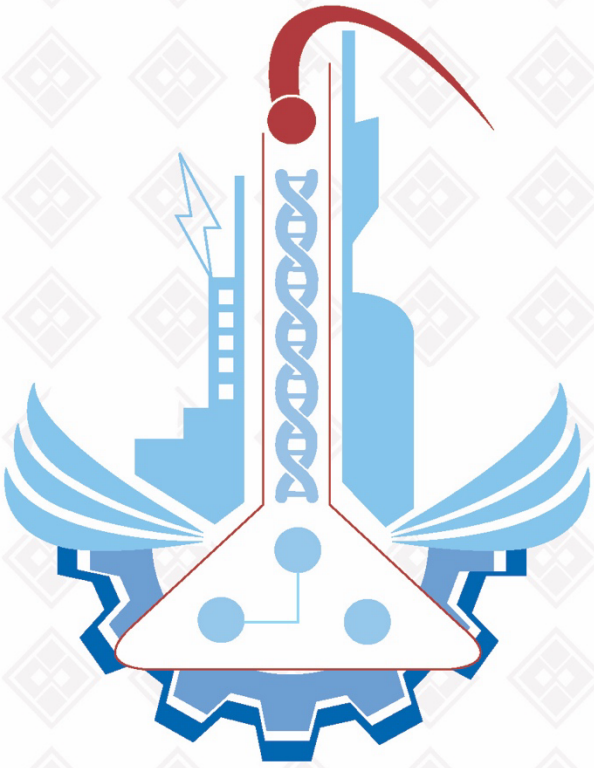
ISSN: 1308-9072

Cilt: 37 / Sayı: 2 / Yıl: 2025

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ



F ı r a t Ü n i v e r s i t e s i
Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)
Cilt:37, Sayı:2, Yıl: 2025
ISSN: 1308 - 9072

İ l e t i ş i m

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
23119, ELAZIĞ

Tel: 0 424 212 27 07
Faks: 0 424 236 99 55
e-posta: fenbilim@firat.edu.tr

Bu dergi yılda 2 kez ve hakemli olarak yayımlanır.

Derginin Eski adı: *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*
Derginin Eski ISSN numarası: *1300-2708*

https://dergipark.org.tr/tr/pub/fumbd

Fırat Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)

Sahibi

Prof Dr. Fahrettin GÖKTAŞ
Fırat Üniversitesi Rektörü

Genel Yayın Yönetmeni

Prof. Dr. Burhan ERGEN
F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Baş Editör

Doç. Dr. Ferhat UÇAR
F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür Yrd.

Editör

Doç. Dr. Nida KATI
Fırat Ü. Teknoloji F. Öğretim Üyesi

DANIŞMA KURULU

Üye	Kurum
Prof. Dr. Abdülkadir ŞENGÜR	Fırat Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Ahmet Kadri CETİN	Fırat Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Ali KARCI	İnönü Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Ali YAZICI	Atılım Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Deniz UNER	Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Ercan AKSOY	Fırat Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Erhan AKIN	Fırat Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Ertan GÖKALP	Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Güneş S. KÜRKÇÜOĞLU	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Haluk KORALAY	Gazi Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Hanifi GÜLDEMİR	Fırat Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Hikmet GEÇKİL	İnönü Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. İlhami KİZİROĞLU	OSTİM Teknik Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. İzzet KARA	Pamukkale Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Mahmut ELP	Kastamonu Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Ömer AKIN	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Resul DAŞ	Fırat Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Serdar SALMAN	Milli Savunma Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Serkan DAĞ	Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Seyfettin ÇAKMAK	Süleyman Demirel Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Turgay SEÇKİN	İnönü Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Ülkü YETİŞ	Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Türkiye
Prof. Dr. Zühtü Hakan AKPOLAT	Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Türkiye

Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)
37-2, 2025

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

1. **AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik Kare Kapların Derin Çekme Performansı: Kalıp Geometrisi ve Parametre Optimizasyonu**
Deep Drawing Performance of AISI 304 Austenitic Stainless Steel Square Cups: Die Geometry and Parameter Optimization
Engin Ünal, Umutcan Özkan 533-541

2. **General Evaluation and Energy Analysis on the Effects of Installation Faults in Air Conditioning Systems**
Klima Sistemlerinde Kurulum Hataları Etkilerine İlişkin Genel Değerlendirme ve Enerji Analizi
Ruveyda Ergen, Mert Gürtürk 543-555

3. **Kırık Kemiklerin Kaynamasında Kullanılan İmplant Materyalin Giriş Aksını Konumlama Yöntemi ve 3D Slicer Eklenti Yazılımının Geliştirilmesi**
The Method of Positioning the Insertion Axis of The Implant Material Used in The Union of Broken Bones and the Development of the 3D Slicer Add-On Software
Muhammed Fatih Talu, Oktay Belhan 557-567

4. **Deprem Kuvveti Etkisi Altında Çelik Yapıların Davranışının Yapay Sinir Ağları ile Değerlendirilmesi**
Evaluation of the Behavior of Steel Structures Under Seismic Force Using Artificial Neural Networks
Niyazi Safa Aksu, Yüksel Esen, Muhammed Atar 569-580

5. **İşaret Uzayı Çeşitliliği ve Yeniden Yapılandırılabilir Akıllı Yüzeyler Aracılığıyla Kablosuz Haberleşme Başarımının Arttırılması**
Augmenting Wireless Communication Performance through Signal Space Diversity and Reconfigurable Intelligent Surfaces
İrem Yüce, Mustafa Anıl Reşat, Serdar Özyurt 581-589

6. **Ticari Araç Filoları için Sürdürülebilirlik Odaklı Elektrikli Araç Batarya Seçimi: Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımı ile Bir Değerlendirme**
Sustainability-Oriented Electric Vehicle Battery Selection for Commercial Fleets: An Evaluation Using a Multi-Criteria Decision-Making Approach
İrem Duzdar, Eylül Aslan 591-610

7. **An Innovative Solution to the Map Coloring Problem Using the Malatya Vertex Coloring Algorithm**
Malatya Düğüm Renklendirme Algoritması Kullanılarak Harita Renklendirme Problemi için Yenilikçi Bir Çözüm
Cezayir Karaca, Selman Yakut 611-621

8. **Konfeksiyon Yan Sanayi Sektöründeki Pazarlama Sorunlarının Analitik Ağ Süreci Yöntemi ile Analizi**
Analysis of Marketing Problems in the Apparel Supplier Industry Sector with Analytical Network Process Method
Seyda Gur, Fatma Kaya 623-634

9. **Experimental Investigation of the Use of Refrigerant in the Cooling System of the Internal Combustion Engine: Preliminary Study**
İçten Yanmalı Motorun Soğutma Sisteminde Soğutucu Akışkan Kullanımının Deneysel İncelenmesi: Ön Çalışma
Yavuz Selim Kayalı, Tahsin Yüksel, Abdullah Kapıcıoğlu 635-649

10. **Doğu Anadolu Fay Zonu Ilıca Segmentindeki Traverten Oluşumlarına Bir Örnek: Hacılar (Bingöl) Sırt Tipi Traverteni**
An Example of Travertine Formations in the Ilıca Segment of the East Anatolian Fault Zone: Hacılar (Bingöl) Ridge Type Travertine
Serap Çolak Erol, Ercan Aksoy 651-663

11. **Elazığ Hamzabey Barajı, Baraj Göl Aynası Altında Kalan Bitki Türleri**
Elazığ Hamzabey Dam, Plant Species Below The Dam Lake Surface Area
Gülden Doğan, Eyup Bağci 665-684

12. **Investigation of the Bioactivity Properties of TiZrCrNb0.3Ta0.07 Medium Entropy Alloy Produced from TNTZ Waste**
TNTZ Atıklarından Üretilen TiZrCrNb0.3Ta0.07 Orta Entropili Alaşımın Biyoaktivite Özelliklerinin Araştırılması
Nihal Yayla, Ömer Güler, Yakup Say, Harun Güzel 685-698

13. **Anomaly Detection in Unmanned Aerial Vehicle Telemetry Using Automated Machine Learning**
İnsansız Hava Aracı Telemetrisinde Otomatik Makine Öğrenmesi Tabanlı Anomali Tespiti
Anıl Sezgin, Rasim Keskin, Aytuğ Boyacı 699-709

14. **BreakHis Veritabanı Kullanılarak Meme Kanseri Tespiti için Çok Girişli CNN Modelleri**
Multi-Input CNN Models for Breast Cancer Detection Using BreakHis Database
Adnan Köşker, Ümit Budak, Musa Çıbuk, Abdülkadir Şengür 711-721

15. **Akıllı Turizmde Yapay Zeka Kullanımı: Diyarbakır İli için Evrişimsel Sinir Ağı Tabanlı Bir Turistik Yer Sınıflandırması**
Usage of Artificial Intelligence in Smart Tourism: A CNN-based Landmark Classification for Diyarbakir Province
Yunus Korkmaz 723-735

16. **Experimental Investigation of the Effect of Raster Angle and Printing Speed on Mechanical Performance and Fracture Behavior of ABS Material Produced by FFF Technology**
FFF Teknolojisi ile Üretilen ABS Malzemenin Mekanik Performansı ve Kırılma Davranışı Üzerinde Raster Açısı ve Baskı Hızının Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi
Mehmet Kopar, Medeni Sömer, Mahmut Batuhan Çalışkan 737-746

17. **Vakum Karbürlenmiş Toz Metalurjisi Çelik Parçalara Uygulanan Çift Faz Isıl işleminin Mekanik Özelliklere Etkisi**
Effect of Dual Phase Heat Treatment on Mechanical Properties of Vacuum Carburized Powder Metallurgy Steel Parts
Özer Pamuk 747-761

18. **Application of Watershed Segmentation on Biomedical Images as an Educational Tool**
Havza Bölütlemesinin Biyomedikal Görüntüler Üzerinde Bir Eğitim Aracı Olarak Uygulanması
Şefika Çağlan, Ali Değirmenci, İlyas Çankaya, Ömer Faruk Göktaş 763-780

19. **Kemerli Yapıyla Güçlendirilmiş Sandviç Plakaların Eğme Davranışlarının İncelenmesi**
Investigation of Bending Behavior of Sandwich Plates Reinforced with Arched Structure
Serdar Kaveloğlu 781-790

20. **Rejeneratif Tasarım ve Sürdürülebilirlik Üzerine Bibliyometrik Analiz**
Bibliometric Analysis on Regenerative Design and Sustainability
Pınar Kısa Ovalı, Güzide Gider 791-805

21. **Akin (Sandıklı/Afyonkarahisar) Bazaltlarının Demiryolu Balastı Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi**
Evaluation of the Use of Akin (Sandıklı/Afyonkarahisar) Basalts as Railway Ballast
Mehmet Kozak 807-812

22. **Araç Takip Modellerinin Karma Otoyol Trafik Akım Başarımlarına Olan Etkisinin Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi: İstanbul E-80 Otoyolu Örneği**
A Comparative Analysis of the Effects of Car-Following Models on Mixed Freeway Traffic Flow Performance: The Case of Istanbul E-80 Freeway
Mehmet Ali Silgu 813-822

23. **Sıcak Dövme Sektöründe Üretim Planlama için Yönetim Bilişim Sistemi Geliştirilmesi**
Development of Management Information System for Production Planning in Hot Forging Industry
Maide Sina Nur Demir, Nadide Gizem Gürson Dolar, Hadi Gökçen 823-838

24. **Mobil Uygulama Kullanıcı Yorumları Üzerinde Metin Madenciliği ve Müşteri Memnuniyeti Analizi: E-Ticaret Markası Örneği**
Text Mining and Customer Satisfaction Analysis on Mobile Application User Reviews: An E-Commerce Brand Case Study
Mehmet Kayakuş, Fatma Yiğit Açıkgöz 839-852

25. **AFAD Yönetim Döngüsünün Depreme Uyarlanarak Riskleri Azaltmadaki Etkisinin ANP Yöntemi ile Analizinin Yapılması, Sağlık ve Güvenliğe Etkisinin Yorumlanması**
Analysis of the Effect of AFAD Management Cycle on Reducing Risks by Adapting to Earthquake with ANP Method and Interpretation of its Effect on Health and Safety
Güler Aksüt 853-861

26. **Metal Eklemeli ve Geleneksel İmalat Yöntemleriyle Üretilen Alüminyum Profillerin Sıcaklık Davranışının Bulanık Mantık ve Yapay Zekâ Tabanlı Modellemesi**
Modeling the Temperature Behavior of Aluminum Profiles Produced by Metal Additive and Conventional Manufacturing Methods Using Fuzzy Logic and Artificial Intelligence
Koray Özsoy, Bekir Aksoy 863-875

27. **Hızlı Katılaştırma ile Üretilen Al84Y10Ni4Co2 Alaşımının Mekanik Özelliklerinin ve Faz Dönüşümlerinin İncelenmesi**
Investigation of Mechanical Properties and Phase Transformations of Al84Y10Ni4Co2 Alloy Produced by Rapid Solidification
Musa Gögebakan 877-884

28. **İç Mekanda İşleve Göre Renk Tercihlerinin Mekansal Deneyim ve Sanal Gerçeklik Yöntemleriyle Değerlendirilmesi: Yaşam Alanı ve Hasta Odası Örneği**
Evaluating Interior Color Preferences by Function through Spatial Experience and Virtual Reality: The Case of Living Spaces and Patient Rooms
Fatmanur Yüksektepe, Esra Küçükkılıç Özcan 885-896

29. **KarcıFANN Yönteminin Yakınsama Kabiliyetinin Analiz Edilmesi**
Analyzing the Convergence Ability of the KarcıFANN Method
Hulya Saygili, Meral Karakurt, Ali Karci 897-907

30. **A Generative AI-Driven Analysis of Airline Passenger Feedback: Revealing What Matters Most**
Üretken Yapay Zekâ Destekli Bir Havayolu Yolcu Geri Bildirimi Analizi: En Önemli Olanı Ortaya Çıkarmak
Hakan Koçak 909-918

31. **Sakaltutan Geçidi Yerine Önerilen Eğimsiz Tünelin Emisyon, Yakıt Tüketimi ve Ekonomik Analizi**
Emission, Fuel Consumption and Economic Analysis of Level Tunnel Proposed to Replace the Sakaltutan Pass
Oğuz Kürşat Demirci 919-933

32. **Elektroeğirme Yöntemi ile HA takviyeli PLA-PCL Nanofiber Üretimi**
Production of HA Reinforced PLA-PCL Nanofiber by Electrospinning Method
Gül Tosun, Özlem Aydın 935-942

MBD

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 533-541, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1699070

AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik Kare Kapların Derin Çekme Performansı: Kalıp Geometrisi ve Parametre Optimizasyonu

Engin ÜNAL[1*], Umutcan ÖZKAN[2]
[1] Makine Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
[2] Makine Mühendisliği Teknolojileri Programı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
[*1] enginunal@firat.edu.tr, [2] umutcanozkan23@gmail.com

(Geliş/Received: 14/05/2025; Kabul/Accepted: 04/07/2025)

Öz: Bu çalışmada, AISI 304 östenitik paslanmaz çelik sacların kare kap derin çekilmesinde kalıp geometrisi (matris radyüsü: 4, 6, 8 mm; matris-baskı plakası açısı: 0°, 5°, 10°, 15°) ve işlem parametrelerinin (baskı plakası kuvveti (BPK): 5500, 7950, 10400 N) şekillendirilebilirlik üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Tam faktöriyel deney tasarımı (36 kombinasyon) kullanılarak maksimum zımba kuvveti, ondülasyon, yırtılma ve kulaklanma gibi kusurların parametrelere bağlı değişimi analiz edilmiştir. Sonuçlar, matris açısının 5°-10° aralığında, matris radyüsünün 6-8 mm'de ve BPK'nın 7950-10400 N aralığında optimal performans sağladığını göstermiştir. Özellikle 10° açıda yırtılma riski artarken, radyüsün 8 mm'ye çıkarılması ondülasyonları azaltmış ancak lokal gerilim birikimine neden olmuştur. BPK'nın artması, ondülasyonları minimize etmiş ancak aşırı sıkıştırma plastik deformasyon kapasitesini sınırlamıştır. Bu bulgular, endüstriyel uygulamalarda kusursuz üretim için parametre optimizasyonuna kritik katkı sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Derin çekme, AISI 304, parametre optimizasyonu, şekillendirilebilirlik.

Deep Drawing Performance of AISI 304 Austenitic Stainless Steel Square Cups: Die Geometry and Parameter Optimization

Abstract: This study experimentally investigates the effects of die geometry (matrix radius: 4, 6, 8 mm; die-blank holder angle: 0°, 5°, 10°, 15°) and process parameters (blank holder force (BHF): 5500, 7950, 10400 N) on the formability of AISI 304 austenitic stainless steel sheets in square cup deep drawing. A full factorial experimental design (36 combinations) was employed to analyze the variations in maximum punch force, wrinkling, tearing, and earing defects. Results indicate that optimal performance is achieved with a die angle of 5°-10°, matrix radius of 6-8 mm, and blank holder force of 7950-10400 N. While a 10° angle increased tearing risk, increasing the radius to 8 mm reduced wrinkling but caused localized stress concentration. Higher blank holder force minimized wrinkling but limited plastic deformation due to over-constraint. These findings provide critical insights for parameter optimization in industrial applications to achieve defect-free production.

Key words: Deep drawing, AISI 304, parameter optimization, formability.

1. Giriş

Günümüz endüstrisinde üretim verimliliği, zaman ve maliyet optimizasyonu ile doğrudan ilişkilidir. Sac metal kalıpçılığı, seri üretimde hız, kalite ve ekonomik avantajlar sağlayan kritik bir imalat yöntemidir. Bu yöntem içerisinde öne çıkan derin çekme işlemi, sac levhaların üç boyutlu kap formlarına dönüştürülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Ancak, işlem sırasında malzeme akışı, gerilme dağılımı ve plastik deformasyon gibi dinamiklerin kontrolü, matris radyüsü, baskı plakası kuvveti (BPK) ve matris-baskı plakası açısı gibi parametrelerin optimizasyonunu gerektirir [2]. Yetersiz parametre seçimi, buruşma (wrinkling), yırtılma (tearing) ve geri esneme (springback) gibi kusurlara yol açarak ürün kalitesini ve üretim verimliliğini düşürmektedir [3].

Derin çekme işleminin karmaşıklığı, çoklu parametrelerin etkileşiminden kaynaklanır. Özellikle AISI 304 östenitik paslanmaz çelik gibi yüksek mukavemetli malzemelerde, şekillendirme sırasında oluşan gerilme konsantrasyonları ve deformasyon davranışı, parametre optimizasyonunu kritik hale getirmektedir [4]. Literatürde, bu parametrelerin etkilerini incelemek için deneysel ve sayısal yöntemlerin entegre kullanımı önerilmiştir.

Derin çekme parametrelerinin optimizasyonu, malzeme davranışı ve ürün kalitesi üzerine yoğunlaşan çok sayıda çalışmaya konu olmuştur. Kayhan ve Kaftanoğlu [1], yüksek mukavemetli çeliklerde ısıtma ve soğutma stratejileri ile limit çekme oranını (LÇO) %25,58 artırmıştır. Luo ve ark. [2], mikro derin çekmede baskı plakası boşluğunun kalınlık dağılımı ve şekil doğruluğu üzerindeki etkisini vurgularken; Dal [3], kare ve silindirik kaplarda buruşma analizi için farklı akma kriterlerini karşılaştırmıştır.

[*] Sorumlu yazar: enginunal@firat.edu.tr Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-0501-3690, [2] 0000-0002-2043-4733

Östenitik paslanmaz çeliklerin deformasyon davranışı, iki fazlı modellerle incelenmiş [4], uzun vadeli termal yaşlanmanın kırılma direncini düşürdüğü gösterilmiştir [5]. Eklemeli üretimle elde edilen SLM 304L çeliğinin yorulma performansı [6] ve AISI 304'ün kesme parametrelerine bağlı kalıcı gerilme dağılımları [7] detaylandırılmıştır.

Parametre optimizasyonunda Taguchi yöntemi [8] ve hidromekanik derin çekme [9,10] gibi yaklaşımlar, buruşma ve yırtılma kontrolünde etkili bulunmuştur. Matris açısı ve BPK'nın LÇO üzerindeki pozitif etkisi [11,12], radyüs artışının malzeme akışını iyileştirdiği ve sıcaklık artışının homojen kalınlık dağılımı sağladığı [13,14] rapor edilmiştir.

Mevcut literatür, derin çekmenin çeşitli yönlerini, ayrı ayrı parametrelerin etkilerini, malzeme davranışlarını ve kusur analizlerini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Ancak, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin şekillendirilebilirliği üzerindeki matris-baskı plakası açısı, matris radyüsü ve baskı plakası kuvveti gibi parametrelerin eşzamanlı ve etkileşimli etkilerinin deneysel olarak incelenmesi konusunda önemli bir araştırma boşluğu bulunmaktadır. Önceki çalışmalar bu parametrelerden bazılarını bağımsız olarak veya sınırlı kombinasyonlarda ele almış olsa da özellikle AISI 304 için bu parametrelerin birleşik etkisinin kapsamlı deneysel analizi henüz yeterince araştırılmamıştır.

Bu çalışma, 0,8 mm kalınlığındaki AISI 304 östenitik paslanmaz çelik sac levhaların derin çekme sürecinde bu üç kritik parametrenin (matris-baskı plakası açısı, matris radyüsü ve baskı plakası kuvveti) eşzamanlı etkilerini deneysel olarak inceleyen özgün ve sistematik bir analiz sunmaktadır.

AISI 304 malzemeye uygulanan çoklu parametrelerin eşzamanlı etkilerine odaklanan bu kapsamlı deneysel çalışma, derin çekme mekaniği ve optimizasyonu alanındaki kalıp tasarımı ve proses optimizasyonu için pratik veriler sağlayarak böylece sac metal şekillendirme endüstrisinde ürün kalitesini ve üretim verimliliğini artırmayı ve mevcut bilgi birikimine önemli bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada, 0,8 mm kalınlığında AISI 304 östenitik paslanmaz çelik sac malzeme kullanılmıştır. Malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1'de, fiziksel ve mekanik özellikleri ise Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir. Mekanik özellikler, 30 kN kapasiteli evrensel çekme test cihazında 0°, 45° ve 90° haddeleme açılarında yapılan çekme deneyleri ile belirlenmiştir.

Tablo 1. AISI 304 paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %).

Element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
AISI 304	≤0,08	≤2,0	≤0,045	≤0,03	≤0,75	18–20	8–10

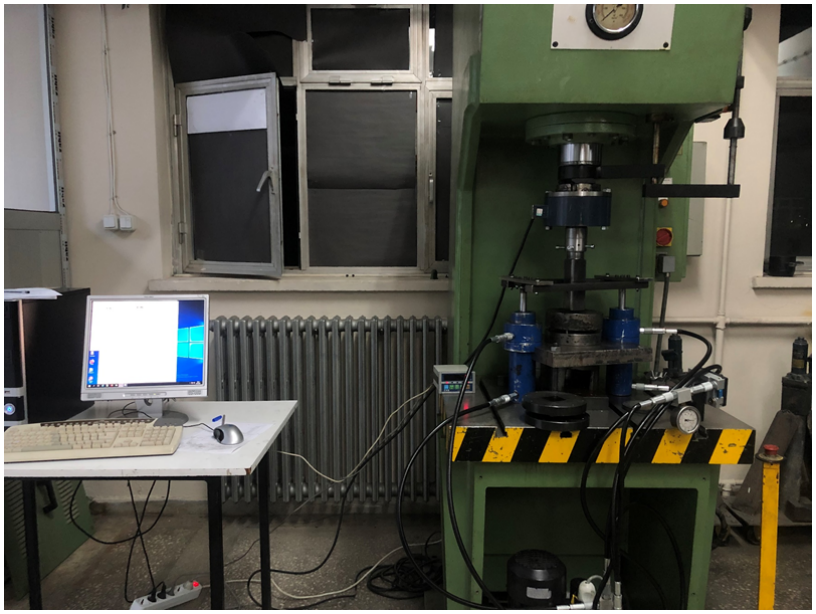
Tablo 2. AISI 304 paslanmaz çeliğin fiziksel özellikleri.

Özellikler	Değerler
Öz kütlesi (kg/m³)	8000
Erime Sıcaklığı (°C)	1450
Elektriksel direnç miktarı (Ωm)	$0,072x10^{-6}$
Isı geçirgenliği (W/m.K)	17,2

Tablo 3. AISI 304 paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri.

Hadde Açısı (°)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Sertlik (HB)	Elastisite Modülü (GPa)
0	285,7	391,4	92	193
45	284,2	388,4	92	193
90	316,3	394,6	92	193

Deneyler, Şahinler marka 60 ton kapasiteli C tipi hidrolik pres tezgâhı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kalıp elemanları (matris, zımba, baskı plakası), 1.2080 soğuk iş takım çeliği (58 HRC) ve CK45 çeliğinden (42 HRC) imal edilmiştir. Kuvvet ölçümü için CAS LS-20T yük hücresi ve veri kaydı için CAS 1500A indikatör kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Deney seti ve bağlı olduğu hidrolik pres tezgâhı.

Tam faktöriyel deney tasarımı (36 kombinasyon) ile parametre etkileri değerlendirilmiştir (Tablo 4). Sürtünmeyi azaltmak ve yüzey çizilmelerini önlemek için endüstriyel yağlama yağı kullanılmıştır.

Tablo 4. Derin çekme deneyi parametrelerinin değerleri.

Derin çekme deneyi parametreleri	Seviyeleri
Matris radyüsü (mm)	4 – 6 – 8
Matris-baskı plakası açısı (°)	0 – 5 – 10 – 15
Baskı plakası kuvveti (N)	5500 – 7950 – 10400

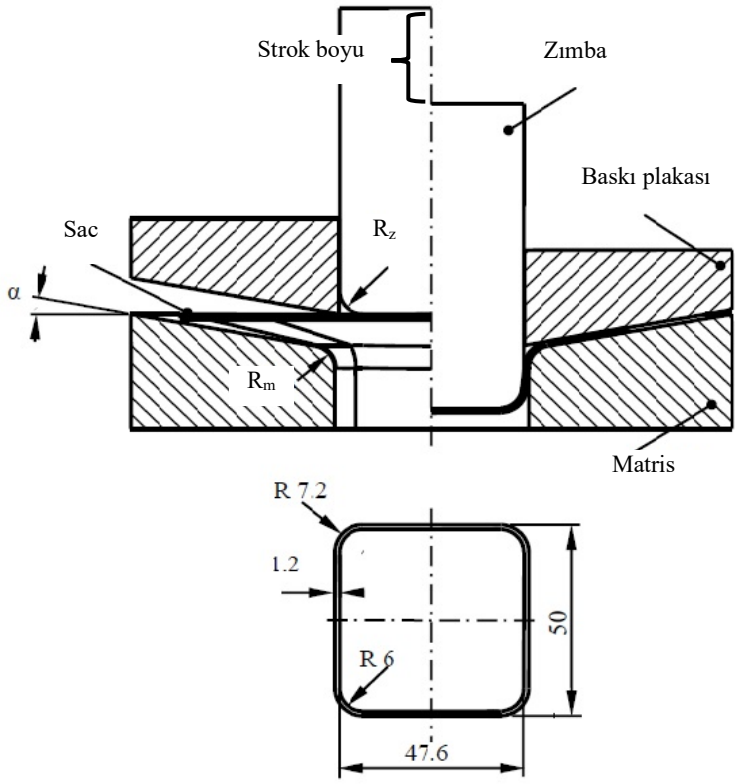
İlkel parça çapı (100 mm), kare kaplar için LÇO prensipleri kullanılarak Denklem 1 ve Denklem 2 ile hesaplanmıştır:

$$\beta = \frac{D_0}{d_p} \text{ (LÇO)} \quad (1)$$

$$D_0 = \sqrt{d_p^2 + 4d_p h} \quad \text{(İlkel parça çapı)} \tag{2}$$

Burada D_0 ilkel parça çapı, d_p zımba çapı, h ise kap yüksekliğidir.

İlkel parçalar, CNC plazma kesim tezgâhı ile 100 mm çapında kesilmiştir. Matris ve zımba, hidrolik prese merkezlenerek monte edilmiştir. Sabit zımba hızında (4 mm/s) gerçekleştirilmiş, kuvvet-deplasman verileri ve ürün kalitesi (yırtılma, buruşma) kaydedilmiştir. Deneylerde kullanılan deney elemanlarının ölçüleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan elemanların ölçüleri.

3. Sonuçlar ve Tartışma

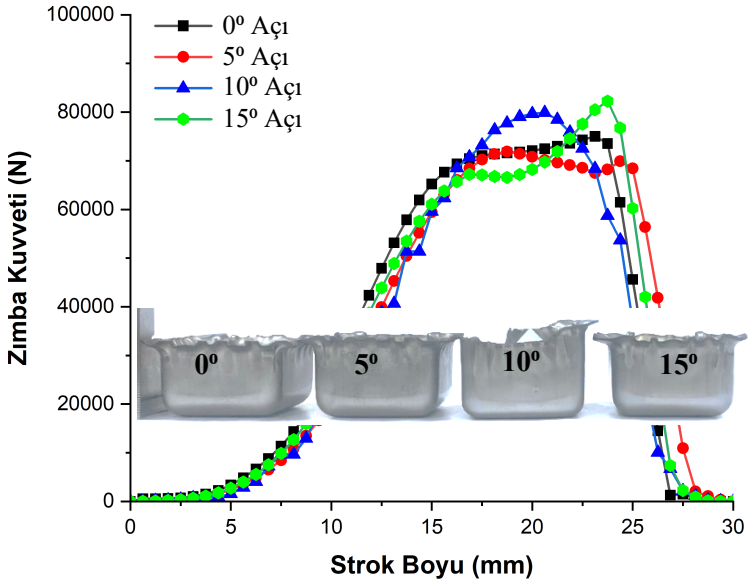
Derin çekme işleminde parametre optimizasyonu, şekillendirilebilirlik ve ürün kalitesi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu çalışmada, AISI 304 östenitik paslanmaz çelik sac malzeme kullanılarak derin çekme işlemine etki eden üç kritik parametrenin (matris-baskı plakası açısı, matris radyüsü ve BPK) şekillendirilebilirlik üzerindeki etkileri deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, maksimum zımba kuvveti, ondülasyon, yırtılma ve kulaklanma gibi kusurların parametrelere bağlı değişimini ortaya koymaktadır.

3.1. Parametrelerin Şekillendirilebilirliğe Etkisi

Açının artması (0° → 15°), genel olarak maksimum zımba kuvvetinde azalmaya neden olmuştur (Şekil 3). Kalıplama parametrelerinin R 4 mm ve BPK=5500 N durumunda 0° açıda 88996,32 N olan kuvvet, 15° açıda 86426,1 N'a düşmüştür (Tablo 5). Ancak 10° açıda ani yırtılmalar gözlemlenmiş (Şekil 3), bu durum şekillendirilen malzemenin çekme gerilmelerini aştığını göstermektedir. Literatürdeki [15] nolu referanstaki çalışmalar da benzer şekilde 8-12° aralığında gerilim birikiminin arttığını belirtmiştir.

Tablo 5. Matris-Baskı plakası açısının maksimum zımba kuvvetine etkisi (R4, BPK=5500 N).

Açı (°)	100 mm Kuvvet (N)	105 mm Kuvvet (N)	Ondülasyon Durumu
0	75026,88	88996,32	Yüksek
5	71868,06	87152,04	Orta
10	79873,02	84640,68	Yırtılma
15	82266,66	86426,10	Düşük



Şekil 3. R4 için BPK'nın 5500 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti ve elde edilen kaplar.

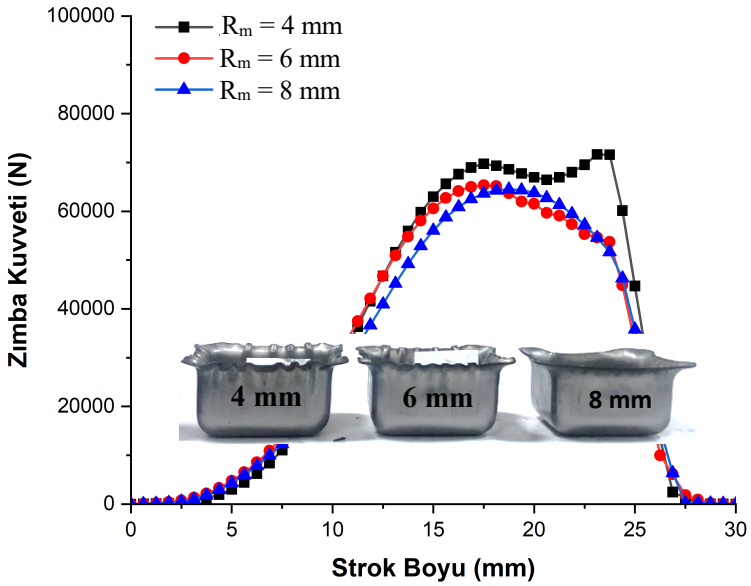
Radyüsün 4 mm'den 8 mm'ye artmasıyla maksimum zımba kuvveti düşmüştür (Şekil 4). 4 mm radyüste 100 mm ilkel parça çapı için 71652,24 N olan kuvvet, 8 mm radyüste 64530,18 N'a düşmüştür (Tablo 6). Ancak radyüsün 8 mm'ye çıkarılması, ondülasyonlarda beklenmeyen bir artışa neden olmuştur. Bu durum, aşırı radyüsün malzeme akışını engelleyerek lokal gerilim birikimine yol açtığını göstermektedir. Literatürdeki çalışmalar genellikle radyüs artışının ondülasyonları azalttığını belirtse de [16], bu çalışma kritik bir radyüs eşiğinin varlığına işaret etmektedir. Bu bulgu, radyüs büyüdükçe malzeme akışının kolaylaşması ve gerilim dağılımının homojenleşmesiyle açıklanabilir [11]. Ancak 4 mm radyüste ondülasyonların artması, malzeme akış dinamiklerinin radyüs boyutuna bağlı olarak değişebileceğini ve optimum radyüs değerinin proses parametrelerine göre belirlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, 6 mm radyüste hem kuvvet hem de ondülasyon açısından dengeli bir performans gözlemlenmiştir.

BPK'nın 5500 N'dan 10400 N'a artmasıyla maksimum zımba kuvveti önce artmış, ardından azalmıştır (Şekil 5). İlkel parça çapının 100 mm olması, BPK=5500 N'da 74968,02 N olan kuvvet, BPK=7950 N'da 76476,9 N'a yükselmiş, BPK=10400 N'da ise 71632,62 N'a düşmüştür (Tablo 7).

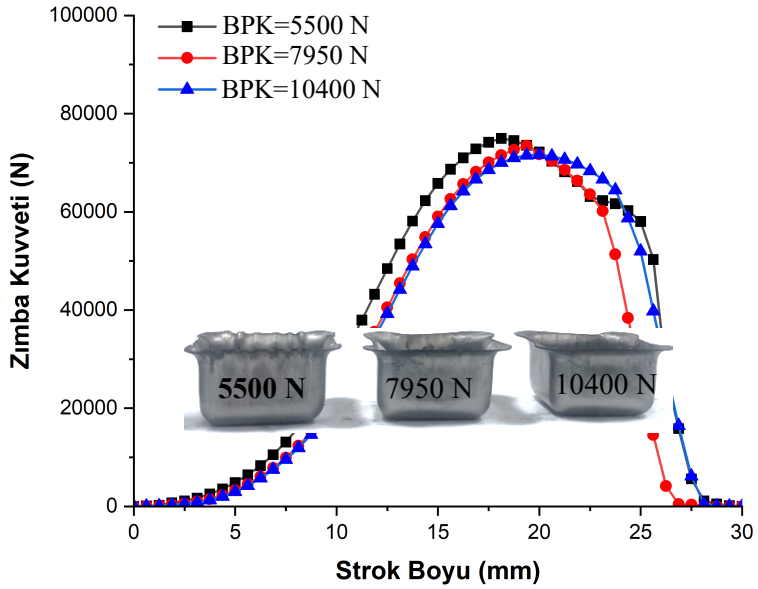
BPK artışı, ondülasyonları belirgin şekilde azaltmıştır. BPK=5500 N'da yüksek ondülasyon gözlemlenirken, BPK=10400 N'da bu kusurlar minimum seviyeye inmiştir (Şekil 5). Ancak BPK=10400 N'da kuvvetin düşmesi, malzemenin aşırı sıkıştırılmasının plastik deformasyonu sınırladığını göstermektedir. Literatürdeki çalışmalar, BPK'nın malzeme sıkışmasını kontrol etmedeki kritik rolünü vurgulamaktadır [17].

Tablo 6. Matris radyüsünün maksimum zımba kuvvetine etkisi (15° Açı, BPK=7950 N).

Radyüs (mm)	100 mm Kuvvet (N)	105 mm Kuvvet (N)	Ondülasyon Durumu
4	71652,24	77518,62	Yüksek
6	65314,98	76851,54	Azalmış
8	64530,18	74026,26	Düşük



Şekil 4. 15º için BPK'nın 7950 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti ve elde edilen kaplar.



Şekil 5. 5º ve radyüs 6 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti ve elde edilen kaplar.

Tablo 7. BPK'nın maksimum zımba kuvvetine etkisi (R 6, 5° Açı).

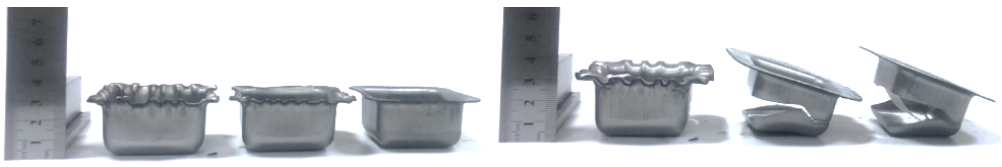
BPK (N)	100 mm Kuvvet (N)	105 mm Kuvvet (N)	Ondülasyon Durumu
5500	74968,02	84366,00	Yüksek
7950	76476,90	86798,88	Orta
10400	71632,62	81795,78	Düşük

Bu sonuçlar, [17]'de vurgulandığı gibi BPK'nın malzeme sıkışmasını kontrol etmedeki kritik rolünü doğrulamaktadır. BPK=7950 N'da kuvvetin maksimum seviyeye ulaşması, [12] nolu referanstaki optimum BPK değerlerinin bizim çalışmamızda elde ettiğimiz ideal BPK değeri olan 7950 N ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Ancak BPK=10400 N'da kuvvetin düşmesi, aşırı sıkıştırmanın deformasyon kapasitesini azalttığını gösterir. Bu durum, [11]'deki "plastik deformasyon sertleşmesi" hipotezini desteklemektedir.

Bu çalışmanın sonuçları, özellikle matris açısı ve BPK ilişkisi konusunda [15] ve [11] nolu referanslar ile uyumludur. Ancak, 10° açıdaki yırtılmalar, [17]'de belirtilen kritik gerilim eşiğinin altında kalmak için daha yüksek BPK gerektiğini göstermektedir. Ayrıca, radyüs artışının ondülasyonları azaltması, kaynak [12]'deki artan radyüs değerleri ile ondülasyonların azaldığı bulgusu bizim sonuçlarımızla örtüşmektedir.

3.3. İlkel Parça Boyutlarının Numune Deformasyonlarına Olan Etkisi

Derin çekme işleminde oluşan temel hatalar; buruşma, yırtılma, kulaklanma incelme, BPK'den oluşan çatlak, dalgalanma (pot), girinti izi, matris izi, sac malzeme kaynaklı hatalar olarak söylenebilir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu tespit edilen hatalar ise; çekilen numunelerin üst kısımlarında ve yan yüzeylerinde oluşan buruşma, aynı bölgelerde oluşan yırtılma, numune taban yüzeyine paralel olarak yırtılma ve çatlak, taban yüzeyinde bulunan köşelerde incelme olarak gözlemlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde ilkel parça çapı büyüdükçe hidrolik pres tarafından zımba ile aktarılan kuvvetin arttığı ölçülmüştür. Aynı zamanda ilkel parça çapının büyümesi ve uygulanan kuvvetin artması ile numuneler üzerindeki deformasyonların oluştuğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte bu deformasyonu azaltıcı parametreler kullanılmıştır. Örneğin Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar incelendiğinde BPK'nın artması numunelerin üst kısımlarında oluşan ondülasyonu azalttığı gözlemlenmiştir. Ancak BPK'nın ve ilkel parça çapının aynı anda arttırıldığı durumlarda numunelerin taban yüzeyine paralel olarak yırtılmalar gözlemlenmiştir. BPK'nın ve ilkel parça çapının arttığı durumda oluşan deformasyonlar ve taban yüzeyine paralel olarak oluşan yırtılmalar Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. 100 mm ve 105 mm ilkel parça çapında BPK'nın değişimi ile oluşan deformasyonlar.

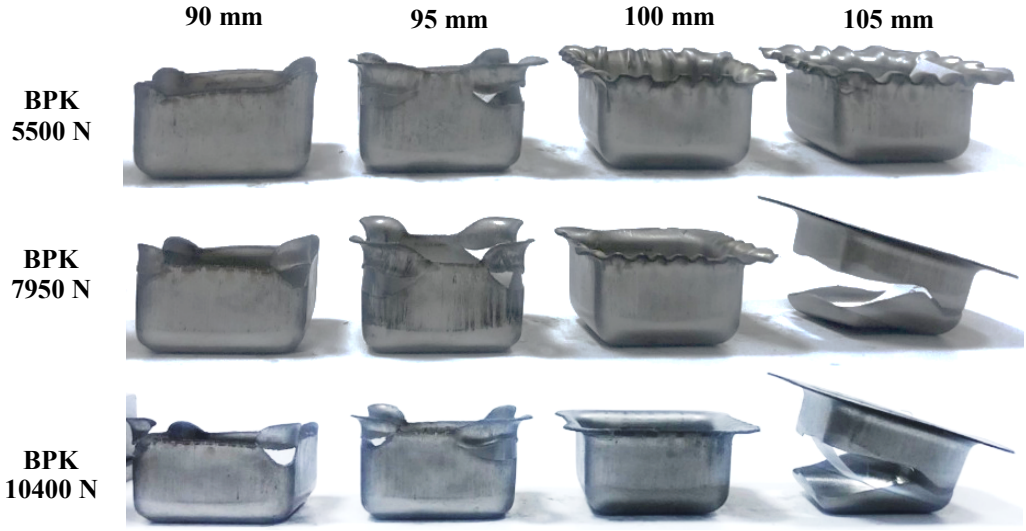
Şekil 6'da aynı şartlarda oluşturulan deney numuneleri incelendiğinde BPK'nın artması ile 100 mm ilkel parça çapındaki değişimler BPK'nın artması ile numunelerdeki üst kısımlarda oluşan ondülasyonlar azalmıştır. 105 mm ilkel parça çapındaki BPK'nın artması ile numunelerin üst kısımlarındaki ondülasyonlar azalmış

BPK'nın 5500 N olduğu durumda üst köşelerde yırtılma ve aynı zamanda tabana paralel şekilde yırtılma görülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu oluşan bazı deformasyonlar Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Deneysel çalışmalar sonucunda oluşan çeşitli deformasyonlar ve hatalar.

Yapılan deneysel çalışmalarda ilkel parça boyutlarının etkinliğini araştırmak amacıyla matris-baskı plakası açısının 0º, matris radyüsünün 4 mm, BPK'nın değiştirilerek hazırlanan deney düzeneğinde 90 mm ve 95 mm ilkel parça çapıyla deneyler yapılmıştır. Bu deneylere ait olan numuneler Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. İlkel parça çaplarının şekillendirilebilirliğe olan etkisi.

Şekil 8'de verilen numuneler incelendiğinde BPK'nın 5500 N olduğu durumda oluşturulan numuneler ilkel parça çapının artması ile kulaklanmalar artmış ve buna bağlı olarak ondülasyonlar artmıştır. 95 mm ilkel parça çapında ise yırtılmalar oluşmuştur. BPK'nın 7950 N olduğu durumda ilkel parça çapının artması ile kulaklanmalar oluşmuş fakat BPK'nın artmış olmasından dolayı ondülasyonlarda bir azalma görülmüştür. Bir önceki BPK ile aynı olarak 95 mm ilkel parça çapında yırtılmalar oluşmuş ve 105 mm ilkel parça çapında tabana paralel olarak yırtılma gerçekleşmiştir. 10400 N BPK'nın olduğu durumda ilkel parça çapının artması ile kulaklanmalar oluşmuş fakat BPK'nın artmış olmasından dolayı ondülasyonlar gözlemlenmemiştir. BPK'nın fazla gelmesinden dolayı ilkel parça matris içine akma konusunda zorlanmış 90 mm ve 95 mm ilkel parça çaplarında numunelerin üst köşelerinde yırtılmalar oluşmuştur. 105 mm ilkel parça çapında ise numunenin taban yüzeyine paralel bir yırtılma oluşmuştur.

4. Genel Sonuçlar

Bu çalışma, AISI 304 östenitik paslanmaz çelik sacların kare kap derin çekilmesinde matris-baskı plakası açısı, matris radyüsü ve BPK parametrelerinin şekillendirilebilirlik ve kusur oluşumu üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemiştir. Elde edilen bulgulara göre:

Matris-Baskı Plakası Açısı: 0° ile 15° arasında artan açı, maksimum zımba kuvvetinde genel bir azalmaya neden olmuştur. Ancak 10° açıda kritik gerilim birikimi sonucu yırtılmalar gözlemlenmiştir (Şekil 3). Literatürle uyumlu şekilde [13], 5°-10° aralığı dengeli bir performans sağlamıştır.

Matris Radyüsü: Radyüsün 4 mm'den 8 mm'ye artırılması, ondülasyonları azaltmış ancak 8 mm'de lokal gerilim artışına bağlı beklenmedik kusurlara yol açmıştır. Optimum radyüs değeri 6 mm olarak belirlenmiştir.

Baskı Plakası Kuvveti (BPK): BPK'nın 5500 N'dan 10400 N'a artırılması, ondülasyonları önemli ölçüde azaltmış ancak 10400 N'da plastik deformasyon kapasitesini sınırlamıştır (Tablo 7). BPK=7950 N, kuvvet ve kusur dengesi açısından optimal bulunmuştur.

Çalışma, parametrelerin etkileşiminin şekillendirilebilirliği nasıl belirlediğini ortaya koyarak endüstriyel süreçlerde verimlilik ve kalite artışına yönelik kritik veriler sunmaktadır. Özellikle 6 mm matris radyüsü, 5°-10° açı ve 7950 N BPK kombinasyonunun kusur minimizasyonu ve yüksek üretim verimi sağladığı görülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma ikinci yazarın "Östenitik Paslanmaz Çelik Sacların Kare Kap Derin Çekilmesinde Kalıp Geometrisi Ve İşlem Parametrelerinin Şekillendirilebilirliliğe Etkisinin Araştırılması" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından TEKF.21.30 protokol numaralı proje ile desteklenmiştir. E.Ü. fikir sahibi, U.Ö. deneyleri gerçekleştirdi, E.Ü. ve U.Ö. sonuçları yorumladı, E.Ü. makaleyi yazdı.

Kaynaklar

[1] Kayhan E, Kaftanoğlu B. Yüksek Mukavemet Çeliklerinin Derin Çekme Oranlarının Geliştirilmesi İçin Yapılan Deneysel Çalışmalar. Mak Tas İmlt Derg 2016;14(2):77-87.
[2] Luo L, Wei D, Zu G, Jiang Z. Influence of blank holder-die gap on micro-deep drawing of SUS304 cups. Int J Mech Sci 2021;191(April 2020):106065.
[3] Dal SR. Analysis of Wrinkling in Deep Drawing Processes. MSc, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2019.
[4] Gallée S, Pilvin P. Deep drawing simulation of a metastable austenitic stainless steel using a two-phase model. J Mater Process Technol 2010;210(6-7):835-843.
[5] Collins DA, Carter EL, Lach TG, Byun TS. A comprehensive study of the effects of long-term thermal aging on the fracture resistance of cast austenitic stainless steels. Nucl Eng Technol 2022;54(2):709-731.
[6] Zhang H, Li C, Xu M, et al. The fatigue performance evaluation of additively manufactured 304L austenitic stainless steels. Mater Sci Eng A 2021;802(October 2020):140640.
[7] Tekaslan Ö, Gerger N, Şeker U. AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerde kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüklerinin araştırılması. BAÜ FBE Derg 2008;10(2):3-12.
[8] Sener B, Kurtaran H. Optimization of process parameters for rectangular cup deep drawing by the Taguchi method and genetic algorithm. Mater Test 2022;58(3):238-245.
[9] Ballıkaya H, Savaş V, Özay Ç. Investigation of Sheet Thickness and Punch Force in Die Surface Angled Hydro-mechanical Deep Drawing Method. El-Cezeri. 2023;10(3):475-491.
[10] Ballikaya H, Savas V, Ozay C. The limit drawing ratio in die angled hydromechanical deep drawing method. Int J Adv Manuf Technol 2020;106(1-2):791-801.
[11] Özek C, Ünal E. The effect of die/blank holder angles on limit drawing ratio and wall thickness in deep drawing of square cups. GUMMFD. 2012;27(3):615-622.
[12] Özek C, Ünal E. Optimization and modeling of angular deep drawing process for square cups. Mater Manuf Processes 2011;26(9):1117-1125.
[13] Özek C, Bal M. The effect of die/blank holder and punch radiuses on limit drawing ratio in angular deep-drawing dies. Int J Adv Manuf Technol 2009;40(11-12):1077-1083.
[14] Özek C, Taşdemir V. AA 5754-O alaşiminin ilik derin çekilmesi üzerine kalip yüzey açisi ve baski plakasi kuvvetinin etkisinin deneysel araştirilmasi. GUMMFD. 2017;32(1):193-201.
[15] Tekaslan Ö, Gerger N, Şeker U. Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in "V" bending dies. Mater Des 2008;29(5):1043-1050.
[16] Ünal E, Özek C. A study on the wall thickness in the angular deep drawing process. Mater Test 2017;59(2):178-182.
[17] Takuda H, Mori K, Masachika T, Yamazaki E, Watanabe Y. Finite element analysis of the formability of an austenitic stainless steel sheet in warm deep drawing. J Mater Process Technol 2003;143-144(1):242-248.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 543-555, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1555335

General Evaluation and Energy Analysis on the Effects of Installation Faults in Air Conditioning Systems

Ruveyda Ergen[1], Mert Gürtürk[2*]
[1,2]Department of Energy Systems Engineering, Technology Faculty, Fırat University, 23100 Elazig, Turkey
[1]ruveydaergen@gmail.com, [2*]m.gurturk@gmail.com

(Geliş/Received: 24/09/2024; Kabul/Accepted: 28/05/2025)

Abstract: In this study, the installation faults in the condenser section of household air conditioning (AC) systems were investigated. The electricity consumption of AC systems in residential buildings has been steadily increasing, raising significant concerns. Numerous studies have been conducted to reduce the electricity consumption and emission values of these systems. However, it remains questionable whether these systems are being used and installed correctly. This study experimentally investigated the effects of installation faults in the condenser section. An energy analysis was carried out to evaluate the impact of these faults on system performance. The findings revealed that installation faults caused an increase in electricity consumption ranging from 40% to 60% compared to the baseline values. Additionally, the coefficient of performance (COP) of the AC system decreased by 48.75% due to these faults. A general evaluation was also performed to calculate the unnecessary energy consumption caused by installation faults in the condenser, considering the use of AC systems in Japan, the USA, and China. The results indicated that the annual unnecessary energy consumption due to installation faults ranged from 0.05 TWh to 1.26 TWh for each country.

Keywords: Air conditioning, Energy, Installation Fault, AC.

Klima Sistemlerinde Kurulum Hataları Etkilerine İlişkin Genel Değerlendirme ve Enerji Analizi

Öz: Bu çalışmada, ev tipi klima (AC) sistemlerinin yoğuşturucu bölümündeki montaj hataları araştırılmıştır. Konut binalarındaki AC sistemlerinin elektrik tüketimi sürekli artmakta ve önemli endişelere yol açmaktadır. Bu sistemlerin elektrik tüketimini ve emisyon değerlerini azaltmak için çok sayıda çalışma yürütülmüştür. Ancak, bu sistemlerin doğru bir şekilde kullanılıp kullanılmadığı ve kurulup kurulmadığı hala şüphelidir. Bu çalışmada, yoğuşturucu bölümündeki montaj hatalarının etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu hataların sistem performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için bir enerji analizi yapılmıştır. Bulgular, montaj hatalarının temel değerlere kıyasla %40 ila %60 arasında değişen bir elektrik tüketimi artışına neden olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, bu hatalar nedeniyle AC sisteminin performans katsayısı (COP) %48,75 oranında düşmüştür. Ayrıca, Japonya, ABD ve Çin'deki AC sistemlerinin kullanımı göz önünde bulundurularak, yoğuşturucudaki montaj hatalarının neden olduğu gereksiz enerji tüketimini hesaplamak için gemel bir değerlendirme yapılmıştır. Sonuçlar, kurulum hatalarından kaynaklanan yıllık gereksiz enerji tüketiminin her ülke için 0,05 TWh ile 1,26 TWh arasında değiştiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Klima, Enerji, Kurulum hatası, AC.

1. Introduction

The use of air conditioning (AC) systems has been increasing steadily over time, and their share in the total electrical energy consumption of buildings has reached significant levels, accounting for up to 34%. This trend underscores the critical importance of studies aimed at improving the efficiency and performance of AC systems [1]. Numerous studies in the literature have sought to enhance the performance of AC systems, with a particular focus on reducing energy consumption and emissions. Emission values, often assessed within the scope of life cycle climate performance (LCCP), are indirectly linked to energy consumption [2]. Looking ahead, advancements in AC system technology are anticipated to remain a prominent topic in the literature [3]. Review studies have explored themes such as innovative approaches [4], energy efficiency, cost-saving methods , and energy-use classifications [5], emerging technologies [6] with energy-saving methods receiving significant attention [7]. These reviews also address topics including technological advancements, ecological impacts, general analyses, and multidisciplinary approaches to improving cooling systems. A general approach was employed in a recent

* Sorumlu yazar: m.gurturk@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: [1]0000-0001-7909-7770, [2]0000-0003-0380-5704.

review to evaluate the energy performance of AC systems. It was found that many systems operate at efficiency levels far below their potential, with electricity consumption accounting for 38% of total energy use in these systems [1]. Researchers have also examined energy-saving developments and emerging technologies. For example, studies have focused on systems utilizing the Maisotsenko cycle, a thermodynamic approach to improving cooling efficiency [8]. In some reviews, a systems-based approach is prioritized over component-level analysis. Key systems examined include Liquid Desiccant AC Systems (LDAS) [9], comprehensive overview of the developments in LDAS [10], technological improvement of Solid-Liquid Desiccant AC Systems (S-LDAS) [11], renewable energy for Liquid Desiccant AC Systems (LDAS) [12], desiccant air-conditioning (DAC) systems [13], Comparative review of membrane-based desalination technologies [14], Recent progress in liquid desiccant dehumidification [15], the Maisotsenko cycle (M-cycle) [8], vapor compression refrigeration systems (VCR) [10,16], and electrically driven dehumidification (EDD) [17]. In addition to systems-focused studies, research has been conducted on the latest advancements in open-cycle absorption for AC systems [18]. Liquid desiccant AC systems have also been a focal point in reviews [10]. In terms of system components, studies have investigated variable refrigerant flow (VRF) systems and other key AC components [19]. Heat exchangers, a fundamental part of both the evaporator and condenser sections of AC systems, have also been extensively analyzed. For example, studies have examined the energy-saving potential of vertical heat exchangers, particularly in tropical climates [20].

Despite the extensive research aimed at enhancing AC system performance, problems arising from installation faults persist. These faults, even when modern technologies and strategies are implemented, result in systems operating far below their potential efficiency. Consequently, installation faults contribute significantly to unnecessary energy consumption. This study addresses a critical gap in the literature by investigating the effects of installation faults using energy analysis. The results highlight the need for countries to revise regulations governing the use of cooling systems and building standards to mitigate the impact of installation faults.

