Wireless sensor networks

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru:24/05/2025
Düzeltme: 23/07/2025
Kabul: 14/08/2025

Anahtar Kelimeler

RSSI
RF konumlama
Nesne konumlandırma
kapalı alan konumlandırma
açık alan konumlandırma
kablosuz sensor ağları

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study investigates RF-based object localization using RSSI values with k-NN and deep learning. Indoor results show limited accuracy, while Neural Net Fitting achieves 94.05% outdoors, outperforming Machine Learning. Findings highlight challenges indoors and demonstrate NNF's effectiveness for reliable RF positioning in open-air environments. /Bu çalışma, k-NN ve derin öğrenme yöntemleri kullanarak RSSI değerleri ile RF tabanlı nesne konumlandırmayı araştırmaktadır. Kapalı alan sonuçları sınırlı doğruluk gösterirken, Neural Net Fitting açık alanda %94,05 doğruluk elde ederek Makine Öğrenmesini geride bırakmaktadır. Bulgular, kapalı alanlardaki zorlukları ortaya koymakta ve NNF'nin açık alan ortamlarında güvenilir RF konumlandırma için etkinliğini göstermektedir.

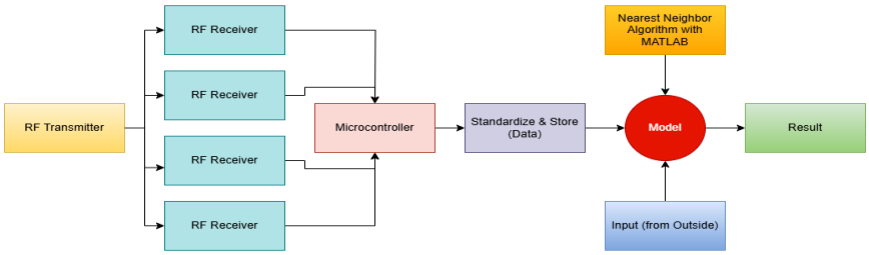


Figure A: *System block diyagram /* ***Şekil A:*** *Sistem blok diyagramı*

Highlights (Önemli noktalar)

- *In indoor environments, RSSI-based methods show low performance, with ANN achieving only 12%. / Kapalı alanlarda, RSSI tabanlı yöntemler düşük performans göstermekte, YSA ise yalnızca %12 başarı sağlamaktadır.*
- *In outdoor environments, Neural Net Fitting (NNF) achieved the best performance with 94.05% accuracy. /Açık alanlarda, Neural Net Fitting (NNF) %94,05 doğruluk ile en iyi performansı elde etmiştir.*
- *Results reveal that NNF provides a reliable and effective solution for RF-based localization in open areas. / Sonuçlar, NNF'nin açık alanlarda RF tabanlı konumlama için güvenilir ve etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.*

Aim (Amaç): *This study aims to evaluate the effectiveness of RSSI-based methods, including k-NN and deep learning, for accurate object localization in indoor and outdoor environments. / Bu çalışma, k-NN ve derin öğrenme dahil olmak üzere RSSI tabanlı yöntemlerin, kapalı ve açık alanlarda nesnelerin doğru konumlandırılması için etkinliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.*

Originality (Özgünlük): *This study uniquely compares k-NN, ANN, and Neural Net Fitting models for RSSI-based localization, highlighting their distinct performance differences in indoor and outdoor environments. / Bu çalışma, RSSI tabanlı konumlama için k-NN, YSA ve Neural Net Fitting modellerini özgün bir şekilde karşılaştırmakta ve bunların kapalı ve açık alanlardaki farklı performanslarını ortaya koymaktadır.*

Results (Bulgular): *The findings show that while indoor localization achieved limited accuracy (ANN 12%, MAE 66%), Neural Net Fitting reached 94.05% in outdoor environments, outperforming Machine Learning (74.4%).*

Conclusion (Sonuç): *Localization using RSSI signals becomes challenging indoors but provides superior accuracy in open areas. It serves as an alternative to GPS-based positioning./ RSS sinyalleri ile konum belirleme kapalı alanlarda zorlaşırken açık alanlarda üstün doğruluk sağlamaktadır. GPS konum belirlemeye göre bir alternatiftir*

*Corresponding author, e-mail: nihatdaldal@ibu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1705341

GU J Sci, Part C, 13(3): 1331-1344 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Estimating Object Location in RF Communication by Using RSSI Values Through k-NN and Deep Learning Techniques

Nihat DALDAL[1*], Mohammed ZAIB[1]

[1]*Bolu Abant İzzet Baysal University, Department of Electrical and Electronics Engineering, BOLU, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 24/05/2025
Revision: 23/07/2025
Accepted: 14/08/2025

Keywords

RSSI
RF Positioning
Object localization
Indoor localiziation
Outdoor localiziation
Wireless sensor networks

Abstract

GPS-based positioning faces significant challenges in accuracy and reliability, especially due to environmental factors such as signal interruptions, multi-path propagation, and poor satellite visibility. This study explores using RF signal strength, or Received Signal Strength Indicator (RSSI) to estimate object positions, comparing different algorithms in indoor and open-air environments. For indoor localization, the Mean Absolute Error (MAE) algorithm achieved a limited 66% success rate, primarily due to RSSI fluctuations caused by signal reflections from obstacles. Similarly, when an Artificial Neural Network (ANN) is modeled for the indoor area, an efficiency rate of 12% is obtained. In open-air settings, Neural Net Fitting (NNF) outperformed Machine Learning (ML). NNF demonstrated high accuracy of approximately 94.05%, indicating effective learning and minimal overfitting. The ML model achieved 74.4% accuracy, showing less stability and overall accuracy compared to NNF. Results suggest NNF is more effective for RF-based localization, particularly in open-air environments where signal propagation is less complex.

RF Haberleşmesinde RSSI Değerleri Kullanılarak k-NN ve Derin Öğrenme Yöntemleri ile Nesne Konumunun Tahmin Edilmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru:24/05/2025
Düzeltme: 23/07/2025
Kabul: 14/08/2025

Anahtar Kelimeler

RSSI
RF konumlama
Nesne konumlandırma
kapalı alan konumlandırma
açık alan konumlandırma
kablosuz sensor ağları

Öz

GPS tabanlı konumlandırma, özellikle sinyal kesintileri, çoklu yol (multi-path) yayılımı ve zayıf uydu görünürlüğü gibi çevresel faktörler nedeniyle doğruluk ve güvenilirlik açısından önemli zorluklarla karşı karşıyadır. Bu çalışma, nesne konumlarını tahmin etmek için RF sinyal gücünü (yani Received Signal Strength Indicator (RSSI)) kullanmayı araştırmakta ve farklı algoritmaları kapalı alan ve açık hava ortamlarında karşılaştırmaktadır. Kapalı alan konumlandırmasında, Ortalama Mutlak Hata (MAE) algoritması, sinyallerin engellerden yansıması nedeniyle oluşan RSSI dalgalanmalarından ötürü %66 ile sınırlı bir başarı oranına ulaşmıştır. Aynı şekilde kapalı alan için Yapay Sinir Ağı (YSA) modellendiğinde verimlilik oranı %12 olarak elde edilmektedir. Açık hava ortamlarında ise Sinir Ağı Uydurması (NNF), Makine Öğrenimi'ne (ML) kıyasla daha iyi performans göstermiştir. NNF yaklaşık %94,05 gibi yüksek bir doğruluk oranı ile etkili öğrenme gerçekleştirmiş ve aşırı öğrenme (overfitting) göstermemiştir. ML modeli ise %74,4 doğruluk oranına ulaşarak NNF'ye kıyasla daha düşük kararlılık ve genel doğruluk sergilemiştir. Sonuçlar, sinyal yayılımının daha az karmaşık olduğu açık hava ortamlarında RF tabanlı konumlandırma için NNF'nin daha etkili olduğunu göstermektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

RF (Radio Frequency) modules are devices used to transmit and/or receive radio signals. They are generally used to provide a mode of communication through two or more devices [1]. A typical RF system consists of a transmitter and a receiver. The transmitter sends a radio signal through space, and a receiver receives that signal [2]. However, that signal doesn't reach the receiver with the same

*Corresponding author, e-mail: nihatdaldal@ibu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1705341

power because it can get weak because of various factors like the distance between the transmitter and the receiver and the signal's frequency [3], [4].

RSSI (Received Signal Strength Indicator/Indicating) measures the power of the received signal [5]. In some RF modules, the weakness ratio of the signal through the RSSI pin can be seen. The RSSI pin has a voltage on it, which, on measuring, can be used to determine the power of the receiving signal [6]. If the voltage level of the RSSI pin is less than the normal value, it means the signal is not as strong as the transmitted signal. The voltage value of the signal can be changed to dBm (ratio between decibel value of the signal and 1 mV) to standardize the values.

In this modern world, every object's location can be detected through GPS (Global Positioning System). But the main disadvantage is that it can be very inaccurate and can misguide at several points, especially at indoor locations, due to signal interruptions, multipath propagation, and poor satellite visibility. To overcome this problem, in this study, the RSSI value feature of RF modules is used to determine the position of an object in an indoor and small space by transmitting a signal from the transmitter to the receiver and indicating the coordinates of the object by reading RSSI values.

2. LITERATURE REVIEW (LİTERATUR ARAŞTIRMASI)

There are several studies done on related topics. On reviewing them,

Du et al. have researched detecting the position of an object by using 16 L-shaped antennas, a 2 MHz RF signal receiver, and a non-parallel wave depth estimator (to infer the signal source's depth information by learning the sequence in the difference of phase). The method used there is detecting and measuring the Angle of Arrival (AoA) of the incoming signal by utilizing a custom Phase Difference Matching (PDM) algorithm. As a result, the system works with a median AoA error of 1.88 degrees vertically and 2.88 degrees horizontally, and the error determined in average depth estimation is 1.07m. [7]

Kleniatis et al. proposed a study on device-free localization (DFL) of a stationary human by using a few RFID antennas and large numbers of RFID tags. The authors reviewed two methods for this purpose, one of which employs group sparsity and RF propagation, and another one takes phase and rate fluctuations in visual notices them and uses them in the DFL Localization. [8]

Teeda et al. did research by using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and ground Radio Frequency (RF) emitters. The main purpose of the project was to study the system performance for finding the point of RF emitters through measuring their Received Signal Strength Indicator (RSSI) values, which are derived from measuring signals done through UAVs. 2.4 GHz and 865 MHz, two unlicensed frequency bands, were used with interference to them, respectively. After conducting these experiments in rural areas, the results show that, with interference, the mean absolute localization error is 5 meters, while it is 4 meters without interference. [9]

Peled-Eitan et al. did research on the localization of a handset user by detecting their RF transmitted signals and measuring their RSSI values. Two types of algorithms, weighted mean and Extended Kalman Filter (EKF), are used. Unattended static and moving transceiver nodes were used to simulate the environment. Several maneuvers were simulated to test and check both algorithms in different-shaped simulated urban environments. Results show that the EKF algorithm has the lowest position estimation error. [10]

Chen et al. proposed a study on using an RL2 robotic system to detect the position of an object by using UHF Radio-Frequency Identification (RFID) tags. The robot has mounted reader antennas for accurate and speedy localization through a reinforcement-learning-based RL (Reinforcement Learning) trajectory optimization network. By evaluating the results, it is noticed that the median 3D localization accuracy is 0.55 m, and its speed of finding different RFID tags is 2.13x faster than the baseline. [11]

3. METHODOLOGY (YÖNTEMLER)

In this study, two datasets have been used to determine the position of the object, one for indoor

localization, which has walls on the sides (which causes noise in the values), and another one in open air. All of these measurements and calculations have been done in the light of the Friis transmission equation (Equation 1). The Friis transmission equation is a fundamental formula used in telecommunications engineering to calculate the power received by one antenna when another antenna transmits a known amount of power at a certain distance under ideal conditions (free space propagation).

$$P_r = P_t . G_t . G_r . (\frac{\lambda}{4\pi d})^2 \quad (1)$$

Where P_r is the power received by the receiving antenna (in Watts), P_t is the power transmitted by the transmitting antenna (in Watts), G_t is the gain of the transmitting antenna (dimensionless, often expressed in dBi), G_r is the gain of the receiving antenna (dimensionless, often expressed in dBi), λ is the wavelength of the transmitted signal (in meters), and d is the distance between the transmitting and receiving antennas (in meters). The result values, from the Friis transmission equation, have then been changed into dBm values with the following formula (Equation 2):

$$dBm = 20 \log (\frac{received\ signal\ voltage\ (V)}{1\ mV}) \quad (2)$$

Details for both datasets and different models are as follows:

3.1. Data Collection System (Veri Toplama Sistemi)

RSSI measurement can be done with different methods. One of these methods is connecting a voltmeter to the RSSI output pin of the receiver RF module, and the voltage is noted. Another method is to use a microcontroller in place of a voltmeter, which is programmed to read the RSSI value from the RF modules and pass it to the computer. In this study, units with integrated RF modules, positioned at the corners, measure Received Signal Strength Indication (RSSI) values via the microcontroller's analog port and wirelessly transmit these readings, along with unit identification, to a central data acquisition unit (as depicted in Figure 1). The central data acquisition unit receives the RSSI values from the corner-mounted units (as shown in Figure 2) via the RF module and transmits them to a computer.

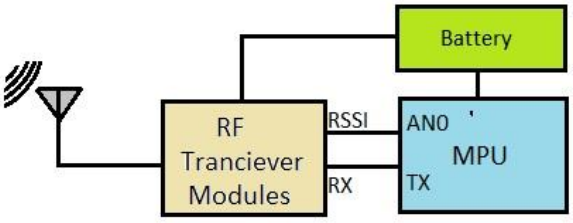


Figure 1. RSSI Measurement System placed in the corners (Köşelere yerleştirilen RSSI Ölçüm Sistemi)

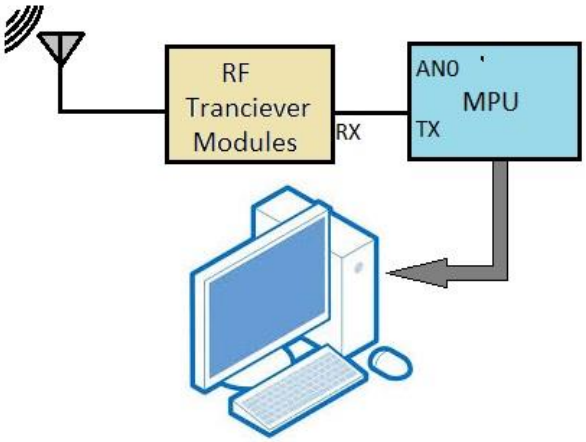


Figure 2. RSSI value data collection system (RSSI sinyali veri toplama sistemi)

4. INDOOR LOCALIZATION (KAPALI ALAN KONUMLAMA)

In this part of the study, there are several steps, like collecting values from the indoor measurement area, processing the values, using the MATLAB Algorithm for Mean Absolute Error (MAE) ((nearest neighbor in simple words) (should not be confused with k-NN Algorithm)) model, and then analyzing the results. The block diagram for the study is shown in Figure 3.

All the steps are described below with details.

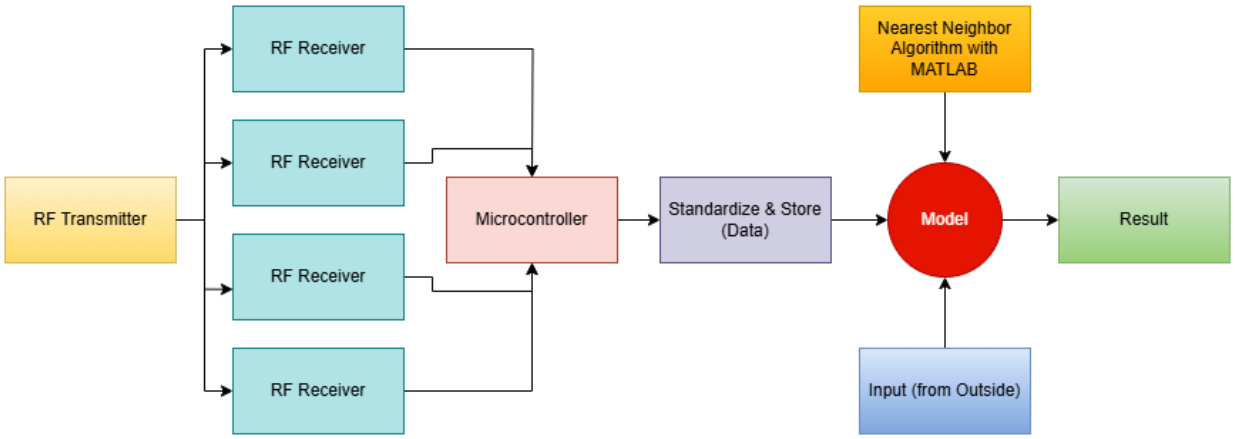
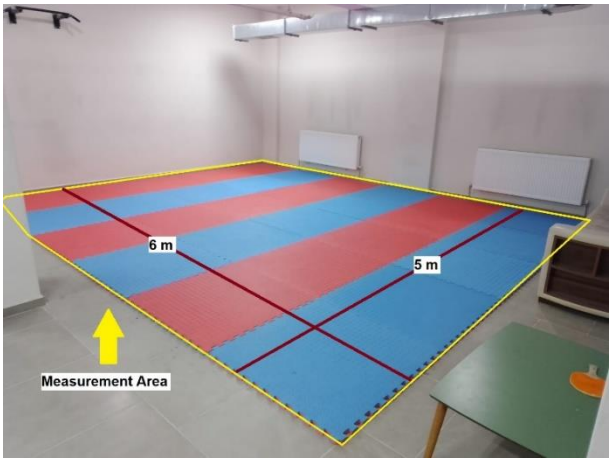


Figure 3. Block diagram for ındoor localization (Kapalı alan konumlama blok diyagramı)

4.1. Indoor Collecting the data (Kapalı Alanda Veri Toplama)

The dataset for this part of the study was collected from a 5x6 meter area, which is an indoor area with walls on every side, as shown in Figure 4a. Four RF receivers have been placed in every corner of the area to receive the signal from the RF transmitter, which is mobile in the area of measurement, wandering from point to point, as shown in 4b. A microcontroller is used to calculate the RSSI values of the received signals from RF receivers and save them. The resultant matrix is 25x4, with 25 values from all four corners.



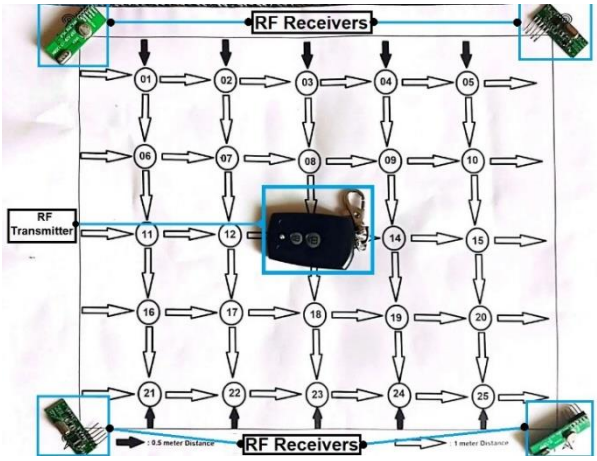


Figure 4. a. Measurement Area b. Layout for Indoor Localization with 4 Receivers and 1 Transmitter

(a.Ölçüm alanı b. Kapalı alanda 4 alıcı 1 verici ile yerleşim modüllerin düzeni)

Table 1 shows the values (in dBm) taken from the first five points for all four receivers. These first five points are selected as an example to show how non-linearly RSSI values fluctuate while measuring indoors due to the noise and reflection of RF signals.

Table 1. First 5 points (dBm) (İlk 5 nokta değerleri)

Point No.	1st Receiver	2nd Receiver	3rd Receiver	4th Receiver
01	65.1295	61.8684	64.0814	61.6915
02	64.4803	64.0005	63.9731	62.7344
03	65.3434	63.7504	63.8902	64.2968
04	64.5577	62.8290	63.2870	64.1095
05	63.6082	63.9179	63.8066	64.8359

4.2. Indoor Position Estimation (Kapalı Alanda Konum Tahmini)

In this study, two algorithms are used to determine the position of an object transmitting RF signals on a specific layout and then compared. One of these algorithms is Mean Absolute Error (MAE), which is also known as k-NN. The other one is Artificial Neural Network (ANN). The details of these algorithms and the results are as below:

4.3 MAE Algorithm (MAE Algoritması)

In this part of the study, the Mean Absolute Error (MAE) algorithm is used. The reason for using this algorithm is that it uses a simple algorithm of subtraction, while no model needs to be trained. From the dataset, a 25x4 matrix is used as the main matrix. A MATLAB code is written in which fresh readings from all four receivers are taken as input as a 1x4 matrix and compared with the main matrix, all rows, one-by-one, to find the nearest match. Code finds the difference between every element from the same column, and it applies to all rows, with the column remaining constant. The output is the row with the least element-wise average difference, and that row number is the point number of that object in the layout, as shown in .. The block diagram of Nearest Neighbor (or MAE) is shown in Figure .

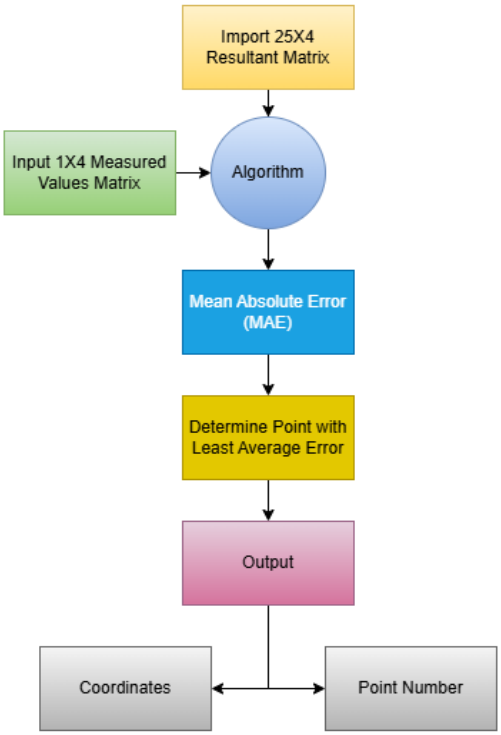


Figure 5. MAE algorithm block diagram (MAE algoritma blok diyagramı)

For testing the algorithm, two more values were taken from these same points to compare it with the main matrix. As a result, 33 out of 50 checks gave an accurate result.

Success rate % = (33 / 50) * 100 = 66%

So, the success rate of the model is 66%. This performance is not very good for a localization system. The reason for this performance is that RSSI values, taken from different points, do not change with sequence but randomly because of reflecting RF signals from obstacles, which act as noise for the system.

4.4 Artificial Neural Network (ANN) Algorithm (Yapay Sinir Ağı (YSA) Algoritması)

In this part of the study, the Artificial Neural Network (ANN) algorithm is used. From the dataset, a 25x4 matrix is used as the main matrix, same as MAE. A MATLAB application, Neural Net Fitting, is used to determine the relation between inputs and outputs. The 25x4 matrix, which has RSSI values taken from all points for all four receivers, has been taken as predictors, and a 25x1 matrix, with position values, has been taken as responses. The data splits as 70% for training and 15% for validation, while the remaining 15% is used to test the algorithm. 10 neural layers are used, which are hidden inside the neural network. The neural network is trained by the Scaled Conjugate Gradient algorithm, which is a memory-efficient algorithm with respect to Bayesian Regularization and Levenberg-Marquardt. The result of the training of the neural network is given in

Table 2.

Table 2. Artificial neural network (ANN) algorithm

	Observations	**MSE**	**R**
Training	17	26.6850	0.6843
Validation	4	31.1991	0.9441
Test	4	101.5748	-0.4053

	Observations	**MSE**	**R**
Training	17	26.6850	0.6843
Validation	4	31.1991	0.9441
Test	4	101.5748	-0.4053

(Yapay sinir ağı (YAS) algoritması)

For a better result, the Mean Squared Error (MSE) should be near 0, and the square of R (R^2) should be near or equal to 1. As shown in

Table 2, R^2 is smaller than 1 (even negative in the test), and MSE is much larger than 0, which is not a good and efficient result, and it means that the model is not trained very well and performs badly. More detail about the neural training is mentioned in Table 3.