2. Research Methodology

The authors have identified significant problems in the installation processes of air conditioning (AC) systems. Meetings were conducted with dealers and technical service providers of AC systems to better understand the challenges. AC manufacturers regularly organize training programs for their dealers and technical staff, providing guidelines on the correct installation of AC system components, particularly the condenser section. These training sessions emphasize how to properly mount the condenser on walls. Despite this, the information provided during training sessions is often not adhered to, and some condenser units are improperly installed. AC manufacturers also provide users with materials such as user manuals to promote correct installation practices. According to these manuals, specific clearances must be maintained around the condenser units during installation to ensure optimal functionality. These guidelines recommend a 30 cm gap at the back and sides (air inlets), along with clearances of 60 cm, 60 cm, and 200 cm from the top, right side, and front of the condenser, respectively. The primary purpose of these clearances is to prevent obstruction of the condenser's air inlet and outlet. However, these installation procedures are frequently disregarded by some dealers and technical service personnel. One issue arises when trained personnel are not dispatched for installations. Instead, personnel who have not participated in manufacturer-provided training are assigned to the task. Furthermore, some users contribute to improper installations by neglecting to read the user guide or by pressuring technical staff to deviate from standard procedures for various reasons. In some cases, users sell their AC systems secondhand, and the subsequent installation of these units is performed by untrained personnel. The improper installation of AC systems cannot be solely attributed to technical services, dealers, or manufacturers. Users also play a role in causing installation faults, whether due to a lack of awareness or deliberate actions. For instance, users may insist on unconventional installations that hinder the performance of the condenser unit. Examples of installation faults observed in the condenser sections of AC systems are presented in Fig. 1.

The air entry to the condenser is obstructed at the locations marked by the red arrows in Fig. 1. The authors have documented several additional examples of installation faults similar to those shown in Fig. 1. In Fig. 1-A, the condensers of two different AC systems are displayed, highlighting the air inlet sections of the condenser. The red arrows indicate that the side air inlets of one condenser are blocked by the presence of another condenser. In Fig. 1-B, the pipe was improperly positioned and placed within the air inlet section at the back of the condenser, obstructing airflow. The AC system used in the experiments had a cooling capacity of 12,000 Btu, with a power supply of 220–240 V, 1 phase, and 50 Hz. The airflow rate of the condenser was 1,700 m^3/h. The refrigerant utilized in the system was R32, with 0.5 kg used in the refrigeration cycle. During the experiments, the setpoint

temperature of the AC was maintained at a constant 16 °C across all trials, while the ambient temperature was set at 27 °C. This ambient temperature aligns with the reference value recommended by the Spanish government [21].



(A) (B)

Figure 1. Photos showing the installation faults in the condenser section of ACs, (A) - Two different outdoor units blocking each other, (B) - Pipe bundle blocking air inlet

Numerous studies in the literature have focused on the energy analysis of AC systems. The methods and equations employed in these significant studies have also been utilized in the present work. Assumptions in the analysis:

- The AC system operates under steady-state conditions during all experiments.
- The enthalpy remains constant across the expansion valve.
- Pressure drops are assumed to be negligible.
- Potential and kinetic energy changes are neglected.

The energy analyses were performed by examining each component of the AC system individually. The energy analysis of the compressor was conducted using Eq. (1) [22,23].

$$\dot{W} = \dot{m} \cdot (\mathrm{h}_{out} - h_{in}) \tag{1}$$

In Eq. (1), $\dot{W}$ (kW) represents the compressor power, while $\dot{m}$ (kg/s) denotes the refrigerant flow rate. The refrigerant flow rate is controlled automatically based on the working conditions of the AC system. These working conditions are optimized to achieve maximum performance and minimum electricity consumption, facilitated by temperature sensors strategically placed at various points within the AC system. The enthalpy values, h (kJ/kg), in Eq. (1) correspond to the input and output refrigerants at the compressor. The compression ratio of the compressor is calculated using Eq. (2).

$$CR = \frac{P_{cond}}{P_{evap}} \tag{2}$$

In Eq. (2), P (bar) denotes the pressure. The energy analysis of the condenser section is performed using Eq. (3) [22,23].

$$\dot{E}_{cond} = \dot{m} \cdot (\mathrm{h}_{in} - \mathrm{h}_{out}) \tag{3}$$

In the energy analysis of the evaporator section, Eq. (4) is used [22,23].

$$\dot{E}_{evap} = \dot{m} \cdot (\mathrm{h}_{out} - \mathrm{h}_{in}) \tag{4}$$

The COP of the AC system is determined by using Eq. (5) [22].

$$COP = \dot{E}_{evap} \Big/ \dot{W} \tag{5}$$

The precision of the measuring devices used in experimental studies directly impacts the accuracy of the results obtained. It is well established that every measuring device is associated with an uncertainty value. In this study, the Kline and McClintock method [24] was employed to calculate uncertainty. The uncertainty analysis was conducted using Eq. (6).

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \frac{1}{\varphi}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x_i}\Delta x_i\right)^2} \tag{6}$$

where φ is the parameter, x_i is the variable, and Δx_i is the error of the measured variables. The measuring devices and uncertainty values used in the experimental study are given in Table (1).

Table 1. Measurement uncertainties.

Instruments	Value of quantity	Uncertainties (±)
Thermocouple type T	-250, 350	0.5 (°C)
Air Flowmeter	-0,15	0.1 (m/s)
Pressure	-	2 (bar)

The values obtained from the uncertainty analysis are shown using error bars in the graphs.

3. Results and Discussions

The graphs derived from the energy analysis of the compressor, evaporator, and condenser sections, conducted to assess the impact of installation faults in the condenser section of the AC system, are presented in this section. The specific results of the energy analysis for the condenser section are illustrated in Fig. 2.

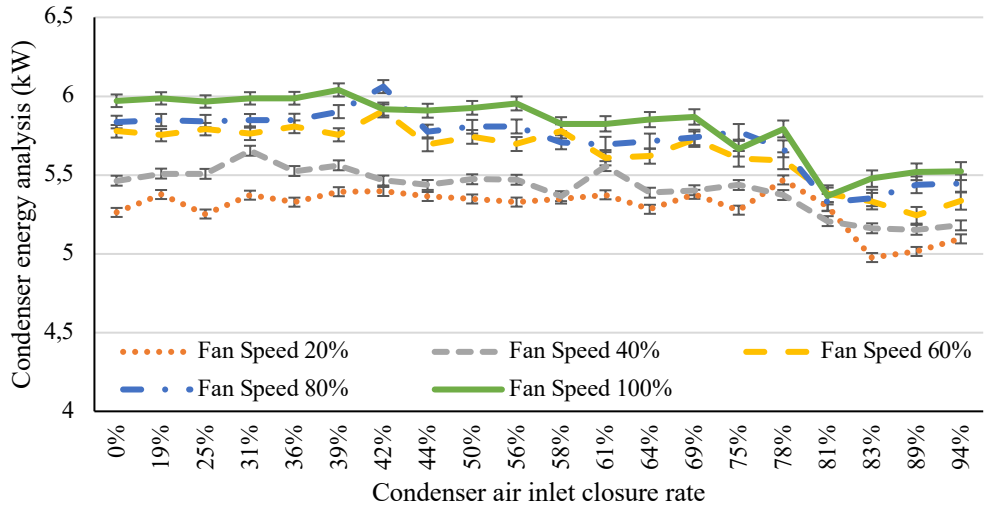


Figure 2. Energy analysis of the condenser.

In Fig. 2, the x-axis represents the closure rate of the condenser air inlet area. The error bars in the graph range between ±0.04. A notable decrease in the condenser's energy consumption is observed, particularly when the air inlet is 81% closed. Upon analyzing the parameters in Eq. (3), it becomes evident that the enthalpy difference between the refrigerant's inlet and outlet in the condenser must be maintained until the closure rate reaches 81%. For instance, reference energy values for the condenser typically range from 5.2 to 5.9 kW. Up to a closure rate of 78%, the energy values vary between 5.2 and 5.7 kW. However, after 81% closure, energy values decrease to 4.97 and 5.3 kW. As illustrated in Fig. 2, this decrease becomes apparent at the 81%. The primary reason for this decline is the automation system, which automatically adjusts the AC's performance. When the air inlet closure reaches 81%, the automation system increases the compressor's power and the refrigerant flow rate within the cycle. This ensures that the system operates within predefined parameters coded into the automation system, based on temperature readings from both the condenser and evaporator. This behavior is further reflected in the results of the energy analysis for the evaporator, as shown in Fig. 3.

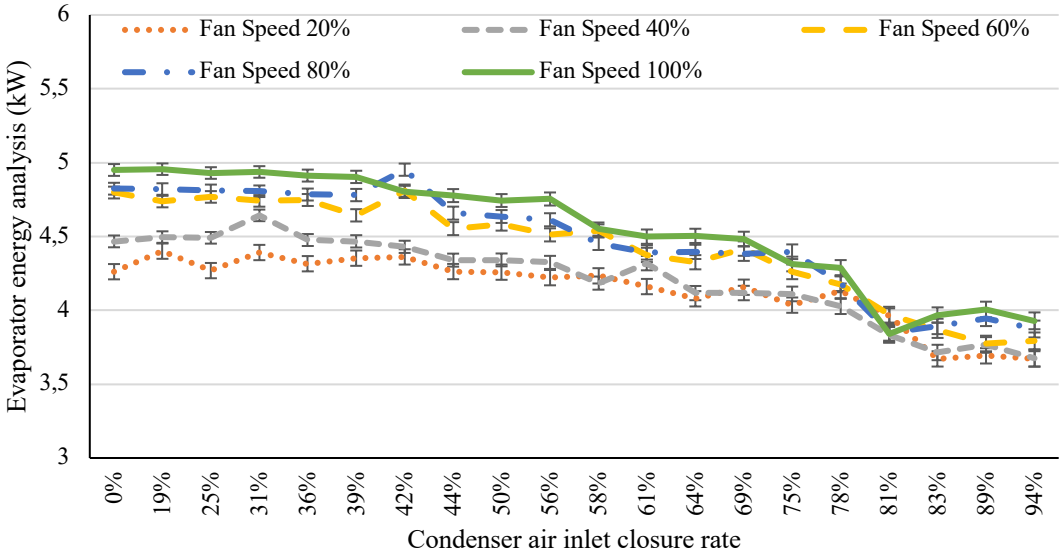


Figure 3. Energy analysis of the evaporator.

When Figs. 3 and 2 are examined, it is evident that the lines exhibit similar trends. The error bars in the graph range between ±0.04. From the energy analysis of the evaporator, the reference energy values are calculated to range between 4.9 and 4.2 kW. Due to variations in system performance at different fan speeds, the difference between these values is determined to be 0.7 kW. A 21.6% decrease in energy (calculated as 3.84 kW) was observed when the condenser air inlets were closed at specific rates. Additionally, a decrease of 11.6% (3.71 kW) was calculated when the evaporator fan speed was set to 20%. This downward trend in energy consumption is less variable compared to the closing rates of the condenser air inlet. The primary reason for this stability is attributed to the automation system. When the condenser air inlets are closed, some energy becomes stored within the refrigerant and other components of the system. This condition causes the automation system to interpret the environment within the system as operating at higher temperatures, prompting an increase in compressor power. This explanation is supported by the data presented in Fig. 4.

The energy graphs of the evaporator and condenser exhibit minimal variability. This stability is primarily attributed to the efficiency of the automation system, which increases the working capacity of the compressor to discharge energy into the environment. The data presented in Fig. 4 support this conclusion. The error bars in the graph range between ±0.04. According to the energy analysis of the compressor, an increase of 40% to 60% is observed compared to the reference values. While the reference values for compressor power are approximately 1 kW at different fan power levels, these values increase to between 1.4 and 1.6 kW when the condenser air inlet is closed. This 40% to 60% increase relative to the reference values corresponds to unnecessary energy consumption caused by restricted airflow to the condenser. This restricted airflow, resulting from an insufficient air inlet to the condenser, forces the system to consume significantly more electricity than required. As shown by Eq. (5), such

unnecessary electricity consumption in the compressor leads to dramatic reductions in the coefficient of performance (COP). The impact of this restricted airflow on the system's COP is illustrated in Fig. 5.

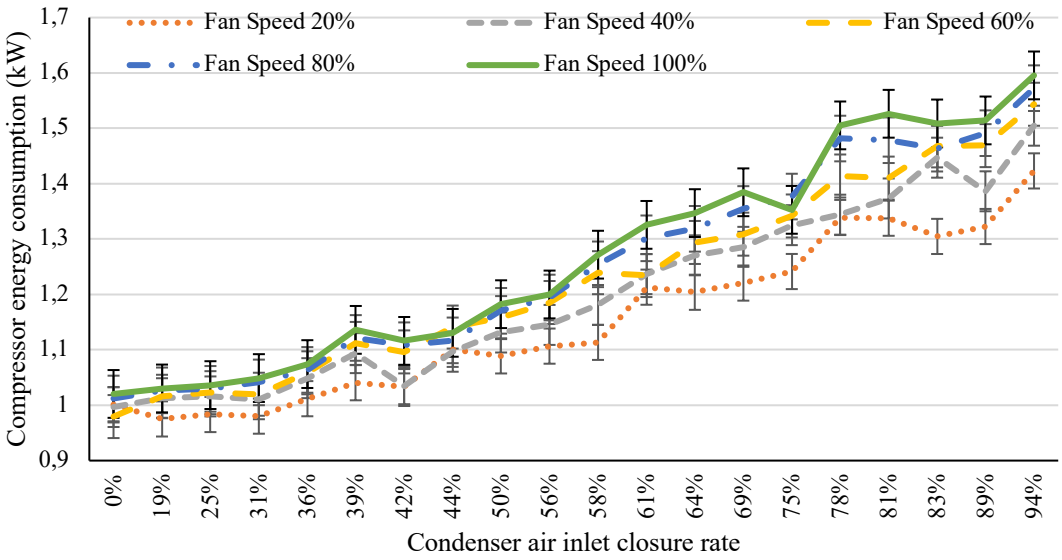


Figure 4. Energy analysis of the compressor.

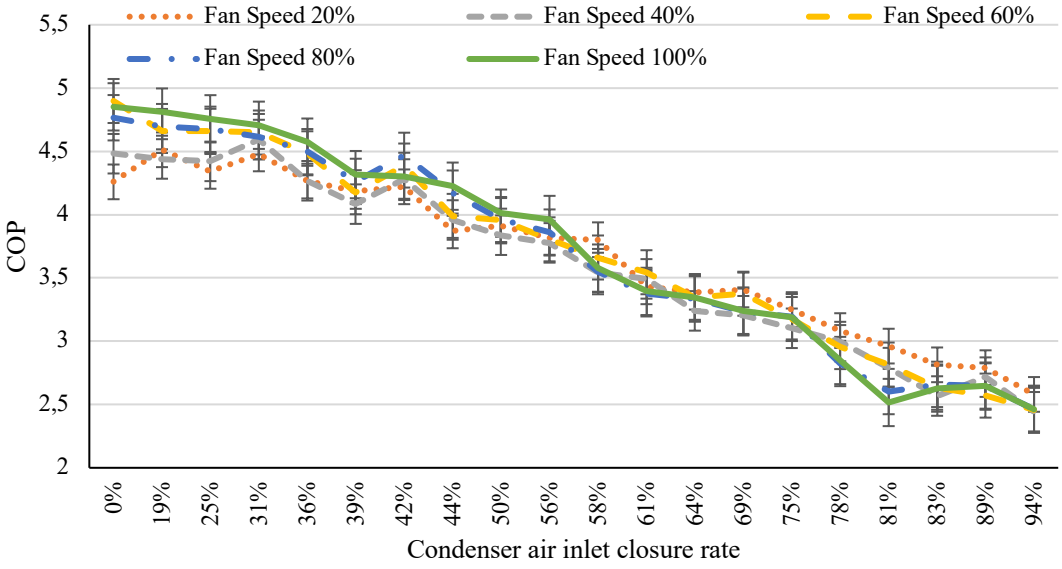


Figure 5. Change in the COP value of the system.

The reference values for the coefficient of performance (COP) range between 4.85 and 4.48, depending on the evaporator fan speed. In the literature, the COP for R32 refrigerant has been calculated as 4.5 [22]. More recent studies report reference COP values ranging from 4.1 to 6.1, based on comparisons of products from different AC manufacturers [25]. In Fig. 5, the COP decreases significantly, reaching 2.46 when the condenser air inlet is fully closed. A 94% closure of the air inlet results in a 48.75% decrease in the COP. For air inlet closure rates of 25%, 50%, and 75%, the COP decreases by 2%, 17.5%, and 34.43%, respectively. Numerous parameters influence the

COP of AC systems. Examples include working conditions, condensing capacity, the type of refrigerant used, and modifications to system components designed to enhance performance. As demonstrated, closing the condenser air inlet leads to a significant reduction in the COP. A comparison of COP variations across different cooling technologies is presented in Table 2.

Table 2. Comparison of COPs according to refrigeration technologies [26].

Technology	Types	COP
Electrochemical	$I_3^- / I^- // FCN^{3-} / FCN^{4-}$	8.09
	$I_3^- / I^- // FCN^{3-} / FCN^{4-}$	0.93
Vapor Compression	R410a	3.29-3.59 [27]
	R134a	3.5
	R32	4.5 [22]
Magnetocaloric	gadolinium	0.8
Thermoelectric	bismuth telluride	0.72
Absorption	ammonia-water	0.45
Metal Hydride	lanthanum quantitative	0.26

COP values can also be analyzed in the context of environmental factors. The commercialization of advanced technological developments in AC systems often requires significant time. Currently, commercialized air conditioning systems available on the market incorporate the latest technological advancements aimed at improving energy efficiency and achieving energy savings. These systems emphasize a few critical parameters, such as high-energy efficiency components, including compressors, inverters, heat exchangers, fans, refrigerants, metering devices, and smart sensors. The primary goals of these parameters are to reduce electricity consumption, carbon emissions, and operational costs. Importantly, these improvements are implemented without compromising the cooling and heating capacities of existing AC systems. In contrast, advanced technologies that have not yet been commercialized include smart hybrid designs, solid-state materials, thermally driven technologies, and evaporative cooling designs. Detailed discussions on these emerging technologies can be found in Ref. [25]. When the air inlets of the condenser are closed, the energy extracted from the evaporator is retained within the refrigerant and system components. This behavior can be verified by analyzing the system's operating pressure values. Due to the inability to discharge energy into the surrounding air, the compressor is expected to increase its power output, which subsequently raises the operating pressure as a result of the increased refrigerant temperature during the cycle. When the data presented in Fig. 6 are examined, this observation is confirmed.

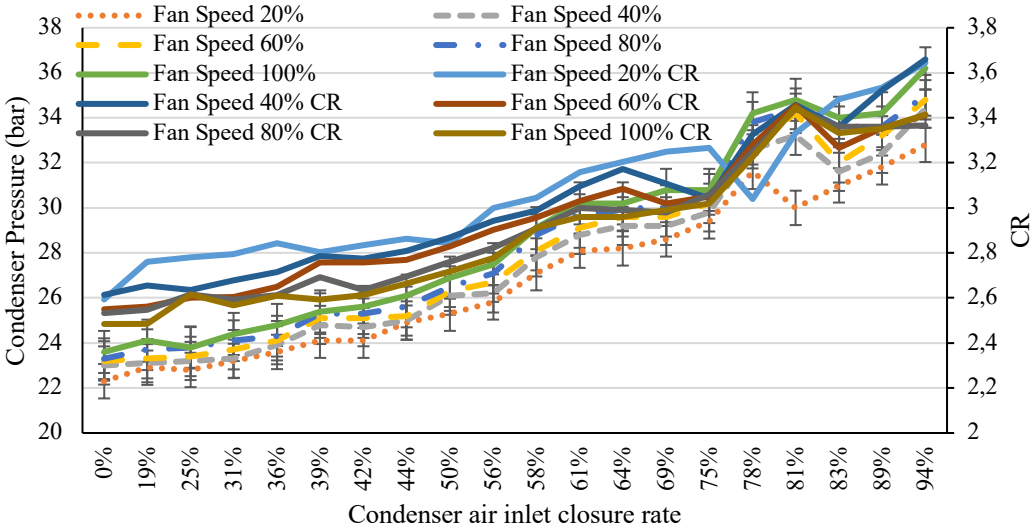


Figure 6. Variation in condenser pressure and CR value.

When insufficient energy is released from the condenser to the environment, the pressure within the condenser increases. The error bars in the graph represent ±2 bars. The reference working pressure is 23.6 bars. With the gradual closure of the condenser air inlet (25%, 50%, 75%, and 94%), the pressure values increased to 23.8, 26.9, 30.8, and 36.2 bars, respectively. A similar trend is observed in the compression ratio (CR) values, which range from 2.68 to 3.64 depending on the degree of air inlet closure. Installation errors made during the setup phase of the system can have long-lasting impacts throughout the system's operational life. The data in Fig. 6 can also be interpreted from an alternative perspective. For instance, if the working pressure exceeds its intended range, the system's maintenance and repair costs will rise, while the intervals between required maintenance will shorten. Closing the condenser air inlets due to installation faults obstructs airflow, thereby reducing the system's ability to transfer energy to the environment. Fig. 7 illustrates the decrease in the condenser's airflow rate as a function of the air inlet closure rate in the condenser section.

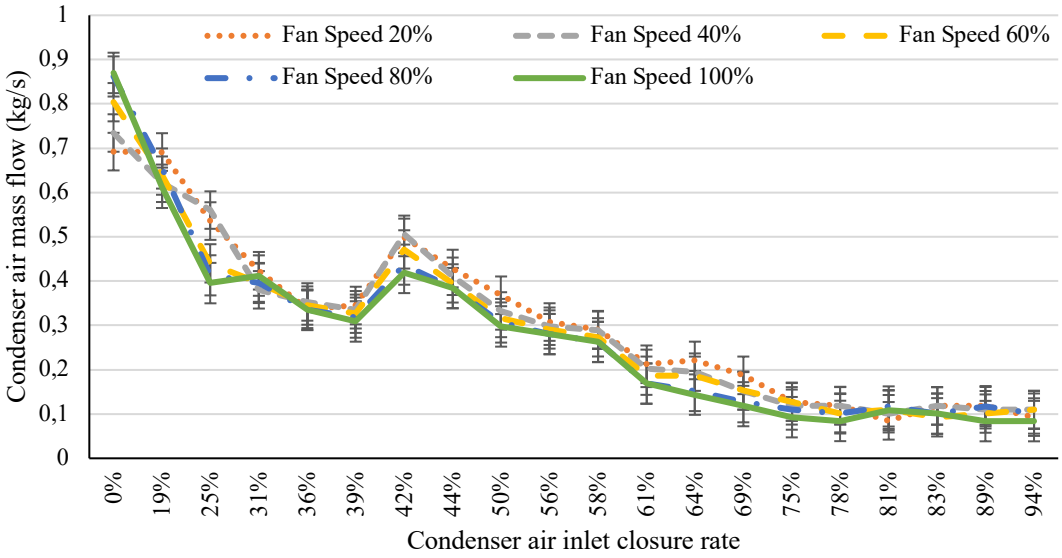


Figure 7. Airflow through the condenser.

When the values in Fig. 7 are analyzed, airflow rates ranging from 0.69 to 0.86 kg/s were measured at different evaporator fan speeds (20% to 100%) under reference conditions, where the condenser air inlet closure rate was 0%. The error bars in the graph range between ±0.039. As the condenser air inlet closure rate increases to between 39% and 50%, the automation system compensates by increasing the fan speed. However, this increase in fan speed is insufficient to fully counteract the effects of the closure rate. Beyond 50%, a significant decrease in airflow continues, with the airflow rate dropping to 0.08 kg/s when the air inlet closure reaches 94%. When Fig. 7 and the previous figures are considered together, several negative consequences of restricted condenser airflow emerge:

- Increased frequency of maintenance and repairs
- Higher maintenance and repair costs
- Greater release of refrigerants into the environment
- Unnecessary overstrain on system components
- Reduced operational lifespan of the system

Additional adverse effects could be identified beyond those listed above. However, as these are indirect impacts, they are briefly addressed in this study. It is important to note that the graphs and values presented reflect the results from a single AC unit. A general approach would provide a clearer understanding of the broader significance of the issue. Japan stands out for its extensive use of AC systems, with China and the USA also demonstrating significant general contributions to global AC usage. For these reasons, annual energy consumption

(AEC) values were calculated for these three countries. The AEC calculations considered regions with ambient temperatures exceeding 27 °C. The AEC values for Japan are presented in Fig. 8.

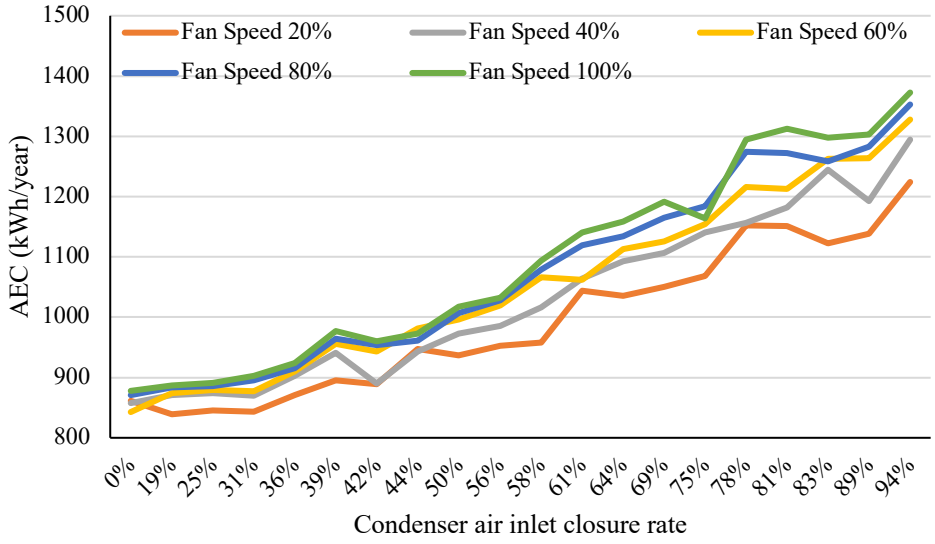


Figure 8. AEC values for Japan (Tokyo).

The use of air conditioning (AC) systems in Japan accounts for 9.5% of the electricity consumption in buildings [28]. When ACs are used for cooling purposes in Japan, the total annual usage time is calculated as 860 hours/year for Tokyo, based on an ambient temperature of 27 °C. As shown in Fig. 8, the reference annual energy consumption (AEC) values for Japan range from 860 to 877 kWh/year under normal operating conditions. However, electricity consumption increases significantly due to installation faults in the condenser air inlet. In such cases, the AEC values rise to 1224–1372 kWh/year, which represents the highest values observed in Fig. 8. Fig. 9 illustrates the AEC values for the United States.

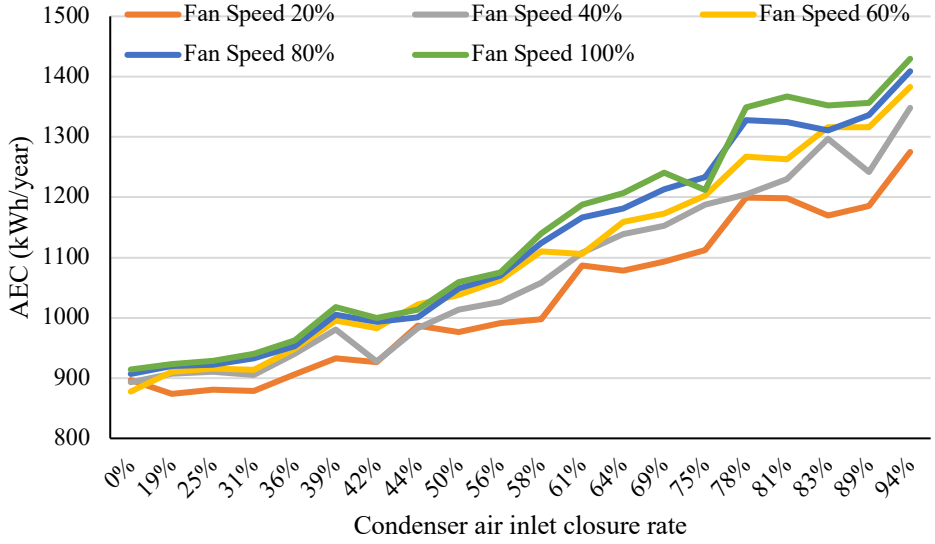


Figure 9. AEC values for the US (Washington DC).

A similar approach was applied to the United States, where the total AC usage time was determined to be 896 hours/year for Washington, DC. In the U.S., air conditioning (AC) systems account for 10.6% of the electricity

consumption in buildings [28]. As shown in Fig. 9, the reference annual energy consumption (AEC) values for the U.S. range from 896 to 914 kWh/year under normal conditions. However, the maximum AEC values observed in Fig. 9 are between 1275 and 1429 kWh/year. The difference between the mean reference values and the maximum values is calculated to be 49.39%. The calculated AEC values for China are presented in Fig. 10.

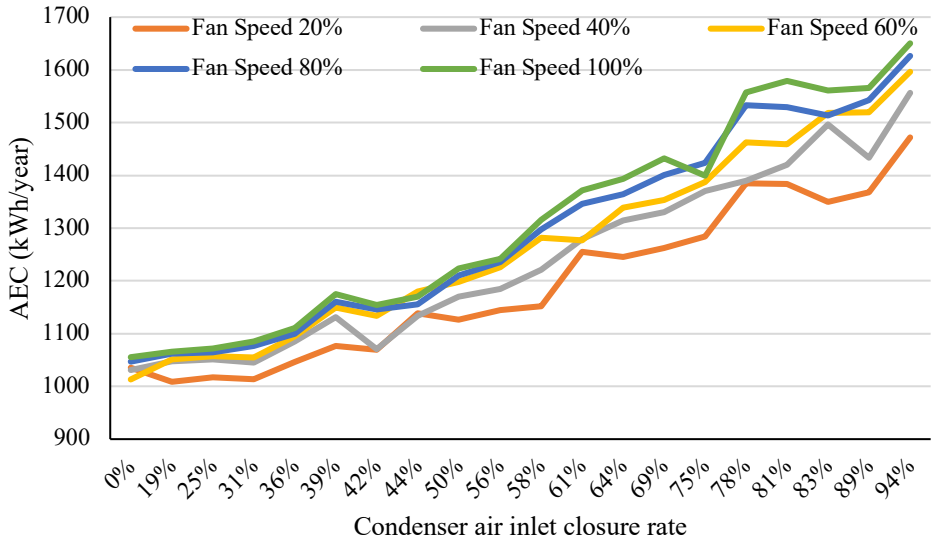


Figure 10. AEC values for China (Beijing).

China is one of the countries where the use of air conditioning (AC) systems is expected to grow most significantly in the future. The reference annual energy consumption (AEC) values for China range from 1034 to 1055 kWh/year, while the maximum AEC values range from 1471 to 1650 kWh/year. Currently, the use of AC systems in China accounts for 9.3% of the electricity consumption in buildings [28]. The total AC usage time in China has been calculated as 1034 hours/year for Beijing. The graphs above represent the annual energy consumption (AEC) values for a single AC unit. Globally, approximately 1.6 billion AC units are in use [29]. The distribution of these units across the three countries studied is as follows: 9% in Japan (144 million units), 23% in the U.S. (368 million units), and 35% in China (560 million units) [29]. The AC units used in this study are predominantly designed for domestic use, and the proportion of ACs used in homes is 91% in Japan, 90% in the U.S., and 60% in China. Based on these percentages, the number of ACs used in homes is estimated to be 131.04 million units in Japan, 331.2 million units in the U.S., and 336 million units in China. The general data above, sourced from the International Energy Agency (IEA), covers the expected trends for 2016–2030 [29]. Assuming that only 1% of the condenser sections of ACs used in homes are installed incorrectly, the number of improperly installed units is estimated at 1.31 million in Japan, 3.31 million in the U.S., and 3.36 million in China. If the unnecessary electricity consumption resulting from these installation faults is calculated by multiplying these figures by the AEC values and subtracting the reference AEC values, significant inefficiencies can be quantified. By comparing the above data with the AEC values obtained in this study, Table 3 has been prepared. For a comprehensive evaluation, the total number of AC units in all three countries was considered. It was assumed that these units are used in homes, have a cooling capacity of 12,000 Btu, and operate with fan speeds at 60%. AEC values were calculated under reference conditions and with condenser air inlet closure rates of 25% and 75%, simulating installation faults. The results of these calculations are presented in Table 3.

There is no data in the literature on the exact rate of installation faults in the condenser sections of air conditioners (ACs) or the extent to which the condenser air inlet is obstructed. However, when the values discussed above are considered, the implications are significant. Only a few studies have investigated the effects of installation faults in AC systems. For instance, studies conducted in the United States examined installation faults in air conditioners and heat pumps, evaluating the resulting unnecessary energy consumption. These studies calculated that installation faults in both systems collectively cause an energy loss of approximately 20.7 TWh/year [30,31].

Table 3. Unnecessary energy consumption values for evaporator 60% fan speed.

	Japan	US	China
$AEC_{(Ref. – 1\ AC\ unite)}$	842.697 (kWh/year)	877.633 (kWh/year)	1013.13 (kWh/year)
$AEC_{(\%25 – 1\ AC\ unite)}$	879.807 (kWh/year)	916.281 (kWh/year)	1057.75 (kWh/year)
$AEC_{(\%75 – 1\ AC\ unite)}$	1154.33 (kWh/year)	1202.19 (kWh/year)	1387.79 (kWh/year)
$AEC_{(\%25 – 1\ AC\ unite)}$ - $AEC_{(Ref. – 1\ AC\ unite)}$ unnecessary energy consumption	37.11 (kWh/year)	38.64 (kWh/year)	44.62 (kWh/year)
$AEC_{(\%75 – 1\ AC\ unite)}$ - $AEC_{(Ref. – 1\ AC\ unite)}$ unnecessary energy consumption	311.63 (kWh/year)	324.55 (kWh/year)	374.66 (kWh/year)
$AEC_{(Ref.\ total)}$	1.10 (TWh/year)	2.9 (TWh/year)	3.4 (TWh/year)
$AEC_{(\%25\ total)}$	1.15 (TWh/year)	3.03 (TWh/year)	3.55 (TWh/year)
$AEC_{(\%75\ total)}$	1.5 (TWh/year)	3.98 (TWh/year)	4.66 (TWh/year)
$AEC_{(\%25\ total)}$ - $AEC_{(Ref.\ total)}$ unnecessary energy consumption	0.05 (TWh/year)	0.13 (TWh/year)	0.15 (TWh/year)
$AEC_{(\%75\ total)}$ - $AEC_{(Ref.\ total)}$ unnecessary energy consumption	0.4 (TWh/year)	1.08 (TWh/year)	1.26 (TWh/year)

It is important to note that the analyses presented in this study were conducted for a single AC unit operating at a fixed ambient temperature (27 °C) and a specific capacity (12,000 Btu). At higher ambient temperatures, the negative effects of installation faults are expected to increase significantly. Preventing installation faults in AC systems offers a considerable opportunity to reduce energy losses. Additionally, addressing these faults can positively impact the average emissions from AC systems. The authors believe that both companies and governments must take responsibility in this regard. Technological solutions and proactive measures should be developed and implemented to mitigate the problems caused by installation faults. AC manufacturers should initiate research and development (R&D) programs to improve product design and installation practices. A significant challenge lies in the disconnect between the training provided to technical service personnel and its application in real-world installations. Improper installation of the condenser continues to pose serious issues, resulting in higher energy consumption. Governments have developed numerous policies to reduce energy consumption and emissions, but greater efforts are needed to address the specific problems arising from installation faults. Governments must also work in collaboration with companies to enforce effective energy consumption and emissions reductions. Even in societies with high environmental awareness, installation faults in AC systems remain a technical issue beyond the control of individual users. Many users are unaware that an incorrectly installed AC system can consume significantly more energy than necessary, even if they adopt responsible usage practices. This highlights the critical need for governments to implement stricter regulations and take decisive actions regarding energy laws and standards. Although it is challenging to regulate AC systems in residential buildings, it is essential to establish regulations that incorporate technical recommendations from AC manufacturers for installations in new buildings. Regular inspections of AC systems should also be mandated, particularly in offices, commercial spaces, and similar environments. Cooling systems used in stores, markets, and other commercial areas should be included in these inspections. Such government-led inspections would help reduce the energy consumption and emissions associated with installation faults in AC systems. Interviews with AC users reveal that most are unaware of the negative effects of installation faults. This lack of awareness is understandable, as the problem falls within the domain of engineering. While users may lack knowledge about installation faults, it is evident that their efforts to improve efficiency in heating systems do not extend to cooling systems. Similarly, regulations and policies for energy efficiency in buildings tend to prioritize heating systems over cooling systems. Governments should place equal emphasis on cooling systems, just as they do for heating systems, to ensure comprehensive energy efficiency and savings. By approaching the above study from different perspectives, the effects of incorrect installation on cost, exergy analysis, electricity consumption and carbon emissions can be examined. A similar study can be repeated for the heating mode of the air conditioner. In addition, a similar analysis can be done on air conditioners of different power and building air conditioning systems (HVAC).

4. Conclusion

This study investigated the practical problems caused by installation faults in the condenser sections of air conditioning (AC) systems. Through experimental analysis, the air inlet of the condenser section was gradually obstructed, and the results demonstrated that AC systems perform below their expected efficiency levels when such faults occur. Installation faults in ACs result in significant unnecessary energy consumption. When this issue is evaluated on a national scale, substantial energy losses are observed. The key findings from this study are summarized as follows:

- The electricity consumption of the AC system increases with the closure rate of the condenser air inlets. An increase of 40% to 60% in energy consumption compared to reference values was observed when the condenser air inlets were obstructed for various reasons. This increase represents the amount of unnecessary energy consumed due to installation faults.
- Energy extracted from the evaporator is typically transferred to the surrounding air via the condenser. However, obstructing air inlets reduces the system's ability to transfer this energy to the environment, leading to higher electricity consumption and a decrease in the coefficient of performance (COP). Reference COP values range from 4.85 to 4.48, depending on the evaporator fan speed. When the air inlet is blocked at rates of 25%, 50%, 75%, and 94%, the COP decreases by 2%, 17.5%, 34.43%, and 48.75%, respectively.
- The inability to discharge energy into the environment raises the refrigerant's working pressure within the AC system. The reference working pressure is 23.6 bar. When the air inlets are progressively blocked at rates of 25%, 50%, 75%, and 94%, the working pressure increases to 23.8, 26.9, 30.8, and 36.2 bar, respectively. A similar trend was observed for the compression ratio (CR).
- When the airflow in the condenser section is obstructed, the airflow rate decreases significantly. Under reference conditions, the airflow rate ranges between 0.69 and 0.86 kg/s. However, when the condenser airflow is blocked, the rate drops to 0.08 kg/s.
- The results indicated that the annual unnecessary energy consumption due to installation faults ranged from 0.05 TWh to 1.26 TWh for each country.

Acknowledgments

This study was produced from the master thesis titled “Investigation of the possible effects of incorrect montage of AC systems on the performance values of the system”. Authors thank to Fırat University Project Support Unit with the project number TEKF.22.07. The historical temperature data used in this study were obtained from the NASA Langley Research Center (LaRC) POWER Project funded through the NASA Earth Science/Applied Science Program. We undertake that in the article we submitted for publication, no study requiring ethics committee approval, was conducted. There is no conflict of interest between the authors.

References

[1] Ni J, Bai X. A review of air conditioning energy performance in data centers. Renew Sustain Energy Rev 2017;67:625–40.
[2] Yang C, Seo S, Takata N, Thu K, Miyazaki T. The life cycle climate performance evaluation of low-GWP refrigerants for domestic heat pumps. Int J Refrig 2021;121:33–42.
[3] Guan B, Liu X, Zhang T. Analytical solutions for the optimal cooling and heating source temperatures in liquid desiccant air-conditioning system based on exergy analysis. Energy 2020;203:117860.
[4] Ma Z, Ren H, Lin W. A review of heating, ventilation and air conditioning technologies and innovations used in solar-powered net zero energy Solar Decathlon houses. J Clean Prod 2019;240:118158.
[5] Mahlia TMI, Saidur R. A review on test procedure, energy efficiency standards and energy labels for room air conditioners and refrigerator-freezers. Renew Sustain Energy Rev 2010;14:1888–900.
[6] Qi Z. Advances on air conditioning and heat pump system in electric vehicles - A review. Renew Sustain Energy Rev 2014;38:754–64.
[7] Yu Y, You S, Zhang H, Ye T, Wang Y, Wei S. A review on available energy saving strategies for heating, ventilation and air conditioning in underground metro stations. Renew Sustain Energy Rev 2021;141:110788.
[8] Sadighi Dizaji H, Hu EJ, Chen L. A comprehensive review of the Maisotsenko-cycle based air conditioning systems. Energy 2018;156:725–49.
[9] Gurubalan A, Simonson CJ. A comprehensive review of dehumidifiers and regenerators for liquid desiccant air conditioning system. Energy Convers Manag 2021;240:114234.

[10] Gurubalan A, Maiya MP, Geoghegan PJ. A comprehensive review of liquid desiccant air conditioning system. Appl Energy 2019;254:113673.
[11] Jani DB, Mishra M, Sahoo PK. Solid desiccant air conditioning - A state of the art review. Renew Sustain Energy Rev 2016;60:1451–69.
[12] Fekadu G, Subudhi S. Renewable energy for liquid desiccants air conditioning system: A review. Renew Sustain Energy Rev 2018;93:364–79.
[13] Gao DC, Sun YJ, Ma Z, Ren H. A review on integration and design of desiccant air-conditioning systems for overall performance improvements. Renew Sustain Energy Rev 2021;141.
[14] Pasqualin P, Lefers R, Mahmoud S, Davies PA. Comparative review of membrane-based desalination technologies for energy-efficient regeneration in liquid desiccant air conditioning of greenhouses. Renew Sustain Energy Rev 2022;154:111815.
[15] Chen X, Riffat S, Bai H, Zheng X, Reay D. Recent progress in liquid desiccant dehumidification and air-conditioning: A review. Energy Built Environ 2020;1:106–30.
[16] She X, Cong L, Nie B, Leng G, Peng H, Chen Y, et al. Energy-efficient and -economic technologies for air conditioning with vapor compression refrigeration: A comprehensive review. Appl Energy 2018;232:157–86.
[17] Liu H, Yang H, Qi R. A review of electrically driven dehumidification technology for air-conditioning systems. Appl Energy 2020;279:115863.
[18] Enteria N, Yoshino H, Mochida A. Review of the advances in open-cycle absorption air-conditioning systems. Renew Sustain Energy Rev 2013;28:265–89.
[19] Wan H, Cao T, Hwang Y, Oh S. A review of recent advancements of variable refrigerant flow air-conditioning systems. Appl Therm Eng 2020;169:114893.
[20] Yau YH, Ahmadzadehtalatapeh M. A review on the application of horizontal heat pipe heat exchangers in air conditioning systems in the tropics. Appl Therm Eng 2010;30:77–84.
[21] Spanish government to allow flexibility on air-conditioning, but rules out U-turn on decree. Spain in English 2022. https://www.spainenglish.com/2022/08/08/spanish-government-to-allow-flexibility-on-air-conditioning-but-rules-out-u-turn-on-decree/.
[22] Mishra P, Soni S, Maheshwari G. Exergetic performance analysis of low GWP refrigerants as an alternative to R410A in split air conditioner. Mater Today Proc 2022;63:406–12.
[23] Cui M, Wang B, Wei F, Shi W. A modified exergy analysis method for vapor compression systems: Splitting refrigerant exergy destruction. Appl Therm Eng 2022;201:117728.
[24] Kline SJ, McClintock FA. Describing uncertainties in single sample experiments. Mech Eng 1953;75:3–8.
[25] Shah N, Park WY, Ding C. Trends in best-in-class energy-efficient technologies for room air conditioners. Energy Reports 2021;7:3162–70.
[26] Rajan A, McKay IS, Yee SK. Continuous electrochemical refrigeration based on the Brayton cycle. Nat Energy 2022.
[27] Ziya Sogut M. Exergetic and environmental assessment of room air conditioners in Turkish market. Energy 2012;46:32–41.
[28] International Energy Agency (IEA). The Future of Cooling Opportunities for energy- efficient air conditioning <https://iea.blob.core.windows.net/assets/0bb45525-277f-4c9c-8d0c-9c0cb5e7d525/The_Future_of_Cooling.pdf> 2018:92.
[29] The International Energy Agency (ıea). Renewable 2017. n.d.
[30] Winkler J, Das S, Earle L, Burkett L, Robertson J, Roberts D, et al. Impact of installation faults in air conditioners and heat pumps in single-family homes on U.S. energy usage. Appl Energy 2020;278:115533.
[31] Hourahan GC, Baxter VD. Impact of Installation Faults on Heat Pump Performance. IEA Heat Pump Cent Newsl 2015;33:34–8.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 557-567, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1600646

Kırık Kemiklerin Kaynamasında Kullanılan İmplant Materyalin Giriş Aksını Konumlama Yöntemi ve 3D Slicer Eklenti Yazılımının Geliştirilmesi

Muhammed Fatih TALU[1*], Oktay BELHAN[2]
[1] Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye
[2] Ortopedi ve Travmatoloji Bölümü, Tıp Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, Türkiye
[*1] fatih.talu@inonu.edu.tr, [2] obelhan@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 13/12/2024; Kabul/Accepted: 20/05/2025)

Öz: Ortopedik travma sonucunda kemik yapısında meydana gelen kırılma veya yerinden oynama sorunlarının tedavisinde tel veya vida gibi implant uygulaması yapılmaktadır. İmplant malzemenin kırık kemiğe doğru aks ve açıda uygulanması, kemiğin hızlı ve doğru kaynaması için önemlidir. Ancak kemik yapısının 3boyutlu karmaşık bir geometriye sahip olması ve iç dolgusunda delik veya boşluk içerebilmesi gibi durumlarda implant malzemenin doğru aks ve açıda uygulanması oldukça güçtür. Bu makalede, CT veya MRI çekimleri girdi olarak alarak belirlenen kemik yapısına implant malzemenin uygulanacağı aks ve açıyı otomatik tespit edebilen bir yöntem sunulmaktadır. Bu yöntem, CT veya MRI verisinin yüklemesi, veriden kemik yapısının ayıklanması, belirlenen kırık kemik bölgesinin kesilmesi ve modelinin üretilmesi, modelin merkez hattının çıkarılması (Voroni) ve çıkarılan noktalar üzerine doğru modelinin uydurulması (Line Regression) aşamalarını içermektedir. Uygulama çalışmaları 3D Slicer yazılımında ve Python programlama dilinde gerçekleştirilmiştir. Uygulama çalışmalarında RibFrac2020 veri kümesindeki CT taramaları kullanılmıştır. Uygulama sonuçları incelendiğinde, düzgün ve simetrik kemik yapılarında implant malzemenin sorunsuz bir şekilde yerleştirilebildiği, bununla birlikte dış geometrik yapısı düzgün olmayan veya iç kısmında boşluklar bulunan kemik yapılarında merkez hattında çatallaşmanın meydana geldiği görülmüştür. Bu durumda cerrah çatallaşan hatları eleyerek tek bir ana hat kalmasını sağlar. Böylece geliştirilen yöntemin düzgün veya düzensiz kemik yapılarına uygulanabildiği ve implant malzemenin en uygun aks ve açısını hesaplayabildiği görülmüştür. Önerilen yöntemin implant uygulama doğruluğunu maksimize ettiği, böylece hasta ve cerrah konforunu arttırma potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir.

Anahtar kelimeler: Kırık kemik kaynama, ortopedi, implant, görüntü işleme, MRI, CT.

The Method of Positioning the Insertion Axis of The Implant Material Used in The Union of Broken Bones and the Development of the 3D Slicer Add-On Software

Abstract: In the treatment of fractures or dislocations in the bone structure as a result of orthopedic trauma, implants such as wires or screws are applied. Applying the implant material to the broken bone at the correct axis and angle is important for the bone to heal quickly and correctly. However, in cases where the bone structure has a complex 3D geometry and may contain holes or gaps in its inner filling, it is quite difficult to apply the implant material at the correct axis and angle. This article presents a method that can automatically detect the axis and angle at which the implant material will be applied to the determined bone structure by taking CT or MRI images as input. This method includes the stages of loading the CT or MRI data, extracting the bone structure from the data, cutting the determined broken bone area and producing its model, extracting the centerline of the model (Voroni) and fitting the correct model on the extracted points (Line Regression). The application studies were carried out in the 3D Slicer software and the Python programming language. CT scans in the RibFrac2020 dataset were used in the application studies. When the application results are examined, it is seen that the implant material can be placed without any problems in smooth and symmetrical bone structures, however, in bone structures with irregular external geometric structure or with gaps in the interior, bifurcation occurs in the center line. In this case, the surgeon eliminates the bifurcated lines and leaves a single main line. Thus, it has been seen that the developed method can be applied to smooth or irregular bone structures and can calculate the most appropriate axis and angle of the implant material. It is evaluated that the proposed method maximizes implant application accuracy, thus has the potential to increase patient and surgeon comfort.

Key words: Fracture bone healing, orthopedics, implant, image processing, MRI, CT.

1. Giriş

Kapalı redüksiyon, ortopedik travma sonucu yerinden oynamış veya kırılmış kemikleri yerine oturtma işlemidir [1]. Bu işlem yapılırken hastanın cildinde herhangi bir kesme yapılmadan tel veya vida gibi bir implant malzeme kemik yapısına direk uygulanır. Uygulanan implant malzeme doğrusal düz bir geometriye sahiptir.

[*] Sorumlu yazar: fatih.talu@inonu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0003-1166-8404, [2] 0000-0002-7612-7345

Ancak kompleks ve üç boyutlu bir geometriye sahip kemik parçasına uygulanmaktadır. Bu nedenle uygulanma esnasında implant malzemenin kemik storunun en sağlam/kalın olduğu bölgeden geçmesi hedeflenir. İmplant malzemenin uygun aks ve açıda uygulanması kemikleri birbirine kaynama işleminde önem arz etmektedir. Cerrahın tecrübe eksikliğine bağlı yanlış aks ve açıda implantı uygulaması verimli bir kemik kaynama sağlamadığı gibi farklı komplikasyonların ortaya çıkmasına neden olduğu bilinmektedir.

Bununla birlikte anestezi ile uyutulmuş hastaya implant uygulamasında uygun hasta pozisyonu ayarlama işleminin oldukça güç olduğu bilinir. Farklı pozisyonlarda implant uygulamalarını gözlemlemek için Skopi adlı cihaz kullanılmaktadır [2]. Ergonomi açısından kullanım zorluğu bulunan bu cihazların en büyük dezavantajı ameliyat ortamına radyasyon yaymasıdır. Kemik yapısının gerçek zamanlı olarak görüntülenebilmesi için ortama yayılan radyasyon, hasta ve sağlık personelini olumsuz yönde etkilemektedir.

Literatür incelendiğinde genellikle kemik kırığının olduğu bölgenin tespitine yönelik çalışmaların yapıldığı [3, 4] ve kırık bölge tespiti yapıldıktan sonra kırık türünün sınıflandırılması üzerinde araştırma çalışmalarının yapıldığı görülmektedir [5-7]. Kırık bölge tespiti ve kırık türü sınıflama işlemlerinin her ikisi içinde derin konvolüsyonel ağların yoğun bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Bu makalede yapılan çalışma, kırık kemiği kaynaştırmak için kullanılacak implant malzemenin hangi aks ve açıda olması gerektiği ile ilgilidir. Bu açıdan literatürdeki mevcut çalışmalardan ayrışmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, kapalı redüksiyon işleminde hastanın 3B kemik yapısını göz önüne alarak uygulanacak implant materyalinin aks ve açısını tespit edebilen nesnel bir yöntem geliştirmek ve bu yöntemin açık kaynak kodlu 3D Slicer yazılımı içerisinde çalışabilmesini sağlayacak yeni bir eklenti yazılım modülü üretmektir. Önerilen yöntem CT veya MRI veri türüne bağlı olmadığı için geliştirilen eklentide her iki veride kullanılabilir. Ortopedi uzmanlarının bu eklentiyi kullanmasıyla yukarıda bahsedilen radyasyon ve ergonomi dezavantajları elimine edilmekte ve hekim tecrübesine bağlılık ortadan kalkmaktadır. Çünkü birleştirilmesi hedeflenen kırık kemik yapıları üç boyutludur. Karmaşık bir geometriye sahip olabilmektedir. Bazı kemik yapılarının iç bölgelerinde dıştan görünmeyen deliksi yapılar bulunabilir. Bu karmaşık geometri uzmanların en uygun yere aks yerleştirme işlemini güçleştirmektedir. Hekimin geçmiş tecrübesi burada kritik rol oynamaktadır. Yeterli tecrübeye sahip olmayan bir hekimin yanlış bölgeye uygulayacağı aks materyalinin radyasyonel komplikasyonların ortaya çıkmasına ve kemik yapılarının birbiriyle kaynaşmamasına neden olabilir.

Önerilen yöntem, CT veya MRI verilerinde cerrahın kemik yapısını bölütlemesi ve kırık bölgeyi işaretlemesiyle başlamaktadır. İlk olarak işaretlenen bölgedeki kemik yapıları kırpılır. Hacimsel olan bu bilgi yüzey modeline dönüştürülür. İçi boş yüzey modeli Voronoi yöntemiyle üçgensel şekillerle örülerek iç model iskeleti elde edilir. Daha sonra hekim tarafından belirlenen giriş ve çıkış düğümlerindeki en kısa yol tespiti yapılarak merkez hattı düğümleri tespit edilir. Son olarak bu noktalardan geçen doğrusal model (doğrusal regresyon) tespiti yapılır. Sonuç olarak kemik storunun en kalın bölgesinden geçecek implant materyalinin aks ve açısı hesaplanabilir. Böylece önerilen yöntem literatürde yer alan kırık türü/yeri tespit çalışmalarından farklılık içermekte ve sadece ilgili kırık bölgeye aks'ın yerleştirilmesi problemine çözüm sunmaktadır.

Bu makale şu şekilde organize edilmiştir. Bölüm 2'de, kırık kemikleri içeren veri kümesinin tanıtımı yapılmaktadır. Bölüm 3'te, önerilen yöntem kapsamlı bir şekilde ifade edilmektedir. Bölüm 4'te, önerilen yöntemin veri kümesi üzerinde elde edilen uygulama sonuçları paylaşılmıştır. Bölüm 5'te, makale çalışmasından önce yapılan önsel çalışmalardan bahsedilmektedir. Sonuç bölümünde, makale çalışması sonrası elde edilen nihai değerlendirmeler ifade edilmektedir.

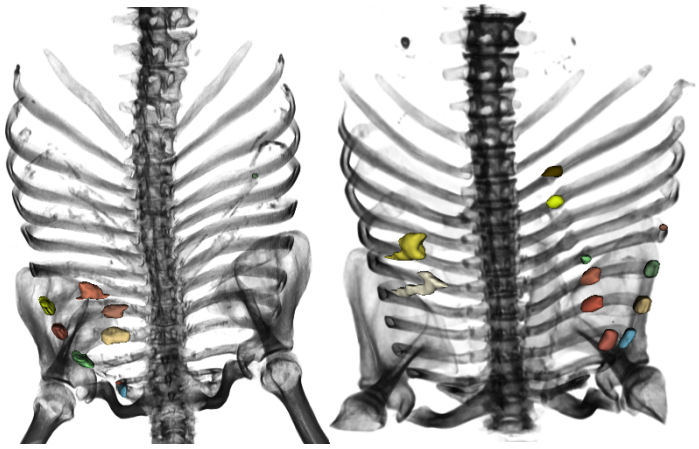
2. RibFrac2020 veri kümesi

Literatürde kemik kırığı ile ilgili birçok veri kümesi bulunmaktadır. Wrist-Fracture [8], MURA [9] ve Kaggle-Fracture [10] veri kümeleri kemik kırığı ile ilgili 2d X-ray görüntüler içerirken, RibFrac2020 veri kümesi [11] 3D CT verilerini içermektedir. Bu makalede önerilen yöntem 3D CT/MRI verilerinde çalışabilme özelliğine sahip olduğu için yapılan tüm deneysel faaliyetlerde RibFrac2020'deki 3d CT verileri kullanılmıştır.

RibFrac2020 [11] veri kümesi, kaburga kırığı teşhisinde hızlı ve yüksek doğruluk sağlayan yöntemlerin geliştirilmesi amacıyla hazırlanmıştır. Bu veri kümesinde toplam 660 CT taramasının yer aldığı ve bu taramalarda yaklaşık 5.000 kırık bölgenin bulunduğu görülmektedir. RibFrac2020 veri kümesinde yer alan iki farklı CT tarama örneği Şekil 1'de gösterilmektedir. Tarama üzerinde bulunan renkli yapılar kemik kırığının olduğu bölgelerdir. Bu bölgeler uzman hekimler tarafından manuel olarak belirlenmiştir. RibFrac2020 veri kümesinde bulunan veriler [12] numaralı linkten elde edilmiştir.

RibFrac2020 veri kümesinde yer alan üç farklı CT taramasına ait bilgiler uzamsal bilgiler Tablo 1'de verilmektedir. Taramaların aynı dilim kalınlığına (1,25), boyuta (512 x 512) ve minimum yoğunluk değerine (-3023) sahip olduğu, ancak dilim sayısı, x-y spacing değerleri ve maksimum yoğunluk değerlerinin farklı olduğu

görülmektedir. Veri kümesindeki örneklerde bulunan bu farklılıklar önerilen kemik birleştirme yönteminin kararlı çalışmasını engellemektedir.



Şekil 1. RibFrac2020 veri kümesindeki örnek CT taramaları ve kırık kemik bölgeleri (renkli yapılar).

Tablo 1. RibFrac2020'daki üç farklı CT verisine ait özellikler.

	Çekim boyutu	Çekim ölçüsü (Spacing)	Çekim aralığı (Intensity Range)
RibFrac1-image.nii	512 x 512 x 333	0,8262 x 0,8262 x 1,25	min: -3023, max: 1598
RibFrac2-image.nii	512 x 512 x 309	0,8008 x 0,8008 x 1,25	min: -3023, max: 1621
RibFrac3-image.nii	512 x 512 x 337	0,9063 x 0,9063 x 1,25	min: -3023, max: 3071

3. Önerilen yöntem

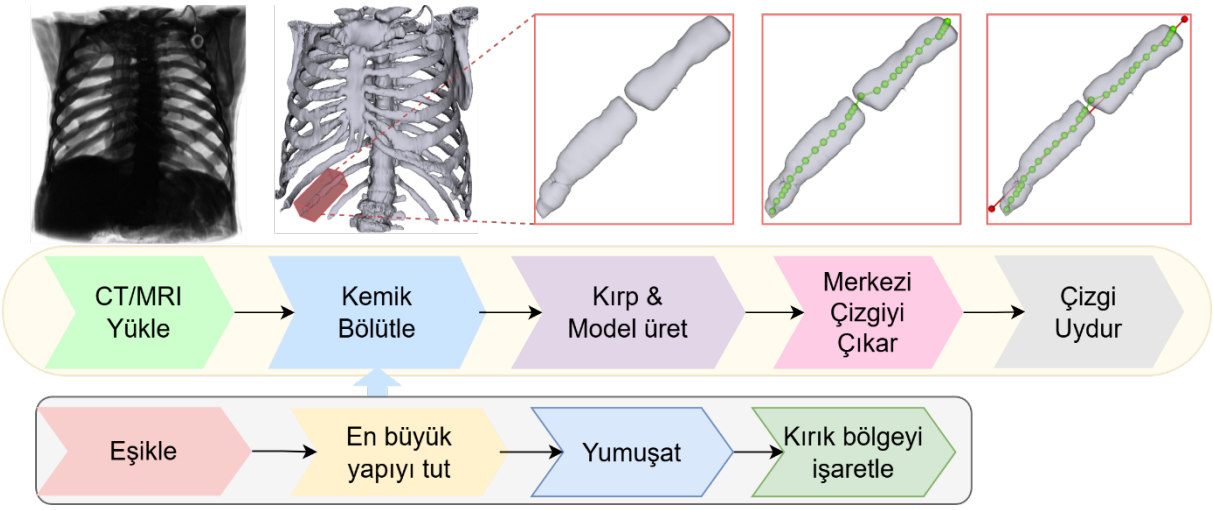
Kırık kemik parçalarını birleştirmek için önerdiğimiz yöntem beş aşamadan oluşmaktadır (bak Şekil 2). Bu aşamalar, CT veya MRI verisinin yüklemesi, veriden kemik yapısının ayıklanması, belirlenen kırık kemik bölgesinin kesilmesi ve modelinin üretilmesi, modelin merkez çizgi hattı noktalarının çıkarılması ve çıkarılan noktalar üzerine doğru modelinin uydurulması şeklindedir. Bu bölümde her bir aşamanın detaylarından kapsamlı bir şekilde bahsedilmektedir.

3.1. CT/MRI yükleme

Önerilen yöntem, üç boyutlu CT veya MRI verisini giriş olarak alabilir. Yöntemin çalışabilmesi için giriş veri çözünürlüğü (x ve y spacing), dilim kalınlığı (z spacing) veya ışık yoğunluk değerlerinde herhangi bir sınırlamaya ihtiyaç duyulmaz. Bununla birlikte giriş verisi, NIFTI veya DICOM uzantılara sahip olabileceği gibi, PNG, JPEG veya TIFF gibi uzantılardan oluşan bir görüntü koleksiyonu da olabilir. Bu nedenle önerilen yöntemin geniş bir kullanım alanına sahip olduğu rahatlıkla görülebilir.

3.2. Bölütleme

Bu aşamada, yüklenen CT/MRI verisinden manuel kemik yapısı çıkarılmakta ve çıkarılan genel kemik yapısından sadece kaynama yapılacağı özel kemik bölgesi ayıklanmaktadır. Kemik yapısının otomatik çıkarılması veya kırıklı bölgenin otomatik tespiti gibi konular bu makalenin kapsamı dışındadır. Bu makalede bilinen 3boyutlu iki kırık kemik yapısının en uygun yerden kaynamasını sağlayacak aksın (trajeksiyonun) hesaplanabilmesidir. Bunun için üç alt operasyon ardışık bir şekilde gerçekleştirilir: Eşikleme, en büyük parçanın tutulması ve yumuşatma.



Şekil 2. Önerilen kırık kemik kaynama yönteminin genel şeması.

3.2.1. Eşikleme

CT verileri oldukça geniş bir değer aralığına (-3023, 3071 gibi) sahiptir. Bu geniş aralık içerisinde kemik yapısına ait değer aralığının eşiklenmesi gerekir. Bunun için kemik yapısının minimum ve maksimum yoğunluk değerlerinin bilinmesi ve bu değerlere göre filtre uygulanması gerekmektedir. Kemiğin sert yapısından dolayı maksimum filtre değeri genellikle CT değer aralığının üst sınırı olmaktadır. Ancak filtrenin alt sınır parametresini ayarlama işlemi zordur. Cihaz farklılıkları, çekim parametre farklılıkları, hastanın yaşına göre kemik sertliğinin değişimi gibi nedenlerden dolayı, alt sınır değeri değişken aralıklara sahiptir. Bu nedenle otomatik eşikleme yöntemleri yeterli performansı sağlayamazlar. Bu çalışmada klasik eşikleme algoritmalarını kullanan manuel bir eşikleme yaklaşımı tercih edilmiştir.

Klasik eşiklemede, global, lokal ve OTSU gibi seçenekler mevcuttur. Verideki zıtlık (kontrast) farklılıkları global eşiklemeyi başarısız kılabilir. OTSU yöntemi, eşikleme noktalarını otomatik tespit etmek için kullanılır ve genellikle yoğunluk histogramında iki belirgin tepe olması durumunda iyi sonuçlar sağlar. Ancak CT'deki değer aralığının geniş olması ve histogramda birbiri içerisine geçmiş birçok tepenin bulunması, OTSU'nun kullanımını engeller. Bu çalışmada, bahsedilen problemlerin üstesinden gelmek ve minimum kemik yoğunluk değerini doğru tespit edebilmek için yerel eşikleme yöntemi kullanılmıştır. Bunun için kaynamanın yapılacağı kemik üzerinde bir alan seçimi yapılır ve seçilen bölgedeki yoğunluk değerlerinin histogramı elde edilir. Histogramdaki alt ve üst sınırlara göre eşikleme gerçekleştirilir. Eşikleme sonucunda kemik yapıları CT içerisindeki diğer tüm yapılardan ayıklanmaktadır.

3.2.2. En büyük yapının tutulması

Genellikle eşikleme sonrası birbirinden bağımsız birçok irili ufaklı yapı ortaya çıkmaktadır. Bu yapılar içerisinde en büyük alana sahip olanı genellikle göğüs kafesini oluşturan kemik yapısıdır ve bunun haricindeki diğer yapıların elenmesi gerekir. 3B bir yapının alanı içerdiği voksel sayısı olarak hesaplanır ve basit bir sayma işlemiyle rahatlıkla hesaplanabilir. Kemik yapısının haricindeki diğer yapıların elenmesi için alanı en büyük olan yapı tutulur ve diğerleri otomatik olarak elenir.

3.2.3. Yumuşatma

Eşikleme operasyonunun neden olduğu diğer bir olumsuzluk kemik yüzeylerinde pürüzlerin ve deliklerin ortaya çıkmasıdır ve düzgünleştirilmeye ihtiyaç duyulur. Bunun için yumuşatma operasyonu kullanılır. Median veya Gaussian yöntemleri yaygın kullanılan yumuşatma teknikleridir. Yumuşatma derecesi kernel parametresiyle belirlenir ve genellikle 3mm (3x3x3) boyutları tercih edilmektedir. Böylece uygulanan kernel maske boyutunun üç eksende (axial, sagittal ve koronal) 3'er piksel şeklinde olması sağlanmıştır. Daha yüksek değerler yapının yüzey eğriliklerinde bozulmaya neden olabilir. Median yönteminde, kernel içerisinde kalan yoğunluk değerleri

sıralanır ve ortanca değer saklanır. Gaussian yönteminde, Denklem (1)'de gösterilen yumuşatma fonksiyonu kullanılmaktadır.

3.2.4. Kırık bölgenin işaretlenmesi

Kırık bölgenin otomatik tespiti konusu çalışma konusunun dışındadır. Bu çalışmada kırık bölgesindeki kemiklerin kaynama aksının optimal tespitine odaklanılmıştır. Bu nedenle göğüs kemiği bölütleme faaliyeti tamamlandıktan sonra cerrah tarafından kırık bölgenin seçimi yapılmaktadır. Manuel işaretlenen bölgeden (region of interest) alınan 3b kemik yapıları model üretim aşamasına iletilir. Bu çalışmada RibFrac2020 veri kümesinde cerrahlar tarafından işaretlenen kırık kemik yapıları kullanılarak önerilen yöntemin birçok farklı kırık kaynama durumundaki doğruluğu incelenmiştir.

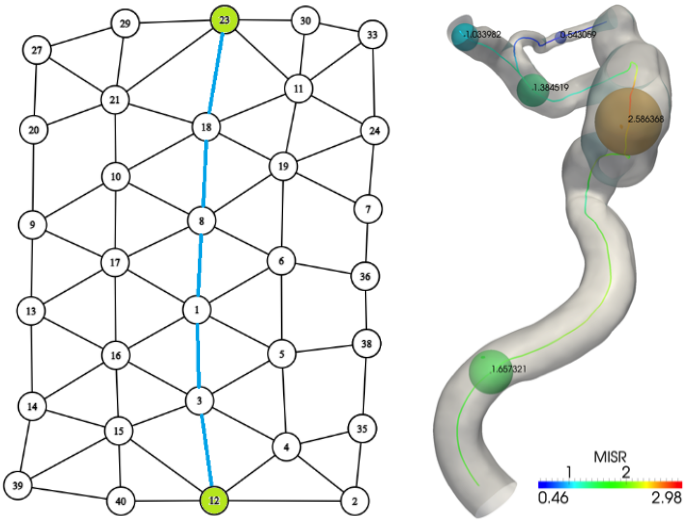
$$G(x,y,z) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2+z^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

3.3. Model üretimi

CT/MRI verisindeki kemik yapısı bölütlendikten sonra kemik kırığı olan lokal bölgenin çıkarılması gerekir. Bu işlemi gerçekleştirmek için 3D Slicer [15], Itksnap [16], Mitk [17], Mricron [18] ve Brainbox [19] gibi yazılımlar kullanılabilir. 3D Slicer yazılımında bu işlem iki farklı araç kullanılarak gerçekleştirilebilir: 1) morfolojik kesme aracı, 2) ROI aracı. Bu araçların herhangi biriyle kırık kemik bölgesi belirlenir ve iki değerli (0 ve 1) hacimsel lokal kemik verisi 3B örgü modeline aktarılır. Örgü modellerinde veri, düğüm ve yüzeyler ile temsil edilir. Genellikle yoğun bir yapıya sahip olan bu modeller yüksek sayıda düğüm içerebilir. Bu durum, örgüler üzerinde yapılacak işlemlerin maliyetini arttırmaktadır. Bu nedenle düğüm sayısının azaltılması için sadeleştirme işlemi gerçekleştirilir. Ancak sadeleştirme oranının doğru belirlenmesi önemlidir. Yüksek bir değerin seçilmesi, örgü yüzeyindeki eğriliklerin kaybolmasına neden olurken, düşük bir değerin seçimi, örgüdeki düğüm sayısının yeterince azalmamasına neden olabilir. Bu çalışmada yapılan uygulama faaliyetleri göz önüne alındığında, kemik yüzey yapısı bozulmadan düğüm sayısının yaklaşık %80 oranında azaltılabildiği görülmüştür.

3.4. Yapı merkez hattının çıkarılması

Bu aşamada, 3B kemik modelinin (düğüm sayısı sadeleştirilmiş örgü modeli) merkez hattı elde edilmektedir. 3B nesne modellerinin merkez hattını çıkarmak için farklı yaklaşımlar önerilmiştir. Bunlardan biri, başlangıç ve bitiş düğümleri arasında ağırlıklandırılmış en kısa yolun bulunmasıdır. Bu yaklaşım, yüzey modeli ve model üzerinde belirlenen iki noktayı (başlangıç ve bitiş) girdi olarak almakta ve Dijkstra algoritmasıyla [13] noktalar arasındaki en kısa yolu hesaplamaktadır. Şekil [3] (sol)'da 40 düğümlü bir örgü modeli gösterilmektedir. Bu örgünün 23 ve 12 numaralı başlangıç ve bitiş düğümleri arasındaki en kısa yol 'un merkez hattını nasıl temsil ettiği rahatlıkla görülebilmektedir. Bu yaklaşımın dezavantajı, başlangıç ve bitiş düğüm konumlarına olan bağımlılıktır. Eğer belirlenen bu noktalar merkezi hat üzerinde değilse sapmalar meydana gelebilir. Diğer bir yaklaşım, Voronoi diyagramlarının kullanımına dayanır. Voronoi yaklaşımında, kemik yapısının baş kısmından girip sonundan çıkan ve çapı maksimum olacak şekilde güncellenen kürenin merkez noktaları hesaplanır (bak Şekil [3] (sağ)). Yapı içerisine sığacak maksimum çaplı kürelerin orijin noktaları, merkez hattı temsil etmektedir. Bu noktaların birbirleriyle doğrusal birleşmesi sonucu merkezi hat elde edilir. Voroni yaklaşımında başlangıç ve bitiş düğümleri kullanılması, hesaplanan çizgi hattında bozulmaya neden olmaz. Bu nedenle çalışmada Voroni temelli merkezi hat belirleme yaklaşımı kullanılmıştır [14].



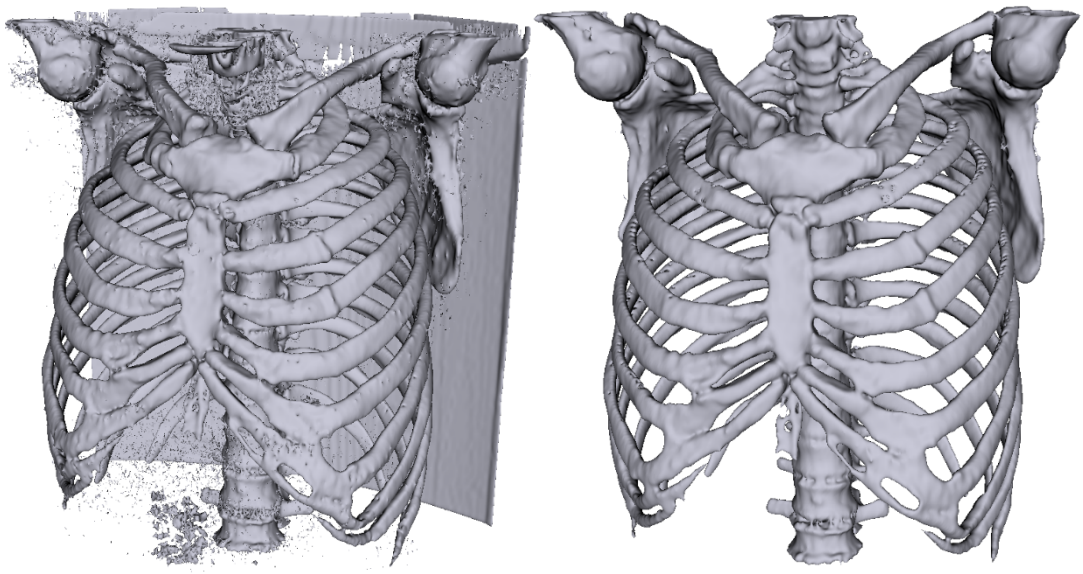
Şekil 3. Merkezi hattın tespiti. (sol) Dijkstra, (sağ) Voronoi [12].

3.5. Birleştirme materyali için çizgi uydurma

Kırık kemikleri birleştirme materyali, doğrusal bir yapıya sahiptir. Bu nedenle hesaplanan merkez çizgi hattı üzerindeki noktalardan geçecek doğrusal bir çizginin tespiti amaçlanmaktadır. Bunun için veri biliminde yaygın bir şekilde kullanılan "line fitting" algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma en küçük kareler tekniğini kullanmaktadır. Buna göre üç boyutlu uzayda yer alan nokta kümesine uzaklığı minimum olacak doğrusal çizginin parametrelerini tespit eder. Birleştirme materyali, hesaplanan bu doğrusal çizgi ekseninde uygulanabilir.

4. Uygulama sonuçları

Uygulama çalışmaları 3D Slicer yazılımında ve Python programlama dilinde gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, kırık kemiklerin kaynaması için önerilen yöntemin daha iyi anlaşılabilmesi için CT göğüs verileri kullanılarak yapılan uygulamaların sonuçları paylaşılmaktadır. Buna göre RibFrac2020 veri kümesinden alınan CT göğüs verisinin yoğunluk aralığının [-1868.50-1598.00] olduğu görülmüştür. Oldukça geniş bir aralığa yayılan parlaklık değerleri içerisinden göğüs kafesi kemik yapının ayıklanabilmesi için uygun eşikleme işleminin yapılması gerekir. Birçok farklı kemik bölgesindeki lokal parlaklık değerlerinin toplanarak histogramlarının incelenmesi sonucu eşikleme işleminin alt sınır değeri 92 olarak belirlenmiştir. Eşikleme sonucu elde edilen iki seviyeli kemik yapısı Şekil [4] (sol) da gösterilmektedir. Sonuca bakıldığında ana kemik yapısının haricinde irili ufaklı birçok farklı yapının ortaya çıktığı görülmektedir. Ana kemik yapısının diğer yapılardan ayıklanabilmesi için hiçbirisi yapıların hacim özellikleri kullanılmıştır. En büyük hacimli yapı tutularak diğer küçük hacimli yapılar elenmiştir. Eşikleme ve eleme işlemi sonrası kemik yapısı üzerinde delikler ve pürüzlü dikenli yapılar görülmektedir. Daha yumuşak ve pürüzsüz kemik yapısının elde edilebilmesi yumuşatma operasyonu (Median operatörü) kullanılmıştır. Örnek bir CT verisi üzerinde ardışık gerçekleştirilen eşikleme, eleme ve yumuşatma operasyonlarının sonucu Şekil [4] (sağ) da gösterilmektedir.



Şekil 4. Kemik yapısının bölümlenmesi. (sol) Eşikleme sonucu, (sağ) Eşikleme, eleme ve yumuşatma sonucu.

Ham CT verisinden pürüzsüz göğüs kafesi kemik yapısı elde edildikten sonra kırık olan kemik bölgesinin bölümlenmesi aşamasına geçilmektedir. İlk olarak implant malzemenin uygulanacağı kemik bölgesinin (ROI) uzman hekim tarafından belirlenmesi gerekir. ROI belirlendikten sonra kırpma yapılarak genel CT verisinden sadece kırık kemik bölgesinin çıkarılması sağlanır. RibFrac2020 veri kümesinde kırık bölgeler zaten uzman hekimler tarafından işaretlenmiş olduğu için bu çalışmada uzman hekim işaretlemesine gerek kalmadan kırık kemik bölgesinin kırpılması işlemi otomatik olarak gerçekleştirilmiştir.

Şekil [5]'te, RibFrac2020 veri kümesinde işaretlenmiş altı farklı kırık kemik bölgesine ait kemik yapıları gösterilmektedir. Ayrıca kemik yapıları üzerinde merkez hattı çıkarma operasyonu gerçekleştirilmiş ve elde edilen merkezi hat noktaları renkli olarak kemik yapıları üzerine çizilmiştir. Merkez hattı çıkarma modülü, giriş olarak model nesnesi kullanmaktadır. Oysa ROI kırpılması sonucu hacimsel bir veri elde bulunmaktadır. Bu nedenle hacimsel verinin model (örgü) yapısına dönüşümü sağlanmıştır. Bu dönüşümle matris formundaki bilgi, düğüm ve yüzey bilgilerine dönüştürülmektedir. Hacimsel verinin model yapısına dönüşümü işlemi 3D Slicer yazılımında bulunmaktadır. Bu nedenle geliştirilen eklenti içerisinde ek yazılıma ihtiyaç duyulmadan rahatlıkla kullanılabilmektedir.

Hacim-Model dönüşümü tamamlandıktan sonra **içi boş kemik yüzey modeli** elde edilmektedir. Model içinin küçük geometrik şekillerle (üçgenler) doldurulması ve böylece iç hacmi dolduran iskelet modelinin elde edilebilmesi işlemi Voronoi diyagramları [20] yardımıyla gerçekleştirilir. Voronoi diyagramı, kemik modelinin içyapı örgüsünün küçük geometrik şekiller ile temsil edilmesini sağlamaktadır. Merkezi hat tespit yazılımı belirlenen bu düğüm ve yüzeylerden oluşan yapı üzerinde çalışmaktadır. Voronoi, iç hacmi birçok noktaya (genellikle yüzeyden alınan örnekler) böler ve yüzey modelinin içinde bir iskelet yapısı (düğüm ve aygıtlardan oluşan çizge yapısı) üretir. Bu bölünmeler sonucu oluşan Voronoi hücrelerinin iskeleti, iç boşluğun geometrik merkezine en yakın geçen hatları oluşturur. Üretilen iskelet yapısı daha sonra merkez hattı çıkarımı için kullanılır. Merkez hattın çıkarılması için üretilen çizge modeli üzerinde bir başlangıç ve bir bitiş noktasının belirlenmesi gerekir. Daha sonra seçilen başlangıç ve bitiş düğümleri arasındaki en kısa yol (shortest path) Dijkstra [13] algoritmasıyla tespit edilir. Bu algoritma ile çizge üzerindeki belirli bir kaynak düğümden hedef düğüme olan en kısa yol tespit edilebilir. Bulunan en kısa yol üzerindeki düğüm noktaları merkez hat düğümlerini temsil eder. Bununla beraber Şekil [5]'te, kemik dış yapısından türetilen Voronoi iskeleti yeşilimsi bir renkle gösterilmektedir.

Şekil [5]'te altı farklı kırık kemik yapısında merkez hattı noktalarının tespiti ve bu noktalara çizgi uydurma işlemi sonuçları paylaşılmaktadır. 1, 2, 4 ve 6 numaralı kemik yapılarında merkez hattı tespitinde herhangi bir çatallaşmanın olmadığı, tek bir eğri hattının tespit edildiği, bu nedenle hat üzerindeki noktaların tek renkle ifade edildiği görülmektedir. 3 ve 5 numaralı kemik yapılarında ise merkez hat eğrisinde çatallaşmanın yaşandığı, üç farklı eğrinin ortaya çıktığı, her bir eğri noktalarının farklı renklerle boyandığı görülmektedir. Bu çatallaşmanın

bir nedeni, kemik yüzey geometrisinde bulunan farklılıklar olduğu görülmektedir. Düzgünlüğü bozan çıkıntılar ve kıvrılmaların olması merkezi hattın çatallaşmasına neden olmaktadır. Bir diğer neden, kemik içyapısında delik bulunmasıdır. Delik içermeyen dolgun kemik yapılarında çatallaşma olmazken, delikli yapılarda birden fazla çatal meydana gelmektedir. Hekim tarafından kemik yapısının dış geometrisi görülebilir, ancak içerisinde delik içerip içermediği bilinemeyeceği için implant malzemeyi doğru konuma uygulaması oldukça zordur. Önerilen yöntemde merkezi hat eğrileri hesaplanırken dış geometri ve iç delik yapıları bütüncül olarak değerlendirildiği ve buna göre iç örgü modeli oluşturulduğu için nesnel bir sonuç üretilmektedir.

Çatallaşmanın ortadan kaldırılması ve merkezi hattın ortaya çıkarılması için geliştirilen eklenti yazılımını kullanarak cerrah dışlanacak hatları belirleyebilmektedir. Bunun için dışlanacak hat üzerindeki herhangi bir düğümü seçmesi yeterlidir. Böylece silinecek hat belirlenir ve kalan hatların birleştirilerek merkezi hat elde edilir. Önerilen yaklaşımın son aşamasında, merkez hattı üzerinde bulunan 3B noktalara doğrusal bir çizgi uydurma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada Denklem 2'de gösterildiği gibi 3B uzayda N adet nokta bulunmaktadır.

$$\{(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^{N} \tag{2}$$

Bu nokta kümesine uydurulacak doğru Denklem 3'teki gibi ifade edilebilir:

$$r(t) = p + t.v \tag{3}$$

$p \in \mathbb{R}^3$, N noktanın merkezini temsil eder ve sabittir. $v \in \mathbb{R}^3$, doğrunun yön vektörü temsil eder. $t \in \mathbb{R}^3$, v yön vektörüne bağlı parametrik değişkendir. Amaç her noktanın doğruya dik izdüşüm mesafesinin karesi toplamını minimize etmektir. Karesel toplam Denklem 4'te ifade edildiği gibi formülleştirilebilir.

$$L(v) = \sum_{i=1}^{N} \|r_i - p - [(r_i - p).\hat{v}]\hat{v}\|^2 \tag{4}$$

Dolayısıyla problem Denklem 5'te gösterilen optimizasyon problemi haline dönüşmektedir.

$$\min_{v \in \mathbb{R}^3} L(v) \ şart \ \|v\| = 1 \tag{5}$$

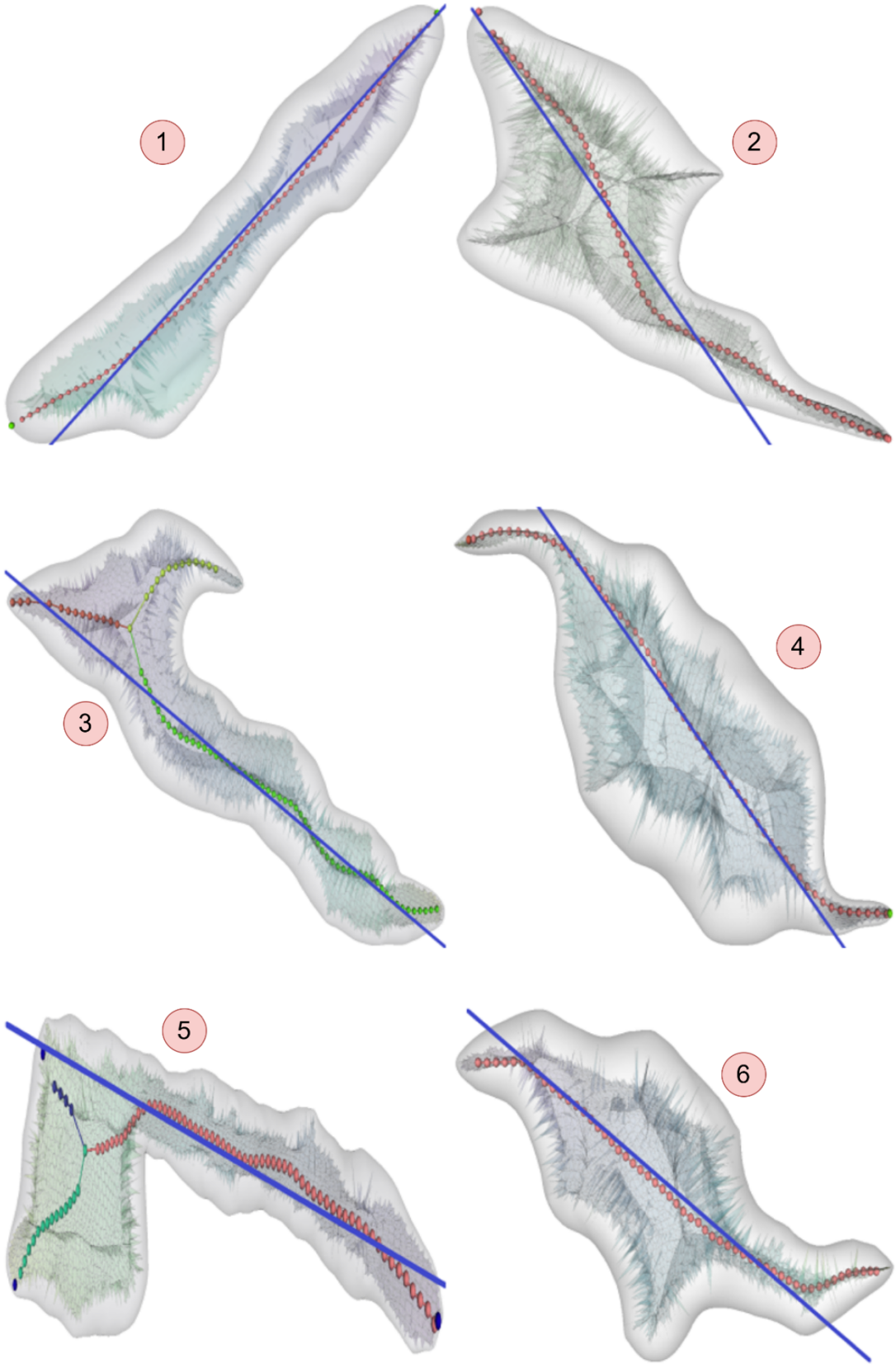
Bu minimizasyon probleminin çözümü için doğrudan SciPy.optimize kütüphanesinde bulunan minimize fonksiyonu kullanılmıştır. Bu işlemin sonucunda elde edilen doğru örnekleri, Şekil [5]'te kalın mavi renkle gösterilmektedir. Kemik yapıları üzerine çizilen bu doğru, kırık kemiklerin birleştirilmesinde kullanılan implant malzemenin hangi aks ve açıda uygulanması gerektiği noktasında cerraha rehberlik etmektedir. Böylece implant veriminin arttırılması ve kemik kaynaşım sürecinin minimize edilmesi hedeflenmektedir.

Doğrulama Faaliyeti

İmplant malzemenin uygulama doğruluğunun sayısal olarak anlaşılabilmesi için çizgi uydurma işleminin ortalama başarımı hesaplanmıştır. RibFrac2020 veri kümesinde yaklaşık 5000 adet kırık bölge bulunmaktadır. Önerilen yöntem manuel işaretlemelere bağımlı olduğu için tüm kırıklar üzerinde işlem yapmak yüksek maliyet (uzun bir zaman ve iş yükü) gerektirir. Bu nedenle örnekleme yapılarak 20 farklı kırık bölgesi üzerinde doğrulama çalışması yapılmıştır. Geliştirilen 3D Slicer eklenti yazılımı kullanılarak her bir kırık yapının kemik bölütleme, Voronoi iskeleti inşa etme, merkezi hat noktalarını tespit etme ve çizgi uydurma işlemleri sırayla gerçekleştirilmiştir. Uydurulan her bir çizginin Denklem 6'da ifade edilen R^2 değeri hesaplanarak başarı ölçütleri hesaplanmıştır.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \tag{6}$$

y_i, model noktasını, $\hat{y}_i$ ilgili model noktasının tahmini değerini, $\bar{y}$ ise ortalama tahmin değerini gösterir. R^2 değeri daima 0 ile 1 arasında sonuç üretir ve 1'e yakın değerler çizgi uydurmanın başarıyla gerçekleştiğini ifade eder. 20 farklı kırık yapının ortalama çizgi uydurma başarımı $R^2 = 0.83$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değer implant malzemenin kemik yapısının merkez hattını önemli oranda temsil gücüne sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. 3B kemik yapılarının noktasal merkezi hattı (noktalar) ve bu hatta aksın (mavi çizgi) uydurulması.

Önerilen yöntemin sınırları

Kırık kemik yapılarının kaynaması için uygulanan implant malzemenin uygun açı ve konuma yerleştirilmesi ile ilgili önerilen yöntemin bazı sınırları bulunmaktadır. Bu sınırlamalar aşağıda maddeler halinde listelenmektedir:

1. CT/MRI verilerindeki kemik yapıları manuel bölütlenmektedir. Literatürdeki otomatik kemik bölütleme yöntemlerinin geliştirilen eklenti yazılımına entegrasyonu hiç şüphesiz Ortopedi uzmanlarının iş yükünü azaltabilir.
2. Kemik yapısındaki kırık bölge cerrah tarafından manuel işaretlenmektedir. Özellikle derin öğrenme modelleriyle kırık bölgelerinin otomatik tespitini yapan çalışmaların entegrasyonu yapılan çalışmayı daha ileriye taşıyabilir.
3. Kemik yapısının içinde bulunan delikler ve dış geometrik farklılıklar merkez hattının inşasında çatallaşmalara neden olmaktadır. Bu durumda cerrahın istenmeyen çatalları elemesi gerekir. Bu eleme işlemi manuel gerçekleştirilmektedir. Otomatikleştirilmesi yönünde çalışmalar yapılabilir.

Şüphesiz listelenen bu sınırlamaların ortadan kaldırılmasıyla kullanımı daha kolay ve esnek bir eklenti yazılımı üretilebilir. Ancak manuel müdahaleleri içermesine rağmen mevcut geliştirilen yazılımın implant malzeme yerleştirme operasyonunda Ortopedi uzmanlarına önemli düzeyde rehberlik edebileceği değerlendirilmektedir.

Sonuç

Bu çalışmada ortopedik travma sonucunda kırılan veya yerinden oynayan kemik yapılarının birleştirilmesi işleminde cerraha yardımcı olacak ve birleştirme materyalini kemik yapısına en uygun pozisyonda uygulanabilmesi için doğru aks ve açının tespitini yapabilecek yardımcı bir yazılım üretilmiştir. Bu yazılım 3D Slicer ortamında gerçekleştirilmiş ve Python programlama dili kullanılarak yeni bir eklenti üretilmiştir. Slicer'daki bu eklentiyi kullanan bir cerrah, CT veya MRI verilerindeki kırık kemik yapılarını seçebilir ve implant malzemeyi seçilen kemik yapısına uygulaması sonucunda en uygun aks ve açının tespitini yapabilir.

Geliştirilen yazılımın uygulama faaliyetleri için RibFrac2020 veri kümesindeki CT taramaları kullanılmıştır. Önerilen yöntemin kırık kemik yapılarındaki düzensizlikler, kemik yapısının 3B olması, kemiğin dış geometrik yapısının oldukça karmaşık olması, iç kemik örgüsünde deliklerin veya boşlukların olması gibi birçok zorluğun üstesinden gelerek implant malzeme için en uygun aks ve açıyı hesaplayabildiği görülmüştür. 20 hasta verisi üzerinde yapılan doğrulama faaliyeti sonucunda implant malzemenin merkezi hatta oturma doğruluğu $R^2 = 0.83$ düzeyinde olduğu görülmüştür.

Bir sonraki çalışmada geliştirilen yazılımın gerçek zamanlı olarak çalışabilir hale dönüştürülmesi ve ameliyat sürecinde cerraha yardımcı bir araç olarak kullanılması hedeflenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından ARDEB 1001 projesi ve 122E495 numarası ile desteklenmiştir. Çalışmamızın gerçekleştirilmesinde desteğin kritik bir rolü bulunmaktadır. Bu nedenle verdiği destekten dolayı TÜBİTAK'a minnettarız. O. B. fikir sahibi, M.F.T ise deneyleri gerçekleştirdi. Her iki yazar sonuçları yorumladı ve makaleyi birlikte yazdı.

Kaynaklar

[1] Özel Adana Ortadoğu Hastanesi, Kapalı Redüksiyon. Retrieved from https://www.ortadoguhastanesi.com.tr/kapali-reduksiyon. Erişim tarihi: 10.01.2025.

[2] Promedis, G. Skopi Cihazları. Retrieved from https://www.promedis.com.tr/tr/urunler/c-kollu-skopi-cihazi. Erişim tarihi: 02.04.2025.

[3] Ma Y, Luo Y. Bone fracture detection through the two-stage system of Crack-Sensitive Convolutional Neural Network. Informatics in Medicine Unlocked. 2021, 22, 100452.

[4] Shaghayegh Tabarestani AA, Ezoji M. Bone Fracture Detection and Localization on MURA Database Using Faster-RCNN. 2021 7th International Conference on Signal Processing and Intelligent Systems (ICSPIS), 1–6.

[5] Lind A, Others. Artificial intelligence for the classification of fractures around the knee in adults according to the 2018 AO/OTA classification system. PLoS ONE, 2021, 16(4). doi:10.1371/journal.pone.0248809

[6] Chen Y. Classification of Atypical Femur Fracture with Deep Neural Networks (Dissertation). 2019. Retrieved from https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-255677.

[7] Y Qi, et al., “Ground Truth Annotated Femoral X-Ray Image Dataset and Object Detection Based Method for Fracture Types Classification” in IEEE Access, , pp. 189436-189444, 2020.
[8] Malik H. Wrist Fracture - X-rays. Mendeley Data. 2020.
[9] Pranav Rajpurkar, Jeremy Irvin, Aarti Bagul, Daisy Ding, Tony Duan, Hershel Mehta, Brandon Yang, Kaylie Zhu, Dillon Laird, Robyn L. Ball, Curtis Langlotz, Katie Shpanskaya, Matthew P. Lungren, & Andrew Y. Ng. 2018. MURA: Large Dataset for Abnormality Detection in Musculoskeletal Radiographs.
[10] Srinivas V. Kaggle-Fracture. 2021. Retrieved from https://www.kaggle.com/datasets/srinivasvishal7/fracture.
[11] Jin, Liang et al. Deep-learning-assisted detection and segmentation of rib fractures from CT scans: Development and validation of FracNet. eBioMedicine. 2020, Volume 62, 103106.
[12] Piccinelli M. Description of geometric indices. Retrieved from http://ecm2.mathcs.emory.edu/aneuriskweb/description. Erişim tarihi: 01.03.2025.
[13] Cormen, T. H.. Introduction to Algorithms (Second ed.). The MIT Press. Cambridge, Massachusetts London, England. 2001, 595–601.
[14] Bai X. Voronoi Diagram Based Heterogeneous Circuit Layout Centerline Extraction for Mask Verification. 2022. pp. 172–177. 2022 27th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC).
[15] 3D Slicer. Link: https://www.slicer.org/. Erişim Tarihi: 09.10.2024.
[16] Itksnap. http://www.itksnap.org/pmwiki/pmwiki.php. Erişim Tarihi: 20.12.2024.
[17] Mitk. https://www.mitk.org/wiki/The_Medical_Imaging_Interaction_Toolkit_(MITK). Erişim Tarihi: 24.10.2024.
[18] Mricron. https://people.cas.sc.edu/rorden/mricron/index.html. Erişim Tarihi: 04.02.2024.
[19] Brainbox. https://people.cas.sc.edu/rorden/mricron/index.html. Erişim Tarihi: 04.02.2024.
[20] Akça Z, Çalış C. On The Voronoi Diagram and Taxicab Plane. Erzincan University Journal of Science and Technology. 2021. 14(1), 175-181.
[21] RibFrac. https://ribfrac.grand-challenge.org/publication/. Erişim Tarihi: 16.10.2024.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 569-580, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1602995

Deprem Kuvveti Etkisi Altında Çelik Yapıların Davranışının Yapay Sinir Ağları ile Değerlendirilmesi

Niyazi Safa AKSU[1*], Yüksel ESEN[2], Muhammed ATAR[3]
[1,2] Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye
[3] Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye
[*1] aksuniyazisafa@gmail.com, [2] yesen@firat.edu.tr, [3] matar@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 17/12/2024; Kabul/Accepted: 22/07/2025)

Öz: İnşaat mühendisliği alanında yapay zekâ uygulamaları, karmaşık ve zaman alıcı yapı tasarım süreçlerinin daha hızlı, kolay ve güvenilir bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlayabilecek bir potansiyele sahiptir. Çalışmamızın amacı, bu potansiyelin uygulanabilirliğini test etmektir. Bu kapsamda, öncelikle örnek yapılar çelik olarak belirlenmiş ve bu yapıların taşıyıcı sistemlerinin deprem etkisi altındaki doğrusal analizleri SAP2000 programı kullanılarak gerçekleştirilmiş; yapının maksimum deplasman değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra, bir yapının deplasmanını etkileyebilecek kat yüksekliği, kat sayısı, yapı yüksekliği, yapı ağırlığı ve yapı taban alanı parametreleri giriş verileri, yapıların maksimum deplasman değerleri ise çıkış verileri olacak şekilde bir yapay sinir ağı (YSA) modeli oluşturulmuştur. Çalışmanın sonunda, SAP2000 ile hesaplanan maksimum deplasmanlar ile YSA modeli tarafından tahmin edilen deplasmanlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, oluşturulan YSA modelinin regresyon katsayılarının 1'e oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, regresyon grafikleri ile elde edilen sonuçların anlamlı olduğunu ve YSA verilerindeki hata oranının yaklaşık %10'dan düşük olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Çelik yapılar, yapay sinir ağları, deprem, doğrusal analiz.

Evaluation of the Behavior of Steel Structures Under Seismic Force Using Artificial Neural Networks

Abstract: Artificial intelligence applications in civil engineering hold significant potential for accelerating complex and time-consuming structural design processes, enhancing their efficiency, reliability, and speed. The aim of this study is to evaluate the feasibility of utilizing this potential. To this end, steel sample structures were selected, and linear analyses of their structural systems under seismic effects were conducted using SAP2000 software to calculate maximum displacement values. Then, an artificial neural network (ANN) model was created with the parameters of storey height, number of storeys, building height, building weight and building floor area as input data and the maximum displacement values of the structures as output data. At the end of the study, the maximum displacements calculated by SAP2000 and the displacements predicted by the ANN model were compared. As a result of this comparison, it was found that the regression coefficients of the ANN model were very close to 1. This shows that the results obtained from the regression plots are significant and the error rate in the ANN data is less than 10%.

Key words: Steel structures, artificial neural network, earthquake, linear analysis.

1. Giriş

Yapılarda taşıyıcı sistem olarak çeliğin kullanılması 18.yy sonlarına doğru İngiltere'de, Severn Nehri üzerine inşa edilmiş Coalbrookdale Köprüsü ile başlamış ve günümüze kadar devam etmiştir [1][2][3]. Çelik yapıların hafif ve yüksek dayanıma sahip olması, olumsuz hava muhalefetlerine karşı dayanıklılığı, betonarme taşıyıcı sisteme kıyasla daha hızlı ve ekonomik onarım imkanı, montaj ve takviye olanakları nedeniyle imalat, restore edilme ya da transfer işlemlerinde kolaylık, geri dönüştürülebilir olması gibi birçok olumlu yönleri nedeniyle zamanımızda çeliğe olan alaka günden güne artmaktadır [4]. 2019 yılı verilerine göre, Türkiye çelik üretiminde dünya sıralamasında sekizinci, Avrupa sıralamasında ise ikinci sırada yer almaktadır [5]. Ülkemizde yapı malzemesi olarak çeliğin kullanımı ise 19.yy ortalarında bina yapım aşamasında kullanılmasıyla başlamaktadır [1][2][3]. Buna rağmen çelik yapı stoğu konusunda henüz istenilen düzeyde değildir.

Ülkemiz sismik aktifliği yüksek olan Alp-Himalaya kuşağının bir parçasıdır. Bu durum, bölgenin genel olarak yüksek deprem olasılığına sahip olması, tarih boyunca yıkıcı ve hasar bırakan depremler meydana gelmesine neden olmuştur. Öyle ki, yakın tarihte yaşanan M_w 7,7 ve M_w 7,6 büyüklüğündeki Kahramanmaraş depremleri bunun en

[*] Sorumlu yazar: aksuniyazisafa@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0009-0001-9227-9680, [2] 0000-0003-2523-0390, [3] 0000-0001-7812-0086

yakın örnekleri olarak göstermektedir [6–8]. Deprem etkisi, bir yapıya enerji uygulayarak kendini gösterir. Bir yapının deprem etkisi altında davranışı ise yapının bu enerjiye karşı tepkisi ile belirlenir. Deprem enerjisi altında yapının davranışını, geri dönen elastik şekil değiştirme enerjisi (E_S), viskoz sönüm enerjisi (E_D), kinetik enerjisi (E_K), geri dönmeyen (tüketilen) histerik enerjisi (E_H) ve bu enerjilerin aralarındaki denge durumu belirler [9]. Bu temel dört enerji bileşenlerin teorik olarak toplamı depremle yapıya giren enerjiye (E_I) eşit olmakta ve bu eşitlik Denklem 1'de ifade edilmektedir.

$$E_S(t) + E_D(t) + E_K(t) + E_H(t) = E_I(t) \quad (1)$$

Yapının sönüm enerjisi (enerji yutma kapasitesi) gelen deprem enerjisinden büyükse ($E_D>E_I$), bu enerji sönümlemeyle karşılanacaktır. Lakin deprem enerjisi sönüm enerjisinden fazla olması durumunda ($E_D<E_I$) aradaki fark histerik enerji ile karşılanacaktır. Bu fark yapının sünekliliğini belirtir ve dayanıma göre tasarımda rijitlik, dayanımla birlikte kullanılan üç temel unsurdan biridir [9]. Zamanla güncellenen deprem yönetmeliklerimiz, daha güvenli olması, yatay yük altından uygun sonuçlar vermesi, iyi enerji sönümleme kabiliyetine sahip olması gibi nedenlerle yapı tasarımlarında inşaat mühendislerini öncelikli olarak süneklilik düzeyi yüksek yapılar tasarlamaya yönlendirmiş ve bu yönlendirme her geçen gün artmıştır.

Çelik, malzeme olarak bakıldığında yüksek süneklilik özelliğine sahiptir. Fakat sistem sünekliği yönünden aynı özelliğe sahip olacağı anlamına gelmez. Çünkü sistem sünekliğinde malzeme özelliklerinden ziyade, sistemin geometrisi de önemlidir. Yani taşıyıcı sistemde çelik malzeme seçip, sistemim yüksek sünekliliğe sahip oldu demek yanlış bir yaklaşımdır [10]. Çelik ve betonarme taşıyıcı sistemlerin deprem davranışı ve dayanımı ele alındığında, çelik strüktürün daha yüksek performans gösterdiği bilinmektedir. Beton kırılgan ve daha gevrek iken, çelik esnek ve daha sünektir; bu nedenle deprem dayanımı daha yüksektir. Çelik aşırı yük altında beton gibi kopma veya kırılma değil, eğilme davranışı göstermekte bu nedenle yatay yük altında daha iyi performans göstermektedir [11].

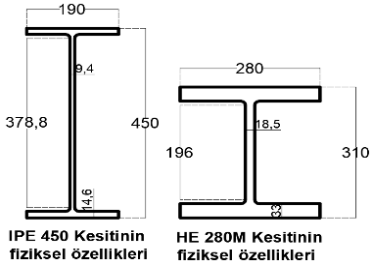
Ülkemizde depremselliğin kaçınılmaz olması ve bu doğrultuda çelik yapı stoğunun zamanla artacağı gerçeği göz önüne alınarak, gelecekte sismik kuvvet tesirinde çelik yapılar ile ilgili çalışmalar artacağı öngörülmektedir. Bu çalışmaları destekleyecek, gerektiğinde kontrol edecek ve çalışmalarda daha hızlı sonuçlar alınmasını sağlayabilecek yapay zekâ kullanımı da zamanla artacaktır. Öyle ki, yapı anabilim dalı altında yapay sinir ağları (YSA) ile ilgili çalışmalara bakacak olursak, Öztekin ve Uzun [12], NPI profilli basit kirişlerin yanal burkulma olmaksızın taşıyabileceği maksimum yayılı yükün tahmini amacıyla bir YSA modeli geliştirmiş ve modelden umut vadeden sonuçlar elde etmiştir. Köroğlu vd. [13], FRP sargılı betonarme kolonların eğilme kapasitesi tahmini için YSA modeli kurmuş ve litaratürdeki mevcut geleneksel yaklaşımlara göre daha tatmin edici sonuçlara ulaşmıştır. Yavuz vd. [14], çalışmasında FRP sargılı betonarme kirişlerin kesme dayanımını tahmini üzerine YSA modeli kurmuş ve makul veriler elde edilmiştir. Chun vd. [15], köprülerde erken hasar tespiti konulu çalışmasında hasarların lokasyonu ve derecesinin belirlenmesi için YSA tabanlı sistem geliştirilmiştir. Arslan vd. [16], 4-10 katlı mevcut betonarme binaların deprem performansının tahmini üzerine YSA modellenmiş ve modelin doğruluğu yaklaşık %74 olarak bulunmuştur. Suryanita vd. [17], çalışmasında, deprem nedeniyle betonarme binalarda oluşan hasar seviyesinin tahmin edilmesi için YSA oluşturulmuş ve tahmin oranı %85-%95 civarında bulunmuştur. Mazanoğlu ve Kandemir [18], ankastre kirişlerin deney yapılmaksızın ivme cevabı ve çatlak yeri hakkında tahmini üzerine ileri beslemeli geri yayılım algoritması kullanılarak YSA kurulmuş ve yüksek regresyon katsayı değerlerine ulaşılmıştır. Ilkhani vd. [19], burulma tesirinde 112 adet betonarme kirişinin burulma kapasitesinin tahmini için örneklerin kiriş boyutları, beton basınç dayanımı, donatı özellikleri girdi olarak burulma kapasitesi ise çıktı olacak şekilde YSA modeli kurulmuş ve maksimum hata %30 olarak elde edilmiştir. Özbayrak [20], deprem tesirinde betonarme kirişsiz döşemelerin eğilme momenti tahmini üzerine kurduğu YSA da %98'lik bir başarı elde edilmiştir. Özkan [21], 8 kata kadar konut tipi betonarme yapılar için YSA kullanılarak yapı performans sınıflarının hızlı ve az veri ile tahmin edilmesini sağlayan yeni bir yöntem geliştirmiş ve mevcut yapılar üzerinde yapılan testlerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Arslan [22], cam elyaf takviyeli polyester (CTP) profillerin tek eğrilikli uzay kafes sistemlerde kullanımı ve performansını YSA ile analiz etmiş ve analiz sucunda malzemenin bu sistemlerde yapı malzemesi olarak etkin ve güvenilir bir seçenek olduğunu göstermiştir. Yalçın (2020) ise basit mesnetli köprülerin hareketli yük dağılım faktörüne ait denklemlerin bulunması için YSA modeli oluşturulmuş ve tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir [23][24]. Dadashov [25], çalışmasında, kiriş yapılarında rijitlik kaybına bağlı hasar tespiti amacıyla, YSA ile simüle edilmiş veriler üzerinden model eğitimi yapılmış; Genetik Algoritma yöntemiyle frekans ve mod şekli değişimlerine dayalı optimizasyon gerçekleştirilerek her iki yöntemin etkinliği ve karşılaştırmalı performansı değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, yapılan bu çalışmalara paralel olarak yapay zekânın yapı tasarımı aşamasındaki kullanılabilirliğinin test edilmesidir. Çalışmanın ilk aşamasında örnek yapılar moment aktaran çerçeveli çelik

yapılar olarak modellenmiş, sonlu eleman analizi yapan SAP2000 programı ile yapıların doğrusal statik analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda örnek yapıların maksimum deplasman değerleri, YSA oluşturulmak için bulunmuştur. Bulunan bu maksimum deplasman değerleri, oluşturulan YSA'da çıktı veri kümesi olarak tanımlanmıştır. Yapının yaptığı maksimum deplasmanlar, yapının kat yüksekliği, kat sayısı, yapının toplam yüksekliği, yapı ağırlığı ve yapı taban alanı ile ilişkisi olduğundan kurulan YSA'da bu veriler de girdi takım verilerini temsil etmiştir. Tanımlanan bu girdi ve çıktı verileri ile MATLAB programı yardımıyla YSA oluşturulmuştur. Çalışma sonunda, SAP2000 programıyla hesaplanan deplasman ve YSA ile hesaplanan değerler arasında regresyon analizi yapılmıştır.

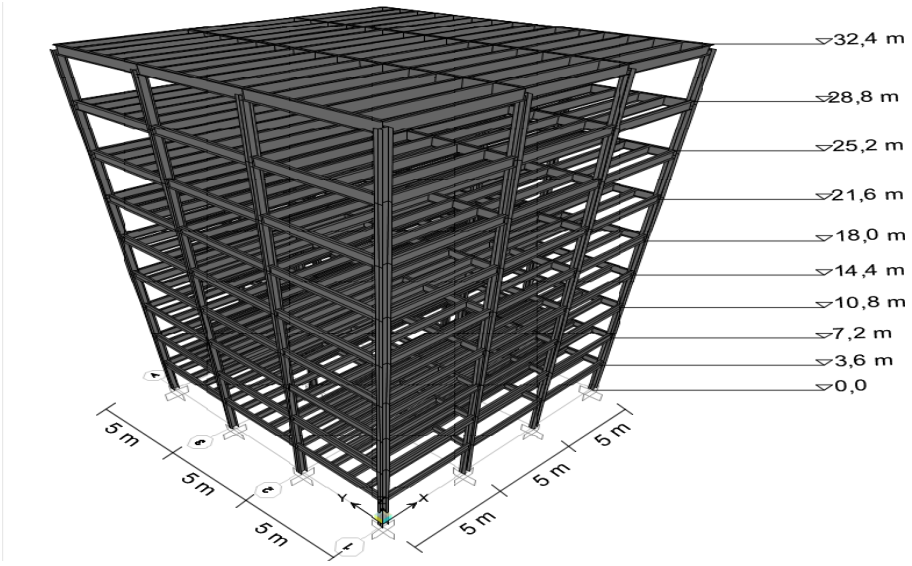
2. Materyal ve Metot

Çalışmamızda, maksimum deplasman üzerinde etkili olduğu belirlenen girdi parametreleri sistematik olarak değiştirilmiş; bu kapsamda, toplam 64 farklı moment aktaran çerçeve sistemli çelik yapı, Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır. Bu çalışmada, yapay zekâ alanının bir alt disiplini olan YSA kullanılmıştır. Kurulan YSA mimarisinin stabil bir yapı sergilemesi istenmesi nedeniyle, örnek yapılar daha yalın ve temel yaklaşımlar doğrultusunda modellenmiş ve doğrusal analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu yaklaşım nedeniyle, örnek yapılarımızda tek tip profil seçimi yapılıp bu profil seçimi ise en yüksek deplasmanı yapan örnek yapıya göre belirlenmiştir. Bunun sonucunda, örnek yapılarımızda kolonlarda HE 280M, ana ve tali kirişler de ise IPE 450 profili seçilmiştir. Kullanılan çelik sınıfı ise her örnekte S355 olarak seçilmiştir. Kullanılan çeliğin ve profillerin mekanik ve fiziksel özellikleri Şekil 1'de verilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan çerçeve sistemli çelik yapıların bir örneğin üç boyutlu görünümü ve aks sistemi ise Şekil 2'de verilmiştir.