Table 3. Training details for neural network
(Sinir ağı için eğitim detayları)

Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value
Epoch	0	8	1000
Elapsed Time	-	00:00:00	-
Performance	196	12.1	0
Gradient	7.35E+05	2.3	0
Mu	679	21.7	1.00E-06
Validation Checks	0	6	6

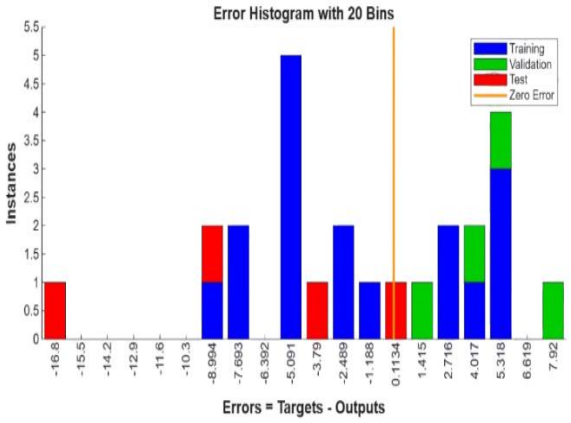


Figure 6. Error histogram for artificial neural network (Yapay sinir ağı için hata histogramı)

6 shows an error histogram for an Artificial Neural Network, showing the distribution of "Errors = Targets - Outputs" across 20 bins.

Blue bars represent training errors, green are validation errors, and red are test errors. The orange line marks zero error. The plot helps assess model performance by showing how frequently different error magnitudes occur for each data subset.

The histogram shows a high frequency of errors clustered around zero, with the highest bar being 5 instances, but not on the 0-error line. The Errors axis spreads from -16.8 to 7.92. It means that the model is not trained very well, and the result is not accurate accordingly.

	Observations	MSE	R
Training	17	26.6850	0.6843
Validation	4	31.1991	0.9441
Test	4	101.5748	-0.4053

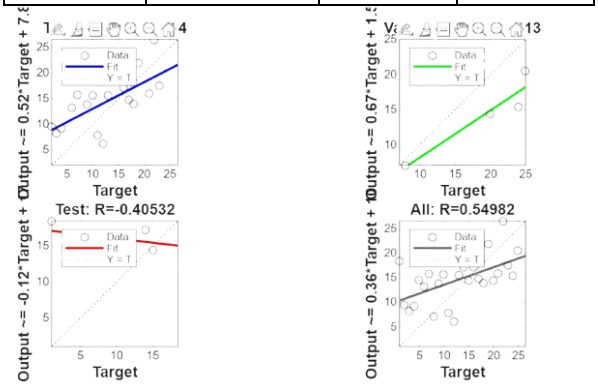


Figure 7. Regression graph (Regresyon grafiği)

Figure is a regression graph. Here, it can be seen that the target curve is not aligned with the result curve very well, but is scattered for all the data types (training, validation, and test).

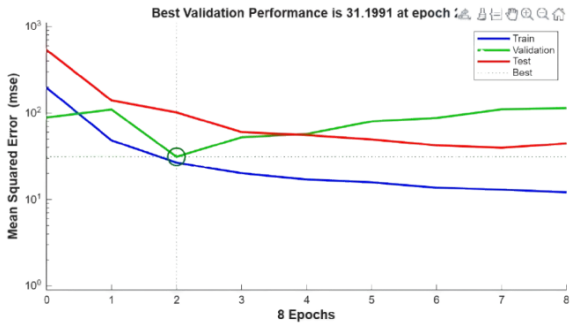


Figure 8. Performance plot (Performans grafiği)

In Figure 8, the Performance Plot, it can be seen that epoch 2 has the best performance, with Mean Square Error (MSE) rate is 31.1991.

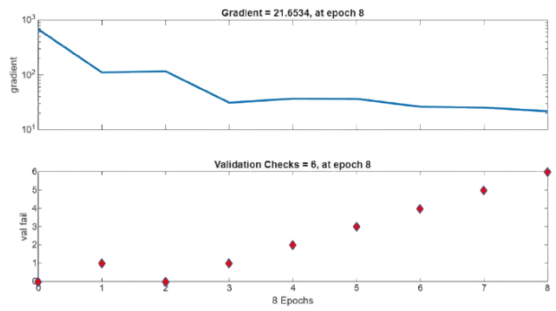


Figure9. Gradient and validation check plot
(Gradyan ve doğrulama kontrol grafiği)

Figure shows the gradient and validation check plots for 8 epochs, where the gradient is 21.6534 and the validation check is 6. In summary, the results presented in these figures indicate a bad performing predictive model with low accuracy, weak generalization, and unstable convergence during training.

According to the histogram, when a threshold of ±1 is given and the instances are counted that fall in the correct result category, it can be observed that the bins from approximately -1.188 to +1.415 fall within this range. 3 out of 25 instances are giving a more approximate result. After calculating with the following formula:

Success Rate % = (3 / 25) * 100 ≈ 12%

The success rate for the model of Artificial Neural Network (ANN) is approximately 12%.

5. OUTDOOR LOCALIZATION (AÇIK ALAN KONUMANDIRMA)

This part of the study consists of several steps, like collecting values from the open-air measurement area, processing the noted values, preparing Machine Learning (ML) and Neural Net Fitting (NNF) (in MATLAB) models, and then testing the results. The block diagram for the study is as shown in

Figure .

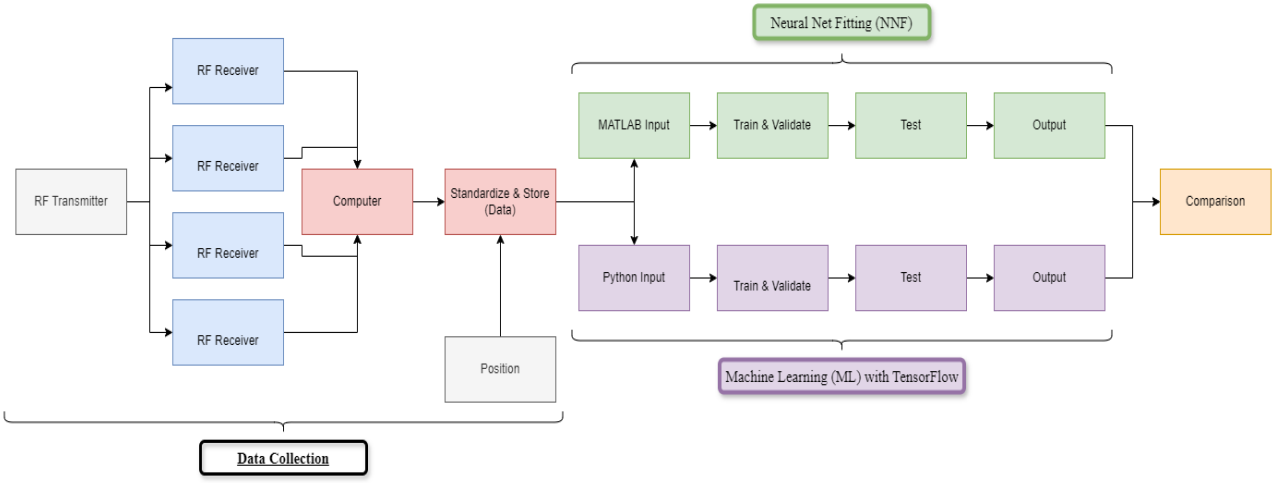
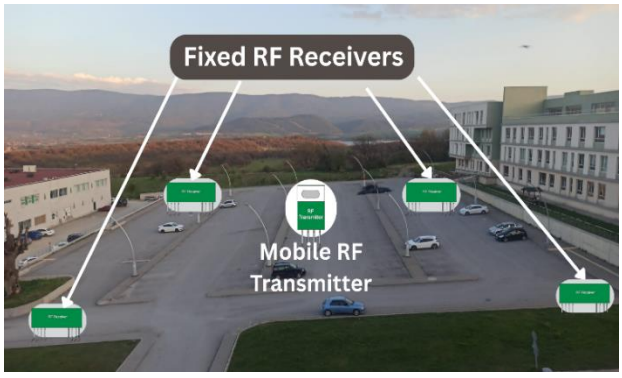


Figure 10. Block diagram for open-air localization (Açık alan veri toplama sistemi blok diyagramı)

5.1. Outdoor Collecting the Data (Açık Alanda veri Toplama)

The data, which is used in the study, is collected for an open-air parking lot, and the dimensions for the measurement area are 50x50 meters. Figure shows the parking lot, which has been taken as a reference. Regarding that area, a MATLAB program is written, which gives the dBm results of every point on that 50x50 m area with 2-meter distances



between every point in both directions, respectively. Figure 1 and Figure 2**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** show the RSSI Measurement System (placed in the corners) and RSSI value data collection system, respectively. That MATLAB program has been written in light of the Friis transmission equation, and a small amount of noise has been added to simulate the real working of algorithms.

Figure 11. Test area for outdoor measurement (Açık alan ölçüm test alanı)

As a layout, each corner of all four corners has an RF receiver that receives the RF signal, which is transmitted by an RF transmitter on the measurement point [12]. The area consists of 672 points (due to a distance of 2 meters between every point). Figure shows the measurement area layout and the places where the RF transmitters and receivers are located in that layout as a sample.

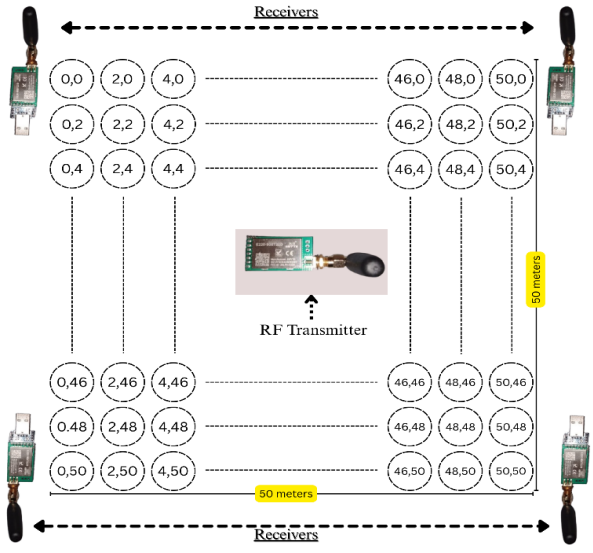


Figure 12. Layout for open-air localization with 4 receivers and 1 transmitter (4 alıcı ve 1 verici ile açık alan konumlandırma düzeni)

The RF transmitter, present on the spot (measurement point), transmits an RF signal, which is received by all four receivers that are present on the corners with coordinates of (0,0), (50,0), (0,50), and (50,50) with a voltage value, and then this received signal voltage value (rV) is changed into dBm to standardize it with the following formula:

$$\text{dBm} = 20\ log(\frac{received\ signal\ voltage\ (rV)}{1\ mV})$$

After standardization, the received values (in dBm) are stored in an Excel sheet to use for further steps and processes in different models. [13]

5.1. Models and Applications (Model ve Uygulamalar)

In this study, two models are used to determine the position of an object transmitting RF signals on a specific layout and then compared. One of these models is Neural Net Fitting, which is a toolbox in MATLAB [14]. The other one is Machine Learning, by TensorFlow (a library in Python) [15]. Both models find a relation between inputs and outputs and train their algorithms by neural networks [16]. The reason these models are used is to study the behavior of different neural networks with different types of RSSI values. Also, these models perform very well with nearly linear values, unlike in an indoor scenario, where values have quite a nonlinear difference. The details of these models and the results are as below:

5.2. Neural Net Fitting Algorithm (NNF) (NNF Algoritması)

The retrieved values, stored in an Excel sheet, were imported into MATLAB as an input matrix with 4 columns of data for every row out of all 672 rows and became a 672x4 matrix. An output matrix with 1-to-672 numbers and a 672x1 dimension was formed to relate it to the input matrix. The input matrix has a nearly non-linear difference between different points. These 672x4 input and 672x1 output matrices make a dataset.

To model the dataset's complicated, nonlinear interactions, neural network regression was used. Specifically, the MATLAB Neural Net Fitting App (launched with the nftool command or through the Machine Learning and Deep Learning toolboxes) was used to provide an interactive environment for training and testing shallow, two-layer feedforward neural networks. This method aided in the creation of a prediction model capable of capturing complex patterns and producing reliable estimates.

The 672x4 matrix, which has RSSI values taken from all points for all four receivers, has been taken as predictors, and a 672x1 matrix, with position values, has been taken as responses. The data splits as 70% for training and 15% for validation, while the remaining 15% is used to test the algorithm. 10 hidden neural layers are used. The neural network is trained by the Levenberg-Marquardt algorithm, which is a fast algorithm with respect to Bayesian

Regularization and Scaled Conjugate Gradient. The result of the training of the neural network is given in Table 4

Table 4. Results of neural network training (Sinir ağı eğitim sonuçları)

	Observations	MSE	R
Training	470	0.0126	1.0000
Validation	101	0.0282	1.0000
Test	101	0.0321	1.0000

That's why R being equal to 1 indicates good training of the model. More detail about the neural training is mentioned in Table 5.