Mekanik Özellikler	Birim	Değer
Birim Hacim Ağırlığı	kN/m^2	76,9729
Elastisite Modülü	kN/m^2	2 x 10^8
Akma Gerilmesi (f_y)	N/mm^2	355
Çekme Dayanımı (f_u) t≤40mm	N/mm^2	510

Şekil 1. Kullanılan çelik sınıfının ve profillerinin mekanik ve fiziksel özellikleri.



Şekil 2. Taban alanı 225 m^2, 3,6 m kat yükseklikli ve 9 katlı örneğin (Örnek 225-3,6-9) üç boyutlu görünümü.

Örnek yapılara, zati ağırlıklarının yanında kirişlere trapez saç, betonarme döşeme, kaplama ve izolasyon yükleri, alın kirişlerine duvar yükleri sabit yük olarak tanımlanmıştır. Çelik yapıların tasarım, hesap ve yapım esaslarına dair yönetmeliğince harketli yük tayini TS 498, rüzgar yükü tayini TS EN 1991-1-4, kar yükü tayini ise TS EN 1991-1-3'e göre hesaplanmıştır. Tasarım deprem yükü hesabı Türkiye bina deprem yönetmeliği 2018'e göre Elazığ ili Ataşehir Mahallesi sınırları içerisinde yer alan 38.660789 enlem ve 39.167020 boylam koordinatlarına sahip lokasyon için hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Analizi yapılan çelik yapıların etkin göreli kat ötelemeri ve ikinci mertebe etkileri sınırlandırılmıştır. Bunun için belirlenen lokasyonun deprem yer hareketi düzeyi-2 (DD-2) ve deprem yer hareketi düzeyi-3 (DD-3) göre elastik tasarım spektral ivmeleri saptanmış ve λ değeri bulunarak TBDY-2018 yönetmeliğinde verilen Denklem 2'de yerine koyularak katların maksimum göreli kat ötelemeleri bulunmuştur. 225 m^2 taban alanlı, kat yüksekliği 3,6 m olan 9 katlı örneğin azaltılmış göreli kat ötelemeleri, etkin göreli kat ötlelemeleri ve maksimum etkin göreli kat öteleme değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

$$\lambda \frac{\delta_{i,max}^{(X)}}{h_i} \leq 0{,}016K \tag{2}$$

Denklemde; λ: göreli kat ötelemelerinin sınırlandırılmasında kullanılan ampirik katsayı, $\delta_{i,max}^{(X)}$: (x) deprem doğrultusu için, binanın i'inci katındaki etkin göreli kat ötelemelerinin kat içindeki en büyük değeri [m], h_i: i'inci katın yüksekliği [m], K: İzin verilen göreli kat ötelemelerinin tanımında betonarme ve çelik taşıyıcı sistemler için farklı olarak kullanılan katsayıdır. (çelik yapı olduğundan K=0,5)

Tablo 1. (Örnek 225-3,6-9) örneğin azaltılmış göreli kat ötelemeri, etkin göreli kat ötlemeleri ve maksimum etkin göreli kat ötleme değerleri (yapı simetrik olduğundan sadece x yönündeki veriler verilmiştir.)

	1.Kat	**2.Kat**	**3.Kat**	**4.Kat**	**5.Kat**	**6.Kat**	**7.Kat**	**8.Kat**	**9.Kat**
$\Delta_{i,max}^{(X)}$(m)	0,004376	0,006558	0,006416	0,005898	0,005404	0,004921	0,004243	0,003202	0,001901
$\delta_i^{(X)}$(m)	0,035008	0,052464	0,051328	0,047184	0,043232	0,039368	0,033944	0,025616	0,015208
$\delta_{i,max}^{(X)}$(m)	0,066991								

Örneklerde her kat için Denklem 3'ye göre hesaplanan ikinci mertebe gösterge değerlerinin Denklem 4'e göre hesaplanan maksimum değerin altında olduğu kontrol edilerek, ikinci mertebe etkileri kontrol edilmiş ve Tablo 2'de verilmiştir.

$$\theta_{\mathrm{II,i}}^{(\mathrm{X})} = \frac{\left(\Delta_{\mathrm{i}}^{(X)}\right)_{ort} \Sigma_{k=i}^{N} w_k}{V_i^{(X)} h_i} \tag{3}$$

$$\theta_{\mathrm{II,max}}^{(\mathrm{X})} \leq 0{,}12 \frac{D}{C_h R} \tag{4}$$

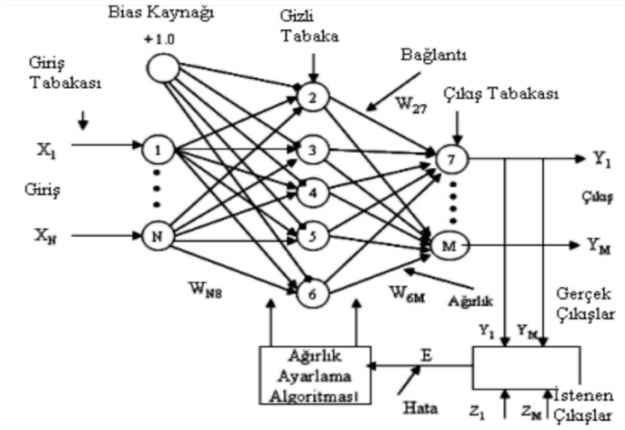
Denklemlerde; $\theta_{\mathrm{II,i}}^{(\mathrm{X})}$: (X) deprem doğrultusunda her bir i'inci kat için tanımlanan ikinci mertebe gösterge değeri, $\left(\Delta_{\mathrm{i}}^{(X)}\right)_{ort}$: (X) deprem doğrultusunda ardışık iki kat arasındaki yerdeğiştirme farkını ifade eden ortalama azaltılmış göreli kat ötelemesi, $V_i^{(X)}$: (X) deprem doğrultusunda i'inci kattaki azaltılmış kat kesme kuvveti [kN], $\theta_{\mathrm{II,max}}^{(\mathrm{X})}$: (X) deprem doğrultusunda tanımlanan maksimum ikinci mertebe gösterge değeri, D: Dayanım fazlalığı katsayısı, C_h: İkinci mertebe hesabında kullanılan ampirik katsayı, R: Taşıyıcı sistem davranış katsayısıdır.

Tablo 2. (Örnek 225-3,6-9) örneğin ikinci mertebe etkilerinin kontrolü (yapı simetrik olduğundan sadece x yönündeki veriler verilmiştir.)

	1.Kat	**2.Kat**	**3.Kat**	**4.Kat**	**5.Kat**	**6.Kat**	**7.Kat**	**8.Kat**	**9.Kat**
$\theta_{\mathrm{II,i}}^{(\mathrm{X})}$	0,008142	0,011061	0,009895	0,008378	0,007113	0,006033	0,004865	0,003443	0,024762
$\theta_{\mathrm{II,max}}^{(\mathrm{X})}$	0,045								

2.1. Yapay Sinir Ağının Oluşturulması

Çalışmamızda çok katmanlı, ileri beslemeli geri yayılımlı algoritmalı bir YSA modeli oluşturulmuştur. İleri beslemeli yapay sinir ağları modelinde, nöronlar girişten çıkışa doğru sıralanmış düzenli katmanlar halinde yapılandırılmıştır. Her bir katman yalnızca kendisinden bir sonraki katman ile bağlantılıdır. Ağın girişine uygulanan veriler, herhangi bir değişime uğramaksızın doğrudan gizli katmandaki nöronlara iletilir ve ardından sırasıyla çıkış katmanında işlenerek, Şekil 3'te gösterildiği üzere, işlem sürecini tamamlar [26].



Şekil 3. İleri beslemeli ağ yapısı [27].

Bu modellerin eğitiminin amacı, oluşturulan ağdaki ağırlıkları optimize edilerek hata miktarını olabildiğince düşük seviyelere düşürmeye çalışmaktır. Bir karesel hata fonksiyonunun toplamı Denklem 5'de verilmiştir.

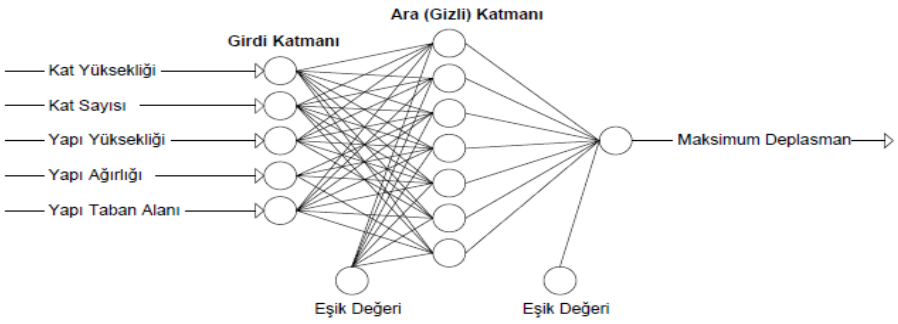
$$E(w) = \frac{1}{n}\sum_{\xi,i}(e_i^{\xi})^2 = \frac{1}{n}\sum_{\xi,i}(d_i^{\xi} + y_i^{\xi})^2 \quad (5)$$

Denklemde; d_i^{ξ} hedef çıkış değeri olurken, y_i^{ξ} ağın çıkışında elde edilen değerlerdir. Her ağırlık Denklem 6' ye göre hesabı yapılmaktadır.

$$w^{(k+1)} = w^{(k)} + \Delta w^k \quad (6)$$

Oluşturulan ağda amaç E(w)'yi seri bir şekilde olabildiğince azaltmaktır. Bunun için her döngüde Δw^k ayarlanır. $\Delta w^{k\prime}$nın hesaplanma yöntemi seçilecek eğitim algoritmasına göre değişiklik göstermektedir. En yaygın ve çok kullanılan ise geri yayılımlı (back propagation) algoritmadır[27]. Yapay sinir ağları, öğrenme algoritması ve aktivasyon fonksiyonu olarak iki temel bileşenden oluşur.

Bu çalışmada YSA modelinin oluşturulmasında MATLAB R2021 yazılımı kullanılmış; oluşturulan YSA mimarisi, Şekil 4'te sunulduğu şekilde yapılandırılmıştır.



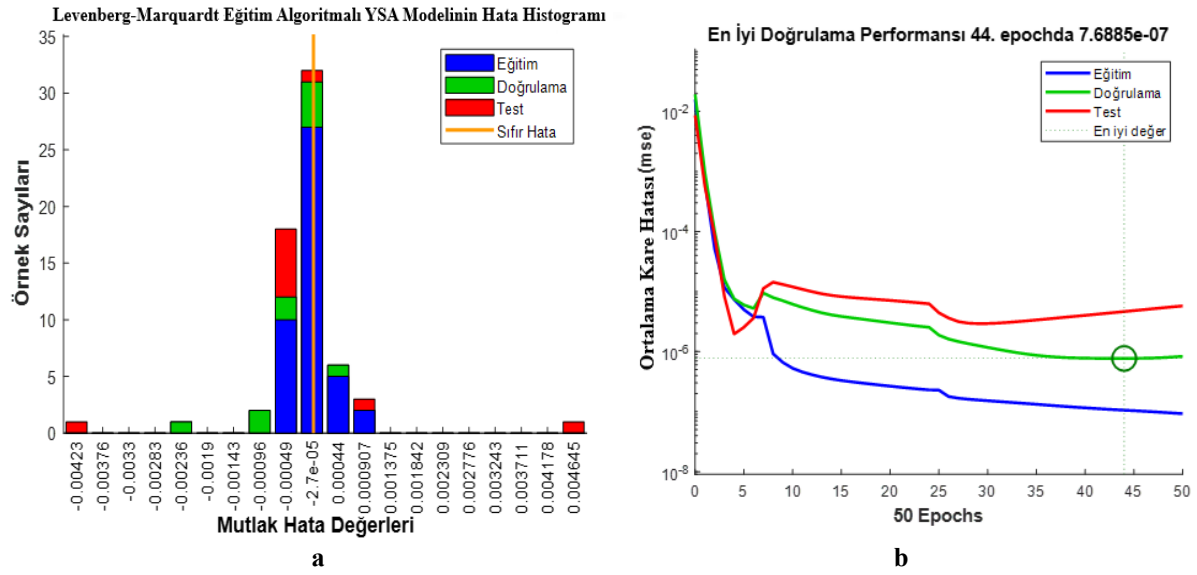
Şekil 4. Örnek yapılarımızda YSA modeli şematik gösterimi.

Aktivasyon fonksiyonları, YSA modelinin gizli katman sayısı, nöron sayısı ve hata fonksiyonlarının belirlenmesi; genellikle problemin türü, veri setinin büyüklüğü, benzer çalışmaların literatürdeki uygulamalar ve modelin aşırı öğrenme (overfitting) eğilimi dikkate alınarak, çoğunlukla deneme-yanılma yöntemiyle yapılmaktadır. Bu çalışmada kurulan YSA modelinde, gizli katmanlarda aktivasyon fonksiyonu olarak tanjant sigmoid transfer fonksiyonu; çıkış katmanında ise lineer transfer fonksiyonu kullanılmış, gizli katman sayısı ve nöron sayısı 10 olarak belirlenmiş ve hata fonksiyonu olarak ortalama karesel hata fonksiyonu tercih edilmiştir. Bu seçimler, modelin performansını artırmak amacıyla yapılan çok sayıda deneme sonucunda optimize edilmiştir. Farklı eğitim algoritmalarının model başarımı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, Levenberg-Marquardt, Bayesian Regularization ve Scaled Conjugate Gradient algoritmaları kullanılarak ayrı ayrı YSA modelleri oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kurulan modellerde, verilerin normalizasyonu için "mapminmax" komutu kullanılmış; böylece modellerin daha hızlı, doğru ve kararlı öğrenmesi sağlanarak genellenebilirlikleri ile performanslarının artırılması hedeflenmiştir.

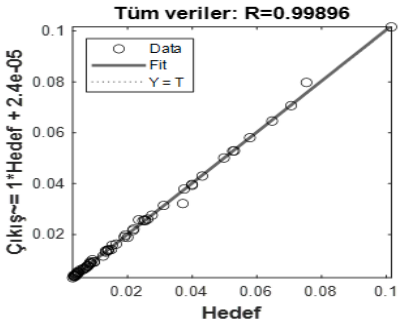
YSA modellerinin oluşturulma sürecinde kullanılan veri kümeleri genellikle üç alt gruba ayrılarak değerlendirilir: eğitim, doğrulama ve test veri kümeleri. Eğitim veri kümesi, modelin öğrenme sürecinde kullanılarak ağın parametrelerinin güncellenmesini sağlar. Doğrulama veri kümesi, eğitim süreci boyunca modelin genellenebilirlik düzeyini izlemek ve aşırı öğrenmeyi önlemek amacıyla kullanılır. Test veri kümesi ise, eğitim tamamlandıktan sonra modelin daha önce karşılaşmadığı veriler üzerindeki performansını nesnel biçimde değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Kurduğumuz modelde eğitim veri seti için %70, yani 44 örnek, doğrulama veri seti için %15, yani 10 örnek ve test veri seti için yine %15, yani 10 örnek olarak belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Levenberg-Marquardt eğitim algoritmalı YSA modeli sonunda oluşan hata histogram, hata fonksiyonu performansı ve regresyon grafikleri Şekil 5a, 5b ve 6'da verilmiştir.

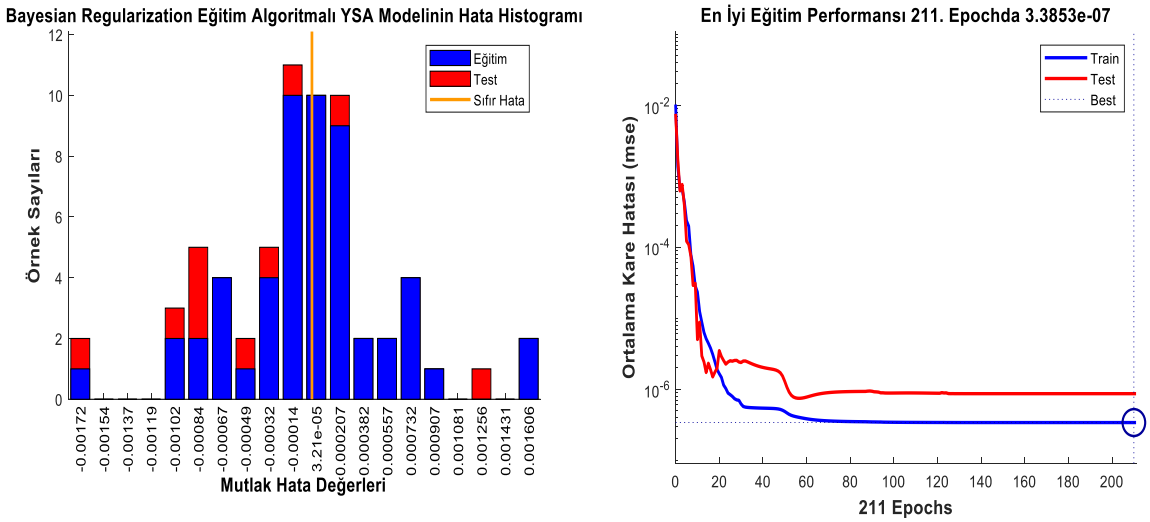


Şekil 5. a) Hata histogram grafiği **b)** Hata fonksiyonu performans grafiği.



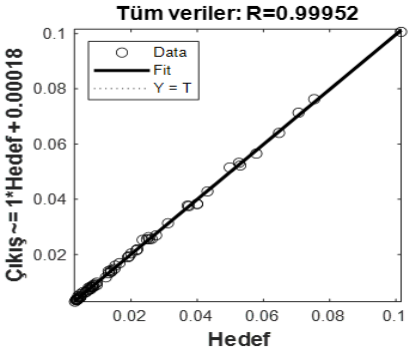
Şekil 6. Levenberg-Marquardt eğitim algoritmalı YSA modelinin regresyon grafiği.

Bayesian Regularization eğitim algoritmalı YSA modeli sonunda oluşan hata histogram, hata fonksiyonu performansı ve regresyon grafikleri Şekil 7a, 7b ve 8'de verilmiştir.



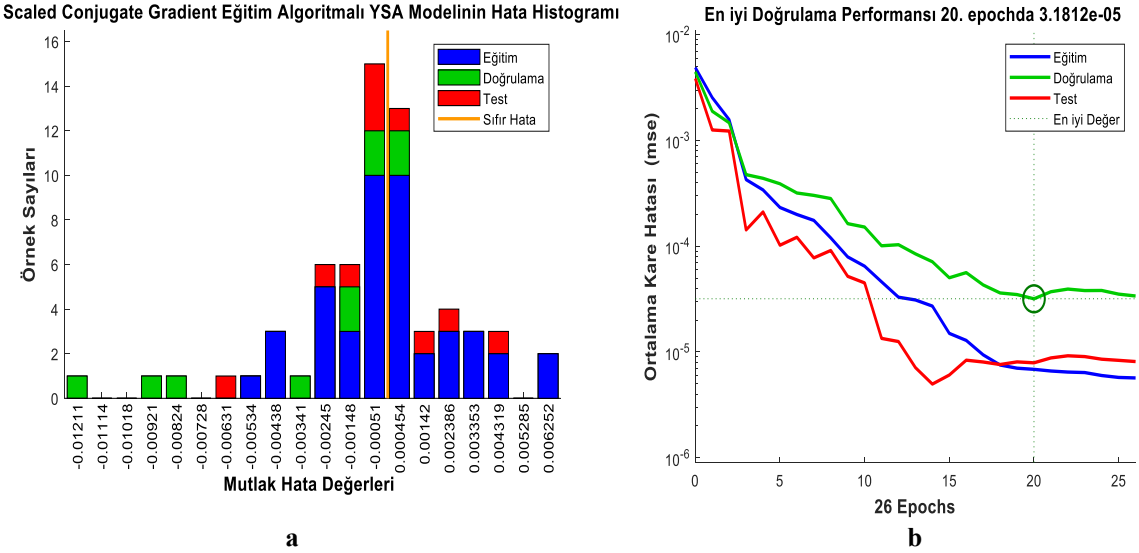
a **b**

Şekil 7. a) Hata histogram grafiği **b)** Hata fonksiyonu performans grafiği.

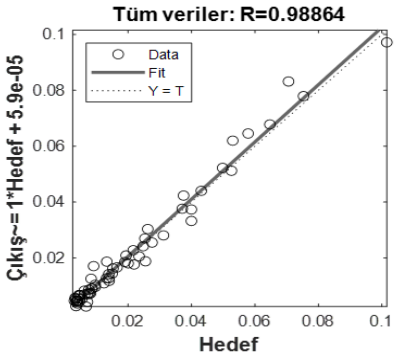


Şekil 8. Bayesian Regularization eğitim algoritmalı YSA modelinin regresyon grafiği.

Scaled Conjugate Gradient eğitim algoritmalı YSA modeli sonunda oluşan hata histogram, hata fonksiyonu performansı ve regresyon grafikleri ise Şekil 9a, 9b ve 10'da verilmiştir.



Şekil 9. a) Hata histogram grafiği **b)** Hata fonksiyonu performans grafiği.



Şekil 10. Scaled Conjugate Gradient eğitim algoritmalı YSA modelinin regresyon grafiği.

Örnekler dört farklı taban alanı, iki farklı kat yüksekliği ve sekiz farklı kat sayısına göre yapıldığından "taban alanı-kat yüksekliği-kat sayısı" şeklinde isimlendirilerek SAP2000 ve üç ayrı algoritma ile oluşturulan YSA ile bulunan maksimum deplasman değerleri Tablo 3 ve Tablo 4'te ve %10, %15, %20 üzeri hata oranına sahip örnek sayıları ise Tablo 5'de verilmiştir. Çalışmada incelenen yapıların maksimum deplasman değerleri beklendiği üzere yapıların en yüksek kotlarında yer alan birleşim noktalarında ve çoğunlukla yatay yük kombinasyonlarının etkisi altında meydana gelmiştir. YSA modellerinde elde edilen sonuçlar ise doğrulama veri setine ait örnekler yeşil renkte, test veri setine ait örnekler ise kırmızı renkte belirtilmiştir.

Tablo 3. SAP2000 ile hesaplanan maksimum deplasmanların (Δ_{max}), üç ayrı eğitim algoritması ile yapılan YSA sonucunda oluşan çıktı verileri karşılaştırılması.

Örnek Yapılar	Δ_{max}(m)	Levenberg-Marquardt algoritmalı YSA ile Δmax(m)	Bağıl hata %	Bayesian Regularization algoritmalı YSA ile Δmax(m)	Bağıl hata %	Scaled Conjugate Gradient algoritmalı YSA ile Δmax(m)	Bağıl hata %
180-2,8-2 Örnek	0,003065	0,003052	0,424144	0,00292	4,730832	0,004658	**51,97595**
180-2,8-3 Örnek	0,003486	0,003454	1,031519	0,00370119	6,045845	0,00538	**54,15037**
180-2,8-4 Örnek	0,004873	0,005111	4,884055	0,0050628	3,899036	0,006702	**37,52975**
180-2,8-5 Örnek	0,008709	0,008802	1,067861	0,00832376	4,420714	0,009037	3,765661
180-2,8-6 Örnek	0,013944	0,013995	0,365749	0,01379707	1,054217	0,012738	8,648907
180-2,8-7 Örnek	0,020033	0,018908	5,615734	0,02037733	1,717167	0,018036	9,969599
180-2,8-8 Örnek	0,027566	0,027639	0,264819	0,02693491	2,289052	0,025494	7,515291
180-2,8-9 Örnek	0,037082	0,032203	**13,15733**	0,03770159	1,671970	0,037617	1,441567
180-3,6-2 Örnek	0,003337	0,003982	**19,22156**	0,00344487	3,143713	0,005713	**71,06218**
180-3,6-3 Örnek	0,006206	0,006159	0,757332	0,00633273	2,046407	0,00825	**32,93721**
180-3,6-4 Örnek	0,013224	0,013551	2,472777	0,01398552	5,762250	0,012721	3,803482
180-3,6-5 Örnek	0,023488	0,025793	9,813522	0,02529219	7,680518	0,020541	12,54556
180-3,6-6 Örnek	0,039964	0,039709	0,638074	0,03827046	4,238815	0,033229	**16,85241**
180-3,6-7 Örnek	0,05259	0,052798	0,395512	0,05319046	1,140901	0,051205	2,633194
180-3,6-8 Örnek	0,075308	0,079773	5,928985	0,07624522	1,244224	0,077933	3,485431
180-3,6-9 Örnek	0,101551	0,101599	0,047267	0,10061714	0,919735	0,09718	4,3045
225-2,8-2 Örnek	0,003598	0,003640	1,111111	0,00379776	5,500000	0,004343	**20,63484**
225-2,8-3 Örnek	0,004156	0,004570	9,855769	0,00422206	1,490385	0,004749	14,15461
225-2,8-4 Örnek	0,004764	0,005377	**12,96218**	0,0046144	3,067227	0,005455	14,59085
225-2,8-5 Örnek	0,006303	0,006632	5,219737	0,00628981	0,206251	0,006907	9,582121
225-2,8-6 Örnek	0,009671	0,009275	4,094716	0,00983373	1,685451	0,009637	0,349715
225-2,8-7 Örnek	0,013916	0,013847	0,495832	0,01437832	3,319920	0,014153	1,704452
225-2,8-8 Örnek	0,019398	0,019843	2,294051	0,01935306	0,231983	0,020893	7,708723
225-2,8-9 Örnek	0,02621	0,026073	0,522701	0,02566558	2,075544	0,030128	14,94851
225-3,6-2 Örnek	0,00394	0,004282	8,680203	0,00368858	6,370558	0,004467	13,37511
225-3,6-3 Örnek	0,004568	0,005360	**17,28665**	0,00433706	5,098468	0,006748	**47,66208**
225-3,6-4 Örnek	0,009634	0,009181	4,702097	0,00892888	**7,317833**	0,010369	7,628667
225-3,6-5 Örnek	0,01653	0,016268	1,584997	0,01687928	2,111313	0,016613	0,503198
225-3,6-6 Örnek	0,025297	0,025728	1,703759	0,02629727	3,953038	0,026947	6,522574
225-3,6-7 Örnek	0,037498	0,037897	1,064057	0,03754619	0,128007	0,042314	12,84304
225-3,6-8 Örnek	0,052999	0,052921	0,147173	0,05224349	1,426442	0,061994	**16,97118**
225-3,6-9 Örnek	0,070573	0,070695	0,172871	0,07133214	1,075482	0,083164	**17,84169**
400-2,8-2 Örnek	0,003608	0,003791	5,01385	0,00350874	2,797784	0,002714	**24,81581**
400-2,8-3 Örnek	0,004067	0,004078	0,19656	0,00499247	**22,653563**	0,003616	11,1481
400-2,8-4 Örnek	0,004658	0,004787	2,725322	0,00563027	**20,815451**	0,004397	5,643152
400-2,8-5 Örnek	0,00547	0,006166	**12,72395**	0,00635724	**16,215722**	0,005411	1,075664
400-2,8-6 Örnek	0,008176	0,008388	2,592955	0,00835568	2,201566	0,007327	10,3852
400-2,8-7 Örnek	0,01241	0,011561	6,841257	0,01173435	5,447220	0,010882	12,31106
400-2,8-8 Örnek	0,015241	0,015824	3,825208	0,01594998	4,651926	0,016207	6,339927
400-2,8-9 Örnek	0,021641	0,021609	0,147867	0,0215153	0,582228	0,022752	5,131874

Tablo 4. SAP2000 ile hesaplanan maksimum deplasmanların (Δ_{max}), üç ayrı eğitim algoritması ile yapılan YSA sonucunda oluşan çıktı verileri karşılaştırılması(devamı).

Örnek Yapılar	Δ_{max}(m)	Levenberg-Marquardt algoritmalı YSA ile Δmax(m)	Bağıl hata %	Bayesian Regularization algoritmalı YSA ile Δmax(m)	Bağıl hata %	Scaled Conjugate Gradient algoritmalı YSA ile Δmax(m)	Bağıl hata %
400-3,6-2 Örnek	0,003851	0,003657	5,012987	0,00391533	1,688312	0,004612	**19,80473**
400-3,6-3 Örnek	0,004459	0,004762	6,7713	0,00472206	5,874439	0,006468	**45,02529**
400-3,6-4 Örnek	0,007663	0,007703	0,521989	0,00759054	0,939580	0,008619	12,47735
400-3,6-5 Örnek	0,014019	0,013728	2,075754	0,01377959	1,704829	0,011994	14,44426
400-3,6-6 Örnek	0,021889	0,022177	1,315729	0,02191151	0,105076	0,017626	**19,47591**
400-3,6-7 Örnek	0,031159	0,031446	0,921082	0,03133566	0,568054	0,028064	9,931951
400-3,6-8 Örnek	0,04308	0,043003	0,178737	0,04286252	0,503714	0,044018	2,17639
400-3,6-9 Örnek	0,057835	0,058064	0,395954	0,05652633	2,263335	0,06455	11,6103
572-2,8-2 Örnek	0,006762	0,006616	0,461716	0,00688234	1,804734	0,002569	**61,99358**
572-2,8-3 Örnek	0,007224	0,007130	1,952919	0,00792979	9,833795	0,004221	**41,54214**
572-2,8-4 Örnek	0,007668	0,007852	0,02757	0,00820201	6,936115	0,007413	3,350723
572-2,8-5 Örnek	0,008345	0,008733	0,762181	0,00812725	2,670659	0,012528	**50,04035**
572-2,8-6 Örnek	0,00914	0,010050	6,722592	0,00937332	2,549234	0,017049	**86,53033**
572-2,8-7 Örnek	0,013297	0,013119	8,275379	0,01319954	0,729488	0,018663	**40,35574**
572-2,8-8 Örnek	0,019032	0,019094	**28,00809**	0,01897602	0,294241	0,018552	2,524414
572-2,8-9 Örnek	0,025485	0,025515	0,058793	0,0255172	0,125564	0,018779	**26,31304**
572-3,6-2 Örnek	0,007132	0,007071	**114,2393**	0,0071496	0,280505	0,007067	0,881117
572-3,6-3 Örnek	0,007732	0,007546	0,105401	0,00736961	4,657180	0,007021	9,170043
572-3,6-4 Örnek	0,008458	0,009181	0,27026	0,00884938	4,598109	0,00897	6,030917
572-3,6-5 Örnek	0,014991	0,014164	0,032987	0,01483057	1,067307	0,014389	4,013356
572-3,6-6 Örnek	0,024783	0,025482	**13,89932**	0,02547545	2,792237	0,024188	2,401157
572-3,6-7 Örnek	0,039949	0,039390	0,054941	0,03831542	4,090215	0,037331	6,55429
572-3,6-8 Örnek	0,049809	0,050108	0,068714	0,05153038	3,455199	0,052229	4,857854
572-3,6-9 Örnek	0,064705	0,064650	0,036598	0,06402256	1,054014	0,067791	4,769268

Tablo 5. Üç farklı algoritma ile %10, %15 ve %20 hata oranı üzerinde olan örnek sayıları.

	%10 üzeri hata oranına sahip örnek sayısı	%15 üzeri hata oranına sahip örnek sayısı	%20 üzeri hata oranına sahip örnek sayısı
Levenberg Marquardt	5	2	2
Bayesian Regularization	3	2	2
Scaled Conjugate Gradient	32	20	16

Levenberg-Marquardt ve Bayesian Regularization algoritmalarıyla eğitilen YSA modellerine ait hata histogramlarında, tahmin hatalarının düşük aralıkta ve sıfır hata çizgisine yakın dağıldığı görülmüştür. %10 ve üzeri hata oranına sahip örnek sayısının oldukça az olması, bu algoritmaların yüksek doğruluk ve tutarlılık sağladığını göstermektedir. Buna karşılık, Scaled Conjugate Gradient algoritmasında hata dağılımı daha geniş olup bazı örneklerde yüksek hatalar gözlemlenmiştir. Bu durum, söz konusu algoritmanın veri setine uyumunun sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır.

4. Sonuç ve Öneriler

Yapay zekânın yapı tasarımı uygulamalarında kullanılabilirliği test edilerek yapılan bu çalışmada, moment aktaran çerçeveli çelik yapıların maksimum deplasmanlarının tahmini üzerine YSA kurulmuştur. Yapılan

çalışmada SAP2000 programı kullanılarak 64 adet yapının maksimum deplasman değerleri deprem yükü etkisinde bulunmuş ve kurulan YSA değerleri ile kıyaslaması yapılmıştır. Yapılan bu araştırma sonucunda oluşan temel sonuçlar ise aşağıda verilmiştir;

- Üç farklı eğitim algoritmasıyla kurulan YSA'larda regresyon katsayıları oldukça yüksek çıkmıştır. Levenberg-Marquardt algoritması ile regresyon katsayısı 0,99896, Bayesian Regularization algoritması ile regresyon katsayısı 0,99952, Scaled Conjugate Gradient algoritması ile regresyon katsayısı diğer ikisine nazaran biraz daha düşük olsa da 0,98864 bulunarak genel anlamda yüksek oluğu gözlemlenmiştir. Çalışmada en düşük %98'lik bir benzerlik oranının bulunması, YSA'nın yeterli doğrulukta olduğunu göstermektedir.
- Regresyon katsayılarının yüksekliği, hata histogramlarının sıfır çizgisine yakın ve dar aralıkta yoğunlaşması ile hata fonksiyonlarının tüm veri setlerinde paralel biçimde düşüş göstermesi, modelin ezberleme yapmadığını ve genel olarak yüksek performans sergilediğini ortaya koymaktadır.
- Doğrusal yapısal analizlerde, maksimum deplasman miktarının tahminine ilişkin hata oranının genellikle %5'in altında olması, modelin doğruluğu açısından kabul edilebilir bir sınır olarak değerlendirilmektedir. Uygun eğitim algoritmasıyla oluşturulan modellerde, verilerin yaklaşık %75–80'inin %5 hata oranının altında olması, modelin sonuçlarının kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir.
- Yapı performansının sağlıklı ve kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilmesi, genellikle birden fazla yapısal parametrenin birlikte incelenmesini gerektirmektedir. Ancak bu çalışmada YSA modelinin etkinliğini değerlendirebilmek amacıyla analizler yalnızca maksimum yer değiştirme verisi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu tercih, modelin sınırlı ve tekil bir parametreyle dahi ne ölçüde doğru sonuçlar üretebileceğini gözlemlemeyi amaçlamaktadır. YSA'nın bu tür sınırlı veri setleriyle yüksek doğruluk oranlarına ulaşması, modelin farklı yapısal performans parametreleri üzerinde de benzer şekilde kullanılabilineceğine dair bir öngörü sunmaktadır. Dolayısıyla bu çalışma, YSA'nın yapı mühendisliğinde karar destek aracı olarak kullanılabilirliğini ortaya koymaya yönelik bir ön adımdır. İlerleyen çalışmalarda, farklı performans ölçütlerine yönelik benzer yaklaşımlar geliştirilerek modelin genellenebilirliği daha kapsamlı şekilde değerlendirilebilir.

Kaynaklar

[1] Özyiğit O. Çelik yapıların eleman ve bileşen düzeyinde incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2004.
[2] Ardan F. Çelik yapı elemanları. Güven Kitabevi, Ankara, 1973.
[3] Uluğ T. Çelik yapılar. Teknik Yayınevi, İstanbul, 1977.
[4] Katmer İE. Çok katlı çelik bir yapının deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik ve türkiye bina deprem yönetmeliği'ne göre tasarımının yapılması. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Mersin, 2019.
[5] Worldsteel. Global crude steel output increases by 3.4% in 2019. https://worldsteel.org/media/press-releases/2020/global-crude-steel-output-increases-by-3-4-in-2019/, Erişim: 27 Kasım 2024.
[6] Bayrak E, Çoban KH. 23 Kasım 2022 Düzce Depreminin (Mw 6,0) Bölgesel Sismisite ve Kuvvetli Yer Hareketleri Açısından Değerlendirilmesi. Fırat Univ J Eng Sci, 2024; 36 (2): 796-807.
[7] Erdik M, Demircioglu M, Sesetyan K, Durukal E, Siyahi B. Earthquake hazard in Marmara region, Turkey. Soil Dyn Earthquake Eng. 2004; 24(8): 605-631.
[8] Özmen B. Gumbel Uç Değerler Yöntemi ile Ankara İli ve Yakın Civarının Deprem Tehlike Analizi. Resilience 2023; 7(2): 391-407.
[9] Ay Z, Çelik İD, Kımıllı NA. Çaprazlı çelik çerçevelerin sismik performansı üzerine bazı değerlendirmeler. Erciyes Univ J Inst Sci Tech 2010; 26(1): 7–17.
[10] Tolan B. Çelik yapı tasarımında Türk standartlarının AISC 360-05 ve 07-05 yaklaşımlarına göre incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
[11] Çelebi NG, Arpacıoğlu Ü. Deprem ve çevresel etki bağlamında çelik ve betonarme çerçeveli yapıların analiz edilmesi. Academy 1st Int Conf Earthquake Stud. 2023; İstanbul, 434-446.
[12] Öztekin E, Uzun MA. Yanal burkulmaya maruz basit NPI kirişlerinin maksimum üniform yayılı yük kapasitelerinin YSA ile tahmini. Gümüşhane Univ J Sci, 2011; 1(2), 135-150.
[13] Köroğlu MA, Ceylan M, Arslan MH, Ilki A. Estimation of flexural capacity of quadrilateral Frp-confined Rc columns using combined artificial neural network. Eng Struct, 2012; 42, 23-32.
[14] Yavuz G, Arslan MH, Baykan OK. Shear strength predicting of Frp-strengthened rc beams by using artificial neural networks. Sci Eng Compos Mater, 2014; 21(2), 239-255.
[15] Chun PJ, Yamashita H, Furukawa S. Bridge damage severity quantification using multipoint acceleration measurement and artificial neural networks. Shock Vib. 2015.

[16] Arslan MH, Ceylan M, Koyuncu T. Determining earthquake performances of existing reinforced concrete buildings by using ANN. Int J Civ Environ Eng, 2015; 9(8), 1097-1101.
[17] Suryanita R, Maizir H, Yuniarto E, Zulfakar M, Jingga H. Damage level prediction of reinforced concrete building based on earthquake time history using artificial neural network. MATEC Web Conf., 2017; 138, 02024,
[18] Mazanoğlu K, Kandemir-Mazanoğlu EÇ. Çatlaklı kirişlerin yapay sinir ağları ile modellenmesi. Afyon Kocatepe Univ J Sci Eng, 2017;17(3):1129-1135.
[19] Ilkhani MH, Moradi E, Lavasani M. Calculation of torsion capacity of the reinforced concrete beams using artificial neural network. J Soft Comput Civ Eng, 2017;1(2): 8-18.
[20] Özbayrak A. Deprem etkisi altındaki betonarme kirişsiz plak döşemelerin eğilme momentlerinin ysa analizi ile tahmin edilmesi. Niğde Ömer Halisdemir Univ J Eng Sci, 2019; 8(2): 979-991.
[21] Özkan E. Betonarme konut yapıların deprem performanslarının yapay sinir ağları hızlı değerlendirme yöntemi ile tahmin edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 2019.
[22] Arslan A, Severcan MH. Cam elyaf takviyeli polyester (CTP) profillerden oluşan tek eğrilikli uzay kafes kirişlerin yapay sinir ağları ile analizi. Niğde Ömer Halisdemir Univ J Eng Sci 2021;10(1),312-318.
[23] Yalçın ÖF. Basit mesnetli köprülerde hareketli yük dağılım faktörleri denklemlerinin yapay sinir ağları ile elde edilmesi. Çukurova Univ J Fac Eng Archit, 2020; 35(3): 609-622.
[24] Gültekin B, Doğan G. İnşaat mühendisliğinde yapay zekâ çalışmaları. Adv Eng Stud Technol, 2021; 2(2); 117-138.
[25] Dadashov A. Yapay sinir ağları ve genetik algoritma optimizasyonu kullanılarak yapı elemanlarında titreşim verileri yardımıyla hasar tespiti. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon 2024.
[26] Öztürk K, Şahin ME. Yapay sinir ağları ve yapay zekâya genel bir bakış. Takvim-i Vekayi, 2018; 6(2) 25–36.
[27] Aşkın D, İskender İ, Mamizadeh A. Farklı yapay sinir ağları yöntemlerini kullanarak kuru tip transformatör sargısının termal analizi, Gazi Univ J Fac Eng Archit, 2011; 26 (4), 905–913.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 581-589, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1624650

İşaret Uzayı Çeşitliliği ve Yeniden Yapılandırılabilir Akıllı Yüzeyler Aracılığıyla Kablosuz Haberleşme Başarımının Arttırılması

İrem YÜCE[1*], Mustafa Anıl REŞAT[2], Serdar ÖZYURT[3]
[1,2,3] Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, Türkiye
[*1] iremyuce8991@gmail.com, [2] maresat@aybu.edu.tr, [3] sozyurt@ybu.edu.tr

(Geliş/Received: 22/01/2025; Kabul/Accepted:11/04/2025)

Öz: Bu çalışmada, ikili faz kaydırmalı anahtarlama ve dörtlü faz kaydırmalı anahtarlama modülasyon teknikleri için, işaret uzayı çeşitliliği (SSD) ve yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeyler (RIS) kullanan tek giriş tek çıkış sistemlerinin performansı araştırılmaktadır. Bu kapsamda, Rayleigh sönümlemeli kanallar altında analog ve nicemlenmiş RIS kurulumları karşılaştırılmaktadır. Her iki RIS yapılandırması da bit hata oranı performansını RIS olmayan sistemlere kıyasla önemli ölçüde artırmaktadır. Buna karşılık, analog RIS kurulumunun, nicemleme hataları sebebiyle ortam faz kaymalarından daha fazla etkilenen nicemlenmiş RIS kurulumuna kıyasla hata performansı üzerinde önemli ölçüde daha az etkisi olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, SSD kullanımı sayesinde sadece çok küçük bir karmaşıklık artışıyla hata performansı oldukça iyileşmektedir. Bu açıdan, RIS ve SDD tekniklerinin birlikte kullanımı, 5G ve ötesi ağların taleplerini karşılamak için uygun maliyetli ve enerji verimli çözümler sağlama potansiyelini gerçekleştirebilecek bir alternatif olarak sunulmaktadır.

Anahtar kelimeler: Yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeyler, ikili faz kaydırma anahtarlaması, dörtlü faz kaydırma anahtarlaması, tek giriş tek çıkış, işaret uzayı çeşitliliği, nicemleme hatası.

Augmenting Wireless Communication Performance through Signal Space Diversity and Reconfigurable Intelligent Surfaces

Abstract: This study investigates the enhancement of the performance of single input single output communication systems, employing binary phase shift keying and quadrature phase shift keying modulation schemes, through the integration of signal space diversity (SSD) and reconfigurable intelligent surfaces (RIS). The study conducts a comparative analysis of analog and quantized RIS configurations under Rayleigh fading conditions. The findings reveal that both architectures significantly improve the bit error rate performance relative to conventional non-RIS-assisted systems. Specifically, the analog RIS configuration demonstrates greater resilience in mitigating error performance degradation, whereas the quantized RIS configuration exhibits higher susceptibility to phase distortions arising from quantization-induced inaccuracies. Furthermore, the incorporation of SSD results in a marked improvement in error performance while incurring only a minimal increase in system complexity. These results underscore the potential of integrating RIS and SSD as a cost-effective and energy-efficient solution, particularly in addressing the stringent reliability and performance requirements of 5G and beyond networks.

Keywords: Reconfigurable intelligent surfaces, binary phase shift keying, quadrature phase shift keying, single input single output, signal space diversity, quantization error.

1. Giriş

Geçtiğimiz birkaç on yılda kablosuz iletişim teknolojisi, daha yüksek veri hızları, gelişmiş güvenilirlik ve artırılmış spektrum verimliliği hedefleri doğrultusunda önemli ilerlemeler kaydetmiştir [1]. Geleceğin iletişim teknolojileri olan beşinci nesil kablosuz iletişim (5G) ve altıncı nesil kablosuz iletişim (6G), daha hızlı, daha güvenilir ve daha yoğun bağlantılar sağlama ihtiyacının bir sonucu olarak kablosuz sistemlerin evriminde önemli bir sıçrama sağlayacaktır [2]. Bu gelişmeler, yalnızca sürekli iyileştirmeler değil, aynı zamanda veri trafiği, cihaz sayısındaki artış ve çeşitli kullanım koşullarının üstesinden gelmek için yapılan temel değişikliklerdir [3]. 5G, veri hızları, gecikme süreleri ve bağlantı yoğunluğu açısından önemli kazanımlar sağlamış olsa da 6G vizyonu daha da ileriye giderek terabit/saniye düzeyinde veri hızları, gerçek zamanlı etkileşim ve fiziksel ve dijital alanlar arasında kesintisiz entegrasyon hedeflemektedir [4]. Bu hedefe ulaşmak için kablosuz ağların çevreleriyle nasıl etkileşim kurduğunu değiştirmek çok önemlidir [5]. Geleneksel ağlar, yayılma ortamını sabit ve kontrol edilemez bir faktör olarak ele alarak yalnızca verici ve alıcı uçlardaki gelişmiş donanım ve algoritmalara güvenir [6]. Bununla birlikte, yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeyler (RIS) gibi yeni teknolojiler, elektromanyetik dalgaların nasıl yayıldığını

* Sorumlu yazar: iremyuce8991@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0009-0005-3926-9108, [2] 0000-0002-3741-7358, [3] 0000-0002-9612-6227

sürekli olarak kontrol etme yeteneğine sahiptir [7]. RIS, kablosuz iletişim kanallarının sinyal gücünü, kapsama alanını ve enerji verimliliğini artırmak ve daha akıllı, daha uyarlanabilir bir iletişim ekosistemi oluşturmak için yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır [8]. 6G kablosuz ağları ilerledikçe, RIS özellikle 100 GHz'in üzerindeki frekanslarda iletişim ve konumlandırma yeteneklerini geliştirmede önemli bir rol oynayacaktır [1].

RIS, sinyal yayılımını optimize etmek için faz kaymalarını değiştirme yeteneğine sahip programlanabilir yansıtıcı birim hücrelerden oluşur [9]. Bu, sinyal-gürültü oranlarını iyileştirir ve zorlu, görüş hattı olmayan ortamlarda bile güvenilir bir iletişim sağlar [10]. RISların gelen dalgaları manipüle etme ve yapıcı girişim oluşturma yetenekleri, geçici engeller ve kullanıcı hareketliliği gibi zorluklarla başa çıkmayı sağlamaktadır [11]. Elektromanyetik dalgaların fazını, genliğini ve polarizasyonunu değiştirebilen programlanabilir elemanlarla donatılan RIS, dinamik sinyal optimizasyonu sağlar [12]. Bu elemanlar akıllıca yapılandırıldığında, RIS sinyal gücünü artırır, sönümlemeyi azaltır ve hata oranını iyileştirir. Bu özellikler, RISı çoklu yol yayılımına sahip kentsel ortamlar gibi karmaşık senaryolar için etkili bir çözüm haline getirir [9, 13]. Geleneksel rölelerin aksine, RIS aktif amplifikasyon gerektirmez ve bu nedenle uygun maliyetli ve enerji açısından verimli bir alternatif sunar. Karmaşık modülasyon teknikleriyle birleştirildiğinde, RISın enerji tüketiminde ve spektral verimlilikte önemli iyileştirmeler sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, RIS teknolojileri, nesnelerin interneti (IoT), akıllı şehirler ve otonom araçlar gibi uygulamalarda güvenilir iletişim sağlayarak yaygın zorlukları hafifletir [10,12]. Örneğin, RISlar, elektromanyetik dalgaların fazını ve genliğini dinamik olarak kontrol ederek, karmaşık yansıma ortamlarında sinyal yayılımını optimize eder ve bu sayede IoT cihazları arasında daha güvenilir ve enerji verimli iletişim sağlar [13]. Bu, akıllı şehirlerde sensör ağlarının etkinliğini artırır ve otonom araçların güvenli veri alışverişini destekler.

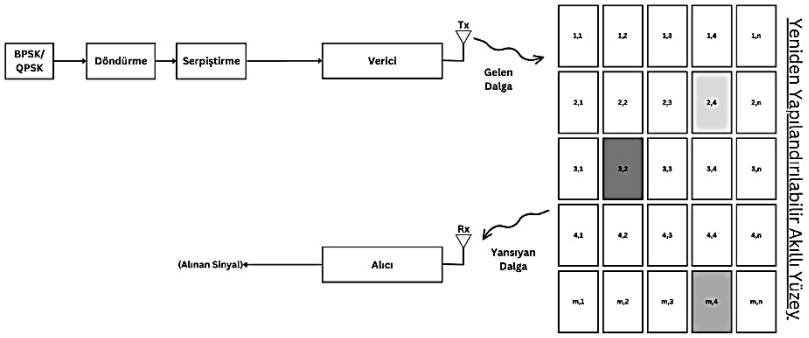
Geleneksel çeşitlilik yöntemleri zaman, frekans, kod ve uzay boyutlarının birden çok kere kullanımını içermektedir [14]. Öte yandan, işaret uzayı çeşitliliği (SSD) hata performansını arttırırken sadece modüle edilmiş sembollerden oluşan işaret uzayındaki hali hazırda bulunan dikgenliği kullanan, düşük karmaşıklıklı bir çeşitlilik tekniğidir. SSD sisteminde iki prosedür uygulanmaktadır: biri, sinyal takımyıldızını optimum bir döndürme açısı ile döndürmeyi içerirken, diğeri koordinat serpiştirme ile ilgilidir [15]. SSD ilk olarak, takımyıldız sembollerinin döndürülmesini kullanarak, orijinal sembolleri her bir işaret noktası ayrık I ve Q bileşenlerine sahip olacak şekilde yeniden düzenlemektedir [16]. Kanal sönümleme katsayılarının birbirinden bağımsızlığını sağlamak için bu süreç belirli bir stratejiye göre belirlenmiş bir I/Q serpiştirme yöntemiyle birleştirilerek, ek karmaşıklık veya kaynak ihtiyacı olmaksızın çeşitlilik sağlanır ve genel sistem verimliliği artırılır [17]. SSD, özellikle çok sayıda anten kullanarak çeşitliliğin sağlanamadığı tek giriş tek çıkış (SISO) sistemlerinde oldukça etkilidir. Rayleigh sönümlemesi bağlamında, SSD tüm sinyal boyutlarında eşzamanlı derin sönümlenme olasılığını azaltarak düşürmektedir [11,18].

Kablosuz haberleşme sistemlerinde sinyal, çevresel etkiler nedeniyle farklı yollar üzerinden alıcıya ulaşarak Rayleigh sönümlemeye uğrar [19]. Rayleigh sönümleme modeli, yoğun kentsel bölgeler ve iç mekân haberleşme sistemleri gibi gerçekçi kablosuz ortamları modellemek için sıklıkla kullanılır [20]. Bu çalışma, Rayleigh sönümlemesi koşulları altında SISO sistemlerindeki bit hata oranı (BER) performansı üzerinde RIS ve SSD tekniklerinin etkisini incelemekte ve analog RIS ile nicemlenmiş RIS yapılandırmalarını karşılaştırarak bunların güçlü ve zayıf yönlerini değerlendirmektedir. SSD tekniğinin takımyıldız rotasyonu ve koordinat serpiştirme teknikleri, sinyal dayanıklılığını artırırken; RIS, kablosuz ortamı dinamik olarak optimize ederek sönümlemeyi azaltmakta ve sinyal kalitesini iyileştirmektedir [21]. Ayrık faz kaydırma kullanan nicemlenmiş RIS, BER performansını hafifçe etkileyen küçük bir nicemleme gürültüsü sunmasına rağmen, RIS kullanılmayan sistemlere kıyasla üstün bir performans sergilemektedir. Bu durum, nicemlenmiş RIS ortamının bütçeye duyarlı kablosuz ağlar için pratik ve uygun maliyetli bir seçenek haline getirmektedir [22]. Öte yandan, analog RIS, sinyal dayanıklılığını ve hata oranının doğruluğunu önemli ölçüde iyileştiren gelişmiş faz kontrolü sağlamaktadır [23]. Ancak, daha yüksek karmaşıklık seviyesi, donanım tasarımı ve enerji verimliliği açısından zorluklar yaratmakta ve bu da analog RIS ortamını düşük güç tüketimi ve basitlik gerektiren uygulamalar için daha az uygun kılmaktadır [24]. Bu araştırma, zorlu ortamlarda RIS yapılandırmalarının spektral ve enerji verimliliğini artırma potansiyelini vurgulamakta ve performans ile uygulama karmaşıklığı arasındaki dengeyi detaylı bir şekilde ele almaktadır. Bu entegrasyon, BPSK ve QPSK şemalarının otonom araçlar ve IoT cihazları gibi uygulamalarda üstün BER performansı göstermesini ve böylece bu modülasyon tekniklerinin yeni nesil ağlarda güvenilir ve verimli iletişimin temel taşı haline gelmesini sağlayabilir.

Notasyon: Bu çalışmada büyük ve koyu harfler matrisleri, küçük ve koyu harfler ise vektörleri temsil etmektedir. $N\times N$ boyutundaki bir birim matris $\mathbf{I}_N$ ile belirtilmiştir. Diyagonalinde $x_1, \ldots, x_N$ olan bir diyagonal matris $\mathrm{diag}(x_1, \ldots, x_N)$ ile gösterilmiştir. Dairesel olarak simetrik karmaşık Gauss dağılımı ise $\mathcal{CN}(\cdot,\cdot)$ ile ifade edilmiştir [25].

2. Sistem Modeli

Bu bölümde, çalışmada önerilen sistem modeli ele alınmıştır. Şekil 1, çalışmada ortaya konan RIS destekli ve SSD kullanan bir kablosuz iletişim sistemini göstermektedir. İletilmek istenen dijital veri, BPSK veya QPSK modülasyon teknikleriyle işlenir; ardından faz döndürme ve serpiştirme işlemleriyle sinyal, parazit ve çok yollu yayılmaya karşı dayanıklı hale getirilir. Bu sinyal, verici tarafından ortama iletilir ve RIS üzerinden yansıtılarak alıcıya yönlendirilir, yani verici ve alıcı arasında doğrudan iletişim yoktur. RIS, faz ve genliği ayarlanabilir pasif elemanlardan oluşur ve gelen sinyali alıcıya en uygun şekilde yansıtmakla görevlidir. Diyagramda koyu renkle gösterilen hücreler, aktif olarak yansıtma yapan RIS elemanlarını temsil eder. Bu yapı sayesinde, kanal koşulları iyileştirilerek daha güvenilir ve verimli bir iletişim sağlanır.



Şekil 1. Sistem modeli

Vericide BPSK veya QPSK modülasyon şemalarına göre üretilen semboller, SSD tekniği kapsamında BPSK modülasyonu için saat yönünün tersine 45 derecelik, QPSK modülasyonu için ise saat yönünün tersine 30 derecelik bir döndürme açısıyla döndürülmektedir. Burada ortalama sembol enerjisinin E_s olduğu kabul edilmiştir. Bu kapsamda bir iletim periyodunda üretilen bir sembolü $s_k = s_{kI} + js_{kQ}$ olarak tarif edebiliriz ($k \in \{1,2,3, \dots\}$) [26]. Burada s_{kI}, s_k sembolünün I bileşenini gösterirken, s_{kQ} ise Q bileşenini göstermektedir. Daha sonra döndürülmüş semboller üzerinde koordinat serpiştirmesi uygulanarak, x_k sembolleri elde edilmektedir [26]. Burada $x_k = s_{\alpha I} + js_{\beta Q}$ olmaktadır ($\alpha, \beta \in \{1,2,3, \dots\}$ ve $\alpha \neq \beta$) [27]. Bu sayede modüle edilmiş bir sembolün I ve Q bileşenlerine etki eden kanal kazançları arasındaki korelasyon katsayısı sıfıra eşit olmaktadır [27].

Vericiden iletilen x sembolleri, verici ile alıcı arasında yer alan RIS vasıtasıyla yansıtılarak alıcıya iletilmektedir. Bu iletim süreci sonucunda alıcıda alınan sinyal:

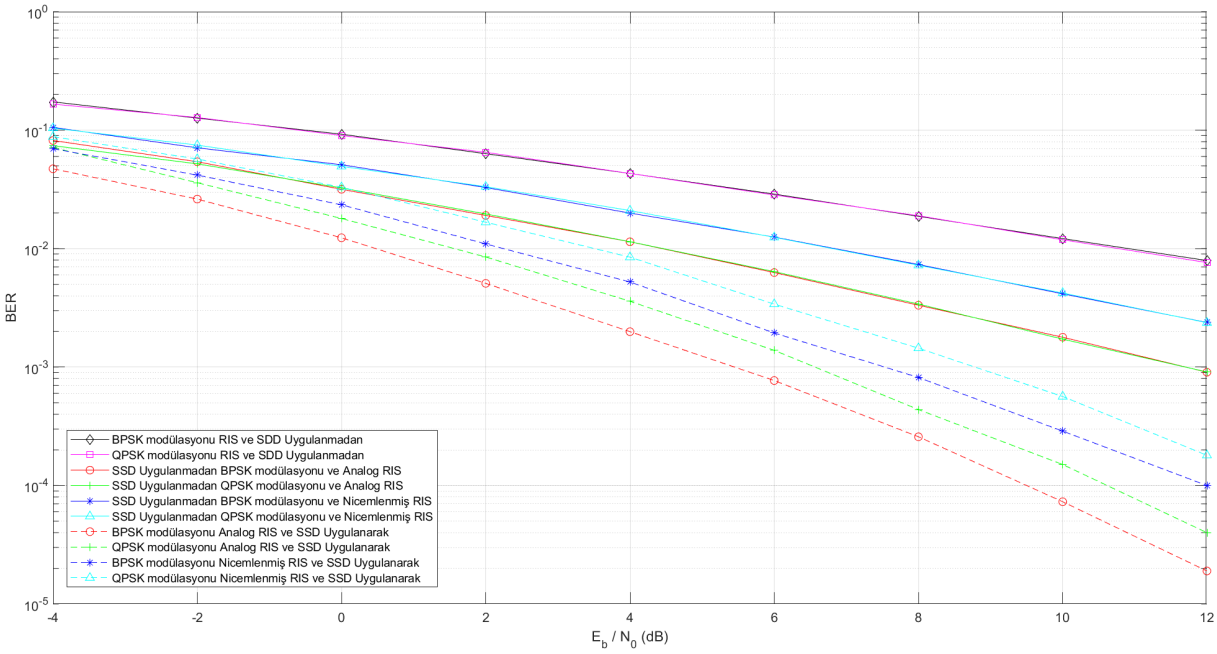
$$y = \sqrt{\rho}\boldsymbol{h}_{sr}^{H}\boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{h}_{rd}x + n \tag{1}$$

Eşitlik (1) ile gösterilebilir. Burada ρ kaynak tarafından iletilen sembol için ayrılmış olan iletim gücünü, $\mathbf{h}_{sr} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \beta_{sr}\mathbf{I}_N)$, verici ve RIS arasındaki kanalı, $\mathbf{h}_{rd} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \beta_{rd}\mathbf{I}_N)$ RIS ile alıcı arasındaki kanalı temsil etmektedir [25]. $\boldsymbol{\Theta} = \mathrm{diag}(e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_N})$ RIS tarafından oluşturulan faz kaymalarını temsil eden diyagonal bir matris olup bu faz kaymaları, θ_N değerleri ile gösterilmekte olup, belirli bir aralıkta $[-\pi, \pi]$ değişebilmektedir. (β_{sr} ve β_{rd} büyük ölçekli sönümleme katsayılarıdır). Bu denklemde yer alan $\boldsymbol{\Theta}$ matrisi, RIS elemanlarının uyguladığı faz kaymalarını belirlemektedir ve değerlerine bağlı olarak hem analog RIS hem de nicemlenmiş RIS senaryolarını temsil edebilir. Analog RIS durumunda, $\boldsymbol{\Theta}$ matrisindeki faz değerleri sürekli olup istenen fazlar tam olarak uygulanabilirken; quantized RIS durumunda ise bu faz değerleri belirli ayrık seviyelere nicemlenmiştir. Son olarak, $n \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ alıcı tarafındaki gürültüyü temsil etmekte olup sıfır ortalamalı ve σ^2 varyansına sahip kompleks normal dağılımlı bir rastgele değişken olarak modellenmektedir [25].

Nicemlenmiş RIS senaryosu için ise donanım kısıtlamaları sebebiyle yansıtıcı faz değerleri $\{\phi_i\}_{i=1}^{N}$ pratikte sadece sonlu sayıda ayrık değerler alabilmektedir. Ayrık değerlerin sayısını 2^b ile ve nicemleme seviye sayısının b ile gösterildiği durumda yansıtıcı fazları düzgün olarak nicemlenebilmektedir ve bu durumda ayrık fazlar $\{0, \frac{2\pi}{2^b}, \dots, \frac{(2^b-1)2\pi}{2^b}\}$ ile gösterilebilmektedir. Bu durumda eş dağılımlı faz kuantalama hatası $[-\frac{\pi}{2^b}, \frac{\pi}{2^b}]$ aralığındadır [28]. Nicemlenmiş RIS sistemleri, donanım kısıtlamalarına rağmen kablosuz iletişimde performans artırıcı etkiler gösterebilmekte ve spektral verimliliği optimize etmektedir [29].

3. Numerik Sonuçlar

Bu çalışmada, Rayleigh sönümleme etkisi altında SISO sistemlerinin hata performansını iyileştirmek amacıyla RIS ve SSD teknikleri entegre edilmiştir. Vericide semboller BPSK veya QPSK modülasyon şemalarına göre üretilmektedir. Daha sonra ise, orijinal modülasyon şeması BPSK modülasyonu için saat yönünün tersine 45 derecelik, QPSK modülasyonu için ise saat yönünün tersine 30 derecelik bir döndürme açısıyla döndürülmektedir. Bu şartlar altında, RISın analog ve nicemlenmiş yapılandırmaları karşılaştırılmış ve SSD tekniğinin sağladığı kazançlar analiz edilmiştir. Simülasyonlar, farklı RIS eleman sayıları ve nicemleme seviyeleri parametreleri altında gerçekleştirilerek, RIS ve SSD teknolojilerinin birlikte kullanımının BER üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu bölümde, benzetimler sonucunda elde edilen sayısal sonuçlar sunulmakta ve önerilen sistemin performans iyileştirmeleri değerlendirilmektedir. Farklı sistem yapılandırmalarında BER performansını değerlendirmek için yapılan analizlerde, bit başına enerji/gürültü güç oranı $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)$ temel alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, RIS ve SSD tekniklerinin BPSK ve QPSK modülasyonlarıyla çalışan SISO sistemler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

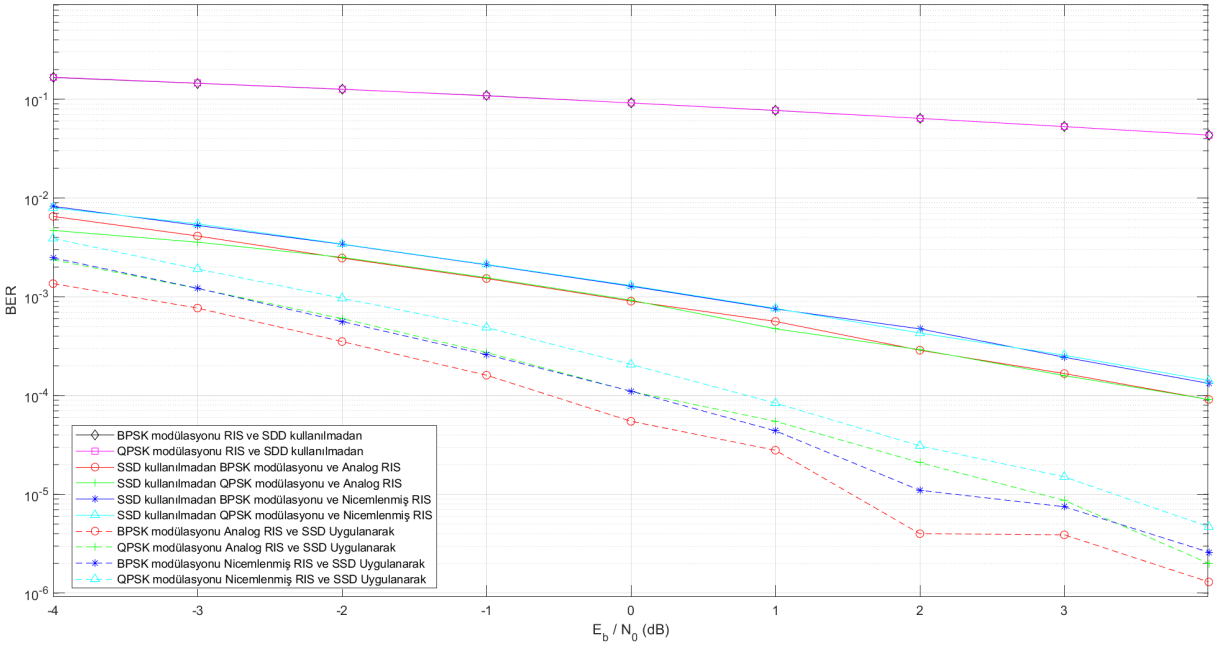


Şekil 2. RIS sayısı = 2 ve Nicemleme biti = 1 durumu.

Şekil 2'de gösterilen simülasyon sonuçları iki RIS elemanına sahip ve bir bitlik nicemleme gürültü seviyesinde çalışan bir sistem senaryosuna dayanmaktadır. RIS bulunmayan, Analog RIS veya SSD içermeyen sistemler, beklendiği üzere en yüksek BER değerlerini sergilemiştir. BER değeri 10^{-4} olduğunda, analog RIS ve SSD kullanımı, nicemlenmiş RIS ve SSD yöntemine kıyasla QPSK modülasyonu için 3,3 dB, BPSK modülasyonu için ise 3,52 dB ek kazanç sağlamaktadır. Ayrıca, aynı sistem içinde QPSK modülasyonunun kullanılması, BPSK modülasyonuna kıyasla kazançta azalmaya neden olmaktadır. Bu azalma analog RIS ve SSD entegrasyonunda 1,28 dB, nicemlenmiş RIS ve SSD ile kullanımında ise 1,12 dB olarak gözlemlenmiştir. Genel olarak, Tablo 1'de de gözlemlediğimiz üzere; analog RIS, nicemlenmiş RISa kıyasla daha üstün hata performansı sunarken, SSD metodunun entegrasyonu BER değerlerinde önemli bir iyileşme sağlamaktadır. Bununla birlikte, BPSK modülasyonu, çoğu durumda QPSK modülasyonuna kıyasla daha yüksek kazanç sunmaktadır. Özellikle BER değerinin 10^{-4} olduğu senaryolarda, analog RIS ve SSD tekniklerinin birlikte kullanımı en büyük avantajı sağlamaktadır. Bu bulgular, RIS ve SSD entegrasyonunun sinyal dayanıklılığı ve enerji verimliliğini artırmada kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Tablo 1. RIS sayısı = 2 ve Nicemleme biti = 1 durumu.

Modülasyon	Yapılandırma Karşılaştırması	Kazanç (dB)	BER Seviyesi
QPSK	Analog RIS+SSD vs Nicemlenmiş RIS+SSD	3,3	10^{-4}
QPSK	Analog RIS+SSD vs Analog RIS (no SSD)	1,28	10^{-4}
QPSK	Nicemlenmiş RIS+SSD vs Nicemlenmiş RIS	1,12	10^{-4}
BPSK	Analog RIS+SSD vs Nicemlenmiş RIS+SSD	3,52	10^{-4}

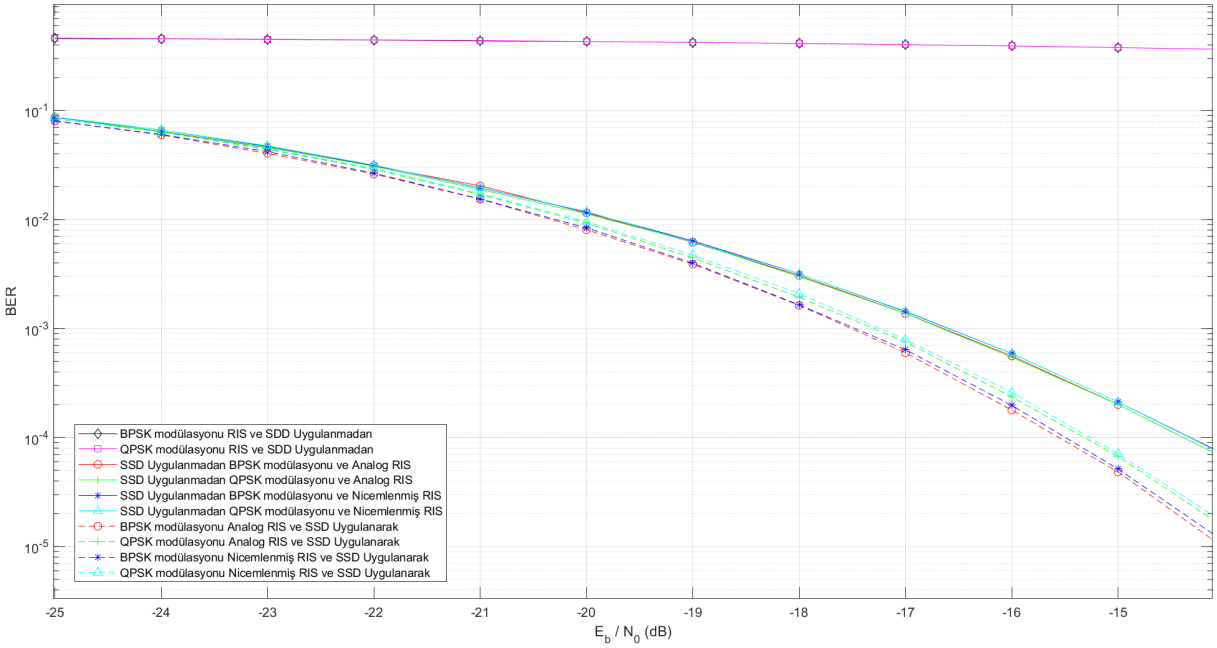


Şekil 3. RIS sayısı = 4 ve Nicemleme biti = 2 durumu.

Şekil 3'te dört RIS elemanı ve iki bitlik nicemleme gürültü seviyesine sahip bir sistem senaryosu incelenmiştir. Bu senaryoda, RIS ve SSD içermeyen sistemler beklendiği üzere çok yüksek bir hata seviyesinde kalmıştır. BER değeri 10^{-4} olduğunda, analog RIS ve SSD kullanılan QPSK modülasyonu, nicemlenmiş RIS ve SSD kullanılan QPSK modülasyonuna kıyasla 1,14 dB daha yüksek kazanç sağlamaktadır. Benzer şekilde, BPSK modülasyonunun analog RIS ve SSD ile kullanımı, nicemlenmiş RIS ile kullanılan BPSK modülasyonuna kıyasla 0,6 dB daha fazla kazanç sunmaktadır. Yalnızca analog RIS kullanan sistemlere kıyasla, analog RIS ve SSD tekniklerinin entegre edildiği QPSK modülasyonu 4,3 dB, BPSK modülasyonu ise 4,1 dB ek kazanç sağlamaktadır. Öte yandan, yalnızca nicemlenmiş RIS içeren sistemlere kıyasla, SSD ile birlikte kullanılan nicemlenmiş RIS destekli QPSK modülasyonu 3,5 dB, BPSK modülasyonu ise 4 dB daha yüksek kazanç elde etmektedir. BER değeri 10^{-5} seviyesine düştüğünde, analog RIS ve SSD ile desteklenen QPSK modülasyonu, nicemlenmiş RIS ve SSD kullanan QPSK modülasyonuna kıyasla 0,7 dB daha fazla kazanç sağlamaktadır. Ayrıca, analog RIS ve SSD kullanılarak gerçekleştirilen BPSK modülasyonu ile nicemlenmiş RIS ve SSD kullanılan QPSK modülasyonu arasında da 0,7 dB'lik bir kazanç farkı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, RIS ve SSD teknolojilerinin birlikte kullanımının kablosuz haberleşme sistemlerinin performansını önemli ölçüde artırdığını ve Tablo 2'de de görüldüğü gibi, özellikle zorlu kanal koşullarında hata oranını düşürerek iletişim güvenilirliğini en üst düzeye çıkardığını ortaya koymaktadır.

Tablo 2. RIS sayısı = 4 ve Nicemleme biti = 2 durumu.

Modülasyon	Yapılandırma Karşılaştırması	Kazanç (dB)	BER Seviyesi
QPSK	Analog RIS+SSD vs Nicemlenmiş RIS+SSD	1,14	10^{-4}
BPSK	Analog RIS+SSD vs Nicemlenmiş RIS+SSD	0,6	10^{-4}
QPSK	Analog RIS+SSD vs Analog RIS (no SSD)	4,3	10^{-4}
BPSK	Analog RIS+SSD vs Analog RIS (no SSD)	4,1	10^{-4}
QPSK	Nicemlenmiş RIS+SSD vs Nicemlenmiş RIS	3,5	10^{-4}
BPSK	Nicemlenmiş RIS+SSD vs Nicemlenmiş RIS	4,0	10^{-4}
QPSK	Analog RIS+SSD vs Nicemlenmiş RIS+SSD	0,7	10^{-5}



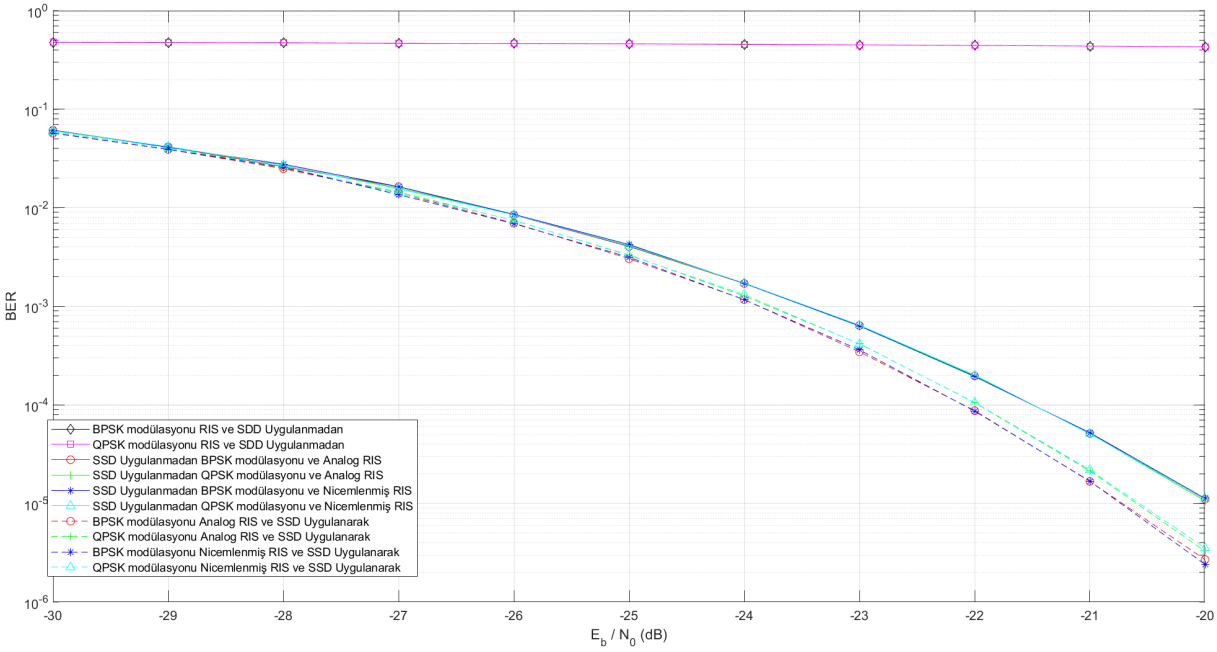
Şekil 4. RIS sayısı = 16 ve Nicemleme biti = 4 durumu.

Şekil 4'te 16 RIS elemanı ve 4 bitlik nicemleme gürültü seviyesine sahip bir senaryo değerlendirilmiştir. BER seviyesi 10^{-3} değerine yaklaştıkça, performans iyileştirmeleri belirgin bir şekilde artmakta ve SSD tekniğinin etkisi daha da ön plana çıkmaktadır. Bu koşullar altında, QPSK modülasyonunun nicemlenmiş RIS veya analog RIS ile birlikte SSD kullanılarak uygulanması, yalnızca analog RIS veya SSD içermeyen nicemlenmiş RIS kullanan sistemlere kıyasla ek 0,7 dB kazanç sağlamaktadır. Benzer şekilde, BPSK modülasyonu 0,9 dB kazanç elde ederek, bu BER seviyesinde QPSK şemasına kıyasla daha üstün bir performans sergilemektedir. BER seviyesi 10^{-4}'e düştüğünde, kazanç artışı daha da belirgin hale gelmektedir. Bu durumda, nicemlenmiş RIS veya analog RIS ile birlikte SSD kullanılan QPSK modülasyonu, yalnızca analog RIS veya SSD içermeyen nicemlenmiş RIS kullanan sistemlere kıyasla ek 1,0 dB kazanç sağlamaktadır. Benzer şekilde, SSD ile entegre edilen nicemlenmiş RIS veya analog RIS destekli BPSK modülasyonu, SSD içermeyen sistemlere kıyasla 1,2 dB'lik bir performans artışı sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, SSD tekniğinin hem nicemlenmiş RIS hem de analog RIS tabanlı iletişim sistemlerinin BER performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini ve bu etkinin özellikle düşük BER seviyelerinde daha belirgin hale geldiğini göstermektedir. Tablo 3'te de görüldüğü gibi, BPSK modülasyonu, QPSK

modülasyonuna kıyasla istikrarlı bir şekilde daha yüksek kazanç sağlamakta olup, düşük hata oranlarının kritik olduğu haberleşme senaryolarında daha avantajlı bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, RIS elemanlarının sayısının 16'ya çıkarılmasıyla birlikte sistem performansı artmakta ve bu durum, gelişmiş RIS ve SSD tekniklerinin entegrasyonunun, güvenilir ve yüksek performanslı kablosuz iletişim sistemlerinin geliştirilmesi açısından kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Tablo 3. RIS sayısı = 16 ve Nicemleme biti = 4 durumu.

Modülasyon	Yapılandırma Karşılaştırması	Kazanç (dB)	BER Seviyesi
QPSK	RIS+SSD vs RIS/ SSD olmayan	0,7	10^{-3}
BPSK	RIS+SSD vs RIS/ SSD olmayan	0,9	10^{-3}
QPSK	RIS+SSD vs RIS/ SSD olmayan	1,0	10^{-4}
BPSK	RIS+SSD vs RIS/ SSD olmayan	1,2	10^{-4}



Şekil 5. RIS sayısı = 32 ve Nicemleme biti = 6 durumu.

Şekil 5'te RIS eleman sayısının 32 olduğu ve 6 bitlik nicemleme gürültü seviyesinin ele alındığı bir senaryo değerlendirilmiştir. BER seviyesi 10^{-4}'e düştüğünde, kazanç iyileştirmeleri devam etmekte ve RIS ile SSD entegrasyonunun etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Analog RIS ve SSD ile birlikte kullanılan QPSK modülasyonu, yalnızca analog RIS veya SSD içermeyen nicemlenmiş RIS kullanan sistemlere kıyasla ek 0,4 dB kazanç sağlamaktadır. Benzer şekilde, BPSK modülasyonunun nicemlenmiş RIS veya analog RIS ile birlikte SSD kullanılarak uygulanması ya da QPSK modülasyonunun nicemlenmiş RIS ve SSD ile entegrasyonu, yalnızca analog RIS veya SSD içermeyen nicemlenmiş RIS kullanan sistemlere kıyasla ek 0,5 dB kazanç sunarak sınırlı bir iyileştirme sağlamaktadır. Bu bulgular hem BPSK hem de QPSK modülasyonlarının SSD entegrasyonundan faydalandığını, ancak BPSK şemasının bir miktar daha üstün performans sergilediğini göstermektedir. BER seviyesi 10^{-5}'e düştüğünde, kazanç artışı daha da belirgin hale gelmektedir. RIS ve SSD tekniklerinin birlikte kullanıldığı sistemler, yalnızca RIS içeren ancak SSD entegrasyonu bulunmayan sistemlere kıyasla 0,7 dB ek kazanç sağlamaktadır. Bu sonuçlar, SSD'nin sistem performansını artırmadaki kritik rolünü vurgulamakta olup, farklı modülasyon şemaları ve RIS yapılandırmaları genelinde güvenilir bir kazanç avantajı sunduğunu ortaya

koymaktadır. Elde edilen bulgular, SSD teknolojisinin hem nicemlenmiş hem de analog RIS tabanlı haberleşme sistemlerinin hata performansını, özellikle düşük BER seviyelerinde, önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Tablo 4'te de görüldüğü gibi, BPSK modülasyonu, QPSK şemasına kıyasla daha yüksek kazanç sağlayarak, hata oranının minimum seviyeye indirilmesinin kritik olduğu senaryolarda daha avantajlı bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, RIS elemanlarının sayısının 32'ye çıkarılmasıyla sistem performansı daha da iyileşmekte ve bu durum, ileri düzey RIS ve SSD tekniklerinin entegrasyonunun, yüksek verimli ve güvenilir kablosuz haberleşme ağlarının geliştirilmesi açısından önemli bir katkı sunduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 4. RIS sayısı = 32 ve Nicemleme biti = 6 durumu.

Modülasyon	Yapılandırma Karşılaştırması	Kazanç (dB)	BER Seviyesi
QPSK	Analog RIS+SSD vs RIS/ SSD olmayan	0,4	10^{-4}
BPSK	Nicemlenmiş RIS+SSD vs RIS/ SSD olmayan	0,5	10^{-4}
QPSK	Nicemlenmiş RIS+SSD vs RIS/ SSD olmayan	0,5	10^{-4}
Tüm modlar	RIS+SSD vs RIS/ SSD olmayan	0,7	10^{-5}

Bu çalışma kapsamında yapılan analizler, RIS ve SSD yöntemlerinin Rayleigh sönümleme koşulları altında çalışan SISO sistemlerinin BER performansını iyileştirmede kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle, RIS teknolojisi sayesinde elektromanyetik ortamın aktif olarak yeniden şekillendirilebilmesi, sinyal yayılım koşullarının optimize edilmesini sağlamaktadır. Analog RIS, faz kaymalarını daha hassas bir şekilde kontrol edebilmesi nedeniyle sürekli olarak nicemlenmiş RIStan daha iyi performans sergilemektedir. Ancak, nicemlenmiş RIS, düşük karmaşıklık, donanım maliyeti ve enerji tüketimi açısından kısıtlı uygulamalar için avantajlı bir alternatif sunmaktadır. SSD tekniğinin takımyıldız döndürme ve koordinat serpiştirme teknikleriyle çeşitlilik kazancı sağlaması, sönümleme etkisini önemli ölçüde azaltmakta ve hata oranını düşürerek sistem güvenilirliğini artırmaktadır. Özellikle, RIS ve SSD teknolojilerinin birlikte kullanımı, kablosuz haberleşme sistemlerinin spektral ve enerji verimliliğini artırarak 6G gibi ileri nesil haberleşme ağları için güçlü bir çözüm sunmaktadır.

4. Sonuç ve Yorumlar

Bu çalışmada, RIS ve SSD tekniklerinin, Rayleigh sönümleme koşulları altında SISO sistemlerinin performansı üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Çalışma, farklı modülasyon teknikleri (BPSK ve QPSK) ile RIS ve SSD entegrasyonunun BER üzerinde önemli ölçüde iyileştirme sağladığını ortaya koymuştur. Simülasyon sonuçları, RISın sinyal gücünü artırarak sönümlemenin etkilerini azaltmada ve SSD tekniğinin sistem dayanıklılığını artırarak hata oranlarını düşürmede oldukça etkin olduğunu göstermiştir. Bütün bu avantajlarının yanında SSD yapısı gereği sadece çok az bir karmaşıklık artışı getirmektedir. Bu bulgular, ileri nesil kablosuz iletişim sistemlerinde RIS ve SSD teknolojilerinin güçlü birer aday teknoloji olduğunu kanıtlamış ve ileri nesil ağlar için önemli bir katkı sunmuştur.

Kaynaklar

[1] Siddiqui MU, Arfeen A. Multi-antenna arrays and high frequency communication for B5G/6G networks: State-of-the-art, issues, and future research directions. Inf 2024; 15(8): 442.

[2] Siddiky MNA, Rahman ME, Uzzal MS, Kabir HMD. A comprehensive exploration of 6G wireless communication technologies. Comput 2025; 14(1): 15.

[3] Banafaa M, Shayea I, Din J, Azmi MH, Alashbi A, Daradkeh YI, Alhammadi A. 6G mobile communication technology: Requirements, targets, applications, challenges, advantages, and opportunities. Alex Eng J 2023; 64: 245–274.

[4] Asghar MZ, Memon SA, Hämäläinen J. Evolution of wireless communication to 6G: Potential applications and research directions. Sustainability 2022; 14(10): 6356.

[5] Wang J, Tang W, Han Y, Jin S, Li X, Wen CK, Cheng Q, Cui TJ. Interplay between RIS and AI in Wireless Communications: Fundamentals, Architectures, Applications, and Open Research Problems. IEEE J Sel Areas Commun 2021;39(8):2271–2288.

[6] Amodu OA, Nordin R, Abdullah NF, Busari SA, Abu-Samah A, Otung I, Ali M, Behjati M. Technical Advancements Toward RIS-Assisted NTN-Based THz Communication for 6G and Beyond. IEEE Access 2024;12:183153–183181.
[7] Chen W, Lin X, Lee J, Toskala A, Sun S, Chiasserini CF, Liu L. 5G-Advanced Toward 6G: Past, Present, and Future. IEEE J Sel Areas Commun 2023;41(6):1592–1619.
[8] Bae J, Khalid W, Lee A, Lee H, Noh S, Yu H. Overview of RIS-Enabled Secure Transmission in 6G Wireless Networks. Digit Commun Netw 2024;10(6):1553–1565.
[9] Jahanbakhsh Basherlou H, Ojaroudi Parchin N, See CH. Antenna Design and Optimization for 5G, 6G, and IoT. Sensors 2025;25(5):1494.
[10] Abualhayjaa M, Centeno A, Butt MM, Sehier P, Tran DH, Imran MA, Mohjazi L. RIS-Assisted UAV for IoT Data Harvesting. In: Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Workshops (ICC Workshops); 2024 Jun 9. p. 816–821.
[11] Ren Y, Zhu Y, Zhang X, Jiang F, Lu G. Computation Efficiency Maximization in UAV and RIS Assisted NOMA-MEC Networks for Emergency Communications. In: Proc. IEEE Wireless Commun Netw Conf (WCNC); 2024 Apr 21. p. 1–6.
[12] Zhang M, Su Z, Xu Q, Qi Y, Fang D. Energy-Efficient Task Offloading in UAV-RIS-Assisted Mobile Edge Computing with NOMA. In: Proc. IEEE INFOCOM Workshops (INFOCOM WKSHPS); 2024 May 20. p. 1–6.
[13] William Marques Guerra D, Carlos Marinello J, Hossain E, Abrão T. Energy-Efficient Uplink Transmission in RIS-Aided M-MIMO IoT Systems. In: Massive MIMO Future Wirel Commun Syst Technol Appl 2025:151–188.
[14] Shaiek H. Multi-carrier waveforms for 5G and beyond systems: from power amplifier impairments to energy efficiency enhancement [dissertation]. Paris (France): Conservatoire Natl Arts Métiers; 2022.
[15] Sikri A, Mathur A, Kaddoum G. Joint Impact of Phase Error, Transceiver Hardware Impairments, and Mobile Interferers on RIS-Aided Wireless System over κ-μ Fading Channels. IEEE Commun Lett 2022;26(10):2312–2316.
[16] Barrueco J, Montalban J, Iradier E, Angueira P. Constellation Design for Future Communication Systems: A Comprehensive Survey. IEEE Access 2021;9:89778–89797.
[17] Sikri A, Mathur A, Kaddoum G. Signal Space Diversity-Based Distributed RIS-Aided Dual-Hop Mixed RF-FSO Systems. IEEE Commun Lett 2022;26(5):1066–1070.
[18] Rahbari D, Ahmed F, Jenihhin M, Alam MM, Le Moullec Y. Reliability-Critical Computation Offloading in UAV Swarms. IEEE Syst J 2024.
[19] Kang W. A Probabilistic Shaping Scheme for MIMO Systems with Signal Space Diversity. In: Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC); 2022 Apr 10. p. 251–255.
[20] Poddar H, Ju S, Shakya D, Rappaport TS. A Tutorial on NYUSIM: Sub-Terahertz and Millimeter-Wave Channel Simulator for 5G, 6G, and Beyond. IEEE Commun. Surv. Tutor. 2024;26(2):824–857.
[21] Verma GD, Mathur A. Performance Improvement of FSO Communication Systems Using Hybrid-ARQ Protocols. Appl. Opt. 2021;60(19):5553–5563.
[22] He Y, Qi W, Shen P, Lu L. Reconfigurable Intelligent Surfaces Aided Parallel RF and FSO Communications Using Adaptive Combining. In: Proc. SPIE Spectral Technol Appl 2024;13283:592–605.
[23] Nour CA. Signal Definition and Resource Management Techniques for Upcoming Communication and Broadcasting Systems [dissertation]. Lorient (France): Univ. Bretagne Sud; 2020.
[24] Song W, Rajak S, Dang S, Liu R, Li J, Chinnadurai S. Deep Learning Enabled IRS for 6G Intelligent Transportation Systems: A Comprehensive Study. IEEE Trans Intell Transp Syst 2022;24(11):12973–12990.
[25] Mora HC, Orozco NG, Chiliguano PT, De Almeida C. Enabling Signal Space Diversity for MU-MIMO/OFDMA Cellular Systems That Employ Frequency Diversity. IEEE Access 2019;7:111204–111221.
[26] Van Chien T, Tu LT, Chatzinotas S, Ottersten B. Coverage Probability and Ergodic Capacity of Intelligent Reflecting Surface-Enhanced Communication Systems. IEEE Commun Lett 2020;25(1):69–73.
[27] Haque AU, Saeed M, Siddiqui FA. Comparative Study of BPSK and QPSK for Wireless Networks over NS2. Int J Comput Appl 2012;41(19):8–12.
[28] Li D. Ergodic Capacity of Intelligent Reflecting Surface-Assisted Communication Systems with Phase Errors. IEEE Commun Lett 2020;24(8):1646–1650.
[29] Khaleel A, Basar E. Phase Shift-Free Passive Beamforming for Reconfigurable Intelligent Surfaces. IEEE Trans Commun 2022;70(10):6966–6976.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 591-610, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1636040

Ticari Araç Filoları için Sürdürülebilirlik Odaklı Elektrikli Araç Batarya Seçimi: Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımı ile Bir Değerlendirme

İrem DÜZDAR[1], Eylül ASLAN[2*]
[1] Endüstri Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye
[1] iremduzdar@gmail.com, [*2] eylulaslan045@gmail.com

(Geliş/Received: 08/02/2025; Kabul/Accepted: 02/07/2025)

Öz: Ticari araç filosu, bir şirketin ulaşım veya taşımacılık için kullandığı tüm araçları ifade eder ve belediyeler, lojistik şirketleri, toplu taşıma sistemleri gibi merkezi sistemlerden oluşur. İklim değişikliğiyle ilgili çevresel endişeler arttıkça, sera gazı emisyonlarının başlıca nedenlerinden biri ulaşım sektörüdür. Elektrikli otomobil teknolojisi, ticari alanda daha geniş kullanımına olanak sağlayacak şekilde ilerleme kaydetmiştir. Elektrikli araç bataryaları bu bağlamda önemli bir yere sahiptir. Sıkı çevre düzenlemeleri, elektrikli araç üreticilerini kapalı devre geri dönüşümüne yönlendirmiştir. Bu filolarda elektrikli araçların batarya seçimi, filonun operasyonel verimliliği ve çevresel etkileri doğrudan etkiler. Çalışma, batarya seçiminde performans, ekonomi ve çevresel sürdürülebilirlik etkilerinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), MOORA ve COPRAS yöntemleriyle, farklı batarya alternatifleri değerlendirilmiş ve sıralanmıştır. AHP ile kriterlerin ağırlıkları belirlenmiş, MOORA ve COPRAS ile batarya alternatifleri sıralanmıştır. Sonuçlar, Li-Ion bataryanın en iyi alternatif olduğunu gösterirken, Na-$NiCl_2$ bataryası ikinci, Pb-Asit bataryası ise en kötü alternatif olarak belirlenmiştir. Duyarlılık analiziyle yapılan analizler, sıralamaların büyük ölçüde sabit kaldığını ve modelin güvenilir sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Elektrikli araç bataryalarının seçimi, ticari araç filolarının enerji verimliliğini artırırken, çevresel etkilerin azaltılmasına ve ekonomik faydalar sağlamaya katkı sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Batarya seçimi, elektrikli araç, sürdürülebilirlik, Copras, Moora.

Sustainability-Oriented Electric Vehicle Battery Selection for Commercial Fleets: An Evaluation Using a Multi-Criteria Decision-Making Approach

Abstract: A commercial vehicle fleet consists of all vehicles used by a company for transportation or logistics, including centrally managed systems such as municipalities, logistics companies, public transportation, and large-scale distribution networks. The transportation sector is a major contributor to greenhouse gas emissions, and as environmental concerns about climate change grow, electric vehicle technology has advanced for wider use in the commercial sector. Electric vehicle batteries play a crucial role in this context. Strict environmental regulations have pushed electric vehicle manufacturers toward closed-loop recycling. In these fleets, the choice of electric vehicle batteries directly impacts operational efficiency and environmental effects. This study highlights the importance of considering performance, economy, and environmental sustainability in battery selection. Using the Analytical Hierarchy Process (AHP), MOORA, and COPRAS methods, different battery alternatives were evaluated and ranked. AHP determined the criteria weights, and MOORA and COPRAS ranked the alternatives. The results indicate that Li-Ion batteries are the best option, followed by Na-$NiCl_2$ batteries, and Pb-Acid batteries as the least favorable. Sensitivity analysis shows that the rankings remain stable and the model provides reliable results. Choosing the right electric vehicle batteries improves energy efficiency, reduces environmental impacts, and supports long-term economic benefits.

Key words: Battery selection, electric vehicle, sustainability, Copras, Moora.

1. Giriş

Ticari araç filoları; belediyeler, lojistik şirketleri, toplu taşıma sistemleri ve büyük ölçekli dağıtım ağları gibi çok sayıda aracın merkezi olarak yönetildiği sistemlerdir. Bu tür filolarda yapılacak her teknolojik tercih, toplam operasyonel verimliliği ve çevresel etkileri doğrudan etkileyebilmektedir. Batarya seçimi, sadece tek bir aracın değil, filonun tamamının enerji tüketimi, bakım maliyeti ve karbon salımı üzerinde belirleyici olmaktadır. Bu nedenle bu çalışma, bireysel araç kullanıcılarından ziyade ticari filoları merkeze alarak, daha yaygın, toplu ve stratejik etki yaratan bir karar problemine odaklanmaktadır.

Ticari filoların elektrikli araç geçişi, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynamaktadır. Ticari araç filoları, daha verimli ve çevre dostu elektrikli araçlar kullanarak karbon ayak izini azaltacaktır. Dünya genelinde iklim değişikliğiyle ilgili çevresel endişeler arttıkça, bu değişikliğe yol açan sera gazı emisyonlarının en

[*] Sorumlu yazar: eylulaslan045@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-7642-8121, [2] 0009-0002-9247-4299

önemli faktörlerden olan ulaşım sektörü de büyük yeniliklere sahne olmuştur. Bu doğrultuda, elektrikli araçlar için yapılan Ar-Ge çalışmaları ve altyapı yatırımları hız kazanmıştır. Son dönemde, elektrikli araç teknolojisi, bu araçların ticari alanda daha geniş bir şekilde kullanılmasına olanak tanıyacak şekilde önemli bir ilerleme kaydetmiştir [1]. Sıkı çevre düzenlemeleri elektrikli araç orijinal ekipman üreticilerini kapalı devre geri dönüşümüne sahip olmaya zorlamıştır [2]. Elektrikli araç bataryalarının doğru bir şekilde seçimi, filoların operasyonel verimliliğini artırırken, çevresel etkileri de en aza indirme fırsatı sunmaktadır.

Elektrikli araçlar sadece ticari filolar için değil, toplum ve çevre için de fayda sağlamaktadır. İçten yanmalı araçlara kıyasla daha düşük emisyon değerleri ile hava kirliliğini azaltarak iklim değişikliğiyle mücadeleye katkı sağlarlar. Ayrıca, sessiz çalışma özellikleri sayesinde gürültü kirliliği yaratmazlar ve sürücüsüne huzurlu bir sürüş deneyimi sunar. Karbon ayak izi, çevreye verilen zararın ölçülmesinde kullanılan bir terimdir ve insan aktiviteleri sonucunda atmosfere salınan tüm sera gazı emisyonlarının toplamını belirtir Elektrikli araçlar, benzinli ve dizel araçlarla kıyaslandığında daha az karbon salınımı yaparak zararlı gazların atmosfere salınımını sınırlamaktadır. Bu da havanın temiz kalmasını ve halk sağlığının korunmasını sağlar. Ek olarak, elektrikli araçlar enerjiyi daha etkin bir şekilde kullanır, bu da daha az enerji tüketimi anlamına gelir ve enerji kaynaklarının daha sürdürülebilir biçimde kullanılmasına katkıda bulunur [1].

Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) 2023 yılı verilerine göre, 2010 yılından bu yana elektrikli araç piyasası her geçen yıl yükseliş gösteriyor. 2011 yılında dünya çapında satılan elektrikli araba sayısı 110 bin kadardı. 2018 yılında bu sayı 2 milyonu buldu. 2023 yılında ise bu sayı 7 kat büyüdü ve dünya çapında 14 milyona yakın elektrikli araç satıldı [3]. Elektrikli araçların üretimi, global sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda hızla artmaktadır [4].

1. 1. Literatür Araştırması

Hamurcu vd. yapmış oldukları çalışmada elektrikli araçlar için seçilecek olan bataryalar, çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan AHP ve MOORA yöntemleri ile sıralanmıştır. Kriterleri enerji yoğunluğu, spesifik enerji, elektrik verimliliği, nominal gerilim, deşarj oranı, çevrim, dayanıklılık olarak belirlenmiştir. Alternatifler Nikel-kadmiyum (Ni-Cd), Lityum-İyon (Li-Ion), Nikel Metal Hidrat (Ni-MH), Kurşun-asit (Pb-asit) batarya türleri olacak şekilde belirlenmiştir. En iyi alternatif batarya, Li-ion batarya olarak belirlenmiştir [5].

Abdulvahitoğlu vd. yapmış oldukları çalışmada elektrikli araçlar için en iyi bataryanın seçimi amaçlanmıştır. Yöntem olarak AHP ve COPRAS kullanılmıştır. Kriterler nominal gerilim, enerji yoğunluğu, Hacimsel enerji yoğunluğu, özgül güç, yaşam döngüsü, çalışma sıcaklığı şeklinde belirlenmiştir. Alternatifler Pb-asit, Ni-Cd, Ni-MH, Sodyum Nikel Klorür (Na-NiCL2, Zebra), Li-Ion şeklindedir. Li-ion pil tipi en iyi seçenek olarak seçilmiştir ve Ni-Cd pil en az tercih edilen alternatiftir [6].

Abdulvahitoğlu vd. yapmış oldukları çalışmada yöntem olarak Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) ve Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) kullanılmıştır. En iyi bataryayı seçmek amaçlanmıştır. Kriterler özgül güç, özgül enerji yoğunluğu, güvenilirlik, güvenlik, fiyat şeklinde belirlenmiştir. Batarya alternatifleri C bataryalar, Lityum Manganez Oksit Bataryalar, Lityum Demir Fosfat bataryalar, Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit Bataryalar, Lityum Titanat bataryalar şeklindedir. Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit bataryalar en yüksek sıralamaya sahip olmuştur [7].

Loganathan vd. yapmış oldukları çalışmada WPM modeli kullanarak en iyi pil teknolojisini seçmeyi amaçlamışlardır. Kriterler fiyat, emniyet, ömür, ağırlık, geri dönüştürülebilirlik, üretilebilirlik, hızlı şarj olarak belirlenmiştir. Alternatifler Lityum metal pil, Grafen pil, Alüminyum-hava bataryası, katı hal şarj edilebilir lityum pil olarak belirlenmiştir. Bu çalışmadan, katı hal pil teknolojisi en iyi pil olarak belirlenmiştir [2].

Shah vd. yapmış oldukları çalışmada yöntem olarak Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE) yöntemini kullanmıştır. Kriterler özgül enerji, enerji yoğunluğu, özgül güç, güç yoğunluğu, ömür, çalışma sıcaklığı aralığı, fiyat, aşırı şarj toleransı şeklinde belirlenmiştir. Alternatifler Nikel-kadmiyum piller, Kurşun Asit piller, Nikel Metal Hidrit piller ve Lityum iyon piller ve Çinko-hava ve Sodyum Nikel Klorür piller olacak şekilde belirlenmiştir [8].

Yücenurşen vd. yapmış oldukları çalışmada elektrikli araçlar için kullanılan batarya tiplerini analiz etmişlerdir. Çeşitli marka ve modeldeki araçların akü kapasitesi, menzili, toplam enerji, ağırlık, enerji yoğunluğu gibi özelliklerini incelemişlerdir [9].

Son yıllarda çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleriyle elektrikli araç bataryalarının değerlendirilmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların büyük bir kısmı teknik performans ve ekonomik kriterlere odaklanmakta; enerji yoğunluğu, özgül güç, nominal gerilim, şarj süresi, maliyet ve ömür gibi ölçütler öne çıkmaktadır. Örneğin Hamurcu vd., AHP ve MOORA yöntemlerini kullanarak Li-Ion bataryayı en uygun seçenek olarak belirlemiştir. Abdulvahitoğlu vd. ise AHP ve COPRAS yöntemlerini kullanarak benzer bir sonuca ulaşmıştır. Farklı ÇKKV yöntemlerinin karşılaştırmalı kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır.

Bununla birlikte, mevcut çalışmaların çoğu çevresel sürdürülebilirlik kriterlerini ikincil önemde ele almakta veya değerlendirmelerine hiç katmamaktadır. Oysa bataryaların geri dönüştürülebilirlik oranı, karbon ayak izi ve hammadde tedarik kaynakları gibi faktörler, çevresel etki açısından belirleyicidir. Bu kriterlerin ihmal edilmesi, sürdürülebilir ulaşım sistemleri bağlamında önemli bir boşluk yaratmaktadır.

Bu bağlamda, bu çalışmanın özgün katkısı; sürdürülebilirlik kriterlerine özel ağırlık verilerek oluşturulan kapsamlı kriterlerin hem MOORA hem de COPRAS yöntemleriyle analiz edilmesi ve duyarlılık analiziyle modelin sağlamlığının test edilmesidir. Literatürde elektrikli araç bataryaları üzerine yapılan çok kriterli karar verme çalışmaları bulunmakla birlikte, bu çalışmaların büyük bölümü bireysel kullanıcı düzeyinde kalmakta, ticari araç filoları için sürdürülebilirlik odaklı bütüncül bir değerlendirme sunmamaktadır. Bu yönüyle çalışma, ticari filolar özelinde sürdürülebilir karar desteği sağlayan nadir çalışmalardan biri olma özelliği taşımaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, ticari araç filoları için elektrikli araç bataryalarının seçiminde çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), MOORA ve COPRAS yöntemleri kullanılmıştır. ÇKKV yöntemleri, çok sayıda alternatifin, birbirinden farklı öneme sahip birçok ölçüte göre sistematik biçimde karşılaştırılması ve sıralanmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, kullanılacak yöntemlerin seçiminde hem literatürdeki yaygınlıkları hem de problem yapısına uygunlukları dikkate alınmıştır.

AHP yöntemi, karar verme sürecinde kriterlerin ağırlıklandırılmasında yaygın olarak kullanılan güçlü bir yöntemdir. İkili karşılaştırmalar yoluyla karar vericilerin öznel yargılarını sayısallaştırarak tutarlılık analizi yapılmasına imkân sağlar. Bu çalışmada AHP, performans, ekonomik ve sürdürülebilirlik ana kriterlerinin ve alt kriterlerinin ağırlıklarını belirlemek amacıyla kullanılmıştır.

MOORA yöntemi hem maksimize hem de minimize edilmesi gereken kriterleri birlikte ele alabilen, hesaplaması kolay ve farklı alt yaklaşımlar (oran, önem katsayısı, referans noktası) içeren esnek bir analiz yöntemidir. Literatürde mühendislik ve enerji sektöründe sıklıkla tercih edilmektedir.

COPRAS yöntemi ise alternatiflerin faydalı ve faydasız yönlerini aynı anda analiz edebilen, göreli önem derecelerini ve performans indekslerini açıkça ortaya koyan bir yöntemdir. Özellikle batarya teknolojisi gibi çok yönlü değerlendirme gerektiren karar problemlerinde etkili sonuçlar üretmektedir.

AHP yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları, MOORA ve COPRAS yöntemlerinde kullanılmak üzere girdi olarak değerlendirilmiştir. Böylece, farklı karar yöntemlerinin alternatif sıralamaları üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Elektrikli araç bataryalarının seçimi, teknik performans, ekonomik maliyet ve çevresel sürdürülebilirlik gibi çok boyutlu kriterlere dayalı bir karar problemidir. AHP yöntemi, bu kriterler arasındaki öncelik düzeyini sistematik biçimde ortaya koyarken; MOORA ve COPRAS yöntemleri, sayısal veriler üzerinden alternatiflerin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu yönüyle, seçilen yöntemler çalışmanın amacına ve verinin yapısına uygunluk göstermektedir.

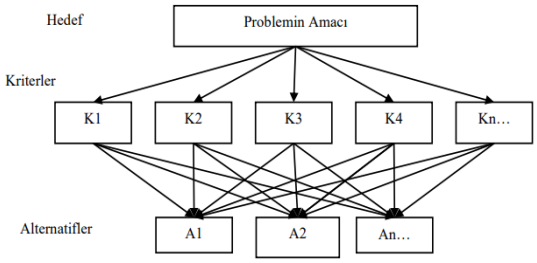
2.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)

Thomas L. Saaty tarafından 1977 yılında geliştiren Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), çok kriterli karar verme yöntemlerinden biridir. En çok kullanılan yöntemlerden biri olan AHP, birçok kriteri birlikte değerlendirerek fazla sayıda alternatif içinden en uygun alternatifi bulmayı sağlaması yönüyle diğer yöntemlere göre üstünlük kurar [10].

AHP yönteminde amaç ve bu amaca yönelik kriterler belirlenir. Alternatifler de belirlendikten sonra hiyerarşik yapı kurulur [11].

2.1.1. Hiyerarşik yapının oluşturulması

Hiyerarşik yapı hedef, kriterler, varsa ana kriterler ve alternatiflerden oluşur. AHP yapısı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. AHP yapısı [5].

2.1.2. İkili karşılaştırma matrisleri

Karşılaştırmalarda önem derecesi tablosu kullanılır. Bu değerlerle ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulur. Önem derecesi tablosu Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Saaty önem derecesi tablosu.

Önem Derecesi	Tanım	Açıklama
1	Eşit derecede önemli	Her iki faktör **aynı** öneme sahip
3	Orta derecede önemli	Bir faktör diğerine göre **biraz daha** önemli
5	Kuvvetli derecede önemli	Bir faktör diğerine göre **kuvvetle daha** önemli
7	Çok kuvvetli derecede önemli	Bir faktör diğerine göre **yüksek derecede** daha önemli
9	Mutlak derecede önemli	Bir faktör diğerine göre **çok yüksek derecede** önemli
2,4,6,8	Ara değerler	İki faktör arasındaki tercihte küçük farklar olduğunda kullanılır

2.1.3. Özvektör değeri ve tutarlılık oranı hesaplanması

İkili karşılaştırma matrisinin normalleştirilip satır ortalamalarının hesaplanması sonucunda özvektör bulunur. Özvektör (w) değeri, Denklem 1 ile belirlenir.

$$w = \frac{\sum_{j=1}^{n} c_{ij}}{n} \quad (1)$$

Özvektör değeri hesaplandıktan sonra ikili karşılaştırmaların tutarlılığı hesaplanır. Bu aşamada, tutarlılık oranının (CR) test edilmesi için Denklem 2 kullanılmaktadır. Formüldeki, tutarlılık göstergesi (CI) Denklem 3 ve Denklem 4 yardımıyla hesaplanmaktadır. Rassallık indeksi (RI), Tablo 2'den bulunur. CR değerinin 0,10'dan küçük çıkması durumunda oluşturulan karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğu kabul edilir. Bu oranın aşılması matrisin tutarsız olduğu anlamına gelir ve ikili karşılaştırma matrislerinin gözden geçirilerek yeniden düzenlenmesi gerekir [12].

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

Tutarlılık göstergesi (CI), Denklem 3 ile hesaplanır.

$$CI = \frac{\lambda max - n}{n-1} \quad (3)$$

CI değeri için en iyi öz değer (λmax), Denklem 4 ile hesaplanır.

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_i}{n} \quad (4)$$

Denklem 2'de kullanılan rassal indeks (RI) değeri, Tablo 2'de belirtilmiştir.

Tablo 2. RI değerleri [13].

N	RI	N	RI	N	RI	N	RI
1	0	4	0,90	8	1,41	11	1,51
2	0	5	1,12	9	1,45	12	1,48
3	0,58	6	1,24	10	1,49	13	1,56

2.1.4. Alternatiflerin önem sıralamalarının bulunması

Kriterlerin değerlendirilmesinde izlenen adımlar, alternatiflerin değerlendirilmesinde de uygulanır ve her bir kriter için alternatiflerin ikili karşılaştırmaları oluşturulur. Kriter ve alternatiflerin ağırlıkları hesaplanır. Ağırlıkların matris çarpımları yapılarak alternatiflerin öncelik seviyeleri bulunur. Bulunan değerler büyükten küçüğe sıralanır, en büyük değer birinci seçim en küçük değer ise sonuncu seçim olacak şekildedir.

2.2. MOORA Yöntemi

2006 yılında Brauers ve Zavadskas tarafından geliştirilen Multi Objective Optimizationon The Basis Of Ratio Analysis (MOORA) yöntemi, günümüzde çok kriterli karar verme problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılan bir tekniktir [14].

MOORA yönteminin avantajları arasında, tüm hedeflerin birlikte değerlendirilmesi, alternatifler ve hedefler arasındaki etkileşimlerin bir bütün olarak ele alınması ve sübjektif ağırlıklar yerine objektif, yönsüz değerlerin kullanılması yer almaktadır [15].

MOORA yöntemleri, Oran Yöntemi, Referans Noktası Yaklaşımı, Önem Katsayısı Yaklaşımı, Tam Çarpım Yaklaşımı ve MULTIMOORA Yaklaşımı gibi farklı tekniklerle uygulanabilir. Her bir yaklaşım, çok kriterli karar verme süreçlerinde alternatiflerin sıralanmasını sağlamak için farklı hesaplama yöntemleri sunar.

2.2.1. Başlangıç karar matrisinin oluşturulması

Alternatiflerin ve amaçların performans değerleri belirlenerek başlangıç karar matrisi oluşturulmaya başlanır. Denklem 5 ile oluşturulur. MOORA yönteminin ilk adımında kullanılan başlangıç matrisi tablosu oluşturulur. Matriste, her bir alternatifin her bir kriterdeki performans ölçüm değeri "xij" olarak ifade edilir. Burada "i", alternatifin numarasını; "j", ilgili kriterin ya da ölçütün adını temsil eder. Ayrıca, "m" toplam alternatif sayısını, "n" ise toplam kriter sayısını belirtir [11].