Table 5. Details for neural training (Ağ eğitim detayları)

Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value
Epoch	0	194	1000
Elapsed Time	-	00:00:01	-
Performance	1.92E+05	0.0123	0
Gradient	7.35E+05	2.3	1.00E-07
Mu	0.001	0.01	1.00E+10
Validation Checks	0	6	6

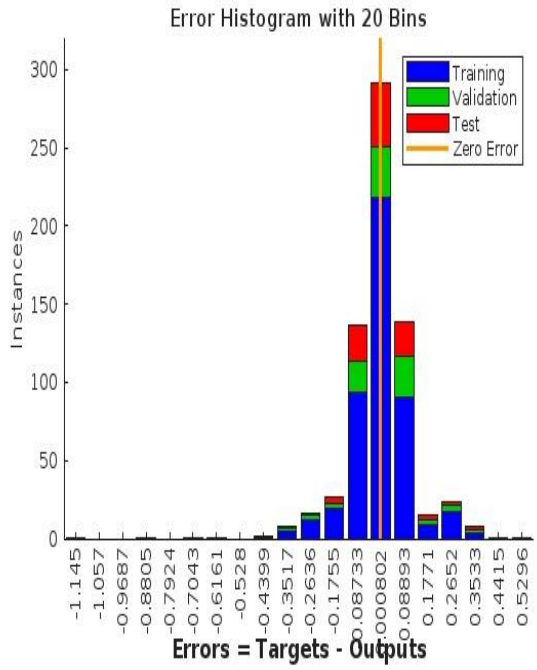


Figure 13. Error histogram (Hata diyagramı)

For a better result, the Mean Squared Error (MSE) should be near 0, and the square of R (R^2) should be near or equal to 1. As shown in Table 4, R^2 is 1 and MSE is close to 0, which is a great result, and it means that the model is trained very well. R being equal to 1 may be seen as an indicator of overfitting, but in some scenarios where data has a very linear approach, R values can be exactly 1. In this study, the values have a linear approach, as it is a simulated model with noise.

Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı. presents the distribution of prediction errors. The histogram shows a high frequency of errors clustered around zero, with the highest bar exceeding 270 instances, indicating that the model frequently makes very accurate predictions. However, the distribution also exhibits a spread, with errors ranging from approximately -0.3 to 0.35, suggesting that while the model is generally accurate, there are instances of larger prediction errors. Overall, the concentration of errors near zero is a positive sign, indicative of good model performance.

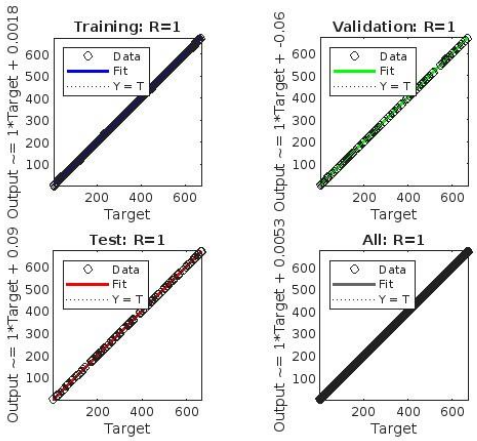


Figure 5. (a-d), "Training, test, validation,all R=1" ,(Eğitim, test, doğrulama ve bütün teslerde R=1)

Figure **5** illustrates the relationship between the model's output and the target values across different datasets. In each plot, the data points align closely with the line "Y=T," representing perfect prediction, and are well-fitted by a linear regression line. The equations provided within each plot, slopes are very close to 1 (approximately 1), and small intercepts (ranging from -0.06 to 0.09) demonstrate a strong linear correlation and minimal bias. This strong alignment suggests excellent predictive capability

across training, test, and validation sets, indicating that the model generalizes well.

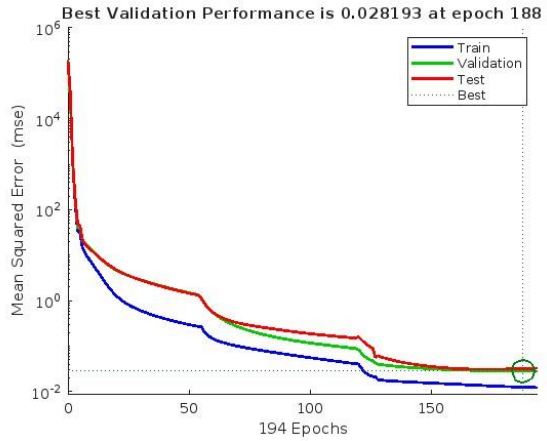


Figure 6. MSE value (MSE değeri)

Figure 65 displays the mean squared error (MSE) for the training, validation, and test sets as a function of training epochs. The MSE decreases rapidly in the early epochs and stabilizes at a low value, with the best validation performance recorded as 0.028193 at epoch 188. The convergence of the MSE to a low plateau is a favorable outcome, demonstrating effective learning and a stable model.

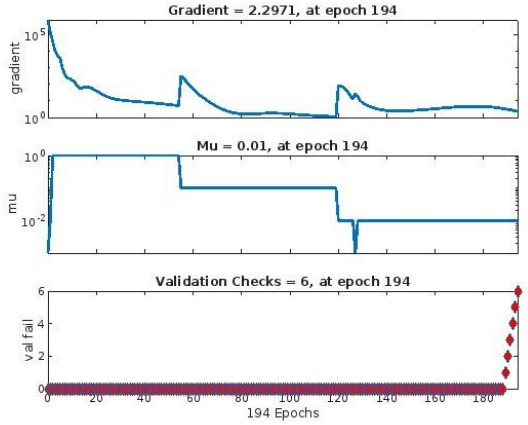


Figure 7. Validation (Doğrulama)

Figure 7 provides details on validation metrics at the optimal epoch (194). The gradient is 2.2971, mu is 0.01, and the validation checks reached 6. These values offer insight into the training process; a stable gradient and mu, along with the validation checks, suggest that the training process converged appropriately and the model's performance is reliable.

In summary, the results presented in these figures indicate a well-performing predictive model with high accuracy, strong generalization, and stable convergence during training.

According to the histogram, when a threshold of ±1 is given and the instances are counted that fall in the correct result category, it can be observed that the bins from approximately -0.17 to +0.17 fall within this range. 632 out of 672 instances are giving a more approximate result. After calculating with the following formula:

Success Rate % = (632 / 672) * 100 ≈ 94.05%

The success rate for the model of Neural Net Fitting (NNF) is approximately 94.05%.

5.3. Machine Learning Algorithm (ML) (Makine Öğrenmesi Algoritması)

In this study, as an input, a 672x4 matrix, and as an output, a 672x1 matrix are taken as the dataset, similar to the Neural Network Model. This dataset is used to train a Machine Learning (ML) model, implemented using the TensorFlow Python library. The model aims to learn a functional relationship between the four input features and the single output variable. The structure of the input and output matrices represents a dataset where each of the 672 samples is characterized by four distinct features and a corresponding target value. Utilizing TensorFlow's capabilities, a customized model was constructed to capture the underlying patterns and dependencies within this data. The objective is to develop a predictive model capable of accurately estimating the output for new, unseen input data. This process, facilitated by TensorFlow's robust computational graph and automatic differentiation features, allows for the efficient training and optimization of the model.

For training the model, various numbers of epochs were used to find the behavior of the algorithm for the training of the model. First of all, 100 epochs were used to train the model. When the result was not satisfactory, the number of epochs was increased to analyze the behavior of the algorithm. 200, 500, 1000, and 2000 epochs were applied. The minimum values of loss, Mean Absolute Error (MAE), validation loss, and validation Mean Absolute Error (MAE) are as shown in Table 6 for all epoch numbers.

Table 6. Model properties for different epochs (Farklı denemelerde model özellikleri)

By analyzing data from Table 6, we understand that the training of the model demonstrates a clear inverse relationship between epochs and both loss and mean absolute error on the training set, indicating a progressive enhancement in the model's capacity to fit the training data. Concurrently, the validation metrics also exhibit a general trend of decline; however, the presence of fluctuations suggests a degree of instability in the model's generalization across unseen data. These observations imply that while the model is learning, scrutiny of the validation set is warranted to ascertain the consistency of its performance.

When the algorithm runs with 2000 epochs, for every epoch, the graphic data is as in the following figures (Figure 8 and Figure 9):

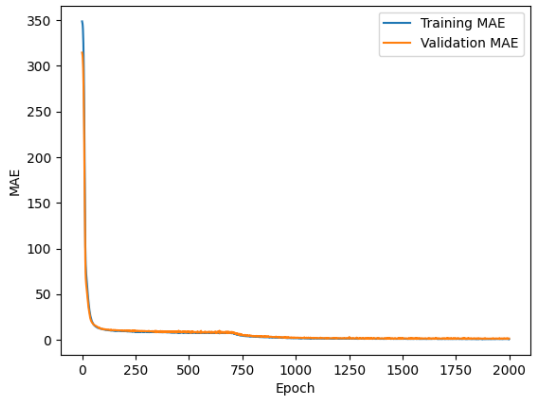


Figure 8. Mean absolute error (MAE) (Ortalama .)

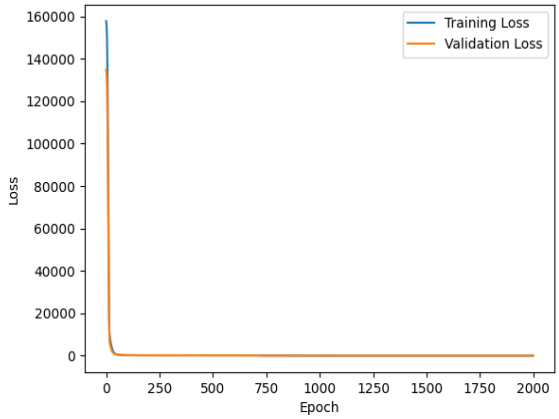


Figure 98. Loss/mean squared error (MSE) (MSE hatası)

In Figure 8 and Figure 9, it can be seen that, when the model training is started, in the beginning, Mean Absolute Error (MAE) gradually decreases and nearly comes to zero at 2000 epochs. For loss, it suddenly drops down to near zero in some initial epochs, and continues its journey, nearing zero. It is valid for both training and validation data. From this, we understand that, number of epochs should be high in number, but it should be limited to avoid overfitting.

For testing the accuracy of the model, the input matrix is used as test data. After analyzing the result, 500 out of 672 points were located correctly with a threshold of ±1. The success rate for the model:

Success Rate % = (500 / 672) * 100 ≈ 74.4%

So, the success rate for Machine Learning (ML) is approximately 74.4%.

6. RESULT AND DISCUSSION (SONUÇ VE TARTIŞMA)

Epochs	Loss	MAE	Validation Loss	Validation MAE
100	244.8224	12.2683	240.5026	11.7979
200	148.1362	9.5236	185.2436	10.0742
500	103.1991	7.0606	148.9660	9.1403
1000	6.8923	1.9481	11.4637	2.3249
2000	1.4637	0.9244	4.8948	1.4838

This study investigated the effectiveness of different approaches for estimating object positions using RF signal strength (RSSI) in both indoor and open-air environments. For indoor localization, the Mean Absolute Error (MAE) algorithm demonstrated a limited success rate of 66%. While the Artificial Neural Network (ANN) algorithm demonstrates a much smaller success rate of as small as 12%. This outcome reveals the challenges of indoor RF-based localization, primarily due to RSSI fluctuations caused by signal reflections from obstacles like walls, which introduce significant noise and unpredictability into the measurements. This suggests that the MAE and ANN algorithms are not robust enough to handle the complexities of indoor RF signal propagation.

In contrast, for open-air localization, the Neural Net Fitting (NNF) model significantly outperformed the

Machine Learning (ML) model. The NNF model achieved a high success rate of approximately 94.05%, supported by strong performance metrics: low Mean Squared Error (MSE) values (0.0126 for training, 0.0282 for validation, and 0.0321 for testing) and R values of 1 across all datasets. These results indicate that NNF effectively captures the complex, non-linear relationships between RSSI values and object positions in open-air settings. The consistency of the model's performance across training, validation, and test sets suggests good generalization and a low risk of overfitting.

The Machine Learning model, implemented using TensorFlow, achieved a success rate of 74.4%. Table **7**.

While the model's performance improved with increased training epochs, it exhibited less stability and overall accuracy compared to the NNF model. This suggests that while machine learning techniques can be applied to RF-based localization, the specific architecture and training process are critical for achieving optimal results. The fluctuations observed in the validation metrics imply that careful tuning and regularization are necessary to ensure the model generalizes well to unseen data.