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2.2. Matrisin normalize edilmesi

Matrisin normalize edilmesi, kriterlerin maksimum yönlü veya minimum yönlü olmasına bakılmadan Denklem 6 ile gerçekleştirilir [11].

$$x_{ij}^{*} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^{2}}} \quad (6)$$

2.2.3. Alternatiflerin performanslarının hesaplanması

2.2.3.1. MOORA- oran yaklaşımı

Normalize edilmiş maksimize edilmesi gereken performans değerlerinin toplamından, minimize edilmesi gereken performans değerlerinin toplamı çıkarılır. Bu işlem Denklem 7 ile gerçekleştirilir [11].

$$y_i^* = \sum_{j=1}^{g} x_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^{n} x_{ij}^* \quad (7)$$

g, maksimize edilecek, (n − g), minimize edilecek kriterlerin sayısını ifade etmektedir. yi* ise i. seçeneğin tüm kriterlere göre normalize edilmiş değerini ifade eder. yi* değerleri büyükten küçüğe sıralanır ve sıralamadaki birinci seçenek en uygun seçenek olarak belirlenir [11].

2.2.3.2. MOORA- önem katsayısı yaklaşımı

Gerçek hayatta, karar vericiler genellikle tüm kriterleri eşit derecede önemli görmez. Bu yöntemde, MOORA-Oran yaklaşımı ile normalleştirilen veriler, kriterlerin önemine göre ağırlıklandırılır. Her bir kriterin ağırlığını ifade eden wj katsayısı ile bu veriler çarpılarak, bazı kriterlere daha fazla, bazılarına ise daha az önem verilmesi sağlanır. Performans değerleri Denklem 8 ile bulunur [15].

$$y_i = \sum_{j=1}^{g} x_{ij} - \sum_{j=g+1}^{n} x_{ij} \quad (8)$$

yi değerleri büyükten küçüğe sıralanır ve sıralamada en yüksek değeri alan seçenek en uygun seçenek olarak değerlendirilir [11].

2.2.3.3. MOORA- referans noktası yaklaşımı

Oran sistemi yöntemine ilave olarak, her amaç için ayrı "Maksimum Amaç Referans Noktaları" belirlenir. Bu noktalar, amaç minimizasyon olduğunda minimum (min) ve maksimizasyon olduğunda maksimum (max) noktalarıdır. Belirlenen bu referans noktalardan, her x*ij için uzaklıklar Denklem 9 ile hesaplanır [15].

$$\min_j \max_i \left(r_j - x_{ij}\right) \quad (9)$$

2.3. COPRAS Yöntemi

Complex Praportional Assesment (COPRAS) yöntemi, alternatifleri adım adım analiz ederek önem ve fayda derecelerine göre sıralar. Bu yöntem, diğer karar verme yöntemlerine kıyasla daha kolay ve sade işlemler sunar [16]. COPRAS yöntemi, avantaj sağlayan kriterleri en üst seviyeye çıkarmayı ve dezavantaj oluşturan kriterleri en aza indirmeyi amaçlar [17].

COPRAS yöntemi, maksimize ve minimize edilmesi gereken kriterlerin bulunduğu karar problemlerinde kolayca kullanılabilir. Çözüm sırasında, her iki kriter türü ayrı ayrı analiz edilir. COPRAS yönteminin diğer çok kriterli karar verme yöntemlerine göre avantajı, alternatiflerin fayda düzeylerini açıkça göstermesidir. Alternatifler birbiriyle kıyaslanarak, diğerlerine göre ne kadar avantajlı ya da dezavantajlı oldukları yüzde olarak ifade edilir [18].

COPRAS yönteminin adımları aşağıdaki gibidir [17-19, 20]:

2.3.1. Karar matrisinin oluşturulması

Modeldeki değişkenler:

Aj= i. Alternatif	i = 1, 2,… , m
Cj = j. değerlendirme ölçütü	j= 1, 2 ….., n
Wj= j. değerlendirme ölçütünün önem düzeyi	j= 1, 2,…., n

Xij = j. Değerlendirme ölçütü açısından i. alternatifin değeridir.

COPRAS yönteminin birinci adımında karar matrisi oluşturulur ve matris Denklem 10'daki gibi gösterilir.

$$D = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ . \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & . & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & . & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & . & x_{3n} \\ . & . & . & . & . \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & . & x_{mnn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.3.2. Normalize edilmiş karar matrisinin oluşturulması

Normalize edilmiş karar matrisi değerleri Denklem 11 ile bulunur.

$$x_{ij}^{*} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}} \forall j = 1,2, \dots n \quad (11)$$

2.3.3. Ağırlıklandırılmış karar matrisinin oluşturulması

Ağırlıklandırılmış karar matrisi, normalize edilmiş karar matrisi sütunlarının kriterlere atanan wj ağırlıkları ile çarpılmasıyla elde edilir ve bu işlem Denklem 12 ile gerçekleştirilir.

$$D' = d_{ij} = x_{ij}^{*} \cdot w_j \quad (12)$$

2.3.4. Faydalı ve faydasız ölçütlerin hesaplanması

Bu aşamada, faydalı ölçütler, hedefe ulaşmak için yüksek değerlerin daha iyi olduğu kriterleri ifade eder. Faydasız ölçütler ise hedefe ulaşmada düşük değerlerin daha iyi olduğu ifade etmektedir. Bu değerler Denklem 13 ve Denklem 14 ile hesaplanır.

$$S_i^{+} = \sum_{j=1}^{k} d_{ij}\ j = 1,2, \dots \dots, k \quad \text{Faydalı ölçütler} \quad (13)$$

$$S_i^{-} = \sum_{j=k+1}^{n} d_{ij} j = k+1, k+2, \dots, n \quad \text{Faydasız ölçütler} \quad (14)$$

2.3.5. Qi göreceli önem derecelerinin hesaplanması

Qi değerleri, her bir alternatifin göreceli öncelik derecesini gösterir ve bu değer, Denklem 15 kullanılarak hesaplanır. Hesaplama sonucu en yüksek göreceli öncelik değerine sahip olan alternatif, en uygun seçenek olarak belirlenir.

$$Q_i = S_i^{+} + \frac{\sum_{i=1}^{m} S_i^{-}}{S_i^{-} \cdot \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{S_i^{-}}} \quad (15)$$

2.3.6. En yüksek göreceli önem değerlerinin hesaplanması

En yüksek göreceli öncelik değeri Denklem 16 ile bulunmaktadır.

$$Q_{max} = \text{enbüyuk}\{\{Qi\} \nabla i = 1,2, \dots m \quad (16)$$

2.3.7. Alternatifler için performans indeksi Pi değerlerinin hesaplanması

Her alternatif için Pi adı verilen performans göstergesi, Denklem 17 ile hesaplanır.

$$P_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} \cdot 100\% \quad (17)$$

Hesaplanan Pi performans değerlerinin arasından 100 olan alternatif en yüksek performansa sahip olarak kabul edilir. Alternatiflerin sıralaması, performans indekslerinin büyükten küçüğe doğru düzenlenmesiyle yapılır.

3. Uygulama

Bu çalışmanın uygulama aşamasında, elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan beş farklı batarya teknolojisi; sürdürülebilirlik, teknik performans ve ekonomik boyutlar dikkate alınarak çok kriterli bir değerlendirme sürecine tabi tutulmuştur. Uygulama, öncelikle literatür taraması ve uzman görüşleri doğrultusunda kriterlerin ve batarya alternatiflerinin belirlenmesiyle başlamıştır. Ardından, belirlenen kriterlerin göreli önem düzeyleri Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemiyle hesaplanmış ve elde edilen ağırlıklar, çok kriterli sıralama yöntemlerinden MOORA ve COPRAS yöntemlerinde kullanılmıştır. Bu yöntemlerle yapılan analiz sonucunda batarya alternatifleri çok boyutlu yapılarıyla değerlendirilmiş ve ticari filo yönetimi bağlamında sürdürülebilirlik odaklı en uygun batarya seçeneği belirlenmiştir. Bu uygulama, karar vericilere sürdürülebilir ve sistematik bir yaklaşım sunarak elektrikli araç bataryası seçimini daha rasyonel bir zemine oturtmayı amaçlamaktadır.

Bu çalışmada kriter ağırlıklarının belirlenmesi amacıyla Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi uygulanmıştır. AHP, karar vericilerin ikili karşılaştırmalar yoluyla kriterler arasındaki göreli önemi belirlemelerine ve karar sürecinde tutarlılık analizi yapmalarına imkân tanıyan güçlü birçok kriterli karar verme yöntemidir.

AHP analizinde kullanılacak ikili karşılaştırma matrisleri, bu alanda uzman üç kişinin görüşleri doğrultusunda oluşturulmuştur. Uzmanların görevleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Birleştirilmiş ana kriter ikili karşılaştırma matrisi.

Uzman 1	Filo Yöneticisi
Uzman 2	Elektrikli Araç Uzmanı
Uzman 3	Filo Elektrikli Araç Yöneticisi

3.1. Kriter ve alternatifler

Belirlenen kriterler ve açıklamaları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Kriterler ve açıklamaları.

Kriter	Açıklama
P1 – Enerji Yoğunluğu [6]	Kütle başına düşen enerji miktarını ifade eder (MJ/L).
P2 – Özgül Güç [6]	1 kg bataryadan elde edilebilecek güç miktarını gösterir (W/kg).
P3 – Çevrim Sayısı [6]	Bataryanın tamamen şarj edilip boşaltıldığı döngü sayısıdır.
P4 – Çalışma Sıcaklığı [6]	Bataryanın bozulmadan çalışabileceği sıcaklık aralığıdır (°C).
P5 – Şarj Süresi [9]	Bataryanın tam şarj olma süresidir.
P6 – Kapasite Kaybı (Degradasyon) [21]	Bataryanın kullanım süresince kapasite kaybetme oranıdır.
P7 – Güvenlik [2]	Bataryanın çalışma sırasında oluşturabileceği risklere karşı güvenlik düzeyidir.
E1 – Toplam Maliyet [8]	Satın alma, bakım ve işletme maliyetlerinin toplamıdır ($/kWh).
E2 – Ömür Boyu Maliyet [22]	Bataryanın tüm ömrü boyunca oluşturduğu toplam maliyettir ($).
E3 – Geri Dönüşüm Değeri [23]	Kullanım ömrü sonunda geri dönüşümle elde edilebilecek maddi faydadır ($).
S1 – Geri Dönüştürülebilirlik [2]	Bataryanın geri dönüştürülebilir parça oranı ve çevresel etkisidir.
S2 – Karbon Ayak İzi [24]	Bataryanın üretim, kullanım ve geri dönüşüm sürecinde yaydığı toplam karbon miktarıdır.
S3 – Hammadde Tedarik Kaynağı [25]	Hammaddelerin çevresel etkisi ve sürdürülebilir kaynaklardan temin edilme durumudur.

Alternatif bataryalar Lityum İyon (Li-ion) piller, Nikel Metal Hidrat (NiMH) piller, Nikel Kadmiyum (NiCd) piller, Kurşun-Asit (Pb-acid) piller, Sodyum Nikel Klorür (Na-NiCL2) piller seçilmiştir ve Tablo 5'te verilmiştir. Bu piller elektrikli araçlarda kullanılan yaygın pillerdir [26].

Tablo 5. Elektrikli araç bataryası alternatifleri.

Batarya Türü	Kısaltma
Lityum İyon [26]	Li-Ion
Nikel Metal Hidrat [26]	NiMH
Nikel Kadmiyum [26]	NiCd
Kurşun-Asit [26]	Pb-Acid
Sodyum Nikel Klorür [26]	$Na\text{-}NiCl_2$

Lityum iyon bataryalar, nikel tabanlı bataryalara göre daha yüksek anma gerilimi ve enerji yoğunluğuna sahiptir [27]. Elektrikli araçlar başta olmak üzere, taşınabilir elektroniklerde en yaygın tercih edilen batarya türüdür. Mevcut teknolojide, birim hücrede en yüksek hücre gerilimi ve enerji yoğunluğu lityum iyon bataryalarda elde edilmektedir. Hafıza etkisinin olmaması, düşük kendi kendine deşarj oranı ve uzun çevrim ömrü gibi avantajlarıyla öne çıkar [28]. Ayrıca, fiziksel dayanıklılığı yüksek olup, ortalama ömürleri beş yıl civarındadır. En yüksek şarj verimine sahip bataryalardandır ve bakım gereksinimi en az olan türdür. Taşınabilir enerji depolama alanında öncelikli tercih olması, performans geliştirme olanaklarını artırmakta ve enerji depolamaya dayalı yeni teknolojilere öncülük etmektedir [29].

Nikel metal hidrat bataryalar, kadmiyum, kurşun veya cıva gibi toksik bileşenler içermediği için, nikel kadmiyum ve kurşun asit bataryalara göre çevresel açıdan daha dost bir seçenektir. Ayrıca, lityum iyon bataryalara kıyasla daha düşük maliyetlidir [30].

Nikel kadmiyum bataryalar, uzun raf ömrü ve çevrim başına düşük maliyetiyle ekonomik bir seçenek sunar [31]. En büyük avantajları, yüksek dayanıklılıkları ve uzun ömürleridir. Ancak enerji yoğunlukları düşüktür ve hafıza etkisi, zamanla kapasitelerinin azalmasına neden olur. Bu durum, bataryanın tam kapasite yerine daha düşük bir seviyeyi "hatırlayarak" şarjı sınırlandırmasıyla açıklanır. Ayrıca kadmiyum içermeleri nedeniyle çevre açısından olumsuz etkileri vardır ve kurşun asit bataryalara kıyasla maliyet açısından dezavantajlıdır [32].

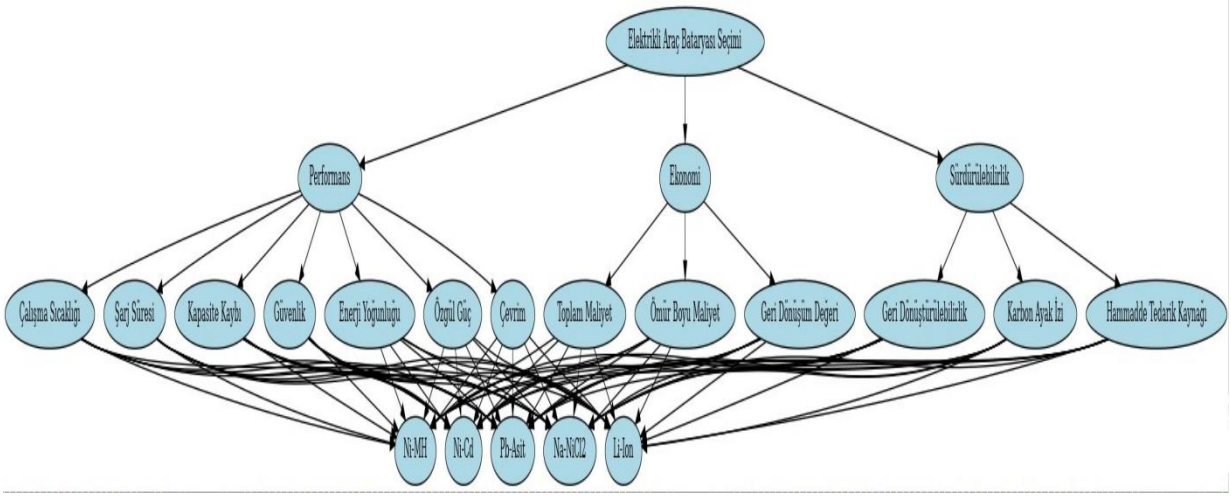
Kurşun asit bataryalar, uygun maliyetli olmaları, yüksek deşarj akımı sağlamaları ve hafıza etkisine sahip olmamaları nedeniyle tercih edilmektedir [27]. Ancak, enerji yoğunluklarının ve nominal gerilim değerlerinin düşük olması performanslarını sınırlamaktadır. Bu bataryalar, kullanılmadıklarında zamanla kapasitelerini kaybederek daha kısa ömürlü hale gelir. Her bir hücrenin yalnızca 2 voltluk enerji üretmesi, lityum iyon bataryalara kıyasla aynı gerilimin elde edilmesi için daha fazla hücre kullanılmasını gerektirir [28].

Sodyum-nikel klorür ($Na\text{-}NiCl_2$) ya da bilinen adıyla ZEBRA piller, elektrolit olarak sodyum tuzu kullanır [33] ve 245–350°C arasında değişen yüksek sıcaklıklarda çalışır. Bu piller, elektrikli araçlar için gerekli olan yüksek enerji ve güç yoğunluğu özelliklerine sahiptir. Ancak, bu yüksek çalışma sıcaklığı nedeniyle güvenlik önlemleri ve termal yönetim sistemleri üzerinde ciddi zorluklar ortaya çıkmaktadır [34].

3.2. AHP uygulaması

3.2.1. Hiyerarşik yapının oluşturulması

Kriterlerinin ağırlıklarının bulunmasında AHP yöntemi adımları uygulanmıştır. AHP yöntemi çözümünde Ms Excel programı kullanılmıştır. AHP hiyerarşik yapısı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. AHP hiyerarşik yapısı.

3.2.2. İkili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması

Üç ayrı uzmandan alınan ikili karşılaştırma matrisleri eşit ağırlıklı olacak şekilde birleştirilmiş ortak bir matris elde edilmiştir. Birleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisleri Tablo 6- Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Birleştirilmiş ana kriter ikili karşılaştırma matrisi.

	Performans	Ekonomi	Sürdürülebilirlik
Performans	1	4,2172	7,6117
Ekonomi	0,2371	1	4,7177
Sürdürülebilirlik	0,1314	0,2120	1

Tablo 7. Birleştirilmiş performans alt kriterleri ikili karşılaştırma matrisi.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
P1	1	4,5789	0,9196	1,8420	2,0000	2,0274	3,0000
P2	0,2184	1	2,0138	0,7368	2,2680	5,1925	3,7798
P3	1,0873	0,4966	1	2,1898	2,1544	2,3052	1,2051
P4	0,5429	1,3572	0,4568	1	0,7469	2,2894	0,9196
P5	0,5000	0,4409	0,4642	1,3389	1	1,9574	1,6710
P6	0,4932	0,1926	0,4338	0,4368	0,5109	1	0,6057
P7	0,3333	0,2646	0,8298	1,0873	0,5984	1,6510	1

Tablo 8. Birleştirilmiş ekonomi alt kriterleri ikili karşılaştırma matrisi.

	E1	E2	E3
E1	1	1,2331	3,9149
E2	0,8110	1	1,4736
E3	0,2554	0,6786	1

Tablo 9. Birleştirilmiş sürdürülebilirlik alt kriterleri ikili karşılaştırma matrisi.

	S1	S2	S3
S1	1	5,3133	2,1055
S2	0,1882	1	0,8220
S3	0,4750	1,2164	1

3.2.3. Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Bütün karşılaştırma matrislerinin CR değeri 0,10 değerinden küçük çıkmıştır. Matrislerin tutarlı olduğu kabul edilmiştir.

Bulunan ana kriter ağırlıkları ve alt kriter ağırlıkları birbirleriyle çarpılarak birleştirilmiştir. Bu işlemin sonucunda kriterlerin ağırlıkları bulunmuştur. Tablo 10'da gösterilmiştir.

Tablo 10. Kriterler ağırlıkları.

Kriterler	**Ağırlıklar**
P1	0,17
P2	0,14
P3	0,11
P4	0,08
P5	0,07
P6	0,06
P7	0,04
E1	0,12
E2	0,07
E3	0,04
S1	0,04
S2	0,02
S3	0,01

AHP yönteminden çıkan sonuçlara göre kriter sıralamaları P1> P2> E1> P3> P4>P5-E2> P6> P7- E3- S1> S2> S3 şeklinde olmuştur.

Uzman görüşlerine göre hesaplanan kriter ağırlıklarına bakıldığında performans ana kriterinin alt kriterlerinden P5, P6 ve P7 kriterleri; ekonomi ana kriterinin alt kriterlerinden E2 ve E3 kriterleri; sürdürülebilirlik ana kriterinin alt kriterlerinden S2 ve S3 kriterleri diğer kriterlere göre daha az öneme sahip olmuştur. Bu sebeple alternatif sıralamak için kullanılacak olan MOORA ve COPRAS yöntemlerinin çözümüne bu kriterler eklenmeyecektir.

AHP sonuçlarına göre, en yüksek öneme sahip kriterler enerji yoğunluğu (P1), özgül güç (P2) ve toplam maliyet (E1) olarak öne çıkmıştır. Buna karşılık, sürdürülebilirlik kriterlerinin toplam ağırlığı yalnızca %7 olarak belirlenmiştir. Bu durum, teknik ve ekonomik kriterlerin uzmanlar tarafından daha öncelikli görüldüğünü göstermektedir.

3.3. MOORA Uygulaması

Alternatifleri sıralamak için MOORA yöntemi kullanılmıştır. MOORA yöntemi çözümünde Ms Excel programı kullanılmıştır.

Tablo 7'deki AHP yönteminden elde edilen kriter ağırlıklarıyla çözüm yapılmıştır.

3.3.1. MOORA oran yaklaşımı yöntemi

Her alternatif için çözüme alınacak kriter değerleri bulunmuştur. Tablo 10'da gösterilmiştir. İlk olarak karar matrisi oluşturulmuştur. Tablo 11'de gösterilmiştir.

Tablo 11. Karar matrisi.

	P1 [6]	P2 [6]	P3 [6]	P4 [6]	S1 [8]	E1 [22,25]
Kriter yönleri	maks	maks	maks	maks	maks	min
Önem Katsayısı	0,17	0,14	0,12	0,08	0,04	0,12
Li-Ion	250	430	2000	60	59	180
Ni-MH	95	300	2900	60	100	200
Ni-Cd	80	200	2000	50	100	350
Pb-Asit	35	180	1000	50	98	150
Na-NiCL2	120	155	1300	350	100	300

Daha sonra normalleştirilmiş karar matrisi oluşturulmuştur. Tablo 12'de gösterilmiştir. Bu işlem Denklem 6 ile gerçekleştirilir.

Tablo 12. Normalleştirilmiş karar matrisi.

	P1	P2	P3	P4	S1	E1
Kriter yönleri	maks	maks	maks	maks	maks	min
Li-Ion	0,8174	0,7057	0,4576	0,1635	0,2842	0,3247
Ni-MH	0,3106	0,4923	0,6636	0,1635	0,4818	0,3607
Ni-Cd	0,2616	0,3282	0,4576	0,1362	0,4818	0,6313
Pb-Asit	0,1144	0,2954	0,2288	0,1362	0,4721	0,2705
Na-NiCL2	0,3923	0,2544	0,2975	0,9536	0,4818	0,5411

Sonraki adımda normalize edilmiş maksimize edilmesi gereken performans değerlerinin toplamından, minimize edilmesi gereken performans değerlerinin toplamı çıkarılmış Yi değerleri bulunmuştur. Bu işlem Denklem 7 ile gerçekleştirilmiştir. Bulunan değerler büyükten küçüğe sıralanarak Moora Oran Yaklaşımına göre alternatif sıralaması bulunmuştur. Tablo 13'te gösterilmiştir.

Tablo 13. MOORA Oran yaklaşımına göre sıralama.

	Yi	Sıralama
Li-Ion	2,1037	1
Ni-MH	1,7510	3
Ni-Cd	1,0341	4
Pb-Asit	0,9765	5
Na-$NiCL_2$	1,8385	2

MOORA oran yaklaşımına göre alternatif sıralamasında en uygun tercih Li- Ion batarya olmuştur. En kötü tercih ise Pb- Asit batarya seçilmiştir.

3.3.2. MOORA Önem Katsayısı Yöntemi

Moora oran yaklaşımı yönteminde elde edilen normalleştirilmiş matris ve kriterlerin ağırlık değerleri çarpılarak ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi elde edilmiştir. Tablo 14'te gösterilmiştir.

Tablo 14. Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi.

	P1	P2	P3	P4	S1	E1
Kriter yönleri	maks	maks	maks	maks	maks	min
Önem Katsayısı	0,17	0,14	0,12	0,08	0,04	0,12
Li-Ion	0,1390	0,0988	0,0549	0,0131	0,0114	0,0390
Ni-MH	0,0528	0,0689	0,0796	0,0131	0,0193	0,0433
Ni-Cd	0,0445	0,0459	0,0549	0,0109	0,0193	0,0758
Pb-Asit	0,0195	0,0414	0,0275	0,0109	0,0189	0,0325
Na-NiCL2	0,0667	0,0356	0,0357	0,0763	0,0193	0,0649

Bir sonraki adımda performans değerleri Denklem 8 ile bulunmuştur. Değerler Tablo 15'de gösterilmiştir. Bulunan değerler büyükten küçüğe sıralanmıştır.

Tablo 15. MOORA önem katsayısı yaklaşımına göre sıralama.

	Yi	Sıralama
Li-Ion	0,2781	1
Ni-MH	0,1904	2
Ni-Cd	0,0997	4
Pb-Asit	0,0856	5
Na-NiCL2	0,1686	3

Moora önem katsayısı yaklaşımına göre en iyi batarya tercihi Li- Ion batarya olmuştur. En kötü tercih ise Pb-Asit bataryası olmuştur.

3.3.3. MOORA Referans Noktası Yöntemi

Referans noktaları, maks yönlü kriterlerde maksimum değer; min yönlü kriterlerde minimum değer olacak şekilde belirlenmiştir. Belirlenen bu referans noktalardan, her x*ij için uzaklıklar Denklem 9 ile hesaplanmıştır. Değerler Tablo 16'da verilmiştir.

Tablo 16. Referans noktalara olan uzaklıklar.

	P1	P2	P3	P4	S1	E1
Kriter yönleri	maks	maks	maks	maks	maks	min
Rj değerleri	0,8174	0,7057	0,6636	0,9536	0,4818	0,2705
Li-Ion	0,0000	0,0000	0,2059	0,7902	0,1975	0,0541
Ni-MH	0,5068	0,2133	0,0000	0,7902	0,0000	0,0902
Ni-Cd	0,5558	0,3774	0,2059	0,8174	0,0000	0,3607
Pb-Asit	0,7029	0,4103	0,4347	0,8174	0,0096	0,0000
Na-NiCL2	0,4250	0,4513	0,3661	0,0000	0,0000	0,2705

Her alternatifin en büyük değeri seçilmiş ve seçilen değerler büyükten küçüğe sıralanmıştır. En büyük değer en iyi alternatif olacak şekilde belirlenmiştir. Tablo 17'de gösterilmiştir.

Tablo 17. MOORA Referans noktası yaklaşımına göre sıralama.

	Yi	Sıralama
Li-Ion	0,7902	2
Ni-MH	0,7902	2
Ni-Cd	0,8174	4
Pb-Asit	0,8174	4
Na-NiCL2	0,4513	1

Moora referans noktası yaklaşımına göre en iyi seçenek Na-$NiCL_2$ olmuştur. En kötü seçenekler Ni-Cd ve Pb- Asit bataryaları olacak şekilde eşit derecede sıralanmışlardır.

3.4. COPRAS Uygulaması

Alternatifleri sıralamak için COPRAS yöntemi kullanılmıştır. COPRAS yöntemi çözümünde Ms Excel programı kullanılmıştır.

AHP yönteminde bulunan kriter ağırlıkları kullanılarak çözüm yapılmıştır.

Karar matrisi Denklem 11 ile normalize edilmiştir. Tablo 18'de gösterilmiştir.

Tablo 18. Normalize karar matrisi.

	P1	P2	P3	P4	S1	E1
Kriter yönleri	maks	maks	maks	maks	maks	min
Li-Ion	0,4310	0,3399	0,2174	0,1052	0,1291	0,1525
Ni-MH	0,1638	0,2371	0,3152	0,1053	0,2188	0,1695
Ni-Cd	0,1379	0,1581	0,2174	0,0877	0,2188	0,2966
Pb-Asit	0,0603	0,1423	0,1087	0,0877	0,2144	0,1271
Na-NiCL2	0,2069	0,1225	0,1413	0,6140	0,2188	0,2542

Normalize edilmiş karar matrisinin kriter ağırlıkları ile çarpılmasıyla ağırlıklandırılmış normalize matris elde edilir. Tablo 19'da gösterilmiştir.

Tablo 19. Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi.

	P1	P2	P3	P4	S1	E1
Kriter yönleri	maks	maks	maks	maks	maks	min
Önem Katsayısı	0,17	0,14	0,12	0,08	0,04	0,12
Li-Ion	0,0732	0,0476	0,0261	0,0084	0,0051	0,0183
Ni-MH	0,0278	0,0332	0,0378	0,0084	0,0087	0,0203
Ni-Cd	0,0234	0,0221	0,0261	0,0070	0,0088	0,0356
Pb-Asit	0,0103	0,0199	0,0130	0,0070	0,0086	0,0153
Na-NiCL2	0,0352	0,0171	0,0169	0,0491	0,0088	0,0305

Faydalı ölçüt ve faydasız ölçütler hesaplanmıştır. Bu aşamada Denklem 13 ve Denklem 14 kullanılmıştır. Değerler Tablo 20'de gösterilmiştir.

Sonraki adımda Qi olarak belirtilen göreceli önem değerleri Denklem 15 ile hesaplanmıştır. Pi değerlerinin hesaplanmasında da Denklem 16 kullanılmıştır. Hesaplanan Pi değerleri büyükten küçüğe sıralanmıştır. En büyük değer en iyi alternatif olacak şekilde belirlenmiştir. Tablo 21'de gösterilmiştir.

Tablo 20. S +i, S –i ve S -min/S -i değerleri.

	S +i	S -i	S -min/S -i
Li-Ion	0,1605	0,0183	0,8333
Ni-MH	0,1160	0,0203	0,7500
Ni-Cd	0,0874	0,0356	0,4285
Pb-Asit	0,0588	0,0153	1,0000
Na-NiCL2	0,1272	0,0305	0,5000

Tablo 21. Qi, Pi değerleri ve sıralama.

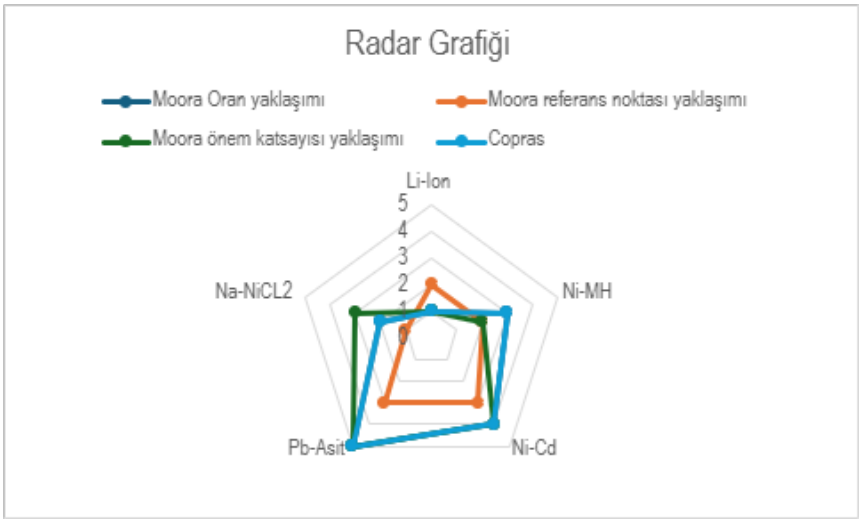
	Qi	Pi	Sıralama
Li-Ion	0,1890	100,0000	1
Ni-MH	0,1417	74,9549	3
Ni-Cd	0,1021	54,0094	4
Pb-Asit	0,0930	49,1969	5
$Na\text{-}NiCL_2$	0,1442	76,3146	2

Copras yöntemine göre en iyi batarya tercihi Li- Ion batarya olmuştur. En kötü tercih ise Pb- Asit bataryası olmuştur.

4. Uygulama Sonuçlarının Karşılaştırılması

Sonuçlara göre, MOORA yönteminin Oran Yaklaşımına göre sıralama Li-Ion batarya en uygun seçenek olarak belirlenirken, ardından $Na\text{-}NiCl_2$, Ni-MH, Ni-Cd ve Pb-Asit gelmiştir. MOORA'nın Önem Katsayısı Yaklaşımında ise yine Li-Ion batarya en iyi seçenek olarak değerlendirilmiş, bunu Ni-MH, $Na\text{-}NiCl_2$, Ni-Cd ve Pb-Asit takip etmiştir. MOORA'nın Referans Noktası Yaklaşımında ise $Na\text{-}NiCl_2$ batarya en uygun seçenek olarak öne çıkarken, Li-Ion ve Ni-MH eşit değerlendirilmiş, Ni-Cd ve Pb-Asit ise eşit ve en düşük sırada yer almıştır. COPRAS yöntemine göre yapılan değerlendirmede ise Li-Ion batarya yine en iyi alternatif olarak bulunmuş; bunu sırasıyla $Na\text{-}NiCl_2$, Ni-MH, Ni-Cd ve Pb-Asit takip etmiştir.

Yöntemlerin sıralamaları radar grafiğinde gösterilmiştir. Şekil 3'te mevcuttur.



Şekil 3. Alternatiflerin sıralama sonuçlarını gösteren radar grafiği.

Li-Ion bataryasının açık bir şekilde en uygun alternatif olduğu görünmektedir. Na-NiCl2 bataryası MOORA referans noktası yaklaşımında ilk sırada, MOORA önem katsayısı yaklaşımında ve COPRAS yönteminde 2. sırada yer almaktadır. Bu sonuçlar Na-$NiCl_2$ bataryasının güçlü bir aday olduğunu göstermektedir. Ayrıca COPRAS yöntemi ve MOORA oran yaklaşımı yöntemlerinin sıralaması aynı olduğu için radar grafiğinde bu iki yöntemin çizgilerinin üst üstte geldiği görünmektedir. Isı haritası oluşturulmuştur. Şekil 4'te verilmiştir.

	Moora Oran yaklaşımı	Moora referans noktası yaklaşımı	Moora önem katsayısı yaklaşımı	Copras
Li-Ion	1	2	1	1
Ni-MH	3	2	2	3
Ni-Cd	4	3	4	4
Pb-Asit	5	3	5	5
Na-NiCL2	2	1	3	2

Şekil 4. Yöntemlere göre alternatif sıralamalarının ısı haritası.

Isı grafiğinde mavi renk daha yüksek sıralamaları, kırmızı renk ise daha düşük sıralamaları göstermektedir.

Grafikte de görüldüğü üzere en iyi sıralamaları mavi renkle gösterilen Li- Ion batarya alarak en uygun batarya seçilmiştir.

Na-$NiCL_2$ bataryası MOORA referans noktası yaklaşımında ilk sırada, Moora oran yaklaşımı ve COPRAS yönteminde ikinci sırada ve MOORA önem katsayısı yaklaşımı yönteminde üçüncü sırada yer alarak ikinci en iyi alternatif olarak belirlenmiştir.

Ni- MH bataryası MOORA referans noktası yaklaşımında ve MOORA önem katsayısı yaklaşımında ikinci sırada, MOORA oran yaklaşımı ve COPRAS yöntemine üçüncü sırada çıkarak en iyi üçüncü alternatif olarak belirlenmiştir.

Ni-Cd bataryası MOORA referans noktası yaklaşımına göre üçüncü sırada; MOORA oran yaklaşımı, MOORA önem katsayısı yaklaşımına ve COPRAS yöntemine göre dördüncü sırada çıkarak en iyi dördüncü alternatif olarak belirlenmiştir.

Pb- Asit bataryası grafikte en çok kırmızı renkle gösterilen bataryadır. MOORA referans noktası yaklaşımına göre üçüncü sırada; MOORA oran yaklaşımında, MOORA önem katsayısı yaklaşımında ve COPRAS yönteminde beşinci sırada çıkarak en kötü alternatif olarak belirlenmiştir.

5. Duyarlılık Analizi

Bu çalışmada kullanılan karar verme modelinin sağlamlığını test etmek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Duyarlılık analizinin temel amacı, kriter ağırlıklarında meydana gelebilecek değişimlerin, alternatiflerin sıralamaları üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu kapsamda, beş farklı senaryo oluşturulmuştur. Senaryolar, en yüksek ağırlığa sahip kriter ile sırasıyla en düşükten daha yüksek ağırlığa sahip kriterlerin ağırlıklarının yer değiştirmesi esasına dayanır. Her bir senaryoda, ağırlık değişimi sonrası alternatiflerin sıralamaları hem MOORA hem de COPRAS yöntemleri kullanılarak yeniden hesaplanmıştır.

Senaryo 1'de, en yüksek ağırlığa sahip kriter (P1: 0.17) ile en düşük ağırlığa sahip kriter (S1: 0.04) yer değiştirmiştir. Bu değişim, modelin en uç noktalarında yer alan kriterlerin etkisini test etmeyi amaçlamaktadır.

Senaryo 2'de, en yüksek ağırlığa sahip kriter (P1: 0.17) ile sondan bir önceki en düşük ağırlığa sahip kriter (P4: 0.08) yer değiştirilmiştir. Bu senaryoda, uçtan bir diğer uca değil, daha ılımlı bir değişim kurgulanmıştır.

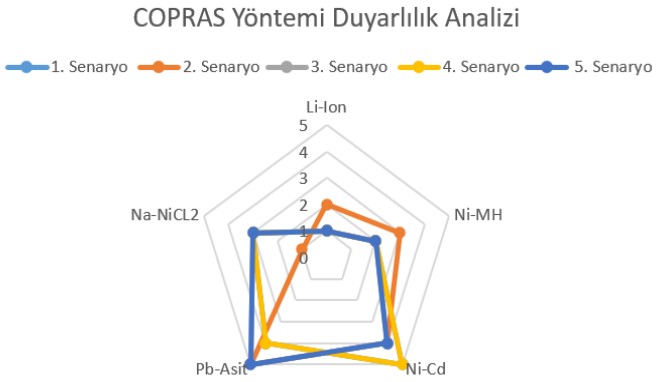
Senaryo 3'te, en yüksek ağırlığa sahip kriter (P1: 0.17) ile sondan üçüncü en düşük ağırlığa sahip kriter (P3: 0.12) arasında ağırlık değişimi yapılmıştır. Böylece sıralama üzerindeki orta düzeyde bir değişim test edilmiştir.

Senaryo 4'te, en yüksek ağırlığa sahip kriter (P1: 0.17) ile sondan dördüncü en düşük ağırlığa sahip kriter (E1: 0.12) yer değiştirilmiştir. Bu senaryo da orta seviye bir ağırlık kaydırmasını temsil etmektedir.

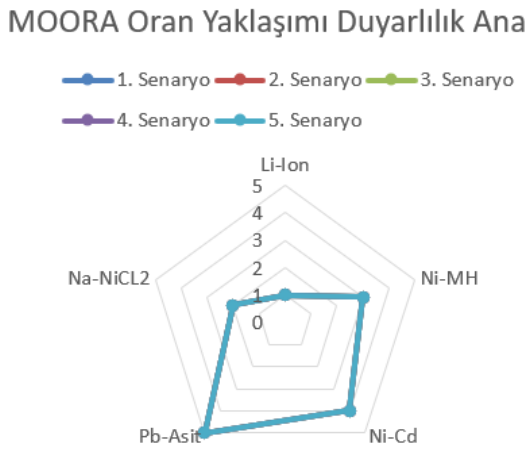
Senaryo 5'te ise, en yüksek ağırlığa sahip kriter (P1: 0.17) ile sondan beşinci en düşük ağırlığa sahip kriter (P2: 0.14) yer değiştirilerek, benzer ağırlıklara sahip kriterler arasında yapılan değişimin sıralamaya etkisi analiz edilmiştir.

Her bir senaryoda belirlenen yeni kriter ağırlıkları, MOORA ve COPRAS yöntemleri ile tekrar uygulanmış; her iki yöntemde elde edilen alternatif sıralamaları karşılaştırılarak, modelin kararlılığı değerlendirilmiştir. Bu analiz sayesinde, alternatif sıralamalarının ağırlık değişimlerine karşı ne derece hassas olduğu ortaya konmuş ve modelin güvenilirliği sınanmıştır.

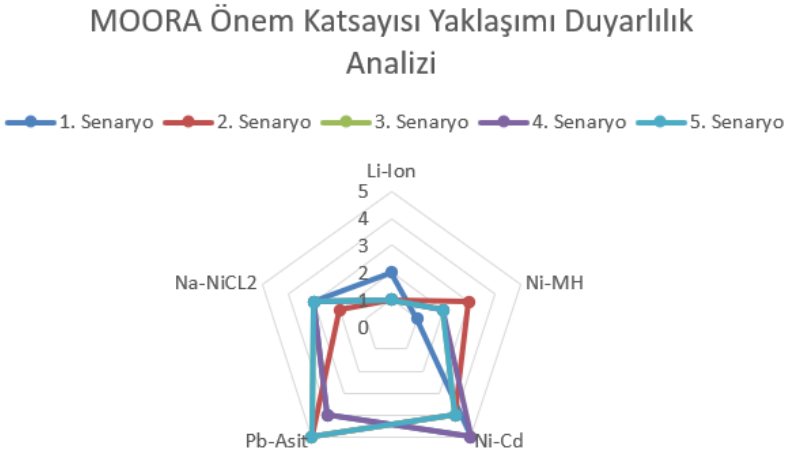
COPRAS ve MOORA yöntemleri kullanılarak yapılan duyarlılık analizi Şekil 5-8'de gösterilmiştir.



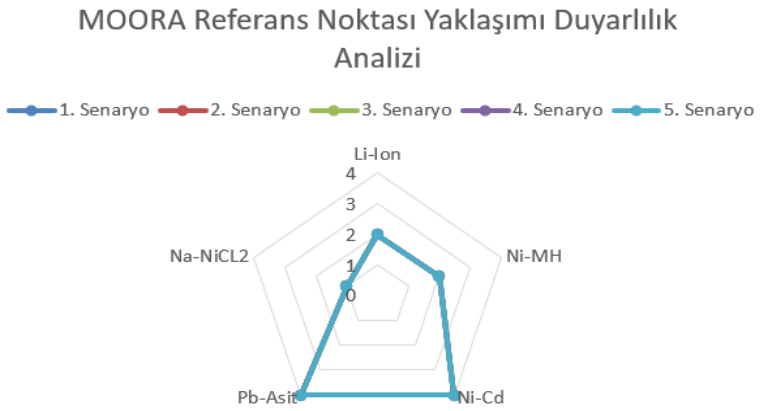
Şekil 5. COPRAS yöntemi duyarlılık analizi.



Şekil 6. MOORA oran yaklaşımı yöntemi duyarlılık analizi.



Şekil 7. MOORA önem katsayısı yöntemi duyarlılık analizi.



Şekil 8. MOORA referans noktası yöntemi duyarlılık analizi.

COPRAS ve MOORA yöntemlerinin farklı senaryolarda nasıl davrandığı incelenmiştir. Her iki yöntemde de kriter ağırlıklarında değişiklikler yapılarak, sıralamaların ne ölçüde etkilendiği analiz edilmiştir.

COPRAS yöntemi ile yapılan analizde, Li-Ion batarya birinci sıradaki yerini korumuştur. Ni-MH batarya sabit şekilde ikinci sırada kalırken, Na-$NiCl_2$ üçüncü sırada yer almıştır. Ni-Cd ve Pb-Asit bataryalarının sıralamaları da değişmemiştir. Bu sonuçlar, COPRAS yönteminin senaryolar karşısında oldukça kararlı ve istikrarlı çıktılar verdiğini göstermektedir.

MOORA yönteminin üç farklı yaklaşımında da genel eğilim COPRAS ile benzerlik göstermektedir. Özellikle Oran Yaklaşımı ve Referans Noktası Yaklaşımı, senaryolara karşı son derece sabit sonuçlar üretmiştir. Örneğin, oran yaklaşımında Li-Ion batarya tüm senaryolarda birinci sırada, Na-$NiCl_2$ ikinci sırada, Ni-MH ise üçüncü sırada yer almıştır. Bu sonuçlar COPRAS yöntemiyle örtüşmektedir.

Yapılan duyarlılık analizi sonucunda hem COPRAS hem de MOORA yöntemlerinde elde edilen sıralamaların, kriter ağırlıklarındaki değişimlere rağmen büyük ölçüde sabit kaldığı görülmüştür. Her iki yöntemde de özellikle ilk üç sıradaki alternatifler (Li-Ion, Ni-MH ve Na-$NiCl_2$) senaryolar arasında anlamlı bir değişiklik göstermemiştir. Bu durum, kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerinin kararlı ve güvenilir sonuçlar ürettiğini ortaya koymaktadır.

6. Sonuç ve Öneriler

Ticari araç filoları; belediyeler, lojistik firmaları, toplu taşıma işletmeleri ve büyük ölçekli dağıtım ağları gibi çok sayıda aracın merkezi olarak yönetildiği sistemleri kapsamaktadır. Bu tür filolarda yapılacak her teknolojik tercih, sadece bireysel araç düzeyinde değil, toplam operasyonel verimlilik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da kritik öneme sahiptir. Özellikle batarya teknolojisi seçimi, filonun genel enerji tüketimi, bakım maliyetleri ve karbon salımı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, çalışma bireysel kullanıcı odaklı değerlendirmelerin ötesine geçerek, ticari filolarda daha yaygın, toplu ve stratejik etki yaratan bir karar problemini ele almaktadır.

Günümüzde iklim değişikliği ile mücadele kapsamında ulaşım sektörünün dönüşümü büyük önem kazanmıştır. Sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik artan baskılar ve sıkı çevre düzenlemeleri, elektrikli araç kullanımının hızla yaygınlaşmasına neden olmuştur. Bu dönüşüm sürecinde ticari araç filolarının elektrikli araçlara geçişi, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kilit rol oynamaktadır. Gelişen elektrikli araç teknolojileri ve batarya altyapıları sayesinde, artık bu araçların ticari kullanımı daha erişilebilir ve verimli hale gelmiştir.

Bu çalışmada ticari filolar için kullanılacak olan elektrikli araçların bataryalarının performans, ekonomi ve sürdürülebilirlik açısından incelenmesi yapılmış alternatif bataryalar sıralanmıştır. Yöntem olarak AHP, MOORA ve COPRAS kullanılmıştır. AHP ile kriter ağırlıkları bulunmuştur. Konuya hâkim üç uzmanla görüşülerek değerlendirme süreci desteklenmiştir. Uzmanlar; filo yöneticisi, elektrikli araç uzmanı ve filo elektrikli araç yöneticisi olarak farklı açılardan sürece katkı sağlamıştır. Bu sayede, belirlenen kriterlerin sektörel geçerliliği artırılmış ve karar verme sürecinin sağlamlığı güçlendirilmiştir. MOORA ve COPRAS ile alternatifler sıralanmıştır. Alternatifler MOORA oran yaklaşımı, Moora referans noktası yaklaşımı, Moora önem katsayısı yaklaşımı ve COPRAS ile toplamda 4 yöntem ile sıralanmışlardır. Alternatifler 13 kritere göre değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışmanın sonucunda Li-Ion bataryanın 3 yönteme göre en iyi alternatif olarak seçildiği gözlemlenmiştir. İkinci en iyi alternatifin Na-NiCL2 bataryasının olduğu görülmüştür. Pb-Asit bataryanın ise bütün yöntemlerde en kötü batarya alternatifi seçildiği gözlemlenmiştir. Kullanılan yöntemlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Sıralamaların genelinin benzer olduğu ve büyük farklılıkların olmadığı sonucuna varılmıştır.

Modelin sağlamlığını değerlendirmek amacıyla beş farklı senaryo ile duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu senaryolarda, en yüksek ağırlığa sahip kriter ile farklı düşük ağırlıklı kriterlerin yerleri değiştirilmiş ve yöntemlerin sonuçları yeniden analiz edilmiştir.

COPRAS ve MOORA yöntemlerinin farklı senaryolarda nasıl davrandığı incelenmiş ve her iki yöntemde de kriter ağırlıklarındaki değişikliklerle sıralamaların ne kadar etkilendiği analiz edilmiştir.

COPRAS yöntemi, Li-Ion bataryanın birinci sıradaki yerini koruduğunu, Ni-MH bataryanın ikinci sırada kaldığını ve Na-$NiCl_2$'nin üçüncü sırada yer aldığını göstermiştir. Ni-Cd ve Pb-Asit bataryalarının sıralamaları değişmemiştir, bu da COPRAS yönteminin istikrarlı ve kararlı olduğunu ortaya koymaktadır.

MOORA yönteminin Oran ve Referans Noktası Yaklaşımları da benzer şekilde sabit sonuçlar üretmiştir. Özellikle, Li-Ion batarya tüm senaryolarda birinci, Na-$NiCl_2$ ikinci ve Ni-MH üçüncü sırada yer almıştır, bu sonuç COPRAS ile örtüşmektedir.

Yapılan duyarlılık analizleri sonucunda, COPRAS ve MOORA yöntemlerinde de sıralamaların büyük ölçüde sabit kaldığı, özellikle ilk üç sıradaki alternatiflerin konumunun değişmediği gözlemlenmiştir. Bu da modelin istikrarlı ve güvenilir sonuçlar verdiğini kanıtlamaktadır.

Elde edilen sonuçlara göre, Li-Ion bataryalar her iki yöntemle yapılan analizlerde de en uygun alternatif olarak öne çıkmıştır. Bunu sırasıyla Ni-MH ve Na-$NiCl_2$ bataryaları takip etmiştir. Ni-Cd ve Kurşun-Asit bataryalar ise düşük çevresel ve teknik performansları nedeniyle alt sıralarda yer almıştır.

Yapılan çalışmada MOORA ve COPRAS yöntemleri ile elektrikli araç bataryalarının sıralaması yapılmış ve en uygun batarya Li-Ion olarak belirlenmiştir. Literatürde Hamurcu vd.ve Abdulvahitoğlu vd. [4-5] tarafından yapılan benzer çalışmalarda da Li-Ion bataryanın en iyi alternatif olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte, MOORA'nın Referans Noktası Yaklaşımında Na-$NiCl_2$ bataryanın öne çıkması, farklı yöntemlerin sonuçlar üzerindeki etkisini göstermektedir. Diğer çalışmalardaki farklı yöntemler ve kriter ağırlıkları, alternatif sıralamalarda bazı farklılıklar yaratmıştır. Literatürde yapılan benzer çalışmalarda da Li-Ion bataryanın teknik ve ekonomik açıdan üstün olduğu ifade edilmiştir (Hamurcu vd., Abdulvahitoğlu vd.,). Ancak bu çalışmanın özgün katkısı, sürdürülebilirlik kriterlerinin modele entegre edilmesi, duyarlılık analiziyle sonuçların sağlamlığının test edilmesi ve kriterlerin ticari filolar için değerlendirilmesidir.

Enerji yoğunluğu (MJ/L), özgül güç (W/kg), çevrim çalışma sıcaklığı (°C), geri dönüştürülebilirlik, toplam maliyet ($/kWh) kriterleri ticari araç filolarına göre değerlendirildiğinde elektrikli araç batarya seçenekleri arasındaki en uygun bataryanın Li-Ion batarya olduğu sonucuna varılmıştır.

Ticari araç filoları, lojistik, kamu hizmetleri ve toplu taşıma gibi alanlarda çok sayıda aracın merkezi olarak yönetildiği sistemlerdir. Bu nedenle, bu tür yapılarda sürdürülebilirlik ilkesine uygun, performansı yüksek ve maliyet açısından verimli elektrikli araç bataryalarının tercih edilmesi büyük önem taşır. Doğru batarya seçimi, filonun genel enerji verimliliğini artırmanın yanı sıra çevresel etkilerin azaltılmasına, karbon emisyonlarının düşürülmesine ve uzun vadede ekonomik faydaların sağlanmasına katkı sunar. Bu nedenle, belirlenen kriterlere göre en uygun batarya olarak seçilen Li-Ion batarya, ticari filolarda kullanılan elektrikli araçlarda tercih edildiğinde filonun genel enerji verimliliğini artıracak, çevresel etkileri azaltacak, karbon emisyonlarını düşürecek ve uzun vadede ekonomik faydalar sağlayacaktır.

Kaynaklar

[1] Kırmızıgül İE, Baykal B. Elektrikli araç tercihinde tüketici motivasyonu. Sosyal Bilimler Metinleri. 2023;2023(2):223-241.

[2] Loganathan MK, Tan CM, Mishra B, Msagati TAM, Snyman LW. Review and selection of advanced battery technologies for post-2020 era electric vehicles. IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India). 2019;1-5. Bengaluru, India.

[3] IEA. World Energy Outlook 2023.

[4] Ari YO. Küresel elektrikli otomobil piyasasına genel bakış. Kırklareli Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi. 2020;4(2):193-203.

[5] Hamurcu M, Çakır E, Eren T. Kullanıcı perspektifli çok kriterli karar verme ile elektrikli araçlarda batarya seçimi. IJERD 2021;13(2):733-749.

[6] Abdulvahitoğlu A, Ekmekçi Güçlüten G. Utilizing an integrated AHP-COPRAS approach for battery selection in electric vehicles. IJAET 2023;12(4):121-132

[7] Abdulvahitoğlu A, Abdulvahitoğlu A, Kılıç M. Elektrikli araç bataryalarının bütünleşik SWARA-TOPSIS metodunun değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi. 2022;37(4):1061-1076.
[8] Shimin VV, Shah VA, Lokhande MM. Electric vehicle batteries: A selection based on PROMETHEE method. 2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON). 2016;1-6. Bikaner, India.
[9] Yücenurşen A, Samancı A. Battery selection criteria for electric vehicles: Techno-economic analysis. IJAET 2023;12(2):65-74.
[10] Sancaklı E. Tekstil sektöründe metal aksesuar tedarikçilerinin performans değerlendirme sürecinde bulanık analitik hiyerarşi ve bulanık TOPSIS yöntemlerinin uygulanması. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. 2019;18(35):17-41.
[11] Oral B. Tedarikçi performans değerlendirilmesinde bulanık çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanılması ve tekstil sektöründe bir uygulama [yüksek lisans tezi]. Tekirdağ: Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı; 2022.
[12] Özbek A, Eren T. Üçüncü parti lojistik (3PL) firmanın analitik hiyerarşi süreciyle (AHS) belirlenmesi. IJERD 2012;4(2):46-54.
[13] Palaz H, Kovacı A. Türk Deniz Kuvvetleri denizaltılarının seçiminin AHP ile değerlendirilmesi. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi. 2008; 3:53-60.
[14] Brauers WK, Zavadskas EK. The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. Control and Cybern. 2006;35(2):445-469.
[15] Karaca T. Proje yönetiminde çok kriterli karar verme tekniklerini kullanarak kritik yolun belirlenmesi, yüksek lisans tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü; 2011.
[16] Ersöz F, Atav A. Çok kriterli karar verme problemlerinde MOORA yöntemi. KHO Savunma Bilimleri Enstitüsü Harekat Araştırması. 2011.
[17] Podvezko V. The comparative analysis of MCDA methods SAW and COPRAS. Inzinerine Ekonomika - Engineering Economics. 2011;22(2):134-146.
[18] Aksoy E, Ömürbek N, Karaatlı M. AHP temelli MULTIMOORA ve COPRAS yöntemi ile Türkiye Kömür İşletmeleri'nin performans değerlendirmesi. Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi. 2015;33(4):1-28.
[19] Zavadskas EK, Kaklauskas A, Turskis Z, Tamosaitiene J. Contractor selection multi-attribute model applying COPRAS method with grey interval numbers. In: International Conference 20th EURO Mini Conference "Continuous Optimization and Knowledge-Based Technologies" (EurOPT-2008); 2008 May 20-23; Neringa, Lithuania. 2008. p. 241-247.
[20] Özdağoğlu A. Çok ölçütlü karar verme modellerinde normalizasyon tekniklerinin sonuçlara etkisi: COPRAS örneği. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi. 2013;8(2):229-252.
[21] Aktaş M, Baygüneş B, Kıvrak S, Çavuş B, et al. Elektrikli araç için düşük maliyetli bir batarya yönetim sistemi tasarımı ve gerçekleştirilmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi. 2020;227-238.
[22] Apata O, Bokoro PN, Sharma G. Department of Electrical Engineering Technology, University of Johannesburg, Johannesburg 2028, South Africa. Energies. 2023;16(14):5274.
[23] Güven CE, Gedik K. Ömrünü tamamlamış elektrikli araç bataryalarının çevresel yönetimi. Journal of the Institute of Science and Technology. 2019;9(2):726-737.
[24] Üçtuğ FG. Türkiye'de üretilen elektrikli ve içten yanmalı motorlu araçların karşılaştırmalı çevresel yaşam döngüsü değerlendirmesi. Düzce University Journal of Science and Technology. 2022;10(4):1701-1714.
[25] Gülcan MF, Alkan E, Çotuker O, Yuca Doğdu N. Lityum iyon batarya üretiminde kullanılan hammaddelerin incelenmesi ve Türkiye'nin batarya üretim potansiyelinin irdelenmesi. BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi. 2024;11(1):204-217.
[26] Muratoğlu Y, Alkaya A. Elektrikli araç teknolojisi ve pil yönetim sistemi incelemesi. Elektrik Mühendisliği. 2016;(458):10-14.
[27] Jia Ying Y. A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. Renewable Sustainable Energy Rev. 2015; 49: 365-385.
[28] Turğut M. Elektrikli araçlar için batarya yönetim sistemi tasarımı ve geliştirilmesi. Yüksek Lisans, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2018.
[29] Rigan M. Batarya yönetim sistemi tasarımı. Yüksek Lisans, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye, 2020.
[30] Yu H., Xie T., Paszczynski S., Wilamowski B.M. Advantages of radial basis function networks for dynamic system design. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2011; 58 (12): 5438-5450.
[31] Kurşunoğlu S. Atık çinko-karbon ve alkali pillerden çinko ve mangan geri kazanılması. Doktora, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2009.
[32] Sayılgan E. Kullanılmış pillerden çinko ve mangan metallerinin geri kazanımı ekonomik analiz ve matematik modelleme. Doktora, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2009.
[33] Cluzel C, Douglas C. Cost and performance of EV batteries. Final Report for The Committee on Climate Change; 2012.
[34] Yong JY, Ramachandaramurthy VK, Tan KM, Mithulananthan N. A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. Renewable Sustainable Energy Rev. 2015;49:365-385.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 611-621, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1646674

An Innovative Solution to the Map Coloring Problem Using the Malatya Vertex Coloring Algorithm

Cezayir KARACA[1*], Selman YAKUT[2]
[1] Computer Engineering, Faculty of Engineering, İnönü University, Malatya, Türkiye
[2] Software Engineering, Faculty of Engineering, İnönü University, Malatya, Türkiye
[*1] cezayirkaraca0242@gmail.com, [2] selman.yakut@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 25/02/2025; Kabul/Accepted:13/06/2025)

Abstract: The map coloring problem is a classical NP-complete problem that requires adjacent regions to be colored differently and is encountered in many real-world applications. Numerous algorithms have been developed to solve this problem. In this study, the Malatya Vertex Coloring (MVC) Algorithm, which presents a novel and original approach to solving the problem, is applied. This algorithm aims to identify influential vertices to reduce the number of colors used in graphs and to complete the coloring process more efficiently. Additionally, the applicability of the algorithm to real-world problems is also evaluated. The MVC Algorithm calculates the Malatya Centrality value for each vertex in the graph; it selects the vertex with the highest value, colors it with a color different from its neighbors, and then removes it from the graph. This process continues until all vertices are colored. The algorithm has been successfully applied to maps of Asia, Europe, districts of Istanbul, Turkey, U.S. states, and the world, and the results demonstrate the effectiveness of the algorithm. The advantages of the MVC Algorithm include its predictability, as well as its ability to operate in polynomial time and space. In this respect, the MVC Algorithm offers an alternative solution approach to the classical Four Color Theorem in the context of the map coloring problem.

Key words: Centrality, graph coloring, map coloring, planar graph.

Malatya Düğüm Renklendirme Algoritması Kullanılarak Harita Renklendirme Problemi için Yenilikçi Bir Çözüm

Öz: Harita renklendirme problemi, bitişik bölgelerin farklı renklerle boyanmasını gerektiren ve birçok gerçek hayat uygulamasında karşılaşılan klasik bir NP-tam problemdir. Bu problemin çözümü için birçok algoritma geliştirilmiştir. Bu çalışmada, ilgili problemin çözümüne yönelik yeni ve özgün bir yaklaşım ortaya koyan Malatya Vertex Coloring (MVC) Algoritması uygulanmıştır. Bu algoritma, graflarda kullanılan renk sayısını azaltmak için etkili düğümleri belirlemekte ve renklendirme sürecini daha kısa sürede tamamlamayı hedeflemektedir. Ayrıca algoritmanın, gerçek hayat problemlerine uygulanabilirliği de değerlendirilmiştir. MVC Algoritması, graf yapısındaki her düğüm için Malatya Merkezilik değerini hesaplar; en yüksek değere sahip düğümü seçerek komşularından farklı bir renkle boyar ve ardından bu düğümü graf üzerinden çıkarır. Bu işlem, tüm düğümler renklendirilene kadar devam etmektedir. Algoritma; Asya, Avrupa, İstanbul ilçeleri, Türkiye, ABD eyaletleri ve Dünya haritaları üzerinde başarıyla uygulanmış ve elde edilen sonuçlar algoritmanın etkinliğini ortaya koymuştur. MVC Algoritması'nın avantajları arasında öngörülebilir olması, polinom zamanda ve polinom uzayda çalışabilmesi yer almaktadır. Bu yönüyle, MVC Algoritması'nın harita renklendirme problemine ilişkin olarak klasik Dört Renk Teoremi'ne alternatif bir çözüm yaklaşımı sunduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Merkezilik, graf renklendirme, harita renklendirme, malatya coloring, düzlemsel graf.

1. Introduction

The Graph Coloring Problem (GCP) was first introduced in 1852 by Francis Guthrie while coloring a map of England. Guthrie noticed that adjacent cities could be assigned different colors and that this could be achieved using only four colors [1]. There are two fundamental principles in graph coloring. The first is the requirement that adjacent vertices must be assigned different colors. The second is the objective of using the minimum number of colors possible. Graph coloring has been applied in various domains, including map coloring [2], frequency assignment [3], Sudoku [4], scheduling [5], register allocation [6], and timetable generation [7].

Map coloring refers to the process of assigning different colors to neighboring regions within bounded areas. This method is studied as a mathematical problem and has applications in various fields. The main goal is to ensure that adjacent regions are assigned different colors while minimizing the total number of colors used. In 1977,

[*] Corresponding author: cezayirkaraca0242@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0009-0007-9250-2612, [2] 0000-0002-0649-1993

Kenneth Appel and Wolfgang Haken proved that any planar graph can be colored using four colors. Assigning different colors to adjacent regions on a map while using the fewest colors has been proven to be an NP-complete problem [8].

Although various algorithms have been developed to solve the map coloring problem, certain limitations still persist. Most existing algorithms are optimized for specific types of maps or graph structures, resulting in limited generalizability. Furthermore, computational cost increases significantly in large and complex datasets, leading to longer solution times and sometimes suboptimal results. While heuristic and approximate algorithms may be effective in practice, they cannot guarantee the minimum number of colors in every case. Additionally, there are significant gaps in developing adaptive and real-time solutions for situations where region boundaries change dynamically.

To facilitate the coloring of maps by algorithms, maps were transformed into planar graphs. Planar graphs are defined as graphs in which edges intersect only at vertices—meaning no two edges cross each other when drawn [2]. In this representation, each region on the map corresponds to a vertex, and the adjacency between regions is represented as an edge [9]. In this context, graph coloring algorithms began to be used to solve the Map Coloring Problem (MCP). The literature indicates that no universally effective general solution exists for GCP, and various exact and approximate algorithms have been proposed for its resolution [10]. Methods such as Ant Colony Optimization [11], Tabu Search [12], Genetic Algorithms [13], and Quantum Search Algorithms [14] have been evaluated for this purpose. Each of these methods has its own strengths and weaknesses.

In this study, the MVC algorithm [15], which was previously proposed for the Graph Coloring Problem, is applied to provide a solution to the MCP. The MVC algorithm aims to color a given map using the minimum number of colors. During this process, the primary constraint is to prevent adjacent regions from being assigned the same color. The algorithm identifies the most critical region and assigns colors accordingly. Thus, optimal or near-optimal color usage is achieved between neighboring regions. The main advantages of the MVC algorithm include the predictability of all iteration and execution steps, as well as its ability to operate with polynomial time and space complexity. In this study, the MVC algorithm is adapted and used to solve the MCP.

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 presents the literature related to map and graph coloring. Section 3 introduces the proposed method and approach. Section 4 presents the results of the map coloring applications. Section 5 concludes the paper. According to the literature, MCP is identified as an NP-complete problem. With the advancement of computer science, numerous approaches and algorithms have been proposed to solve this problem.

2. Literature Review

Hong B. proposed the use of a genetic algorithm to solve the Graph Coloring Problem (GCP) [16]. Lui and Zang conducted research on a DNA-based algorithm for graph coloring. Ruxin Zhao and colleagues proposed the Selfish Herd Optimizer (DSHO) algorithm as an effective solution for GCP [17]. The Turbulent Particle Swarm Optimization (MTPSO) algorithm developed by Ling-Yuan et al. was shown to outperform the PSO algorithm developed by Cui et al. in 2008 [18]. Guangzhao Cui and colleagues developed a Modified PSO algorithm for solving the planar GCP. Test results demonstrated that the Modified PSO outperforms the classical PSO [10]. Colin Campbell and Edward Dahl proposed the Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAQA), supported by application teams. In their article, they aimed to demonstrate that using higher-order terms can significantly enhance the performance of QAQA [14]. Kui and Hitoshi introduced the Discrete Firefly Algorithm (DFA) for GCP. Their study showed that the proposed DFA is based on similarity calculation, does not require defining extra operators, does not need the addition of new strategies, and is a non-hybrid algorithm [19].

Bui T.N., Nguyen T.H., and colleagues stated that the ant algorithm they proposed differs from previous ant-based algorithms, as each ant colors only a part of the graph using local information. This individual coloring forms a section of the graph. Despite certain limitations, the algorithm demonstrated good performance [20]. In the same study, the author proposed a local flower pollination algorithm to solve the planar GCP. The proposed algorithm achieved a higher success rate in coloring compared to Particle Swarm Optimization (PSO), Basic Flower Pollination Algorithm (FPA), and Differential Evolution (DE) [21]. Surbakti N. and Ramadhani F. addressed the map coloring problem using a greedy algorithm approach with a minimum number of colors. The map was colored using four colors, ensuring that neighboring provinces received different colors [22]. Lingli Zhao and colleagues applied greedy algorithms to MCP, arguing that such algorithms are suitable for many real-world problems. Although many algorithms have been used to solve this problem, they tend to be complex; in contrast, the greedy algorithm allowed for a simpler and more effective solution by prioritizing the provinces with the most connections [23].

Another study proposed an artificial neural network based on harmony theory to solve the map coloring problem. This approach determines whether MCP can be solved with a pre-specified number of colors and identifies the minimum number of colors required. The implementation directly encodes the problem into the neural network and represents the solution through node actions [24]. In that study, a perturbation factor was added to the algorithm. When the algorithm stops progressing toward a global optimum, the perturbation resets a particle's velocity with a certain probability, helping it escape local optima. This algorithm was applied to solve GCP. Later, Talavan proposed a neural network method for solving GCP [25].

In this study, the MVC algorithm applied for solving the MCP offers a unique strategy based on the MC value for node selection, aiming to minimize the number of colors used in map coloring problems. Unlike commonly used algorithms in the literature, such as genetic algorithms, ant colony optimization, particle swarm optimization, or classical greedy methods, MVC determines the order of color assignments based on a more systematic and predictable criterion. Most existing algorithms incorporate randomness in the selection of the initial node or make decisions independently of the graph's global structure. The MVC algorithm, however, selects the central node in each iteration and recalculates accordingly, allowing it to adapt to the dynamic structure of the graph and produce successful results with fewer colors by minimizing conflicts. Additionally, its polynomial time and space complexity offer advantages in both theoretical and practical applications.

3. Materials and Methods

The Graph Coloring Problem (GCP) is a significant optimization problem that has been widely studied and has numerous practical applications. In recent years, due to the expansion of its application domains and advancements in solution strategies, GCP has attracted considerable attention from researchers. The primary objective of GCP is to assign different colors to adjacent nodes while minimizing the total number of colors used.

The MVC (Malatya Vertex Coloring) algorithm, proposed as a solution to the GCP, is a coloring method that considers the centrality values of the nodes. The aim of the algorithm is to prioritize the coloring of the most influential nodes, thereby minimizing the total number of colors used and reducing conflicts. In order to apply the MVC algorithm to the Map Coloring Problem (MCP), the problem must first be represented in the form of a graph. To make real-world data such as maps suitable for algorithmic processing, some preprocessing steps are required.

As an example of this process, the district map of Adıyaman, shown in Figure 1, was used. In the first stage (Stage 1), each region or area is represented as a node, and the adjacency relationships between regions are defined as edges. In this way, the map is transformed into a graph structure consisting of nodes and edges (Stage 2). The MVC algorithm is then applied to the resulting graph to assign appropriate colors to each node, producing a colored graph as seen in Stage 3. In the final stage (Stage 4), the colors assigned to each node in the graph are mapped back to the corresponding regions on the original map, resulting in a successfully colored map.

The MVC algorithm is a graph coloring algorithm that operates in two main steps, based on the centrality (MC) values of the nodes. In the first step, the MC values of all nodes in the graph are calculated. In the second step, nodes are selected according to these values, and appropriate colors are assigned to complete the coloring process. The general operation of the algorithm is as follows: First, the MC values of all nodes in the input graph are calculated, and the node with the highest MC value is identified and assigned a color. This colored node is then removed from the graph. Next, the MC values of the remaining nodes are recalculated, and the node with the highest MC value is again selected. A color that does not conflict with the colors of its neighboring nodes is assigned to this node, which is then removed from the graph. This process repeats until all nodes are colored.

The pseudocode of the algorithm is presented in detail in Algorithm 1. The MVC algorithm consists of two main components: the Main Function and the CentralityCalculate function. The CentralityCalculate function computes the MC value for each node, identifies the node with the highest value, and returns it. This node is then assigned a color that does not conflict with those of its neighbors, and subsequently removed from the graph. This cycle continues until no uncolored nodes remain in the graph. Once the loop is completed, all nodes in the copied graph are assigned a color, and the graph is fully colored.

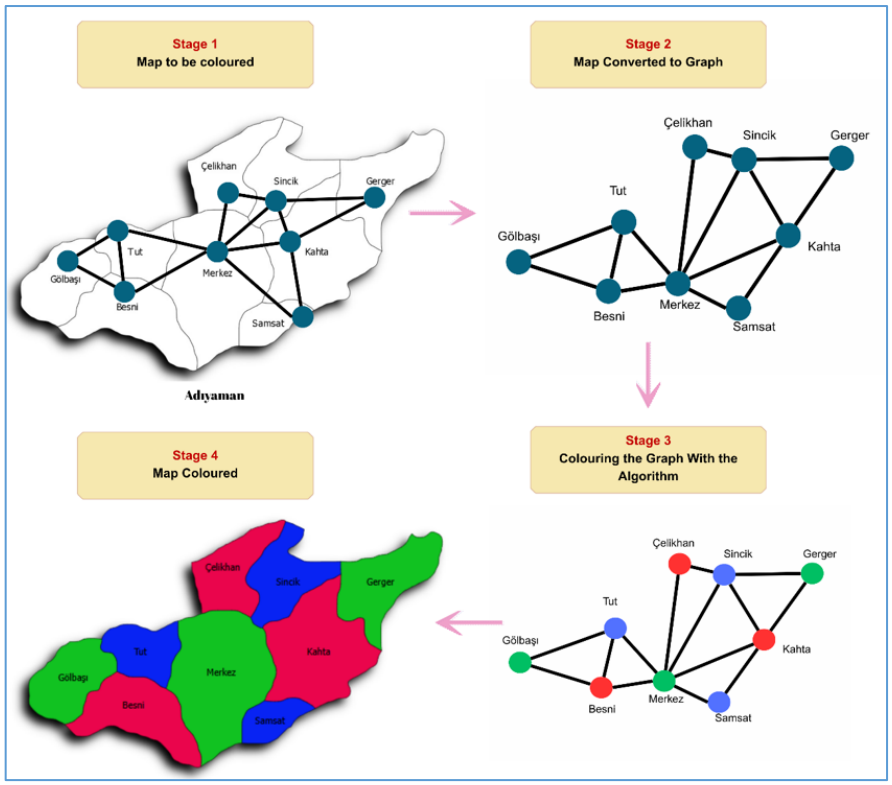


Figure 1. Coloring process of the district map of Adıyaman using the MVC Algorithm.

Algorithm 1. Pseudocode of the MVC Algorithm

MVC Algorithm

```
g ← (V, E)
f ← Copy(g)
CentralityCalculate ← function(g)
    MaxDegree ← -∞
    for i in V(g)
        Centrality ← 0
        for j in Neighbors(i)
            Centrality ← Centrality + Degree(i) / Degree(j)   // The MC value is calculated by
                                                              //summing the ratios of the node's
                                                              //degree to the degrees of its neighbors.
        if Centrality > MaxDegree
            MaxDegree ← Centrality
            Vertex ← i
    return Vertex
while VCount(g) > 0
    vertex ← CentralityCalculate(g)
    for i in Neighbors(f, vertex)
        Color(f[vertex]) ← Color(f[i])
    g ← DeleteVertex(g, vertex)
figure
Show(f)
```

The MC value is calculated as the sum of the ratios of the selected node's degree to the degrees of its neighboring nodes.

To demonstrate the application process of the MVC algorithm, a map of the Southeastern provinces of Turkey was used. The map was converted into a graph structure for coloring, and the adjacency table of the Southeastern provinces was input into the system. The MC (Modular Centrality) value of each node was calculated by summing the ratios of its degree to the degrees of its neighboring nodes. In this way, all nodes' MC values were computed. As shown in Table 1, the province with the highest value was Mardin. Therefore, a color was assigned to Mardin starting from the beginning of the color list, and then it was removed from the graph. After the graph was updated, all MC values were recalculated, and in the second iteration, Gaziantep was determined to have the highest MC value. While assigning a color to Gaziantep, care was taken to avoid using the same color as its neighboring provinces. Since none of Gaziantep's neighbors had yet been colored, the first color in the list was assigned to this node, and it was subsequently removed from the graph. Following the update and recalculation of MC values, Diyarbakır emerged as the province with the highest MC value in the third iteration. Since Mardin, a neighbor of Diyarbakır, had already been assigned a color, a different color from the list was selected for Diyarbakır, which was then removed from the graph. In the fourth iteration, Siirt had the highest MC value among the remaining nodes. To determine the color for Siirt, the colors of its neighboring provinces were reviewed. Since only Mardin had been assigned a color among Siirt's neighbors, a color different from that of Mardin was chosen. In the fifth iteration, Adıyaman and Şanlıurfa had equal MC values. The province that comes first alphabetically, Adıyaman, was selected, and its coloring process was carried out. Upon reviewing Adıyaman's neighbors, it was found that Gaziantep and Diyarbakır had already been colored; hence, a color different from these was assigned to Adıyaman. The remaining provinces had an MC value of zero since their neighbors had been removed from the graph. Each of these was subsequently colored using a color not used by its neighbors.

As a result, the Southeastern region of Turkey was successfully colored using the MVC algorithm. The changes in MC values at each step of the algorithm are presented in Table 1.

Table 1. MC values of southeastern provinces.

.	Adıyaman	Şanlıurfa	Gaziantep	Diyarbakır	Kilis	Mardin	Batman	Siirt	Şırnak
Iteration-1	2.5	4.46	4.75	4.46	0.3	8.3	2.35	3.1	1.06
Iteration-2	3.0	3.0	5.0	3.5	0.3		1.6	3.0	0.5
Iteration-3	1.6	1.6		4.5	0		1.6	3.0	0.5
Iteration-4	1.0	1.0			0		0.5	4.0	0.5
Iteration-5	1.0	1.0			0		0		0
Iteration-6		0			0		0		0
Iteration-7					0		0		0
Iteration-8							0		0
Iteration-9									0

In each step of the MVC algorithm, the coloring of the province with the highest MC value was prioritized. Following each execution step, the map coloring process was visualized through the stages illustrated in Figure2.

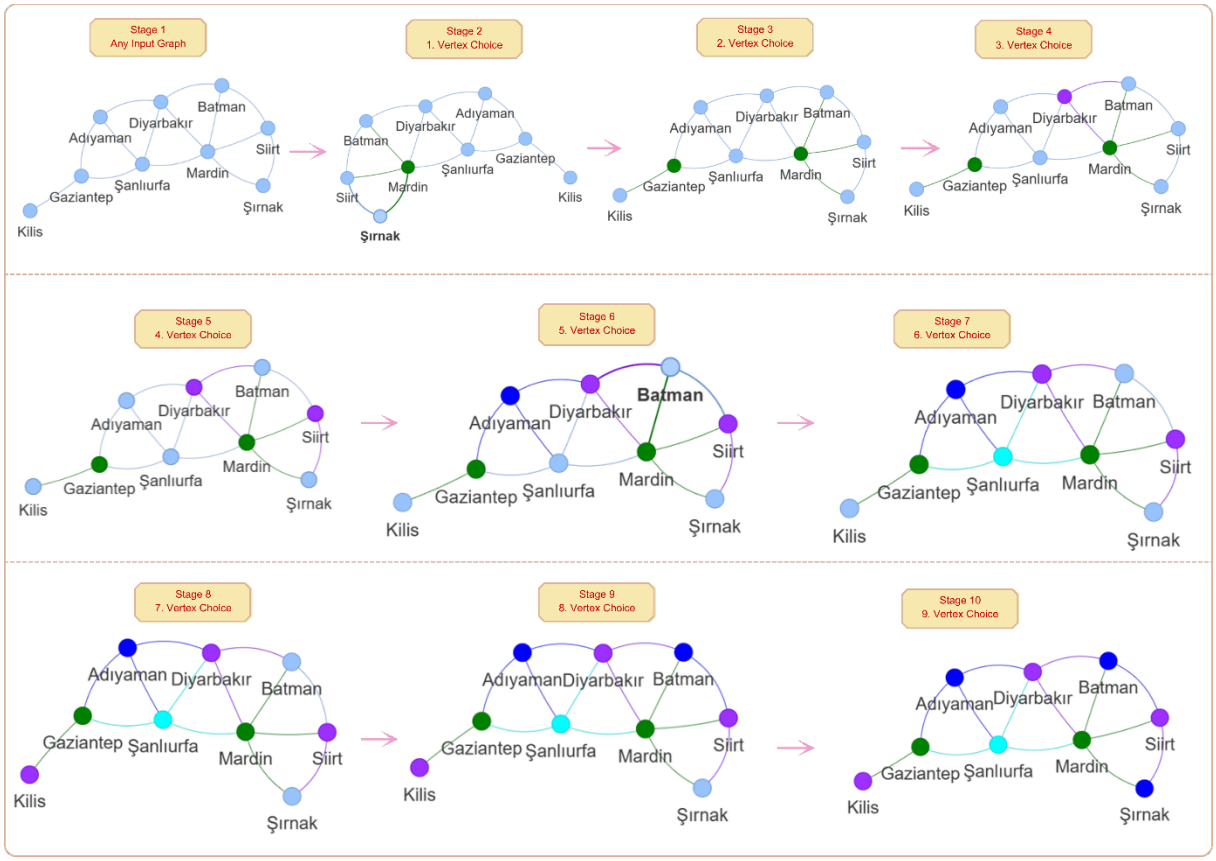


Figure 2. Step-by-step coloring of the Southeastern provinces using the proposed method.

The algorithm was applied to the Asia Map, Europe Map, Istanbul Districts Map, Turkey Map, World Map, and finally the US States Map for the purpose of map coloring, yielding successful results.

4. Map Application Coloring Results

In the graph modeling performed on the map, each region separated by borders was defined as a node, and the relationships between adjacent regions were represented by edges. In the application specifically conducted on the Asia map, 44 countries were modeled as nodes, and the 81 adjacency relationships between them were converted into a graph structure. The MVC algorithm was applied to this graph to ensure that neighboring countries were represented with different colors. As a result of the application, the entire map was successfully colored using only four distinct colors. This outcome is visualized in Figure 3, where each country is represented by a different color, and the principle that neighboring countries do not share the same color is maintained.

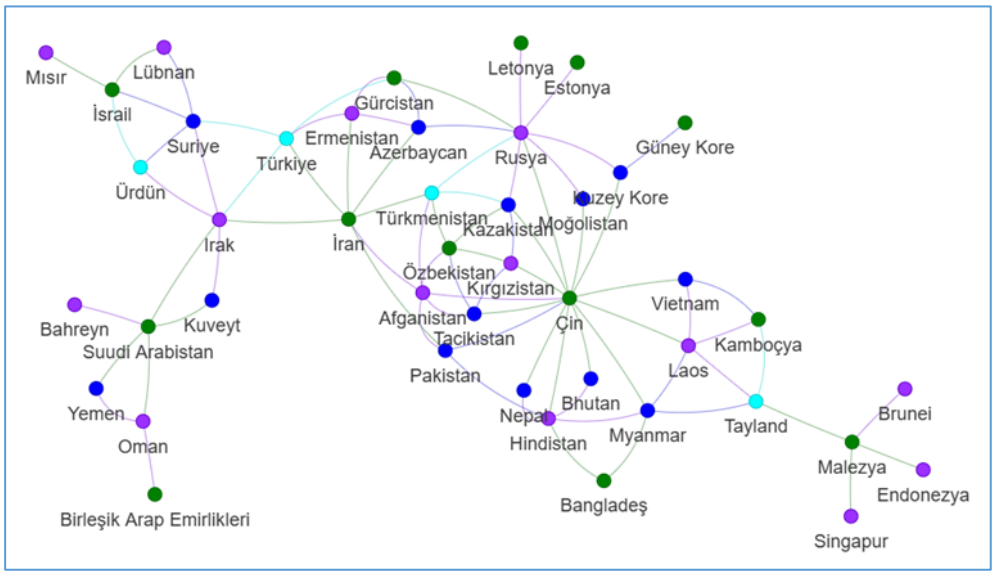


Figure 3. Coloring of the Asia Map.

The Europe map was transformed into a graph structure consisting of nodes representing 40 countries and edges depicting 72 adjacency relationships between them. The MVC algorithm was applied to this graph to ensure that neighboring countries were represented by different colors. As a result of the coloring process, an optimal color distribution was achieved on the map using only four colors. The obtained results are visualized in Figure 4, demonstrating that adjacent countries do not share the same color and that the minimum number of colors was successfully utilized.

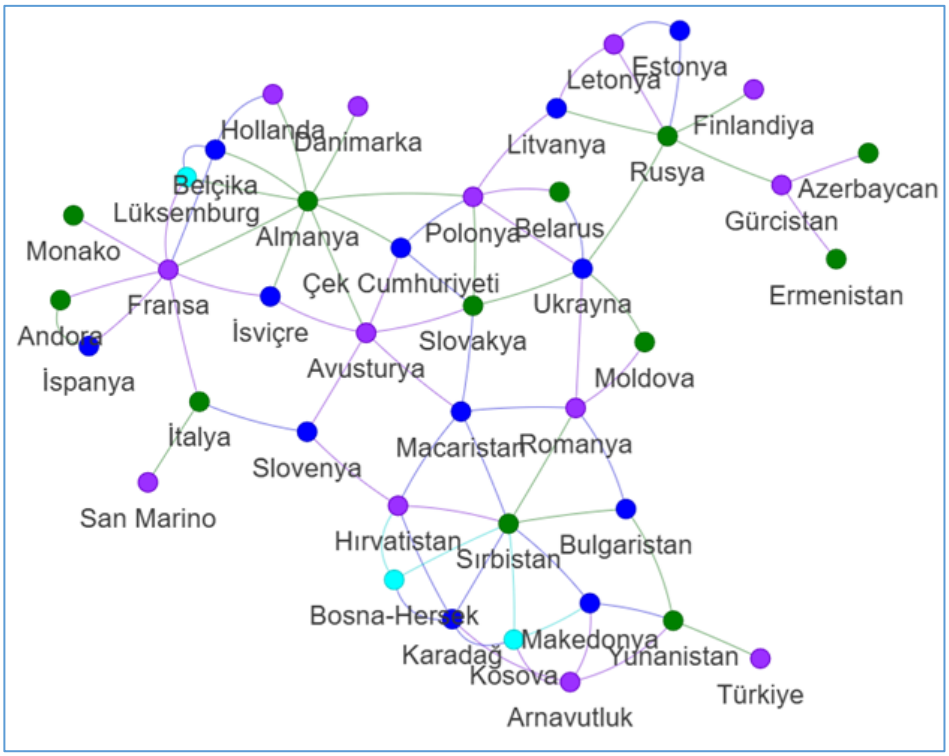


Figure 4. Coloring of the Europe Map.

The map covering Istanbul's 39 districts was transformed into a graph structure, where the districts were represented as nodes and the 76 adjacency relationships between them as edges. By applying the MVC algorithm to this graph, neighboring districts were assigned different colors, achieving a successful coloring using a total of four colors. According to the results visualized in Figure 5, adjacent districts do not share the same color, and an effective solution was obtained with minimal color usage.

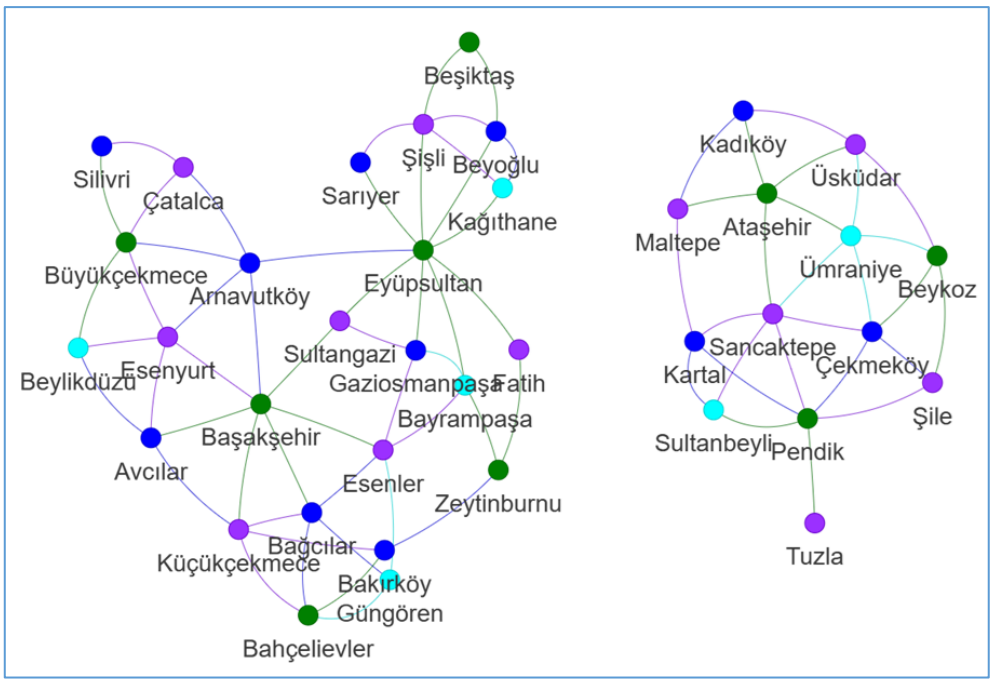


Figure 5. Coloring of the Istanbul Districts Map

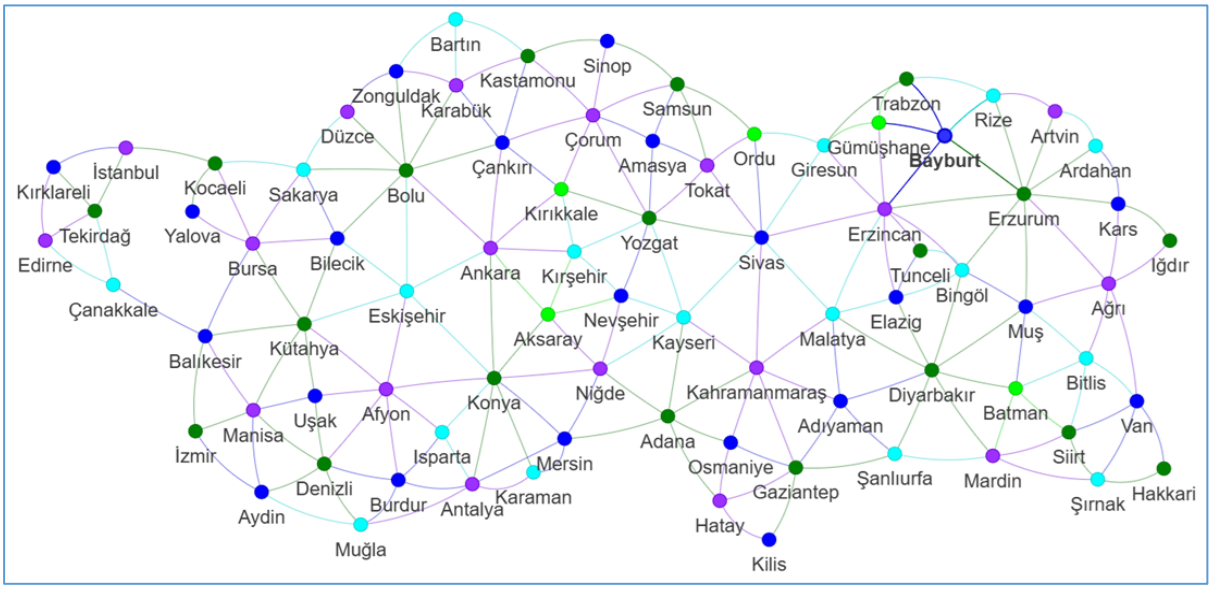


Figure 6. Coloring of Turkey Map

The map including the US states was modeled as a graph structure consisting of 51 nodes and 108 edges. By applying the MVC algorithm to this graph, neighboring states were colored with different colors, and the coloring process was completed using a total of five distinct colors. The obtained results are visualized in Figure7.

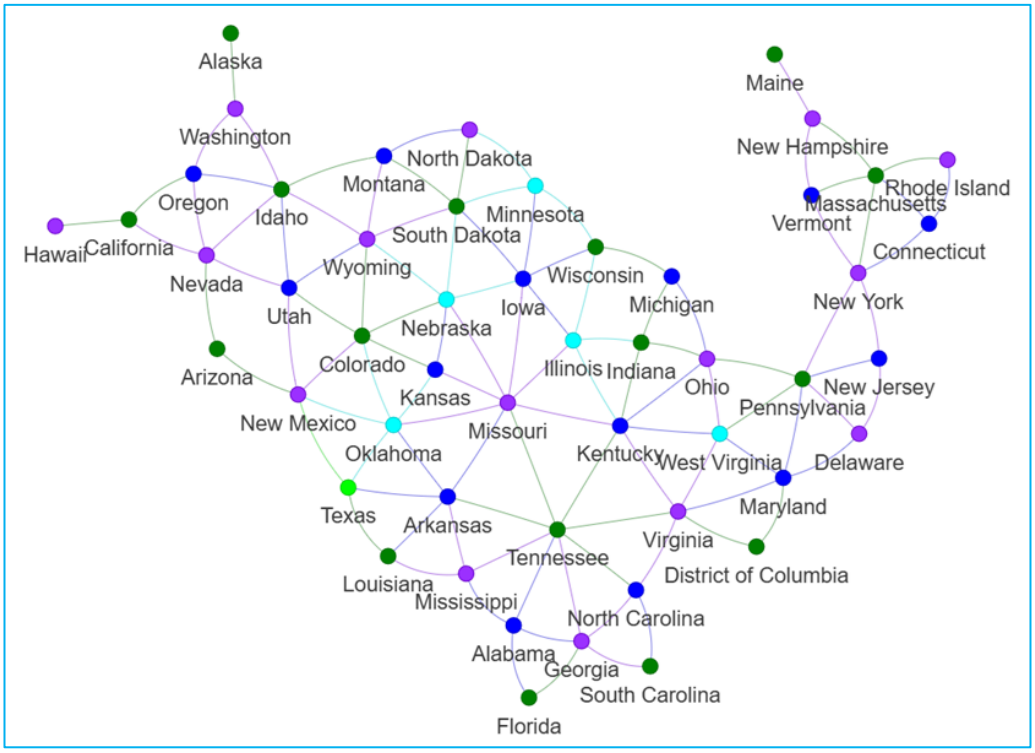


Figure 7. Coloring of the US States Map.

Finally, the algorithm was applied to the world map. In this application, 249 countries were modeled as nodes, and 728 adjacency relationships between the countries were represented by edges. The coloring process performed using the MVC algorithm ensured that all adjacent countries were displayed with different colors using only five distinct colors. The colored world map is presented in Figure 8.

Table 2 presents a comparative summary of the coloring results obtained by applying different algorithms to various geographical maps. The MVCA algorithm produced successful outcomes by using a number of colors equal to or comparable with those of existing classical algorithms. Notably, in the US States map, while the RLF algorithm utilized five colors, the MVCA algorithm achieved better performance using only four colors. For the other maps, MVCA yielded results on par with competing algorithms in terms of the number of colors used. These findings demonstrate that the MVC algorithm offers a competitive and effective alternative for map coloring problems.

Table 2. MC Values of Southeastern Provinces

Applied Maps	Number of Nodes	Number of Edges	Welsh-Powell	Greedy Color	Dsatur	RLF	MVCA
Asia Map	44	81	4	4	4	4	4
Europe Map	40	72	4	4	4	4	4
Istanbul Districts Map	39	76	4	4	4	4	4
Turkey Map	81	200	5	5	5	5	5
US States Map	51	108	4	4	4	5	4
World Map	249	320	5	5	5	5	5

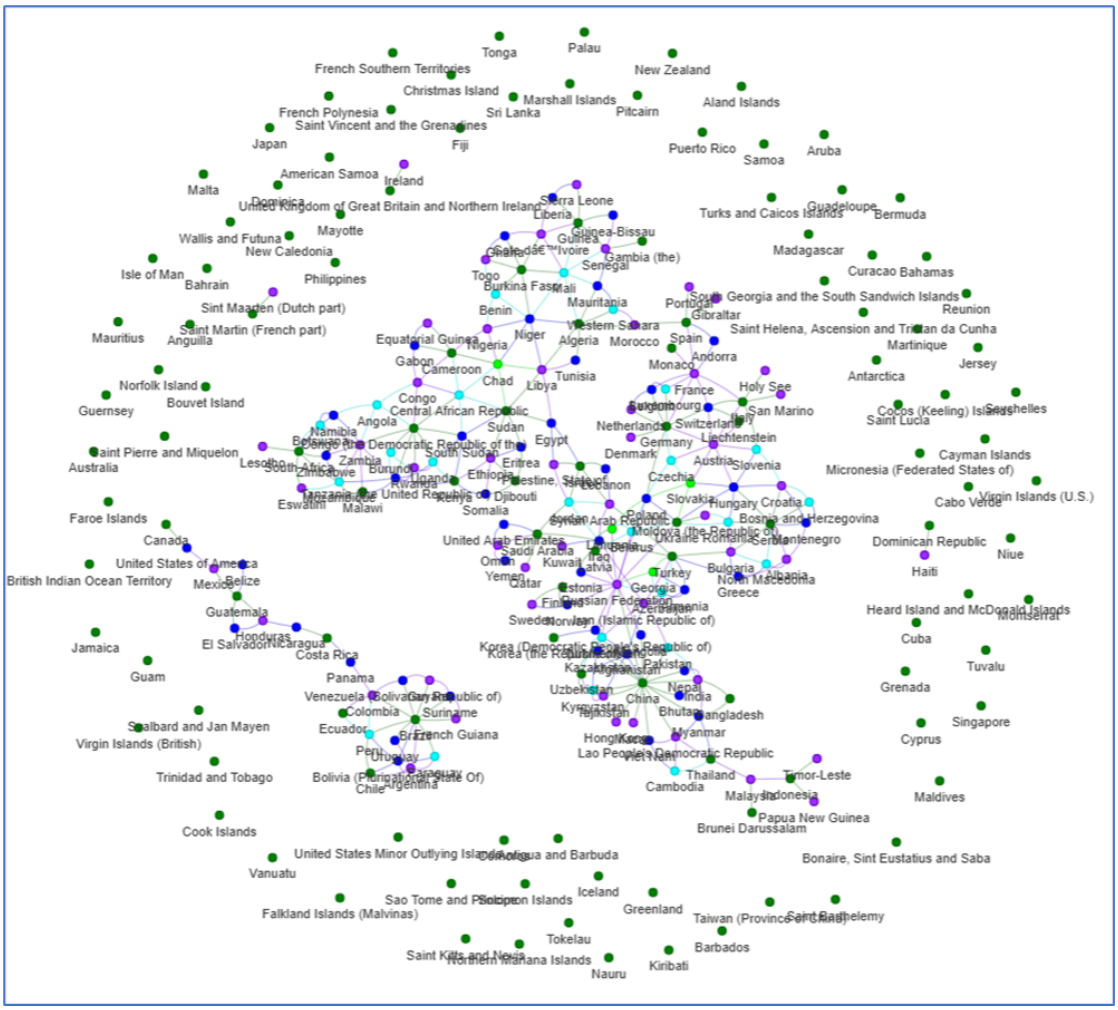


Figure 8. Coloring of the World Map.

5. Conclusion

In this study, a novel and original approach called the Malatya Vertex Coloring (MVC) Algorithm was developed and applied to solve the map coloring problem (MCP). Unlike classical graph coloring algorithms, the proposed algorithm assigns colors based on the MC values of the nodes, starting from the most influential node. This approach ensures that adjacent nodes receive different colors while minimizing the total number of colors used.

The MVC algorithm consists of two main steps: First, the centrality values of all nodes are calculated; then, a color is assigned to the node with the highest value in a way that does not conflict with the colors of its neighbors, and the node is removed from the graph. This process continues until all nodes are colored.

The distinctive feature of this study compared to existing literature is the use of a systematic strategy based on centrality values for selecting the initial node instead of randomness, making the coloring process predictable and reproducible. Additionally, the MVC algorithm operates with polynomial time and space complexity, demonstrating its theoretical and practical applicability.

The algorithm was tested on various maps of different scales and complexities, including Asia, Europe, Istanbul districts, Turkey, US states, and the world. The results obtained are as follows:

* The Asia map was modeled as a graph with 44 nodes and 81 edges and colored using 4 colors.
* The Europe map, represented by 40 nodes and 72 edges, was also colored with 4 colors.
* The Istanbul districts map, composed of 39 nodes and 76 edges, was successfully colored with 4 colors.
* The Turkey map, modeled with 81 nodes and 393 edges, required 5 colors.
* The US states map, represented by 51 nodes and 108 edges, used 5 colors.

* Finally, the world map, converted into a graph with 249 nodes and 728 edges, was colored using 5 colors.

In the specific case study of Southeastern Anatolian provinces, the algorithm selected the most influential node in each iteration, resulting in an effective color distribution.

As demonstrated in the comparative tables, the MVC algorithm provides efficient solutions using the same or fewer colors compared to classical algorithms. Notably, in certain maps (e.g., the US states map), it achieved near-optimal results using fewer colors than other methods.

In conclusion, the MVC algorithm stands out as a method with strong theoretical foundations and successful practical applications, offering an effective and alternative solution to the map coloring problem. Future work may focus on applying this algorithm to different problem types or enhancing its structure through hybrid systems.

Acknowledgments

I would like to express my sincere gratitude to my advisor, Dr. Selman Yakut, for his valuable contributions and guidance throughout every stage of this study, and to my family for their unwavering support.

References

[1] Fritsch R, Fritsch G. Four-Color Theorem. New York, NY, USA: Springer-Verlag; 1998.
[2] Zhou Y, Zheng H, Luo Q, Wu J. An improved Cuckoo Search Algorithm for Solving Planar Graph Coloring Problem. Appl Math Inf Sci 2013; 7(2): 785-792.
[3] Hale WK. Frequency assignment: Theory and applications. Proc IEEE 1980; 68(12): 1497-1514.
[4] Ono S, Miyamoto R, Nakayama S, Mizuno K. Difficulty estimation of number place puzzle and its problem generation support. In: 2009 ICCAS-SICE; August 2009; Fukuoka, Japan. New York, NY, USA: IEEE. pp. 4542-4547.
[5] Chmeit N. Using simulated annealing and ant-colony optimization algorithms to solve the scheduling problem. PhD Thesis, Notre Dame University-Louaize, Lebanon, 2012.
[6] Chaitin GJ, Auslander MA, Chandra AK, Cocke J, Hopkins ME, Markstein PW. Register allocation via coloring. Comput Lang 1981; 6(1): 47-57.
[7] Altunay H, Eren T. A literature review for course scheduling problem. Pamukkale Univ J Eng Sci 2017; 23(1): 55-70.
[8] Appel K, Haken W. Every planar map is four colorable. In: Mathematical Solitaires and Games. New York, NY, USA: Routledge; 2019. pp. 145-152.
[9] Saxena S, Thapar A, Bansal R. Total fuzzy graph coloring. J Hyperstructures 2022; 11(1): 84-108.
[10] Cui G, Qin L, Liu S, Wang Y, Zhang X, Cao X. Modified PSO algorithm for solving planar graph coloring problem. Prog Nat Sci 2008; 18(3): 353-357.
[11] Ahn S, Lee S, Chung TC. Modified ant colony system for coloring graphs. In: Fourth Int Conf Information, Communications and Signal Processing; 2003; Singapore. New York, NY, USA: IEEE.
[12] Marappan R, Sethumadhavan G. Solution to graph coloring using genetic and tabu search procedures. Arab J Sci Eng 2018; 43(2): 525-542.
[13] Ardelean SM, Udrescu M. Graph coloring using the reduced quantum genetic algorithm. PeerJ Comput Sci 2022; 8: e836.
[14] Campbell C, Dahl E. QAOA of the highest order. In: 2022 IEEE 19th Int Conf Software Architecture Companion (ICSA-C); 2022; Montréal, Canada. New York, NY, USA: IEEE. pp. 141-146.
[15] Karcı A, Yakut S, Öztemiz F. A new approach based on centrality value in solving the minimum vertex cover problem: Malatya centrality algorithm. Computer Science 2022.
[16] Hong B. Generic algorithm of color planar graph. J Guizhou Univ (Nat Sci) 1999; 11(16): 232-297.
[17] Zhao R ve diğerleri. Discrete selfish herd optimizer for solving graph coloring problem. Appl Intell 2020; 50(5): 1633-1656.
[18] Hsu LY, Horng SJ, Fan P, Khan MK, Wang YR, Run RS, Chen RJ ve diğerleri. MTPSO algorithm for solving planar graph coloring problem. Expert Syst Appl 2011; 38(5): 5525-5531.
[19] Zhao R, Wang Y, Liu C, Hu P, Jelodar H, Rabbani M, Li H. Discrete selfish herd optimizer for solving graph coloring problem. Appl Intell 2020; 50(5): 1633-1656.
[20] Bui TN, Nguyen TH, Patel CM, Phan KAT. An ant-based algorithm for coloring graphs. Discrete Appl Math 2008; 156(2): 190-200.
[21] Wang R, Zhou Y, Zhou Y, Bao Z. Local greedy flower pollination algorithm for solving planar graph coloring problem. J Comput Theor Nanosci 2015; 12(11): 4087-4096.
[22] Surbakti NM, Ramadhani F. Implementation of the greedy algorithm for coloring graph based on four-color theorem. Sudo J Tek Inf 2022; 1(4): 178-182.
[23] Luo Q. The 2nd Conference on Environmental Science and Information Application Technology: ESIAT 2010; July 17-18, 2010; Wuhan, China. New York, NY, USA: IEEE; 2010.
[24] Tambouratzis T. A consensus-function artificial neural network for map-coloring. IEEE Trans Syst Man Cybern B Cybern 1998; 28(5): 721-728.
[25] Talaván PM, Yáñez J. The graph coloring problem: A neuronal network approach. Eur J Oper Res 2008; 191(1): 100-111.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 623-634, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1651300

Konfeksiyon Yan Sanayi Sektöründeki Pazarlama Sorunlarının Analitik Ağ Süreci Yöntemi ile Analizi

Şeyda GÜR[1*], Fatma KAYA[2]
[1] Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye
[2] Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye
[*1] seydagur@harran.edu.tr, [2] f-kaya@harran.edu.tr

(Geliş/Received: 04/03/2025; Kabul/Accepted: 12/05/2025)

Öz: Konfeksiyon yan sanayi, giyim üretim süreçlerine destek veren ve üretimde tamamlayıcı ürünler sunan bir sanayi alanıdır. Bu sanayi, konfeksiyonun ana bileşenlerinin (giysi ve tekstil ürünleri) üretimi için gerekli olan aksesuar, malzeme ve yardımcı ürünler üretmektedir. Yan sanayi ürünleri kumaş, düğme, fermuar, aksesuar vb. tamamlayıcı ürünleri kapsamaktadır. Alan moda ve tekstil sektörünün tamamlayıcı parçalarını üretirken aynı zamanda konfeksiyon ana üretim hattının desteklenmesini de sağlamaktadır. Üretim süreçlerinde tedarik zincirindeki pazarlama stratejileri oldukça önemlidir. Pazarlama konularında dikkate alınması gereken etmenler sektördeki işletmelerin verimliliğini artırmak, pazarda rekabet avantajı sağlamak ve müşteri memnuniyetini üst düzeye çıkarmak şeklinde sıralanabilir. Konfeksiyon sektöründeki yan sanayiye ait ürünlerin pazarlama süreçlerini etkileyen sorunlar endüstrinin hem üretim hem de dağıtım aşamalarını büyük ölçüde değiştirmektir. Bu süreçte karşılaşılan sorunların analizi için çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden analitik ağ süreci yöntemi kullanılmıştır. Tedarik zincirinin verimli çalışmasını sağlamak için bu sorunları ve bu sorunlara sebep olan faktörlerin analizi kritik önem taşımaktadır.

Anahtar kelimeler: Konfeksiyon, yan sanayi, pazarlama, analitik ağ süreci.

Analysis of Marketing Problems in the Apparel Supplier Industry Sector with Analytical Network Process Method

Abstract: The apparel sub-industry is an industrial area that supports clothing production processes and offers complementary products in production. This industry produces accessories, materials, and auxiliary products required to produce the main components of apparel (garments and textile products). Sub-industry products include complementary products such as fabrics, buttons, zippers, accessories, etc. While the field produces complementary parts of the fashion and textile sector, it also provides support for the main production line of apparel. Marketing strategies in the supply chain are very important in production processes. Factors to be considered in marketing issues can be listed as increasing the efficiency of businesses in the sector, providing a competitive advantage in the market, and maximizing customer satisfaction. The problems affecting the marketing processes of the products of the sub-industry in the apparel sector are changing both the production and distribution stages of the industry to a great extent. The analytical network process method, one of the multi-criteria decision-making methods, was used to analyze the problems encountered in this process. The analysis of these problems and the factors that cause them is of critical importance in order to ensure the efficient operation of the supply chain.

Key words: Apparel, supplier industry, marketing, analytical network process.

1. Giriş

Konfeksiyon yan sanayi "Başta hazır giyim olmak üzere, deriden giyim ve diğer deri ürünlerine, tekstil ürünlerine ve ev tekstili ürünlerine işlevsellik, görsellik, moda ve değer kazandıran ürünlerin üretildiği bir sanayi alanıdır" şeklinde tanımlanmaktadır [1]. Nihai üretimi bulunmayan bu alan, giyim ve ev tekstili gibi ana üretim hatlarına tedarik oluşturmak ve katma değerlerine katkı sağlamaktadır. Genel anlamda geniş bir alana ürün yelpazesi sunan yan sanayi konfeksiyon başta olmak üzere deri, ev tekstili, mobilya, otomotiv, sağlık, ambalaj gibi birçok alana hizmet sunmaktadır. Konfeksiyon yan sanayi ana sanayiler ile karşılıklı olarak etkileşim halindedir. Ana sanayilerin rekabet gücünü ve katma değerini artırmakta olan yan sanayideki gelişmeler modaya, eğilimlere ve gelişen teknolojilere uyum sağlamakta ve doğrudan gelişim göstermektedir. Tüketici eğilimlerinden dolaylı olarak etkilenen alanın başarısı üretim süreçlerindeki değişen ihtiyaç ve taleplerin karşılanması ile doğru orantılıdır. Konfeksiyon yan sanayi esnek bir üretim yapısına sahip olup çoğunlukla küçük ve orta ölçekli firmalardan oluşmaktadır.

[*] Sorumlu yazar: seydagur@harran.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-4639-9657, [2] 0000-0002-0741-6792

Ana üretim alanlarının destekçisi durumundaki konfeksiyon yan sanayi, dünya çapında küresel moda ve tekstil endüstrisine önemli destek sağlayan bir sektördür. Bu sektörde amaç kaliteli aksesuar, tamamlayıcı parçalar, ambalaj, etiketleme, kumaş yan ürünleri gibi alanlarda faaliyet göstererek konfeksiyon üretimlerinin kapasitesini artırmaktadır. Yan sanayi, moda endüstrisinin sürekli olarak taleplerine uyum sağlaması, kapsamlı çözümler ve sürdürülebilirlik kriterlerine uygun olması gibi parametrelerle birlikte yol almaktadır. Teknoloji ve dijitalleşme, sürdürülebilirlik, pazar dinamikleri ve tedarik zinciri yönetimi gibi alanlar, bölgeden bölgeye değişiklik göstermekte olup yaşanan gelişmelere göre de şekillenen özelliklerdir. Yan sanayi, günümüzde küresel moda üreticilerine yanıt vermek için daha gelişmiş, çevre dostu ve esnek çözümler sunmaktadır. Bu çalışma konfeksiyon yan sanayinde pazarlama konularındaki sorunların analizi üzerine ele alınmıştır. Bu doğrultuda çalışmanın temel araştırma soruları belirlenmiş ve bu sorulara cevap vermeye çalışılmıştır.

- Konfeksiyon yan sanayi sektöründe pazarlama süreçlerinde karşılaşılan temel sorunlar nelerdir?
- Sektörel dinamikler, teknolojik dönüşüm, tedarik zinciri karmaşıklıkları ve küresel etkiler bağlamında sorunların niteliksel ve niceliksel boyutları nelerdir?
- Bu pazarlama sorunlarına etki eden kriterler arasında nasıl bir etkileşim ve öncelik sıralaması mevcuttur?

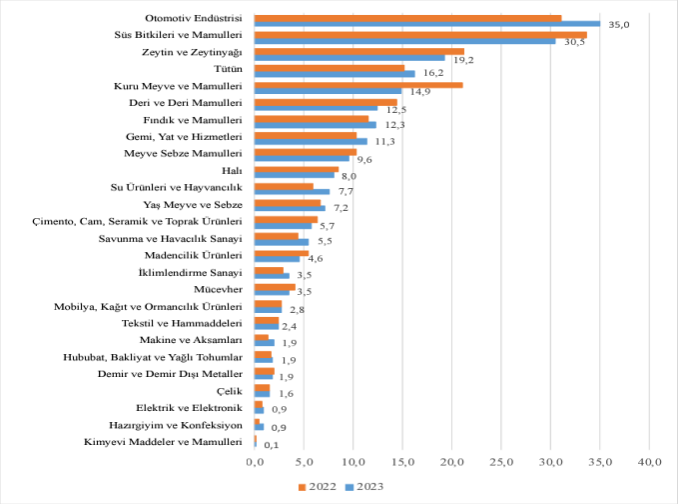
Bu sorular cevaplandırılarak sektörün sorunlarını analiz etmekle kalmayıp aynı zamanda çözüm geliştirme ve öncelik belirleme açısından da yön gösterici bir araştırma sunulması hedeflenmektedir. Yan sanayi sektörünün pazarlama süreçlerinde karşılaşılan sorunlar üretim sürecini direkt etkilemekte ve üretimi geciktirebilmektedir. İşletme sahipleri bu sorunlarla başa çıkabilmek için farklı stratejiler geliştirse de sorunun temel faktörlerinin analizi ve bu faktörlerden hangisine daha fazla yoğunlaşılması gerektiği önemlidir. Böylece sorunun ortaya çıkmasına büyük ölçüde engel olunabilme ihtimali artmaktadır. Bu çalışmada da bu pazarlama sorunlarına neden olan faktörlerin analizi yapılmıştır. Analiz sürecinde çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) yöntemlerinden analitik ağ süreci (AAS) yöntemi kullanılmıştır. Çok ölçütlü karar verme karar vericilerin ele aldıkları karar problemindeki faktörlerin niceliksel olarak değerlendirmesini kapsamaktadır. Sübjektif değerlendirmeleri niceliğe dökerek karar vericiler için birden fazla değerlendirmeyi anlamlı olarak ifade edebilmektedir. Bu yöntemler arasında bulunan AAS yöntemi ise problem üzerinde etkili olan faktörler arasında bariz bir ilişki ve etkileşim olduğu durumları modellemek için kullanılmaktadır. Her bir kriterin birbirinden bağımsız değerlendirilemediği ve geri beslemelerin olduğu durumlar için uygun bir yöntemdir. Çalışmada da süreci etkileyen faktörler arasındaki ilişkiler göz önünde bulundurularak bu yöntem tercih edilmiştir. Sorunların analizi için süreç üzerinde etkili olan faktörler literatürdeki çalışmalardan yararlanılarak belirlenmiştir. Bu faktörler; tedarikçi seçimi ve yönetimi, talep tahminleri, lojistik ve dağıtım, sürdürülebilirlik, teknoloji entegrasyonu, küresel etkiler ve dışsal faktörler, maliyet yönetimi ve kalitedir.