Results for different studies and methods are compared to the current study in

Table 7. Comparison of different studies (Farklı çalışmalar ile karşılaştırma)

Study	Method	Result (Accuracy)
Du et al. [7]	Angle of Arrival (AoA)	87.71%
Kleniatis et al. [8]	RFID	80%
Teeda et al. [9]	RSSI	93.22%
Peled-Eitan et al. [10]	RSSI	90%
Chen et al. [11]	RFID	90.83%
Ferrero-López et al. [13]	Bluetooth Low Energy (BLE)	90.80%
Current Study	MAE	66%
	ANN	12%
	NNF	94.05%
	ML	74.4%

To build upon these findings, future research should prioritize enhancing accuracy and robustness, particularly in indoor environments. This involves exploring more sophisticated algorithms or hybrid approaches, investigating advanced deep learning architectures like CNNs or RNNs, and incorporating additional sensor data. Analyzing and mitigating the impact of environmental factors on RSSI values and extending the research to real-time applications are also important directions.

6. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study evaluated RF-based object localization using RSSI values and different algorithms. The Mean Absolute Error (MAE) and Artificial Neural Network (ANN) algorithms demonstrated limited accuracy in indoor environments, likely due to RSSI variability caused by signal reflections.

In open-air settings, Neural Net Fitting (NNF) outperformed Machine Learning, achieving higher accuracy in position estimation. Specifically, NNF achieved a success rate of approximately 94.05%, while Machine Learning reached 74.4%. These studies suggest that neural network models, particularly NNF, are more effective for RF-based localization, especially in open environments where signal propagation is less complex.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS'CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Nihat DALDAL: Designed and implemented the systems to obtain the required measurement values from RF modules based on distance and conducted studies on position estimation using the measured RSSI data.

Mesafe bazlı olarak RF modüllerinden gerekli ölçüm değerlerini elde etmek için sistemleri tasarladı ve uyguladı, ayrıca ölçülen RSSI verilerini kullanarak konum tahmini üzerine çalışmalar yürüttü.

Mohammed ZAIB: Collected RSSI data from the deployed systems and contributed to position estimation studies.

Kurulan sistemlerden RSSI verilerini topladı ve konum tahmini çalışmalarına katkıda bulundu.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)
There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES:

[1] M. Feng, S. C. Shen, D. C. Caruth, and J. J. Huang, "Device technologies for RF front-end circuits in next-generation wireless communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 2, pp. 354–374, 2004, doi: 10.1109/JPROC.2003.821903.

[2] B. Clerckx, R. Zhang, R. Schober, D. W. K. Ng, D. I. Kim, and H. V. Poor, "Fundamentals of wireless information and power transfer: From RF energy harvester models to signal and system designs," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 1, pp. 4–33, 2019, doi: 10.1109/JSAC.2018.2872615.

[3] Y. Zeng, B. Clerckx, and R. Zhang, "Communications and Signals Design for Wireless Power Transmission," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 5, pp. 2264–2290, 2017, doi: 10.1109/TCOMM.2017.2676103.

[4] A. A. Abidi, "Low-power radio-frequency IC's for portable communications," *Integrated Circuits for Wireless Communications*, vol. 83, no. 4, pp. 3–28, 1998, doi: 10.1109/9780470544952.ch1.

[5] D. N. Purnamasari and M. Ulum, "LoRa 920 MHz as a Green Technology in Maritime Education : Optimizing Modulation Settings for Real-Time Environmental Data," vol. 05004, 2024.

[6] P. D. P. Adi and A. Kitagawa, "A performance of radio frequency and signal strength of LoRa with BME280 sensor," *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 18, no. 2, pp. 649–660, Apr. 2020, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.V18I2.14843.

[7] T. Du, Y. H. Su, and A. Sample, "2D+Depth RF Localization via a Low-Cost Receiver," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, pp. 1–6, 2024, doi: 10.1109/WCNC57260.2024.10571215.

[8] A. Kleniatis, A. Dimitriou, and A. Bletsas, "Device-Free Localization of Multiple Humans with Passive RFID and Joint RSSI-Phase Techniques," *2024 IEEE International Conference on RFID, RFID 2024*, pp. 35–40, 2024, doi: 10.1109/RFID62091.2024.10582592.

[9] V. Teeda, S. Moro, D. Scazzoli, L. Reggiani, and M. Magarini, "Differentiation and Localization of Ground RF Transmitters Through RSSI Measures from a UAV," *IEEE Trans Veh Technol*, vol. PP, pp. 1–10, 2024, doi: 10.1109/TVT.2024.3458416.

[10] L. Peled-Eitan and E. Greenberg, "Mobile User Localization Based on Wireless Sensor Network Signals in Smart Cities," *2024 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas, Biomedical Engineering and Electronic Systems, COMCAS 2024*, pp. 1–4, 2024, doi: 10.1109/COMCAS58210.2024.10666174.

[11] W. Chen, T. Boroushaki, I. Perper, and F. Adib, "Reinforcement Learning for RFID Localization," *2024 IEEE International Conference on RFID, RFID 2024*, pp. 47–52, 2024, doi: 10.1109/RFID62091.2024.10582639.

[12] R. Fu, D. Xiao, and Y. Fan, "A novel cell phone localization solution for trapped victims based on compressed RSSI fluctuation range and PSO-BP neural network," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 225, no. September 2023, p. 114014, 2024,

doi: 10.1016/j.measurement.2023.114014.

[13] A. Ferrero-López, A. J. Gallego, and M. A. Lozano, "Bluetooth low energy indoor positioning: A fingerprinting neural network approach," *Internet Things (The Netherlands)*, vol. 31, no. March, p. 101565, 2025, doi: 10.1016/j.iot.2025.101565.

[14] A. G. Kakisim and Z. Turgut, "Multi-channel convolutional neural network with attention mechanism using dual-band WiFi signals for indoor positioning systems in smart buildings," *Internet Things (The Netherlands)*, vol. 29, no. May 2024, p. 101435, 2025, doi: 10.1016/j.iot.2024.101435.

[15] A. S. Lutakamale, H. C. Myburgh, and A. de Freitas, "RSSI-based fingerprint localization in LoRaWAN networks using CNNs with squeeze and excitation blocks," *Ad Hoc Networks*, vol. 159, no. March, p. 103486, 2024, doi: 10.1016/j.adhoc.2024.103486.

[16] R. R. Guerra, A. Vizziello, P. Savazzi, E. Goldoni, and P. Gamba, "Forecasting LoRaWAN RSSI using weather parameters: A comparative study of ARIMA, artificial intelligence and hybrid approaches," *Comput. Networks*, vol. 243, no. September 2023, p. 110258, 2024, doi: 10.1016/j.comnet.2024.110258.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(3): 1345-1357 (2025)

Performance of L-type Furniture Corner Joints Connected with Dowels Produced in Different Orientations with 3D Printing Technology

Tolga KUŞKUN[1*]

[1]*Muğla Sıtkı Koçman University, Faculty of Technology, Department of Woodworking Industrial Engineering, Muğla, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 25/06/2025
Revision: 12/07/2025
Accepted: 21/07/2025

Keywords

Moment Capacity
Stiffness
Diagonal Tension and Compression Tests
Finite Element Method
3D Printing Technology

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 25/06/2025
Düzeltme: 12/07/2025
Kabul: 21/07/2025

Anahtar Kelimeler

Moment kapasitesi
Elastikiyet
Diyagonal Çekme ve Basınç
Sonlu Elemanlar Yöntemi
3D Yazıcı Teknolojisi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study investigates the moment capacity and stiffness of L-type furniture corner joints assembled with dowels produced in various orientations using 3D printing technology. / Bu çalışmada, 3 boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılarak çeşitli yönlerde üretilen kavelalarla birleştirilen L tipi mobilya köşe bağlantılarının moment kapasitesi ve rijitliği araştırılmıştır.

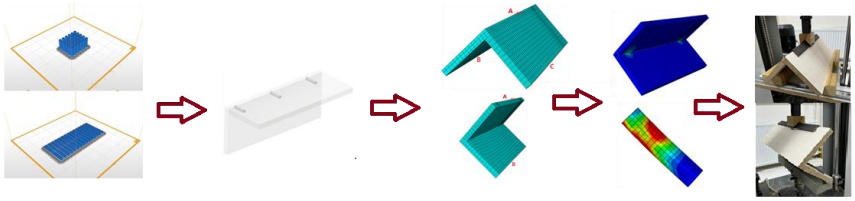


***Figure A**: Summary of the study / **Şekil A:** Çalışma özeti*

Highlights (Önemli noktalar)

- *The dowels utilized in this study were produced by 3D printing in two different orientations (vertical and horizontal) and thus effect of the printing orientation on the performance of the joints was investigated. / Çalışma kapsamında kullanılacak kavelalar, iki farklı yönde (düşey ve yatay) döküm yapılmak suretiyle üretilmiş ve böylece döküm yönünün birleştirmelerin performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.*
- *Dowels and L-type joints have been examined both experimentally and with numerical analyses. / Kavelalar ve L tipi birleştirmeler hem deneysel olarak hem de nümerik analizlerle incelenmiştir.*
- *Dowels are formed on the platform at angles of 0 and 90 degrees using the Layer Plastic Deposition (LPD) method. / Kavelalar, Layer Plastic Deposition (LPD) metodu ile platforma 0 ve 90 derece açı oluşturacak şekilde üretilmiş oluşturulmuştur.*

***Aim (Amaç):** . To determine the effects of dowels produced using different casting directions with LPD technology on the moment capacity and joint elasticity in L-type joints. / LPD teknolojisi kullanılarak farklı döküm yönleriyle üretilen kavelaların, L tipi bağlantılarda moment kapasitesi ve bağlantı elastikiyeti üzerindeki etkilerini belirlemek.*

***Originality (Özgünlük):** The study focuses on the experimental and numerical analyses of the strength of dowles produced using three-dimensional printing technology, which has been frequently used in the production of furniture connections in recent years, based on their printing orientation. / Çalışma, mobilya bağlantı elemanlarının üretiminde son yıllarda sıkça kullanılan üç boyutlu yazıcı teknolojisi ile üretilen bağlantı elemanlarının döküm yönüne göre mukavemetlerinin deneysel ve nümerik olarak analizlerine odaklanmaktadır.*

***Results (Bulgular):** Within the scope of the study; ASA material provided higher results compared to ABS material, horizontal printing orientation provided higher results compared to vertical printing orientation, and the connection type using 3 dowels provided higher results compared to the connection type using 2 dowels. / Çalışma kapsamında; ASA malzeme ABS malzemeye göre, yatay döküm yönü düşey döküm yönüne göre ve 3 kavela kullanılan bağlantı 2 kavela kullanılan bağlantı tipine göre daha yüksek sonuçlar vermiştir.*

***Conclusion (Sonuç):** The stresses that will occur in L-type corner joints can be predicted using FEM analyses, allowing test processes to be shortened and the joint strength to be increased by considering the printing orientation in production with three-dimensional printers. / L tipi köşe birleştirmelerde oluşacak olan gerilmeler FEM analizleri ile tahmin edilerek test süreçleri kısaltılabilir ve üç boyutlu yazıcılar ile yapılacak üretimlerde döküm yönüne dikkat edilerek birleştirme mukavemeti artırılabilir.*

*Corresponding author, e-mail: tolgakuskun@mu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1727452

GU J Sci, Part C, 13(3): 1345-1357 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Performance of L-type Furniture Corner Joints Connected with Dowels Produced in Different Orientations with 3D Printing Technology

Tolga KUŞKUN[1*]

[1]*Muğla Sıtkı Koçman University, Faculty of Technology, Department of Woodworking Industrial Engineering, Muğla, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 25/06/2025
Revision: 12/07/2025
Accepted: 21/07/2025

Keywords

Moment Capacity, Stiffness, Diagonal Tension and Compression Tests, Finite Element Method, 3D Printing Technology.

Abstract

This study investigates the moment capacity and stiffness of L-type furniture corner joints assembled with dowels produced in various orientations using 3D printing technology. The dowels utilized in this study were produced by 3D printing in two different orientations (vertical and horizontal) and thus effect of the printing orientation on the performance of the joints was investigated. Two different filament materials, Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) and Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA), were used to produce the dowels. The produced dowels were used as fasteners in L-type corner joints. In the study, a total of 80 L-type corner joint specimens were prepared with 2 different printing orientation (horizontal and vertical), 2 different number of dowels (2 dowels, 3 dowels) and 10 replications of each specimen, and 40 of them were tested under static diagonal tension and the remaining 40 were tested under static diagonal compression load. In addition, numerical analyses were performed for each group by finite element method (FEM). According to the test results, it was observed that the doweled joints produced from ASA gave higher values than the doweled joints produced from ABS material, and the doweled joints produced in the horizontal orientation gave higher values than the doweled joints produced in the vertical orientation. It was also observed that increasing the number of dowels in the joints from 2 to 3 increased the moment capacity and stiffness of the joints. As a result of the study, the numerical analyses performed by the finite element method were found to be consistent with the actual experimental results and observed deformation characteristics in terms of both forces and stresses.

3B Yazıcı Teknolojisiyle Farklı Döküm Yönünde Üretilen Kavelalarla Bağlanmış L-tipi Mobilya Köşe Birleştirmelerin Performansı

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 25/06/2025
Düzeltme: 12/07/2025
Kabul: 21/07/2025

Anahtar Kelimeler

Moment kapasitesi, Elastikiyet, Diyagonal Çekme ve Basınç, Sonlu Elemanlar Yöntemi, 3D Yazıcı Teknolojisi.

Öz

Bu çalışmanın amacı, üç boyutlu (3B) yazıcı teknolojisiyle farklı yönlerde üretilen kavelalarla birleştirilmiş, kutu konstrüksiyonlu L-tipi mobilya köşe birleştirmelerinin moment kapasiteleri ve elastikiyetlerinin hem deneysel hem de nümerik olarak araştırılmasıdır. Çalışma kapsamında kullanılacak kavelalar, iki farklı yönde (düşey ve yatay) döküm yapılmak suretiyle üretilmiş ve böylece döküm yönünün birleştirmelerin performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kavelaların üretiminde, Akrilonitril Butadiyen Stiren (ABS) ve Akrilonitril Stiren Akrilat (ASA) olmak üzere 2 farklı filament malzemesi tercih edilmiştir. Üretilen kavelalar, L-tipi köşe birleştirmelerde bağlantı elemanı olarak kullanılmıştır. Çalışmada, 2 farklı döküm yönü (yatay ve düşey), 2 farklı kavela sayısı (2 kavelalı, 3 kavelalı) ve her bir örnekten 10 yineleme olmak üzere toplam 80 adet L-tipi köşe birleştirme deney örneği hazırlanmış ve 40'ı statik diyagonal çekme, kalan 40'ı da statik diyagonal basınç yükü altında test edilmiştir. Ayrıca, her bir grup için sonlu elemanlar metodu (FEM) ile nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, ASA malzemeden üretilen kavelalı birleştirmelerin ABS malzemeden üretilen kavelalı birleştirmelere göre; yatay yönde üretilen kavelalı birleştirmelerin de düşey yönde üretilen kavelalı birleştirmelere göre daha yüksek değerler verdiği görülmüştür. Ayrıca birleştirmelerdeki kavela sayısının 2'den 3'e çıkarılmasının birleştirmelerin moment kapasitesini ve elastikiyetini artırdığı görülmüştür. Çalışma sonucunda, Sonlu elemanlar metoduyla gerçekleştirilen nümerik analizler hem kuvvetler hem de gerilmeler açısından gerçek deney sonuçları ve gözlemlenen deformasyon karakteristikleri ile tutarlı bulunmuştur.

*Corresponding author, e-mail: tolgakuskun@mu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1727452

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Three-dimensional (3D) printing technology is a revolutionary technological advancement in the field of manufacturing. The utilization of three-dimensional printers in the production of prototypes and end products has proven to be a highly efficient process. This method ensures the expeditious production of complex geometric and topographical elements while simultaneously reducing material waste and costs. Furthermore, 3D printing provides a novel manufacturing method for composite materials and modifies the mechanical properties of the printed parts [1–5]. Therefore, 3D printing technology has become widespread in a variety of manufacturing industries for tasks such as modeling, prototyping, preliminary kinematic functional testing, and customized design [6–11]. In the domain of additive manufacturing, particularly in the context of 3D printer technology, a multitude of factors must be taken into consideration to ensure the optimal properties of the end product. These include the material properties of the printing material, the printing speed, and the orientation in which the printer is oriented during the printing process. The furniture industry is also among the industries where productions are made with 3D printer technology. Specifically, 3D printer technology facilitates the production of prototypes for numerous fasteners, enabling the assessment of their mechanical properties. In this context, the production methods employed for the production of the fasteners, as well as the printing orientations utilized by the 3D printer, assume significant importance with respect to the mechanical properties of the resultant components. Recently, an increased level of interest has been observed with regard to ready-to-assemble (RTA) furniture joints [12–15]; the production of fasteners with the 3D printer technology for RTA products has been seen to be both an economical and efficient solution.

L-type diagonal tension and compression tests are one of the most effective tests to determine the mechanical properties, like tension, compression, and bending stresses, of fasteners. The effectiveness of furniture joints such as fasteners or glued dowels as anchors for L-type corner joints has been the subject of numerous studies [12]. For instance, Zhang and Eckelman reported that a study on the diagonal tension and compression tests of L-type joints performed with particleboard (PB) single dowel connections indicated that diagonal tension tests had higher moment capacity than diagonal compression tests [16]. In their study of the stiffness and strength of joints utilized in panel furniture, Smardzewski and Prekrat underscored the significance of trapezoidal joints in attaining optimal stiffness-strength properties. It was highlighted that wooden dowels play a critical role in enhancing the strength of such joints [17].

In a recent study, Kasal et al. investigated the mechanical properties of auxetic dowels produced using 3D printer technology. The dowels were put through diagonal tension and compression tests as part of the experimental setup, and the finite element method (FEM) was used to model L-type joints. As a conclusion, further improvements are required before auxetic dowels may be used as a substitute for traditional dowels [12]. In a particular study that examined the application of FEM analysis, FEM analyses proved to be a viable solution to assess the occurred stresses in furniture. A wooden chair was analyzed using FEM by Gustafsson in research. FEM analyses results were compared to the results of the actual test. In summary, it has been indicated that the analysis of chair frames can be conducted through the utilization of computer-aided structural analysis methodologies [18]. A comparison and investigation of the difficulties associated with the utilization of the finite element method (FEM) in the context of wood materials has been conducted through the implementation of performance tests utilizing finite element software [19]. When the literature is examined, it is seen that there are a limited number of studies investigating the effects of printing orientation on strength in three-dimensional printers. Accordingly, in this study, the effects of the printing orientation on the strength of the materials in three-dimensional printers, especially in the production of furniture fasteners, were investigated. The utilization of 3D printing technology has seen a marked increase in the production of fasteners and prototypes within the furniture industry. While a multitude of 3D printing technologies exist, one of the most prevalent in the realm of prototype production is the Layer Plastic Deposition (LPD) method. This method has been successful in the production of various fasteners and dowels. The strength of the produced dowels is related to the casting method and raster orientations. In the study, test specimens were produced using two different raster orientations: the initial orientation of the object is at a 90° angle with respect to the vertical axis, and the horizontal axis is at 0°. The study investigated the strength of dowels produced with LPD technology in 0° and 90° raster orientations [20,21] under diagonal tensile and compression tests in L-type joints. In this study, it was aimed to determine the effects of dowels produced using different casting directions with

LPD technology on the moment capacity and joint elasticity in L-type joints.

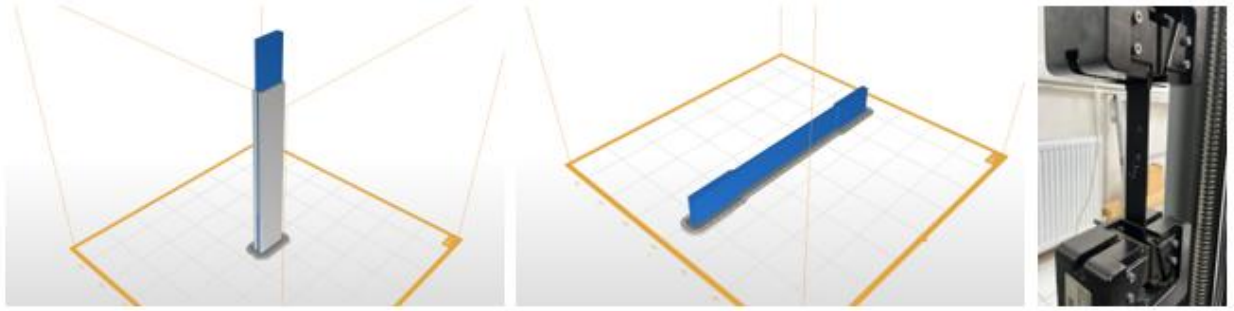
2. MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

2.1. Test Materials (Test Malzemeleri)

Within the scope of the study, the L-type corner joint specimens were made from melamine-coated particleboard, and the dowels were made from ABS and ASA filaments. ABS filaments are suitable for 3D printers with a nozzle temperature of 220-260 °C, no special hot-end required, 80 °C platform temperature, 0,1 mm detailed printing. ASA filaments are suitable for 3D printers with a nozzle temperature of 250-280 °C, no special hot-end, 90 °C platform temperature, 0,1 mm detailed printing diameter [22]. In this study, ABS filament was printed with a layer resolution of 0.1 mm at a nozzle temperature of 240 °C and a platform temperature of 80 °C, following the manufacturer's recommendations. All specimens were produced with nozzle which diameter was 0.4 mm. Since all test samples were produced with 100% infill rate, the infill type was selected as solid in Zortrax M300plus. Within the scope of the study, the densities of ABS and ASA filaments and their tensile strength and modulus of elasticity (MOE) values were determined according to the principles specified in the ASTM D3039/D3039M-17 [23] standard. The specimens used in these tests were produced with a three-dimensional printer.

2.2. Tensile Specimens (Çekme Deneyi Örnekleri)

Tensile specimens were prepared using a Zortrax M300plus printer (Poland) with 0.1 mm dimensional tolerance. 10 specimens were prepared in total. Specimens were produced in both vertical (Figure 1a) and horizontal (Figure 1b) orientations. Tensile strength and modulus of elasticity of the specimens were calculated separately for each printing orientation. Tensile tests were performed on a universal testing machine with a 50 kN capacity (Figure 1c).



a. b. c.

Figure 1. a. Tensile specimens in vertical orientation b. tensile specimen in horizontal orientation, c. tensile test (a. Dikey yönde çekme numuneleri b. yatay yönde çekme numuneleri, c. çekme testi)

The data obtained from the tensile tests were used to define the materials for FEM analysis of L-type corner joints. Since each material has different modulus of elasticity and stress values in different printing orientations, the properties of ABS and ASA filaments were defined separately in the FEM program for horizontal and vertical production. In this case, instead of 2 material definitions, 4 material definitions were used to perform the FEM analysis.

2.3. Preparation and Diagonal Tests of L-type Corner Joints (L tipi deney örneklerini hazırlanışı ve diyagonal testleri)

Dowels produced as part of the study were categorized into two distinct groups based on their orientation, namely, vertical (Figure 2a) and horizontal (Figure 2b), in a manner consistent with the tensile specimens. All dowels produced within the scope of the study had the same dimensions; the diameter of the dowels was 10 mm and the length was 40 mm.



a. b.

Figure 2. Dowels produced a. in vertical orientation, b. in horizontal orientation (Üretilen kavelalar a. düşey yön, b. yatay yön)

L-type corner joints tested within the scope of the study, two different groups were applied as joints prepared with 2 dowels (Figure 3a) and joints prepared with 3 dowels (Figure 3b). In L-type corner joints, holes were drilled so that the dowel axis was 37 mm inside from the front edge of the specimens and the second dowel was 52 mm inside from the back edge. For L-type joints produced with two dowels, the distance between the dowel axes is 288 mm, and for L-type joints produced with three dowels, the distance between the dowel axes is 144 mm.



a. b.

Figure 3. Joints prepared with a) 2 dowels, b) 3 dowel joints. (Birleştirmeler a. 2 kavelalı, b. 3 kavelalı)

During usage, corner joints in panel furniture are commonly exposed to the tensile forces, which try to open the corner joint, and compressive forces, which try to close the joint angle. Under tension and compression, moments occurred at the corner of panel furniture or L-type joints. These two significant loading models were used for this study's test procedure in order to assess the stiffness and strength of L-type corner joints with dowels produced in a 3D printer. Diagonal tension (Figure 4a) and compression (Figure 4b) tests were performed with a 50 kN capacity testing machine.



a. b.

Figure 4. a. Diagonal tension test, b. Diagonal compression test (a. Diyagonal çekme testi, b. Diyagonal basınç testi)

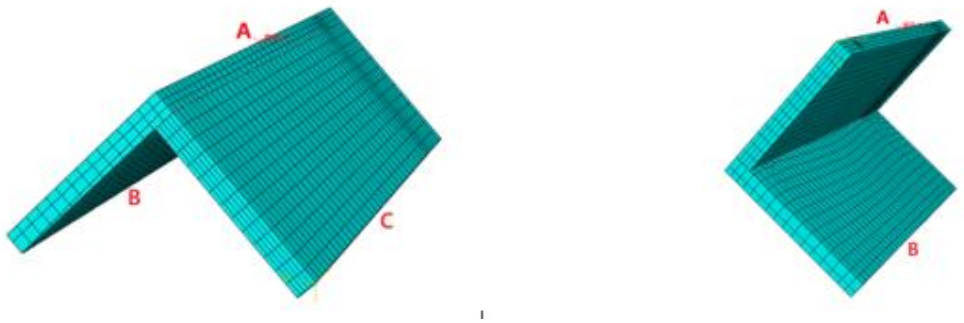
The maximum forces were obtained during the tension and compression experiments, and the displacement and deformation of L-type corner joints was determined. Tests were performed on 80 L-type specimens, 40 of which were tested under diagonal tension and the remaining 40 were tested under diagonal compression loading. The moment capacities (Nm) of the joints under tension or compression were first determined. The moment was divided by the corresponding change in the joint angle between the arms of the connection to determine the stiffness (Nm/rad) values [12]. The experimental design of the study was given in Table 1.

Table 1. Experimental design of the study (Çalışmanın deneme deseni)

Material	Orientation	Number of Dowel	Diagonal Tension	Diagonal Compression
ABS	Vertical	2 Dowels	5	5
		3 Dowels	5	5
	Horizontal	2 Dowels	5	5
		3 Dowels	5	5
ASA	Vertical	2 Dowels	5	5
		3 Dowels	5	5
	Horizontal	2 Dowels	5	5
		3 Dowels	5	5
Total			40	40

2.4. Numerical Analyses of L-type Corner Joints
(L tipi deney örneklerini hazırlanışı ve diyagonal testleri)

By simulating the displacement of fasteners using the finite element method, the damage mechanism of dowels was examined. ABS and ASA materials are defined with a Poisson's ratio of 0.3 for the dowels. Materials are defined separately for horizontal and vertical directions. In this context, since horizontal and vertical directions are defined for ABS and ASA materials, material identification is performed as if four different materials were used. MOE values are defined as 1213 MPa for ABS vertical, 1385 MPa for ABS horizontal, 988 MPa for ASA vertical and 1250 MPa for ASA horizontal. Joints were constructed with the dimensions of the tested specimens, as shown in Figure 5, using the commercial software ABAQUS/Explicit v6.14 (Dassault Systemes Simulia Corp., Waltham, Ma, USA). L-type corner joints were modeled in a virtual environment in real dimensions and transferred to the finite element program. Boundary conditions were determined with the help of some simplifications and assumptions for the analysis of diagonal tension and compression tests (Figure 5a, Figure 5b). Numerical analyses were performed using an average of 10000 nodes and 8000 elements in tension tests and 7400 nodes and 5200 elements in compression test. In general, the hourglass control element was used, which is an 8-node linear brick with reduced integration.



a. b.

Figure 5. a. Diagonal tension test, b. Diagonal compression test in FEM analyses (FEM analizlerinde a. diyagonal çekme, b. diyagonal basınç testi)

The vertical deformations (mm) obtained from the actual tests were applied from the point A shown in Figure 5 for both the tension and compression tests. The supports were applied as roller support at points B and C in the diagonal tensile tests shown in Figure 4a and as pin support at point B in the diagonal

compression tests shown in Figure 5b. The analysis results included a comparison between the actual test results and the maximum reaction force at point A as well as the stresses at the moment of this force.

3. RESULTS (BULGULAR)

3.1. Experimental Results (Deney Sonuçları)

Results obtained from the moisture content, oven-dry density, and air-dry density tests performed for the particleboard used in the preparation of the test specimens are given in Table 2. Densities of ABS and ASA materials used in the production of dowels were determined as 1,10 g/cm3 and 1,07 g/cm3, respectively.

Table 2. Moisture content, oven dry density and air-dry density of particleboard used in study (Çalışmada kullanılan yonga levha malzeme için rutubet miktarı, tam kuru yoğunluk ve havakurusu yoğunluk)

Wood Material	Moisture (%)	Oven Dry Density (gr/cm^3)	Air Dry Density (gr/cm^3)	Bending Stress (MPa)	MOE (MPa)
Particleboard	6,98	0,62	0,65	16	3268

MOE: Modulus of Elasticity

Stress of the tensile test specimens prepared vertical orientation ABS material was found 10,46 MPa and modulus of elasticity (MOE) was found 1213 MPa; for the horizontal orientation printed ABS material, the tensile stress was found 36,41 MPa and the MOE was found 1275 MPa. Also, for the vertical orientation printed ASA material, the tensile stress was found 13,15 MPa and the MOE was found 988 MPa; for the horizontal orientation printed ABS material, the tensile stress was found 37,97 MPa and the MOE was found 1250 MPa. MOE values were calculated for each group using the mean stress and strain values obtained from the tests. The obtained MOE values were used in material definitions in FEM analyses.

After the tensile tests of materials, diagonal tension and compression tests were performed for L-type joints. Moment carrying capacity and stiffness were presented in diagonal tension and diagonal compression tests (Table 3).

Table 3. Moment and stiffness values of L-type corner joints (L-tipi birleştirmelerde moment ve elastikiyet değerleri)

	Material	Orientation	Number of Dowel	Moment (Nm)	Stiffness (Nm/Rad)
Diagonal Tension Test	ABS	Vertical	2 Dowels	12,27 (5,67)	492,41 (9,61)
			3 Dowels	17,94 (7,79)	724,02 (8,72)
		Horizontal	2 Dowels	16,82 (7,49)	407,80 (5,71)
			3 Dowels	21,66 (2,91)	604,38 (8,53)
	ASA	Vertical	2 Dowels	16,55 (2,25)	479,17 (6,13)
			3 Dowels	23,61 (3,82)	659,83 (3,85)
		Horizontal	2 Dowels	17,20 (6,16)	524,90 (6,21)
			3 Dowels	25,56 (4,87)	618,14 (7,72)
Diagonal Compression Test	ABS	Vertical	2 Dowels	4,83 (7,69)	74.53 (8,93)
			3 Dowels	8,55 (4,34)	117,45 (8,60)
		Horizontal	2 Dowels	6,51 (9,04)	68,45 (11,99)
			3 Dowels	7.06 (10,53)	91,13 (8,54)
	ASA	Vertical	2 Dowels	6,51 (9,04)	70,52 (10,70)
			3 Dowels	11,15 (5,27)	109,96 (1,95)
		Horizontal	2 Dowels	5,95 (7,65)	66,02 (7,67)
			3 Dowels	12,08 (8,43)	125,81 (8,67)

*Values in parenthesis are Coefficient of Variation

In order to investigate the impact of filament type as a material and printing orientation on the mean stiffness and moment capacity under diagonal tension and diagonal compression loading, multiway analyses of variances (MANOVA) were implemented for both stiffness and the moment capacity data of L-type corner joints. MANOVA results of L-type corner joint for diagonal tension and diagonal compression tests were given in Table 4.

According to the results of the MANOVA, for both loading types, the impact of the material factor as an independent variable on the stiffness and moment capacity was statistically significant at the 5% level.

Therefore, the mean differences in moment capacity and stiffness values between the L-type joints assessed were calculated using the least significant difference (LSD) comparisons approach at the 5% significance level. Triple interactions were statistically insignificant in diagonal tensile tests, while LSD comparisons were significant for main variables.

Table 4. Analysis of variance for L-type joints diagonal tension and compression tests (L-tipi birleştirmelerde diyagonal çekme ve basınç testleri için varyans analizi sonuçları)

		Source	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F-Value	P-Value
Diagonal Tension Tests	Moment (Nm)	Material (M)	1	126,404	126,404	100,47	0,000
		Orientation (O)	1	73,918	73,918	58,75	0,000
		Dowel Numb. (D)	1	420,325	420,325	334,08	0,000
		MxO	1	20,093	15,168	15,97	0,000
		MxD	1	15,168	0,135	12,06	0,002
		OxD	1	0,135	2,856	0,11	0,745
		MxOxD	1	2,856	1,258	2,27	0,142
		Error	32	40,261			
		Total	39	699,159			
	Stiffness (Nm/Rad)	Material (M)	1	1784	1784	0,80	0,378
		Orientation (O)	1	25052	25052	11,23	0,002
		Dowel Numb. (D)	1	308062	308062	138,14	0,000
		MxO	1	27116	27116	12,16	0,001
		MxD	1	14878	14878	6,67	0,015
		OxD	1	9372	9372	4,20	0,049
		MxOxD	1	1716	1716	0,77	0,387
		Error	32	71364	2230		
		Total	39	459343			
Diagonal Compression Tests	Moment (Nm)	Source	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F-Value	P-Value
		Material (M)	1	47,713	47,713	98,18	0,000
		Orientation (O)	1	0,194	0,194	0,40	0,532
		Dowel Numb. (D)	1	141,712	141,712	291,60	0,000
		MxO	1	0,022	0,022	0,04	0,834
		MxD	1	26,459	26,459	54,44	0,000
		OxD	1	1,750	1,750	3,60	0,067
		MxOxD	1	13,499	13,499	27,78	0,000
		Error	32	15,551	0,486		
		Total	39	246,900			
	Stiffness (Nm/Rad)	Material (M)	1	269,0	269,0	3,58	0,067
		Orientation (O)	1	276,6	276,6	3,68	0,064
		Dowel Numb. (D)	1	16979,3	16979,3	266,17	0,000
		MxO	1	1196,4	1196,4	15,94	0,000
		MxD	1	706,4	70,.4	9,41	0,004
		OxD	1	0,0	0,0	0,00	0,992
		MxOxD	1	1029,4	1029,4	13,71	0,001
		Error	32	2402,3	75,1		
		Total	39	22859,6			

The triple interaction showed considerable results in studies of diagonal compression. Thus, the comparison findings of the triple interaction for the diagonal compression tests and the main factor comparisons for the diagonal tensile tests are given in Table 5.

Table 5. Comparison results for main factors of diagonal tension tests (Diyagonal çekme testi için ana faktörlerin karşılaştırmalı sonuçları)

Diagonal Tension Tests					
		Moment		Stiffness	
		X (Nm)	HG	X (Nm/Rad)	HG
Material	ABS	17,17	B	-	-
	ASA	20,73	A	-	-
Orientation	Vertical	17,59	B	588,857	A
	Horizontal	20,31	A	538.805	B
Dowel Number	2 Dowels	15,71	B	476,07	B
	3 Dowels	22,19	A	651,59	A

*X: Mean Values, HG: Homogeneity Group

Table 5 shows that the moment capacity of L-type corner joints made with ASA was almost 21% greater when the material's major variables are examined in the diagonal tension test. Stiffness values of this factor were not statistically significant. It was shown that dowels made in a horizontal orientation had 15% greater moment capacity values when the printing orientation was examined as a main factor. Analysis of the stiffness values for the same factor revealed that dowels made vertical orientation values that were 9% higher. The moment values of L-type corner joints made with three dowels are 37% higher than those made with two dowels, according to an analysis of the primary determinant of the number of dowels. When the elasticity values were analyzed for the same factor, it was determined that the joints produced with 3 dowels gave 37% higher values. In diagonal compression tests, triple interaction results were analyzed, and comparisons are given in Table 6.

Table 6. Comparison results for interaction of diagonal compression tests (Diyagonal basınç testi için üçlü etkileşim karşılaştırmalı sonuçları)

Diagonal Compression Tests						
Material	Orientation	Dowel Number	Moment		Stiffness	
			X (Nm)	HG	X (Nm/Rad)	HG
ABS	Vertical	2 Dowels	4,83	F	74,53	D
		3 Dowels	8,55	C	117,45	AB
	Horizontal	2 Dowels	6,51	DE	68,45	D
		3 Dowels	7,06	D	91,13	C
ASA	Vertical	2 Dowels	6,51	DE	70,52	D
		3 Dowels	11,12	B	109,96	B
	Horizontal	2 Dowels	5,95	E	66,02	D
		3 Dowels	12,08	A	125,81	A

Table 6 shows that the specimens made from ASA material in the horizontal orientation and with three dowels had the maximum moment and elasticity values for the L-type specimens in the diagonal compression test.

3.2. Failure Modes (Deformasyon Karakteristikleri)

When the failure modes were examined in diagonal tension tests, it was observed that the dowels were broken in the test specimens prepared with dowels produced in vertical orientation (Figure 6a), while in the test specimens prepared with dowels produced in horizontal orientation, the dowel broke the particleboard and came out of the dowel hole (Figure 6b).



a. b.

Figure 6. Failure modes in diagonal tension test a) dowel produced in vertical orientation, b) dowel produced in horizontal orientation (Diyagonal çekme testi için deformasyon karakteristikleri a. düşey yönde üretilen kavela, b. yatay yönde üretilen kavela)

When the failure modes of the compression tests were examined, as in the tensile tests, the dowels were broken in the test specimens prepared with dowels produced in the vertical orientation (Figure 7a), while the particleboard was deformed in the test specimens prepared with dowels produced in the horizontal orientation (Figure 7b).



. a. b.

Figure 7. Failure modes in diagonal compression test a) dowel produced in vertical orientation, b) dowel produced in horizontal orientation (Diyagonal basınç testi için deformasyon karakteristikleri a. düşey yönde üretilen kavela, b. yatay yönde üretilen kavela)

3.3. FEM Results (FEM Sonuçları)

Maximum stress and reaction forces were analyzed in FEM analyses, and maximum reaction forces were compared with actual test results. The deformation characteristics of FEM were also compared with the deformation characteristics obtained from actual tests (Table 7).

Table 7. Comparison results for actual tests and FEM (Deney sonuçları ve FEM analizi karşılaştırması)

Material	Orientation	Dowel Number	Diagonal Tension			Diagonal Compression		
			Actual Tests (N)	FEM (N)	Differences (%)	Actual Tests (N)	FEM (N)	Differences (%)
ABS	Vertical	2 Dowels	258,98	301	16,22	51,01	53	3,90
		3 Dowels	378,67	315	-16,81	90,25	85	-5,82
	Horizontal	2 Dowels	355,12	430	21,09	68,67	77	12,13
		3 Dowels	457,15	502	9,81	74,56	99	32,79
ASA	Vertical	2 Dowels	349,24	326	-6,65	68,67	61	-11,17
		3 Dowels	498,35	331	-33,58	117,72	98	-16,75
	Horizontal	2 Dowels	362,97	375	3,31	62,78	67	6,72
		3 Dowels	539,55	499	-7,52	127,53	115	-9,83

When actual tests and FEM analyses were compared for diagonal tension tests, the group that used three dowels made with ASA material in the vertical orientation was projected to differ by 33%. The results of the FEM analysis seem to be satisfactory other than that. When actual testing and FEM analyses were compared for diagonal compression tests, the group that used three dowels made with ASA material in the vertical orientation was projected to differ by 32%. FEM analyses can

be improved by applying denser meshes and different boundary conditions. Furthermore, FEM analyses were conducted using data from experimental tests to define plasticity. Nonlinear behavior can be defined with more accuracy. These definitions can help ensure more accurate and realistic solutions. The results of the FEM analysis seem to be satisfactory other than that. In addition, the failure modes in FEM are consistent with the failure modes obtained from real tests (Figure 8, Figure 9).



a. b.

Figure 8. Failure modes in diagonal tension test for FEM a) particleboard failure mode b) dowel failure mode (Diyagonal çekme testi için deformasyon karakteristikleri a. yonga levha deformasyonu, b. kavela deformasyonu)



a. b.

Figure 9. Failure modes in diagonal compression test for FEM a) particleboard failure mode b) dowel failure mode (Diyagonal basınç testi için deformasyon karakteristikleri a. yonga levha deformasyonu, b. kavela deformasyonu)

Examining the deformation characteristics revealed that the dowels and the L-type corner joint test specimens both had deformations that were comparable to those observed in the actual test. The stresses obtained from FEM analyses were analyzed for both the dowels and the particleboard. Stress values obtained from FEM analysis are given in Table 8.

Table 8. Maximum Principal Stresses obtained from FEM analyses (FEM analizlerinden elde edilen en yüksek gerilme değerleri)

Material	Orientation	Dowel Number	Diagonal Tension		Diagonal Compression	
			PB Max. Principal Stress (MPa)	Dowel Max. Principal Stress (MPa)	PB Stress Max. Principal (MPa)	Dowel Stress Max. Principal (MPa)
ABS	Vertical	2 Dowels	19,52	11,37	4,23	11,37
		3 Dowels	18,72	11,46	5,18	11,58
	Horizontal	2 Dowels	21,32	36,71	7,70	26,42
		3 Dowels	19,13	34,36	4,96	18,47
ASA	Vertical	2 Dowels	15,13	12,01	3,29	13,21
		3 Dowels	18,90	12,87	5,69	13,24
	Horizontal	2 Dowels	20,98	28,91	7,24	22,58
		3 Dowels	22,01	28,86	6,21	23,89

The stress values in the L-type test specimens made with dowels manufactured in vertical orientation were higher than the stresses found in the tensile tests when the stress levels were analyzed. For instance, it was found that the average stress in dowels with vertical orientation from ABS tensile test specimens was 10,46 MPa. Examining the same group's stresses in FEM studies reveals that the dowel stresses are higher than 11 MPa. The occurrence of dowel fracture deformations, as shown in the deformation characteristics, corresponds with this. L-type test specimens constructed using ASA-made dowels with vertical orientation are likewise subject to the strains described above. In vertical tensile tests, the highest stress generated by ASA material was found to be 13,14 MPa. According to FEM analysis, the stresses in the same group were 13,21 MPa. This aligns with the properties of deformation as well.

When the stress values of the dowels produced in the horizontal orientation are examined, it is determined that the stresses in the dowels in FEM analyzes are much lower than the stresses obtained from tensile tests. This aligns with the deformation properties seen in actual tests. Tensile test specimens made with ABS material in a horizontal orientation have an average stress value of 36,04 MPa, whereas those made of ASA material have an average stress value of 37,98 MPa. However, it is observed that the particleboards are deformed before the dowel stresses produced in the horizontal orientation reach the maximum, and their stresses surpass the maximum stress value when the test specimens prepared with dowels produced in the horizontal orientation in L-type diagonal tensile and compression tests are examined.

4. CONCLUSION (SONUÇLAR)

Recently, 3D printer technology has gained a lot of attention and is widely used, particularly for prototyping. The furniture industry has begun to use 3D printer technology extensively, and production technology, material, and printing orientation are important in the production process of 3D printing.

Within the scope of the study, 3D printer technology was used to create dowel in both horizontal and vertical orientations. The prepared dowel samples were utilized for diagonal tensile and compression tests in L-type corner joints. Both actual tests and FEM analyses of L-type joints were performed, and the results were compared.

When the L-type diagonal tension tests were examined, it was observed that the dowels made of ASA material gave better results than the dowels made of ABS material. When the 3D printer printing orientation is examined, it is seen that the dowels produced in the horizontal orientation gave higher values than the dowels produced in the vertical orientation. In addition, when the joints produced with 3 dowels and the joints produced with 2 dowels were examined, it was determined that the joints using 3 dowels gave higher values. Out of the three dependent factors that were analyzed, the number of dowels had the biggest impact, followed by the orientation of production, and the material dependent variable had the least impact. This may be due to the similar properties of ASA and ABS materials. Therefore, the effect of the material factor can be examined by performing L-type diagonal tests with more materials.

Forces and stresses were found to be rather similar when the finite element analyses were examined. In two groups, however, the comparison percentages were high. This can be because wood composite materials are hard to define in FEM systems. However, by varying the test and constraint circumstances, the derived values can be improved, and FEM analysis can produce more accurate predictions. Therefore, producing fasteners using 3D printing in alignment with the load direction can result in stronger connections. Additionally, production and testing procedures can be improved by using FEM analysis to calculate the stresses that will occur in these fasteners and joints.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***Tolga KUŞKUN*:** He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Ning F, Cong W, Qiu J, Wei J, Wang S. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. Compos Part B Eng 2015;80:369–78. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013.

[2] Masood SH, Song WQ. Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modelling. Mater Des 2004;25:587–94. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.02.009.

[3] Farina I, Fabbrocino F, Carpentieri G, Modano M, Amendola A, Goodall R, et al. On the reinforcement of cement mortars through 3D printed polymeric and metallic fibers. Compos Part B Eng 2016;90:76–85. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.006.

[4] Kuo C-C, Liu L-C, Teng W-F, Chang H-Y, Chien F-M, Liao S-J, et al. Preparation of starch/acrylonitrile-butadiene-styrene copolymers (ABS) biomass alloys and their feasible evaluation for 3D printing applications. Compos Part B Eng 2016;86:36–9. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.10.005.

[5] Zou R, Xia Y, Liu S, Hu P, Hou W, Hu Q, et al. Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material. Compos Part B Eng 2016;99:506–13. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.009.

[6] Rahim SL, Maidin S. Feasibility Study of Additive Manufacturing Technology Implementation in Malaysian Automotive Industry Using Analytic Hierarchy Process. Adv Mater Res 2014;903:450–4. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.903.450.

[7] Richter C, Lipson H. Untethered Hovering Flapping Flight of a 3D-Printed Mechanical Insect. Artif Life 2011;17:73–86. https://doi.org/10.1162/artl_a_00020.

[8] Gebler M, Schoot Uiterkamp AJM, Visser C. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. Energy Policy 2014;74:158–67. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033.

[9] Lee J-Y, Tan WS, An J, Chua CK, Tang CY, Fane AG, et al. The potential to enhance membrane module design with 3D printing technology. J Memb Sci 2016;499:480–90. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.11.008.

[10] Mironov V, Boland T, Trusk T, Forgacs G, Markwald RR. Organ printing: computer-aided jet-based 3D tissue engineering. Trends Biotechnol 2003;21:157–61. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-7799(03)00033-7.

[11] Seitz H, Rieder W, Irsen S, Leukers B, Tille C. Three-dimensional printing of porous ceramic scaffolds for bone tissue engineering. J Biomed Mater Res - Part B Appl Biomater 2005;74:782–8. https://doi.org/10.1002/jbm.b.30291.

[12] Kasal A, Smardzewski J, Kuşkun T, Güray E. Analyses of L-Type Corner Joints Connected with Auxetic Dowels for Case Furniture. Materials (Basel) 2023;16. https://doi.org/10.3390/ma16134547.

[13] Pizzi A, Despres A, Mansouri HR, Leban J-M, Rigolet S. Wood joints by through-dowel rotation welding: microstructure, 13C-NMR and water resistance. J Adhes Sci Technol 2006;20:427–36. https://doi.org/10.1163/156856106777144327.

[14] Segovia C, Pizzi A. Performance of Dowel-Welded T-Joints for Wood Furniture. J Adhes Sci Technol 2009;23:2073–84. https://doi.org/10.1163/016942409X12526743387926.

[15] Stamm B, Natterer J, Navi P. Joining of wood layers by friction welding. J Adhes Sci Technol 2005;19:1129–39. https://doi.org/10.1163/156856105774429046.

[16] Zhang J-L, Eckelman CA. The bending moment resistance of single-dowel corner joints in case construction. For Prod J 1993;43:19.

[17] Smardzewski J, Prekrat S. Stress Distribution in Disconnected Furniture Joints. Electron J Polish Agric Univ 2002;5:1–7.

[18] Gustafsson S-I. Optimising ash wood chairs. Wood Sci Technol 1997;31:291–301. https://doi.org/10.1007/BF00702616.

[19] Koç KH, Kizilkaya K, Erdinler ES, Korkut DS. The use of finite element method in the furniture industry. African J Bus Manag 2011;5:855–65. https://doi.org/10.5897/AJBM10.551.

[20] Gonabadi H, Chen Y, Yadav A, Bull S. Investigation of the effect of raster angle, build orientation, and infill density on the elastic response of 3D printed parts using finite element microstructural modeling and homogenization techniques. Int J Adv Manuf Technol 2022;118:1485–510. https://doi.org/10.1007/s00170-021-07940-4.

[21] Baharlou E, Ma J. Effect of raster orientation on large-scale robotic 3D printing of short carbon fiber-reinforced PLA composites. Addit Manuf Lett 2025;13. https://doi.org/10.1016/j.addlet.2025.100276.
[22] Porima. Porima Polimer Teknolojileri A.Ş. https://porima3d.com/products/porima-abs-filament (accessed June 20, 2025).
[23] International A. ASTM D3039 / D3039M - 17 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials 2017. https://doi.org/10.1520/D3039_D3039M-17.