Bu çalışma dört bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde literatürde ele alınan konu ile ilgili çalışmalara yer verilmiştir. Üçüncü bölümde çalışmada kullanılan yöntem ve yöntemin uygulama adımlarından bahsedilmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlara ve işletmeler için bu sonuçların ne ifade ettiğine değinilmiştir.

2. Literatür Taraması

Ülkemizde yapılan ihracatta tekstil ve konfeksiyon sanayinin payı oldukça yüksektir. Tekstil ve konfeksiyon ihracatı son yıllarda gerçekleşen COVID-19 pandemisi, 2022 yılında enflasyonist baskılar ve Rusya-Ukrayna savaşı gibi bir dizi olaydan etkilenmiştir. Tüm süreçlere karşın "Sektörel olarak 2022 yılında en çok ihracat gerçekleştiren ilk üç sektör, sırasıyla, 35 milyar dolar ile Otomotiv, 3,5 milyar dolar ile Kimyevi Maddeler ve Mamulleri ve 19,2 milyar dolar ile Hazır giyim ve Konfeksiyon sektörü olmuştur." şeklinde ifade edilmiştir [2]. Şekil 1'de sektörlere göre ihracat miktarları verilmiştir.

Türkiye İhracatçılar Meclisi tarafından açıklanan verilere göre üretim sektöründe oldukça önemli bir yere sahip olan hazır giyim ve konfeksiyon sanayi hakkında "2024 yılı Ocak-Haziran Türkiye'nin hazır giyim ve konfeksiyon ihracatı 2023 yılı aynı dönemine göre %12,8 düşüş ile 8,7 milyar dolar olmuştur. Hazır giyim ve konfeksiyon sektörü 2024 yılı ikinci yarı 8,7 milyar dolarlık ihracat değeri ve genel ihracat içindeki %6,9'luk payıyla; %14,1'lik paya sahip olan otomotiv endüstrisinin, %12,6'lık paya sahip olan kimyevi maddeler sektörünün ardından üçüncü sıradadır" şeklinde saptamalara yer verilmiştir [3, 4]. Tablo 1'de hazır giyim ve konfeksiyon sektörünün ihracat seyri verilmiştir.



Şekil 1. Sektörlere Göre İhracat (milyar $, ÖTS) [2].

Tablo 1. Hazır Giyim ve Konfeksiyon İhracatının Seyri [3].

Aylar İtibariyle Hazır Giyim ve Konfeksiyon İhracatının Seyri				
Birim: 1000 $	**Hazır Giyim ve Konfeksiyon İhracatı**			
Aylar	**2022**	**2023**	**2024**	**2022/23 Değişim %**
Ocak	1591578	1623739	1422027	-12,4
Şubat	1840370	1576668	1503506	-4,6
Mart	2014063	1989771	1618456	-18,7
Nisan	2035688	1502526	1230721	-18,1
Mayıs	1335848	1656510	1646187	-0,6
Haziran	1965714	1659501	1299385	-21,7
Temmuz	1617515	1554072		-100,0
Ağustos	1836867	1674160		-100,0
Eylül	1920012	1673636		-100,0
Ekim	1701768	1496788		-100,0
Kasım	1630641	1437047		-100,0
Aralık	1703955	1454727		-100,0
Toplam	**21193566**	**19253722**		**-100,0**
Kaynak: İhracatçı Birlikleri Kayıtları				

Hazır giyim ve konfeksiyon ihracatında yer alan ürün grupları Tablo 2'de yer almakta olup ürün grupları "2024 yılı Ocak-Haziran döneminde en fazla ihracat örme (Fasıl 61) ürün grubunda gerçekleşmiştir. Dönemsel ihracatımızın 4,3 milyar dolar ile %51'i Örme Ürün Grubundan oluşmaktadır." şeklinde sıralanmıştır [3]. Tablo 2'de ihracatı yapılan ürünler listelenmiştir.

Tablo 2. İhracatı Yapılan Ürün Grupları [3].

Ürün Grupları İtibariyle Hazır Giyim ve Konfeksiyon İhracatı				
Birim: 1000 $				
Ürün Grupları	**2023 Ocak-Haziran**	**2024 Ocak-Haziran**	**2023/2024 Değişim %**	**2024 Pay %**
Örme Giyim Eşyaları ve Aksesuarlar	4858850	4368957	-10,1	51,10%
Dokuma Giyim Eşyaları ve Aksesuarlar	3951374	3244073	-17,9	37,90%
Diğer Hazır Eşyalar ve Ev Tekstilleri	1048926	943890	-10	11,00%
Kaynak: İhracatçı Birlikleri Kayıtları				

Literatürde yer alan bu verilerden de anlaşılacağı üzere yan sanayi ürün grupları genel olarak üretim ve pazarlama süreçlerinde ekonomik açıdan oldukça önemli bir yer kapsamaktadır. Yaşadığımız yüzyılın getirdiği teknolojik gelişmeler ve hızlanan, değişen yaşam tarzlarının yeni ihtiyaçları da beraberinde getirdiği görülmekte olup sektör açısından başarı inovatif ürünlerin öncelikli olarak ele alınması gerekliliğini göstermektedir.

Köksal [5] konfeksiyon yan sanayi çalışmaları için "Türk tekstil ve konfeksiyon sanayinin dünya pazarlarında başarılı olabilmesi, bir ölçüde konfeksiyon yan sanayinin çalışmalarına bağlı olduğundan bahsetmiştir. Bu kapsamda konfeksiyon yan sanayinde yer alan ürünlere bakıldığında,

- Aksesuarlar: Düğme, fermuar, çıtçıt, kanca, toka gibi tamamlayıcı tasarımlar,
- Etiket ve Ambalaj: Marka etiketi, yıkama talimatı, fiyat etiketi, karton ve plastik ambalajlar,
- Tela ve Astarlar: Kıyafetlere form ve dayanıklılık kazandıran ürünler,
- İplik ve Dikiş Malzemeleri: Dikiş iplikleri, elastik bantlar, dantel ve biye gibi detaylar,
- Kimyasal Ürünler: Boyalar, yıkama kimyasalları, apre maddeleri gibi sıralanabilir.

Konfeksiyon yan sanayi alanı bu ürün gruplarını üreten küçük ve orta büyüklükteki işletmelerden oluşmakta olup bu çalışmada da konfeksiyon yan sanayinde pazarlama konularındaki sorunlara ve analizlerine yer verilmektedir.

Eraslan vd. [6] Türk tekstil ve hazır giyim sektörünün uluslararası rekabetçilik düzeyini analiz etmektedir. Sektörün ihracat gelirlerindeki payı ve rekabet avantajlarını detaylandırmışlardır. Pazarlama kavramı işletmelerin ürünlerini veya hizmetlerini müşterilerine satabilmek için uyguladıkları farklı stratejiler şeklinde tanımlanabilmektedir [7].

Pazarlama sadece satış yapmak değil, aynı zamanda müşteriyle uzun vadeli ticari ilişkileri genişletmek ve markayı güçlendirmek amaçlarını da kapsamaktadır. Pazarlamanın telem unsurlarını ürün, fiyat aralıkları, dağıtım ve tutundurma (tanıtım) olarak ele almak mümkündür. Öndoğan [8] pazarlama stratejileri için gerekli maliyetleri satış, tutundurma, fiziksel dağıtım, finansal giderler ve genel satış giderleri olmak üzere beş temel gruba ayırmıştır. Konfeksiyon yan sanayinin ana maliyet parametreleri genel olarak hammadde, finansman, işçilik, enerji ve nakliye olarak sıralanabilir. Bakır ve Koncuk [9] sanayi ve hizmet sektöründe faaliyet gösteren KOBİ'lerin iç pazardaki pazarlama sorunlarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Pazarlama araştırması ve pazarlama karması sorunları gibi konularda sektörel farklılıklar tespit etmişlerdir.

Ray ve Nayak [10] konfeksiyon yan sanayi sektöründe pazarlama alanındaki mevcut sorunları ve bu sorunlara yönelik çözüm önerilerini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Sektörde faaliyet gösteren firmaların, bu çalışmalardan elde edilen bulguları dikkate alarak pazarlama stratejilerini geliştirmeleri ve rekabet avantajı sağlamalarının mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Bhagya vd. [11] moda endüstrisindeki niş pazar stratejilerini sistematik bir şekilde incelemekte ve niş uygulamaların haritasını çıkarmaktadır. Niş pazarların dinamikleri ve pazarlama stratejileri detaylandırılmıştır.

Tekstil sektöründe son zamanlarda pazarlama süreçlerini etkileyen çevre kirliliği, insan sağlığı gibi konularda yeni standartlar öne çıkmaktadır. Köksal [5] çalışmasında tekstil ve çevre uyumunu "Çevreye uyum tekstil ve konfeksiyon sektörü için iki boyutludur. Birincisi, üretilen ürünlerdeki boya ve kimyevi maddelerin insansa sağlığına zarar vermeyecek biçimde seçilmesidir. İkincisi ise, üretim sonucu oluşan atıkların su, hava ve toprak ortamına deşarjını kontrol altında tutarak ekolojik dengenin korunmasını sağlamaktır." şeklinde ifade etmiştir.

Tekstil sektörünün de önemli ölçüde etkilendiği teknolojik gelişmeler ışığında araştırmacılar bu etkilenmenin boyutunu incelemişlerdir. Li [12] dijital dönüşüm dalgasında, konfeksiyon perakende markalarının karşılaştığı

önemli fırsatları ve zorlukları incelemektedir. Li Ning markası örneği üzerinden, e-ticaret alanındaki gelişmeler, tüketici tercihlerindeki değişimler ve tedarik zinciri yönetimi gibi unsurlar analiz edilmiştir.

Koç [13] metaverse perakendeciliğinin tekstil sektörü üzerindeki etkileri incelenmiş; dijital pazarlama stratejileri bağlamında metaverse'in sunduğu fırsatlar ve sınırlılıklar analiz etmiştir. Geleneksel, elektronik ve metaverse perakendecilik yaklaşımları karşılaştırılmış, marka örnekleri ve meta-analiz yöntemiyle güncel uygulamaları değerlendirmiştir. Brun ve Castelli [14] moda sektöründe tedarik zinciri yönetiminin (SCM) önemini değerlendirmek amacıyla yürütülen bir araştırmanın sonuçlarını sunmuşlardır. Teorik yaklaşımlar ve vaka analizlerine dayanarak, ürün, marka ve perakende kanalı temelli bir "segmentasyon ağacı" modeli önermişlerdir. Li vd. [15] çalışmasında, Çin'in Wenzhou kentindeki tekstil ve giyim endüstrisinin 2004–2018 yılları arasındaki karbon emisyonları hesaplanmış ve ekonomik büyüme ile olan bağının kopma (decoupling) analizi yapılmıştır. Laspeyres ayrıştırma yöntemiyle yapılan analiz sonucunda, endüstri ölçeğinin karbon emisyonlarını artıran ana etken olduğu, buna karşın sektör yapısı ve teknoloji seviyesinin bu artışı sınırladığı belirlenmiştir. Reinli ve Pettersson [16] İsveç tekstil firmalarının dijital platformlar ve resmi belgelerde sürdürülebilirlik odaklı pazarlama çabalarının ne kadar şeffaf olduğunu anlamak amacıyla belge ve içerik analizi yapmışlardır. Sonuçlar, açık ve motive edici sürdürülebilirlik ifadelerinin şeffaflığı güçlendirdiğini, belirsiz ifadelerin ise yeşil aklama eğilimlerine yol açabileceğini ortaya koymuş; genel olarak sektörde sürdürülebilirlik vurgusu yapan firmaların pazarlama yaklaşımlarında yeterli şeffaflık olmadığı tespit edilmiştir. Novianty ve Wibowo [17] çalışmasında, Covid-19 pandemisinin olumsuz etkilerinden sonra rekabet gücünü kaybeden Hijab Sabine markasının pazarlama kanallarındaki yetersizlikleri tespit edilerek, markanın yeniden yapılanmasına yönelik stratejik pazarlama önerileri geliştirilmiştir. Çalışmada, dış (PESTEL, Porter, rakip ve müşteri analizi) ve iç (STP, 4P, VRIO, BMC) analizler aracılığıyla markanın mevcut durumu değerlendirilmiş ve derinlemesine görüşmelerle desteklenen çözüm önerileri sunulmuştur. Lu [18] Tayland tekstil ve konfeksiyon sektörünün uluslararası pazarlardaki fırsatları ekonomik açıdan incelemiş; sektörün güçlü ve zayıf yönleri Porter's Five Forces, SWOT ve PESTEL analizleri ile değerlendirmiştir. Yükselen üretim maliyetleri ve iş gücü sorunları gibi zorluklara rağmen, teknolojik yenilikler, sürdürülebilir uygulamalar ve uluslararası iş birlikleri sayesinde büyüme potansiyeli vurgulamış, rekabet gücünü artırmak için stratejik devlet desteği önermiştir. Çetiner ve Tunca [19] tekstil ve moda sektörünün tarihsel gelişimi kapitalizm, sanayi devrimi ve modernizm süreçleri bağlamında incelenerek sürdürülebilir moda pazarlamasının nasıl ortaya çıktığı ve hangi kavramsal temellere dayandığını analiz etmişlerdir. Ayrıca, sektörün çevresel ve etik sorunlara verdiği tepkiler doğrultusunda gelişen sürdürülebilir pazarlama anlayışı ekolojik, etik ve yeşil pazarlama yaklaşımlarıyla ilişkilendirerek yerli ve yabancı literatür taramasıyla değerlendirmişlerdir.

Konfeksiyon yan sanayi sektörü, hazır giyim ve tekstil endüstrisinin tamamlayıcı unsurlarından biri olmasına rağmen, pazarlama süreçlerine ilişkin çok ölçütlü karar verme tabanlı analizlerin sınırlı olduğu görülmektedir. Literatürde genellikle hazır giyim sektörünün kendisine odaklanılmış, ana üretim süreçleri, ihracat dinamikleri ve genel rekabet analizleri üzerinde durulmuştur. Oysa konfeksiyon yan sanayi, üretim zincirinin kritik bir halkasını oluşturmasına rağmen, özellikle pazarlama sorunlarının sistematik analizi açısından yeterince ele alınmamıştır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu AAS yöntemiyle yapılandırılmış bir model üzerinden değerlendirerek doldurmayı hedeflemektedir. Çalışma, pazarlama sorunlarını etkileyen faktörler arasındaki karşılıklı bağımlılık ilişkilerini ve etkileşim düzeylerini dikkate alarak, sektör özelinde stratejik bir önceliklendirme sunmaktadır. Böylece literatürde eksik kalan, yan sanayi perspektifinden pazarlama sorunlarına odaklanan çok ölçütlü karar destek modeli yaklaşımı ilk kez detaylı biçimde önerilmektedir.

Genel olarak konfeksiyon yan sanayi, tekstil ve hazır giyim sektörünün ayrılmaz bir parçası olup oluşturulan katma değere önemli katkı sağlamaktadır. Her iki alanda sektördeki gelişme, rekabet gücü ve katma değerleri birbirlerine sağladıkları katkılar ile gerçekleştirmektedirler. Yan sanayinde gerçekleştirilen ilerleme ve gelişmeler tekstil ve hazır giyim sanayinin rekabet gücünü artırmaktadır

3. Materyal ve Metot

Günlük hayatta insanlar seçenekler arasında karar vermesi gereken durumlarla karşılaşabilirler. Karar alma süreçlerinde kullanılan birçok yöntem vardır. Çok kriterli karar alma yöntemleri bu yöntemler arasındadır. Çok kriterli karar verme yöntemleri arasında AAS yöntemi literatürde araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılmaktadır.

3.1. Analitik ağ süreci yöntemi

Saaty [20] analitik ağ süreci yöntemini geliştirmiştir. Yöntemin temeli, sorun üzerinde etkili olan kriterler ve bunlar arasındaki ilişki ve etkileşimdir. Yöntem, faktörler arasındaki ilişkileri göstermek için bir ağ yapısı

oluşturur. Bu ağ yapısında, faktörler arasındaki iç ve dış bağımlılıklar gösterilir. AAS yönteminin adımları aşağıdaki gibidir [21, 22]:

1. Adım: Sorunun belirlenmesi ve ağ yapısının oluşturulması: Karar vericiler bu aşamada öncelikle gerçek yaşam problemiyle ilgilenirler. Sorun için hedefler ve amaçlar belirlenir. Daha sonra, bu amaçlar için kriterler belirlenir. Kriterler arasındaki ilişkiler ve geri bildirimler oluşturulur. Bu ilişkilere göre bir ağ yapısı kurulur.

2. Adım: İkili karşılaştırma matrisleri: İkili karşılaştırma matrislerinin yapısı, kurulan ağ yapısındaki ilişkilere ve etkileşimlere göre oluşturulur. Her etkileşimli kriter, Saaty'nin [23] 1-9 ölçeği kullanılarak birbirine göre değerlendirilir. Tablo 3, Saaty'nin 1-9 ölçeğini göstermektedir.

Tablo 3. Saaty'nin 1-9 ölçeği.

Önem derecesi	Açıklama
1	Eşit önem
3	Orta önemli
5	Güçlü önemli
7	Çok güçlü önemli
9	Son derece önemli
2,4,6,8	Ara değerler

Tablo 3'e göre, bir kriteri başka bir kriterle karşılaştırırken önem derecesi için bir değer alınır. Bu değerlendirmeleri konunun uzmanları yapar. Uzman sayısı fazla olduğunda, bu değerlendirmeler geometrik ortalama yardımıyla birleştirilir.

3. Adım: Süper matrislerin elde edilmesi: Kriterlerin öncelik değerlerini elde etmek için, bir süper matris matris yapısı oluşturularak hesaplamalar yapılır. İkili karşılaştırma matrislerinden elde edilen öncelik vektörlerinin değerleri bu matrislere yerleştirilir. Süper matris yapısı, ağırlıksız, ağırlıklı ve limit süper matris olmak üzere üç farklı matris yapısından oluşur. Ağırlıksız süper matris, İkili karşılaştırma matrislerinden gelen değerleri içerir. Ağırlıklı süper matris yapısı, tüm değerlerin özvektör değeri ile çarpılmasıyla oluşturulur. Limit süper matrisi, ağırlıklı süper matrisin birden fazla üssü (2k+1) alınarak elde edilir.

4.Adım: Öncelik önem ağırlıklarının hesaplanması: Limit süpermatris yapısı elde edildikten sonra, bu matris yapısındaki değerler kriterlerin önem ağırlıklarıdır. En yüksek değere sahip kriter en iyi kriter olarak ifade edilir.

Tekstil ve konfeksiyon sektöründe AAS'nin kullanım alanları:

- Risk değerlendirme: Çat vd. [24]
- Tedarikçi seçimi: Güngör vd. [25]; Utama vd. [26]
- Personel değerlendirilmesi: Tezcan vd. [27]
- Üretim hattı seçimi: Thalagahage vd. [28]
- Ürün güvenliği ve yönetimi: Chen vd. [29]; Xu vd. [30]

3.2. Problem tanımı

Konfeksiyon sektörünün sanayi içinde payı oldukça büyüktür. Bu sektör içinde yan sanayi ürünlerinin çeşitliliği üretilen ürünlerin katma değerini arttırmaktadır. Bu sebeple yan sanayi ürünlerine olan rağbet işletmeler tarafından oldukça fazladır. İşletmeler yan sanayi ürünlerinin tedarikinde sorunlar yaşamaktadır. Tekstil ve konfeksiyon sektöründeki rekabet göz önüne alındığında yan sanayi ürünlerine kolayca ulaşmak işletmeler için önemli bir stratejik hedeftir. Bu çalışmada da yan sanayi sektöründe yaşanan pazarlama sorunları ele alınmıştır. Pazarlama sürecinde karşılaşılan sorunlar ÇÖKV yöntemlerinden AAS yöntemi ile değerlendirilmiştir.

3.3. Çözüm süreci

Bu çalışmada, konfeksiyon yan sanayiinde pazarlama süreçlerinde karşılaşılan sorunların analizi ve bu analiz sonucunda işletmelere önerilerde bulunulması amaçlanmıştır. Analiz sürecinde ÇÖKV yöntemlerinden AAS yöntemi kullanılmıştır. Problemi etkileyen kriterler, literatürdeki çalışmalar incelenerek ve uzmanlara danışılarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, Köksal [5], Öndoğan [8], Ray ve Nayak [10], Bhagya vd. [11] ve Li [12] gibi çalışmalardan yararlanılmış; bu literatürde sıkça vurgulanan tedarik yönetimi, maliyet yönetimi, kalite, sürdürülebilirlik, teknoloji entegrasyonu ve lojistik & dağıtım gibi kriterler doğrudan modele entegre edilmiştir. Buna ek olarak, sektörde aktif olarak faaliyet gösteren iki işletme sahibi ve iki akademisyen ile yapılan görüşmeler aracılığıyla, literatürde daha az yer verilen fakat pratikte önemli olan talep tahminleri ve küresel etkiler ve dışsal faktörler gibi kriterlerin önemi vurgulanmış ve bu kriterler de modele dâhil edilmiştir. Değerlendirme sürecinde

iki akademisyen ve iki farklı işletme sahibi ile bir uzman grup oluşturulmuştur. Uzman grup içerisinde yer alan iki akademisyen, tekstil mühendisliği ve giyim üretim alanlarında uzmanlaşmış öğretim üyeleri ve en az 10 yıllık deneyime sahip, konfeksiyon yan sanayinde faaliyet gösteren işletmelerin kurucu ortakları ve pazarlama müdürleridir. Uzmanlardan, belirlenen kriterler arasındaki göreli önem düzeylerini Saaty'nin 1–9 ölçeğine göre ikili karşılaştırma matrisi formatında derecelendirmeleri istenmiştir. Uzmanların bireysel değerlendirmeleri toplandıktan sonra bütün değerlendirmeler geometrik ortalama ile birleştirilmiştir. Tablo 4'te problem üzerinde etkili olan kriterler ve açıklamaları yer almaktadır.

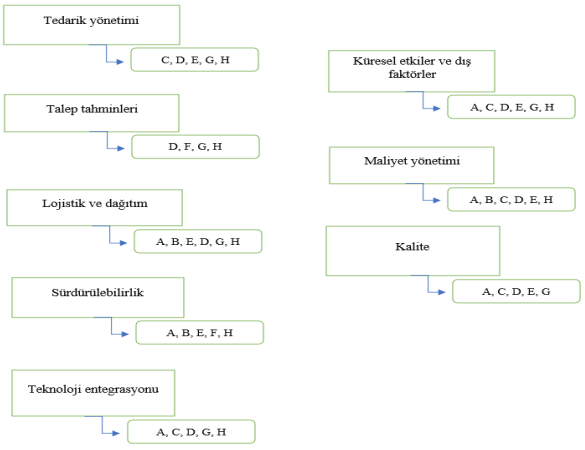
Tablo 4. Kriterler ve açıklamaları.

Kriter	**Açıklaması**
Tedarik yönetimi (A)	Ürünün tedarik aşamasından son halinin müşteriye ulaşması sürecini kapsayan tedarik zinciri, pazarlama sürecinde iyi yönetilmesi gereken bir unsurdur. Bu süreçte malzeme, bilgi ve para akışından yaşanılan aksaklık sürecin olumsuz etkilenmesine sebep olacaktır.
Talep tahminleri (B)	Talep tahminleri, işletmelerin varlıklarını devamını sağlama, geleceğe ilişkin stratejilerini sağlam temeller üzerine inşa edebilme imkanı sağlamaktadır.
Lojistik ve dağıtım (C)	Lojistik, tedarik zinciri içerisindeki hareketler olarak kısaca tanımlanabilir. Bu bağlamda veri akışının düzgün sağlanabilmesi için lojistik ve dağıtım faaliyetlerinin verimli bir şekilde planlanması ve kontrol edilmesi gerekmektedir.
Sürdürülebilirlik (D)	İşletmelerin uzun süreleri varlıklarını koruyabilmesi ve rekabet ortamında ayakta kalabilmeleri için sürdürülebilir üretim süreçlerini benimsemeleri gerekmektedir.
Teknoloji entegrasyonu (E)	Tekstil ve konfeksiyon sektöründe teknolojik entegrasyon ile operasyonel verimliliği arttırabilmek mümkün hale gelmiştir. Tüm süreçlere dahil edilen teknoloji ile işletmeler rekabet avantajı da kazanmaktadır.
Küresel etkiler ve dış faktörler (F)	İşletmeler dünya çapında meydana gelen ekonomik, politik, kültürel durumlardan etkilenmektedirler. Örneğin; küresel ekonomik krizler, iklim değişiklikleri, teknolojik gelişmeler ve uluslararası ticaret politikaları küresel ölçekte işletmeleri etkileyen faktörlerden sayılabilir.
Maliyet yönetimi (G)	İşletmeler için en büyük sorunlardan birisi işletme maliyetleridir. Gelir ve gider dengesini sağlayabilmek ve işletmenin küresel ortamda rekabet edebilmesi için maliyet yönetimini sağlayabilmek işletmeler açısından önemlidir.
Kalite (H)	İşletmelerin müşterilere sundukları ürünlerde mümkün olan en üst seviyede kaliteyi sunabilmeleri gerekmektedir. Sağlanan kalite güvencesi ile hataların en aza indirilmesi ve verimliliğin arttırılması mümkün kılınmaktadır.

3.4. Sayısal sonuçlar

Çalışmada kriterleri değerlendirmek için çok kriterli karar verme yöntemlerinden AAS yöntemleri kullanılmıştır. Kriterler arasındaki ilişkiler ve etkileşimler göz önüne alınarak bu yöntem tercih edilmiştir.

AAS yönteminin ilk adımı problem tanımlamadır. Problemin yapısı ortaya konulduktan sonra kriterler arasındaki ilişkiler göz önünde bulundurularak ağ yapısı kurulur. Şekil 2'de kriterler arasındaki ilişki ve etkileşimi gösteren ağ yapısı verilmiştir.



Şekil 2. Ağ yapısı.

Şekil 2'ye göre teknoloji entegrasyonu kriteri tedarik yönetimi, lojistik ve dağıtım, maliyet yönetimi kriterlerini etkilerken; sürdürülebilirlik kriteri tedarik yönetimi, kalite, küresel etkiler ve dış faktörler, talep tahminleri ve teknoloji entegrasyonu kriterlerini etkilemektedir. Benzer şekilde birbiriyle ilişkili kriterler bu şekilde ifade edilmektedir. Şekil 2'de verilen ağ yapısı sembolik olarak oluşturulmuştur. Ağ yapısı kurulduktan sonra ilişkilerine göre ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmaktadır. Örnek karşılaştırma matrisi Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Örnek karşılaştırma matrisi.

Kalite	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Küresel etkiler
Kalite	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Talep tahminleri
Kalite	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Tedarik yönetimi
Kalite	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Teknoloji entegrasyonu
Küresel etkiler	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Talep tahminleri
Küresel etkiler	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Tedarik yönetimi
Küresel etkiler	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Teknoloji entegrasyonu
Talep tahminleri	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Tedarik yönetimi
Talep tahminleri	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Teknoloji entegrasyonu
Tedarik yönetimi	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Teknoloji entegrasyonu
Kalite	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Küresel etkiler
Kalite	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Maliyet
Kalite	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Sürdürülebilirlik
Küresel etkiler	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Maliyet
Küresel etkiler	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Sürdürülebilirlik
Maliyet	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Sürdürülebilirlik
Kalite	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Lojistik ve dağıtım
Kalite	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Maliyet
Kalite	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Sürdürülebilirlik
Kalite	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Teknoloji entegrasyonu
Lojistik ve dağıtım	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Maliyet
Lojistik ve dağıtım	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Sürdürülebilirlik
Lojistik ve dağıtım	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Teknoloji entegrasyonu
Maliyet	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Sürdürülebilirlik
Maliyet	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Teknoloji entegrasyonu
Sürdürülebilirlik	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Teknoloji entegrasyonu

AAS yönteminin hesaplama sürecinde Super Decision paket programı kullanılmaktadır. Paket programda ilişkiler kurulduktan sonra ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmaktadır. Uzmanlar bu karşılaştırmaları yaptıktan sonra program yardımı ile özvektör değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. AAS yöntemiyle elde edilen özvektör değerleri.

Kriter	Kriter Ağırlığı
Tedarik yönetimi	0,160
Talep tahminleri	0,091
Lojistik ve dağıtım	0,077
Sürdürülebilirlik	0,158
Teknoloji entegrasyonu	0,121
Küresel etkiler ve dış faktörler	0,147
Maliyet yönetimi	0,136
Kalite	0,111

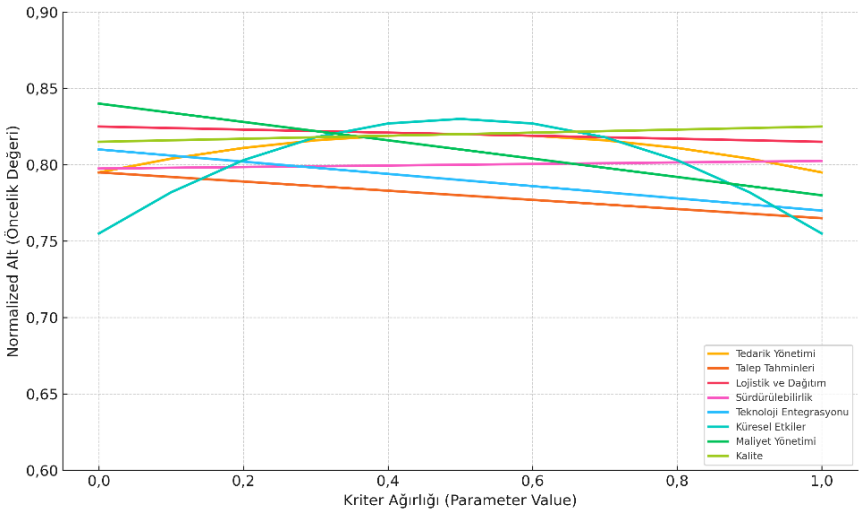
AAS yöntemi ile elde edilen bulgular doğrultusunda, konfeksiyon yan sanayiinde pazarlama süreçlerini en çok etkileyen kriterler sırasıyla tedarik yönetimi (0,160), sürdürülebilirlik (0,158), küresel etkiler ve dışsal faktörler (0,147), maliyet yönetimi (0,136) olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, sektördeki işletmelerin karşılaştığı pazarlama problemlerinin tedarik zinciri kesintileri, sürdürülebilirlik baskıları, küresel krizlerin etkileri ve maliyet dalgalanmaları ekseninde yoğunlaştığını göstermektedir. Tedarik yönetimi kriterinin en yüksek ağırlıkla öne çıkması, konfeksiyon yan sanayiinde üretimin büyük ölçüde hammaddeye hızlı ve güvenilir erişime bağlı olduğunu göstermektedir [5]. Konfeksiyon yan sanayi sektörü, büyük ölçüde zamanında ve kesintisiz tedarik zinciri akışına bağlı olarak faaliyet göstermektedir. Küçük ve orta ölçekli işletmelerden oluşan yapı, hammadde ve tamamlayıcı ürünlerin eksiksiz ve zamanında temin edilememesi durumunda üretim hatlarını doğrudan durma noktasına getirebilmektedir.

Sürdürülebilirlik kriterinin ikinci sırada yer alması, son yıllarda sektörün karşı karşıya olduğu çevresel baskılarla ilişkilidir. Ray ve Nayak [10], sürdürülebilir moda stratejilerinin özellikle tedarik zincirinde yeniden yapılanma ihtiyacını beraberinde getirdiğini belirtmiştir. Bu bağlamda, çevresel regülasyonlara uyum, malzeme geri dönüşümü ve karbon ayak izi gibi konular artık yalnızca kurumsal sosyal sorumluluk değil, pazarlama başarısının da belirleyici faktörleri haline gelmiştir. Özellikle Avrupa Birliği ülkeleri başta olmak üzere pek çok dış pazar, ürünlerin çevresel etki analizlerini ve geri dönüştürülebilirlik oranlarını talep etmektedir.

Küresel etkiler ve dışsal faktörler ise COVID-19 pandemisi sonrası dönemde döviz kuru dalgalanmaları, tedarik gecikmeleri ve enerji krizleriyle birlikte işletmelerin operasyonel belirsizliklerle mücadele ettiğini göstermektedir. Bu durum, Li'nin [12] dijital dönüşüm ve dışsal etkilerin perakende ve tedarik zinciri yönetimi üzerindeki etkisini analiz ettiği çalışmasıyla paralellik göstermektedir.

Maliyet yönetimi kriterinin yüksek önceliğe sahip olması özellikle enerji, lojistik ve işgücü maliyetlerindeki artış, işletmelerin fiyatlandırma stratejilerini doğrudan ilişkilidir. Öndoğan [8] hazır giyim sektöründe maliyetlerin özellikle dağıtım ve finansal giderler üzerinden pazarlama performansını etkilediğini ifade etmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, AAS yöntemiyle yapılan analiz, pazarlama sorunlarının birbirinden bağımsız olmadığını birbiriyle etkileşimli yapılar içerdiğini ortaya koymuş, bu da yöntem seçiminin doğruluğunu desteklemiştir.

AAS yönteminde duyarlılık analizi, modelde yer alan kriterlerin ağırlıklarındaki değişimlerin alternatiflerin öncelik değerleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu analiz sayesinde, karar vericiler sistemin hangi kriterlere daha hassas olduğunu belirleyebilmekte ve modelin karar istikrarı test edilebilmektedir. Super Decisions yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen bu analizde, seçilen bir kriterin ağırlığı belirli aralıklarla artırılıp azaltılarak alternatiflerin öncelik sıralamasındaki değişim grafiksel olarak izlenebilmekte; bu sayede kararın hangi kriter düzeylerinde kırılma noktası yaşadığı tespit edilmektedir [31]. Bu çalışmada değerlendirilmesi gereken alternatif yapısı olmadığı için duyarlılık analizinin yapılabilmesi için çözüm sürecine sahte alternatifler eklenmiştir ve kriterlerin ne derece güvenilir olduğu görülmüştür. Şekil 3'te kriterlerin duyarlılık analizi grafikleri toplu olarak verilmiştir.



Şekil 3. Her bir kriterin güvenirliğini gösteren duyarlılık analizi.

Şekil 3'te, karar verme sürecinde değerlendirilen sekiz kriterin öncelik değerlerinin parametre ağırlıklarındaki değişimlere karşı gösterdiği duyarlılık (sensitivity) eğrileri sunulmaktadır. Grafik, her bir kriterin ağırlığının 0 ile 1 arasında sistematik olarak değiştirilmesi durumunda, nihai alternatiflerin öncelik değerlerinin nasıl etkilendiğini göstermektedir. Böylece karar modelinin ağırlık değişimlerine karşı ne derece stabil olduğu değerlendirilmektedir. Yapılan duyarlılık analizine göre, modelde yer alan sekiz kriterin ağırlıklarındaki değişim, alternatifler arasındaki öncelik sıralamasında anlamlı bir değişime yol açmamaktadır (Bu çalışmada değerlendirilmesi gereken alternatif yapısı olmadığı için duyarlılık analizinin yapılabilmesi için çözüm sürecine sahte alternatifler eklenmiştir). Grafiklerde gözlemlenen eğrilerin hiçbirinin kesişmemesi, kararın tüm kriter ağırlığı varyasyonlarına karşı kararlı olduğunu göstermektedir. Eğrilerde görülen küçük dalgalanmalar, belirli kriterlerin ağırlığı arttıkça veya azaldıkça alternatifler arasındaki farkların nasıl etkilendiğini göstermektedir. Örneğin, "Maliyet Yönetimi" kriteri ağırlığı artırıldığında bazı alternatiflerin öncelik değeri hafifçe azalırken, "Teknoloji Entegrasyonu" kriteri artan ağırlıkla birlikte daha belirgin bir etki yaratmaktadır. Bu durum, karar vericilere hangi kriterlerin daha hassas ve etkili olduğunu analiz etme olanağı sunmaktadır. Bu bulgu, modelin yüksek derecede karar güvenliği (decision confidence) sunduğunu ve kriter ağırlıklarında küçük sapmaların karar sonuçlarını etkilemediğini ortaya koymaktadır.

4. Sonuç ve Tartışma

Konfeksiyon ve hazır giyim sektörünün ayrılmaz bir parçası durumundaki yan sanayindeki üretim ve ihracat küresel ölçekte önemli bir yere sahiptir. Küresel açıdan konfeksiyon yan sanayi üretimi değerlendirildiğinde Çin gelişen ülkeler arasında yer almakta olup diğer ülkeler arasında yüksek üretimi ve ihracat kapasitesine sahiptir. Birçok üründe dünya pazarını yönlendiren Çin'in yanı sıra gelişen ülkeler arasında yer alan Türkiye ve Vietnam da Çin'e göre küçük ölçekte de olsa üretime ve ihracata sahip ülkelerdir. Üretim açısından gelişen ülkeler içinde Hindistan, Tayland, Romanya, Endonezya ve Macaristan yer almaktadır. Daha çok katma değerli ürünler üreten ve üretim ölçekleri daha sınırlı olarak ihracat yapan gelişmiş ülkeler ise Almanya ve İtalya'dır. Üretim süreçlerinde teknolojik açıdan öncü olarak değerlendirilen gelişmiş ülkeler ise ABD, Japonya, Güney Kore, Tayvan, İspanya ve Fransa olarak sıralanmaktadır.

Tekstil, hazır giyim ve konfeksiyon yan sanayi ürün geliştirme, üretim ve katma değer açısından birbirlerini etkileyen ve birbirlerinden etkilenen alanlardır. Bu açıdan bakıldığında konfeksiyon yan sanayinde yaşanacak gelişmeler doğrudan tekstil ve hazır giyim sanayinin rekabet gücünü de artırmaktadır. Yan sanayideki üretim süreçlerinde tedarik yönetimi, talep tahminleri, lojistik ve dağıtım, sürdürülebilirlik, teknoloji entegrasyonu, küresel etkiler ve dış faktörler, maliyet yönetimi ve kalite gibi faktörlerin doğru yönetilmesiyle işletmeler ilerleme ve gelişme kaydetmektedirler. Bu bakımdan çoğunlukla küçük ve orta ölçekli işletmelerden oluşan konfeksiyon yan sanayinde üretim ölçeklerinin büyütülmesi oldukça önem teşkil etmektedir. Doğrudan ihracatında yapıldığı yan sanayi ürünlerinde küresel açıdan yenilikçi, performansı yüksek, maliyetli, ihtiyaca yönelik ürün üretimleri işletmelerin ilerleme ve büyümelerine katkılar sağlamaktadır. Maliyet açısından yan sanayi işletmelerinde kullanılan girdilerin tutarlılığının sağlanmasıyla pazarda oluşabilecek haksız rekabetin önüne geçilebilir. Küçük ve orta ölçekli işletmelerden oluşan konfeksiyon yan sanayinde kalite ve markalaşma önemli konular arasında yer almakta olup işletmelerin sürdürülebilirlik kriterlerini doğrudan etkilemektedir. Konfeksiyon yan sanayi işletmelerdeki büyüme, tekstil ve hazır giyim sektörü ile paralel ilerleme kaydedilerek inovasyon ve ürün geliştirme öncellikleriyle hareket edilmelidir. Modanın da itici güç oluşturduğu bu alanlarda genel olarak ürün çeşitliliğinin arttırılması, yeni eğilimlere cevap verebilecek ürünlerin geliştirilmesi, alıcıların sürdürülebilirlik konusundaki talepleri üretim süreçlerini sürekli şekillendirmektedir. Sektörde yer edinen yeşil üretim kavramı ile üretim koşulları ve kullanılan malzemelerin çevreci, geri dönüştürülebilir ve sıfır atık veya az atık prensibiyle üretilmesi yaklaşımları benimsenmekte ve güçlenmektedir. Bu yaklaşımlarla yan sanayide malzemelerin içerik bazlı (tekstil, metal, plastik, kâğıt vb.) geri dönüştürülmesi alana ciddi olarak katkı sağlamaktadır.

AAS yöntemi ile elde edilen bulgular ışığında, pazarlama süreçlerini etkileyen kriterler arasında tedarik yönetimi en yüksek ağırlıkla (%16) öne çıkmıştır. Bu bulgu, üretim sürecinde yaşanan gecikmelerin ve aksaklıkların çoğunlukla hammadde ve yardımcı malzeme teminindeki düzensizliklerden kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Yan sanayi işletmeleri, özellikle yerli üretim tedarikçilerinin sınırlı kapasitesi ve ithal girdilere bağımlılık nedeniyle malzeme temininde süreklilik sağlayamamaktadır. Tedarik sürecinde yaşanan gecikmeler, üretim takvimini sekteye uğratmakta ve pazara zamanında ürün sunulamamaktadır. Bu nedenle, yan sanayi işletmelerinin dijital tedarik zinciri sistemlerine (örneğin ERP, SCM yazılımları) yatırım yapmaları, alternatif tedarikçi havuzları oluşturarak esnek tedarik altyapısı kurmaları stratejik öneme sahiptir.

İkinci en yüksek öneme sahip kriter olan sürdürülebilirlik (%15,8), özellikle uluslararası pazar taleplerinin ve çevreye duyarlı üretim beklentilerinin firmalar üzerinde oluşturduğu baskıyı yansıtmaktadır. Uluslararası alıcıların

sürdürülebilirlik taleplerine yanıt veremeyen işletmeler, dış pazarlarda yer bulmakta zorlanmaktadır. Geri dönüştürülemeyen malzemeler, yüksek enerji tüketimi ve çevresel uyumsuzluk, pazarlama stratejilerini zayıflatmaktadır. Bu durum, çevre dostu malzemelerin kullanımının artırılması, üretim süreçlerinin karbon ayak izi açısından optimize edilmesi ve yeşil üretim belgelerinin alınması gibi çevresel sürdürülebilirlik politikalarının işletmelerin rekabet gücünü artırabileceğini göstermektedir. Üçüncü sırada yer alan küresel etkiler ve dışsal faktörler (%14,7), pandemiler, enerji krizleri, döviz kuru dalgalanmaları ve ticaret politikaları gibi makro düzeydeki gelişmelerin pazarlama performansı üzerindeki yıkıcı etkilerini göstermektedir. Bu bağlamda firmaların esnek üretim planları oluşturması ve döviz bazlı maliyet planlaması ile kur riskini minimize etmesi önerilmektedir.

Maliyet yönetimi (%13,6) de yüksek öneme sahip kriterlerden biri olarak dikkat çekmektedir. Özellikle artan enerji, işçilik ve lojistik giderleri göz önüne alındığında, üretim süreçlerinin yalınlaştırılması, atıl kapasitenin azaltılması ve enerji verimliliği sağlayacak yatırımların teşvik edilmesi gerekmektedir.

Teknoloji entegrasyonu kriteri (%12,1), dijital dönüşüm sürecine yeterince dahil olamayan firmaların rekabet avantajını kaybettiğine işaret etmektedir. Bu kapsamda firmaların dijital pazarlama, e-ticaret altyapısı, üretim otomasyonu gibi alanlarda teknolojiye dayalı çözümler geliştirmesi stratejik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Kalite kriteri (%11,1) ise, müşteri memnuniyeti ve marka sadakati açısından önemli bir unsur olarak değerlendirilmektedir. Kalite standartlarının artırılması, üretim süreçlerinde hataların azaltılması, ISO belgelerinin alınması ve müşteri geri bildirim sistemlerinin etkinleştirilmesi bu kapsamda önerilmektedir. Göreli olarak daha düşük ağırlıklara sahip olan talep tahminleri (%9,1) ve lojistik ve dağıtım (%7,7) kriterleri, karar verme sürecinde ikinci düzeyde önemli görülmekle birlikte özellikle ani talep değişimlerine karşı yapay zekâ tabanlı tahminleme sistemlerinin kullanılması ve depo/dağıtım altyapısının güçlendirilmesi yönünde dikkat çekici fırsatlar sunmaktadır.

Konfeksiyon yan sanayi işletmelerindeki ilerlemeler; modernizasyon yatırımlarının teknolojik entegrasyon ile hayata geçirilmesi, güvenli tedarik zinciri ile yurtdışı markalarla işbirliklerinin oluşturulması, çağın gerekliliği olan dijitalleşme süreçlerinin teşvik edilmesi, nitelikli işgücü ihtiyacını karşılamada gerekli eğitimsel adımların atılması, ürün çeşitliliği ile birlikte AR-GE, ÜR-GE faaliyetlerinin sürdürülebilirlik süreçlerine uyumlu hale getirilmesi, üretimlerde bir kalite standardının sağlanması gibi birçok etmene bağlı olarak gerçekleştirilebilir. Tekstil ve hazır giyim alanlarından beslenen ve bu alanların tedarik zinciri konumundaki konfeksiyon yan sanayinde son yıllarda üretimlerde gerçekleştirilen ürün çeşitliliği ve kalite standardı ile sürekli bir ilerleme kaydedilmektedir.

Kaynaklar

[1] URL-1: Konfeksiyon Yan Sanayi Sektör Raporları, https://www.iso.org.tr/Sites/1/upload/files/konfeksiyon_raporu_16.05.2024-12258.pdf Erişim Tarihi: 22.01.2025

[2] URL-2: Türkiye İhracatçılar Meclisi, İhracat 2024 Raporu, https://tim.org.tr/files/downloads/Strateji_Raporlari/ihracat_2024_raporu.pdf Erişim Tarihi: 05.01.2025

[3] URL-3: Hazır Giyim ve Konfeksiyon Sektörü 2024 2.Çeyrek Raporu, https://btso.org.tr/documents/sectoralreport/196.pdf Erişim Tarihi: 10.02.2025

[4] URL-4: Türkiye Konfeksiyon Yan Sanayi Sektörü: Vizyon 2030, https://www.kalkinmakutuphanesi.gov.tr/assets/upload/dosyalar/turkiye-konfeksiyon-yan-sanayi-sekt-c3-b6r-c3-bc.pdf Erişim Tarihi: 10.02.2025

[5] Haluk Köksal M. Konfeksiyon yan sanayiinde üretim uygulamaları, sorunları ve çözüm önerileri: Fermuar sektöründe bir alan çalışması. Yönetim ve Ekonomi Dergisi, 1995; 8(2): 69-80.

[6] Eraslan İH, Bakan İ, Helvacıoğlu Kuyucu AD. Türk tekstil ve hazırgiyim sektörünün uluslararası rekabetçilik düzeyinin analizi. 2008; 7(13): 265-300.

[7] Kotler P, Wong V, Saunders J. Principles of marketing 5.ed. Pearson Education, Prentice Hall, 2008; pp.7

[8] Öndoğan EN. Hazır giyim sektöründe pazarlama maliyetleri. Turkish Journal of Fashion Design and Management, 2019; 1(1): 1-12.

[9] Bakır NO, Koncuk G. Sanayi ve hizmet sektöründe faaliyet gösteren Kobi'lerin iç pazardaki pazarlama sorunlarının incelenmesi ve keşifsel bir araştırma. İşletme Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi, 2020; 3(1): 51-81.

[10] Ray S, Nayak L. Marketing sustainable fashion: trends and future directions. Sustainability, 2023; 15(7): 6202.

[11] Bhagya KPN, Karunaratne PVM, Ranathunga GM, Ranaweera A. Fashion niche market strategies: a systematic literature review. Journal of Fashion Marketing and Management: An International Journal, 2024; 29(1): 137-163.

[12] Li Y. Research on the marketing strategy of apparel retail ındustry under digital transformation. Proceedings of the 8th International Conference on Economic Management and Green Development, 2024; pp. 148-154.

[13] Koç F N. Dijital pazarlamanın metaverse fenomenine sunduğu fırsatlar ve sınırlılıklar: Tekstil sektörü incelemesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İşletme Ana Bilim Dalı, 2023.

[14] Brun A, Castelli C. Supply chain strategy in the fashion industry: Developing a portfolio model depending on product, retail channel and brand, Int J Prod Econ, 2008; 116(2), 169-181.
[15] Li Y, Zhou L, Cheng Y, Qu P, Yang Y. Simulation and influencing factors of carbon emission peak in Wenzhou's textile and clothing industry. Industria Textila, 2022; 73(3).
[16] Reinli M, Pettersson A. Marketing transparency in the Swedish textile ındustry: A thesis about marketing transparency on digital platforms. Independent thesis, Uppsala University, Advanced level, 2021.
[17] Novianty N, Wibowo SA. Proposed integrated marketing communications strategy to ıncrease brand awareness and sales of women apparel. Hijab Sabine, 6(6), 3754-3771.
[18] Lu Y. Thailand textile and garment industry: international market opportunities from an economic perspective. Master of Arts, Chulalongkorn University, 2023.
[19] Çetiner M, Tunca MZ. A literature review on sustainable fashion marketing. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 2022; 27(2), 391-315.
[20] Saaty TL. Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/AAS). J Syst Sci Syst Eng, 2004; 13, 1-35.
[21] Sevinc A, Gür Ş, Eren T. Analysis of the difficulties of SMEs in industry 4.0 applications by analytical hierarchy process and analytical network process. Processes, 2018; 6(12), 264.
[22] Alakaş HM, Gür Ş, Özcan E, Eren T. Ranking of sustainability criteria for industrial symbiosis applications based on AAS. J Environ Eng Landscape Manage, 2020; 28(4), 192-201.
[23] Saaty TL. Basic theory of the analytic hierarchy process: how to make a decision. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas Fisicas y Naturales, 1999; 93(4), 395-423.
[24] Çat F, Kocaağa S, Ercin EM, Gündüz T, Özalp BT. Tekstil sektöründe risk değerlendirmelerinin AAS yöntemi ile analizi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 2022; 27(2), 597-616.
[25] Güngör A, Coşkun S, Durur G, Gören HG. A supplier selection, evaluation and re-evaluation model for textile retail organizations. Textile and Apparel, 2010; 20(3), 181-187.
[26] Utama DM, Maharani B, Amallynda I. Integration Dematel and AAS for the supplier selection in the textile industry: A case study. Jurnal Ilmiah Teknik Industri, 2021; 20(1), 119-130.
[27] Tezcan B, Eren T, Özcan E, Gür Ş. Bir tekstil işletmesinde çok ölçütlü karar verme yöntemleri ile personellerin değerlendirilmesi. Trakya Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi E-Dergi, 2019; 8(2), 1-20.
[28] Thalagahage NTH, Wijayanayake A, Niwunhella DHH. Developing a multi criteria decision making framework to select the most suitable production line in apparel firms: Use of AAS method. In International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Singapore, 2021; March 9, 11.
[29] Chen L, Yan X, Gao C. Developing an analytic network process model for identifying critical factors to achieve apparel safety. The Journal of The Textile Institute, 2016; 107(12), 1519-1532.
[30] Xu W, Wang L, Zhuang Q, Yu N, Guan M, Tian Z, Huang J. Management of products in the apparel manufacturing industry using DEMATEL-based analytical network process technique. Oper Manage Res, 2024; 1-14.
[31] Mu E, Pereyra-Rojas M. Practical decision making: an introduction to the Analytic Hierarchy Process (AHP) using super decisions V2. Springer, 2016

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 635-649, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1657782

Experimental Investigation of the Use of Refrigerant in the Cooling System of the Internal Combustion Engine: Preliminary Study

Yavuz Selim KAYALI[1], Tahsin YUKSEL[2], Abdullah KAPICIOGLU[3*]
[1] Institute of Science and Technology, Sivas Cumhuriyet University, Sivas, Türkiye
[2] Department of Mechatronic Engineering, Sivas Cumhuriyet University, Sivas, Türkiye
[3] Department of Manufacturing Engineering, Sivas Cumhuriyet University, Sivas, Türkiye
[1] yavuzselimkayali94@gmail.com, [2] tyuksel@cumhuriyet.edu.tr, [*3]akapicioglu@cumhuriyet.edu.tr

(Geliş/Received: 14/03/2025; Kabul/Accepted: 08/07/2025)

Abstract: A new cooling system has been designed to reduce the adverse effects of the cooling system used in internal combustion engines and to create a more efficient system. R134a gas was used as the refrigerant in the engine cooling system in the experimental setup set up for the preliminary study. The cooling effect of gas masses of different weights (400, 450, 500, 550, 600 g) filled into the cooling system for cooling the simulated cylinder fixed at different temperatures (50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 °C) was determined. By measuring the temperature and pressure values in the system, comparisons were made by calculating the heat transfer coefficient, fluid flow rate and heat transfer rates of the system. The most efficient fluid weight used in the study was determined as 550 g. In the system without a circulation pump, the pressure difference between the heat receiving and heat giving sections allows the refrigerant gas to circulate. It has been observed that this situation is made possible by the increase in the heat transfer coefficient depending on the temperature increase. The absence of a pump in the system will contribute to engine performance. Having the refrigerant in gaseous form will enable smaller engine structures, lower vehicle weight, less fuel consumption and less exhaust emissions.

Keywords: Internal combustion engines, cooling system, R134a, refrigerants, heat transfer rate.

İçten Yanmalı Motorun Soğutma Sisteminde Soğutucu Akışkan Kullanımının Deneysel İncelenmesi: Ön Çalışma

Öz: İçten yanmalı motorlarda kullanılan soğutma sisteminin olumsuz etkilerini azaltmak ve daha verimli bir sistem oluşturmak amacıyla yeni bir soğutma sistemi tasarlanmıştır. Ön çalışma için kurulan deney düzeneğinde, motor soğutma sisteminde soğutucu akışkan olarak R134a gazı kullanılmıştır. Farklı sıcaklıklarda (50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 °C) sabitlenmiş simüle edilmiş silindiri soğutmak için soğutma sistemine doldurulan farklı ağırlıklardaki (400, 450, 500, 550, 600 g) gaz kütlelerinin soğutma etkisi belirlenmiştir. Sistemdeki sıcaklık ve basınç değerleri ölçülerek sistemin ısı transfer katsayısı, akışkan debisi ve ısı transfer hızları hesaplanarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışmada kullanılan en verimli akışkan ağırlığı 550 g olarak belirlenmiştir. Sirkülasyon pompası olmayan sistemde, ısı alan ve ısı veren bölümler arasındaki basınç farkı, soğutucu gazın dolaşımına olanak sağlamaktadır. Bu durumun, sıcaklık artışına bağlı olarak ısı transfer katsayısının artmasıyla mümkün olduğu gözlemlenmiştir. Sistemde pompa bulunmaması, motor performansına katkı sağlayacaktır. Soğutucu akışkanın gaz halinde olması, daha küçük motor yapıları, daha düşük araç ağırlığı, daha az yakıt tüketimi ve daha az egzoz emisyonu sağlayacaktır.

Anahtar kelimeler: İçten yanmalı motorlar, soğutma sistemi, R134a, soğutucu akışkanlar, ısı transfer oranı.

1. Introduction

Transportation has become an indispensable element of daily life. It is a connecting bridge between production and consumption. At the same time, besides being an indicator of development, it has also undertaken an essential economic and social development task. Vehicles, which are means of transportation, are in constant motion to realize this critical mission. Internal combustion engines provide an essential part of the energy needed for the movement of vehicles. While using this important vehicle is aimed to achieve the highest performance with the least fuel consumption and to give the least damage to the environment for humanity. In order to achieve the highest engine performance, the engine cooling system has important duties to provide fuel economy and to keep harmful emission values at low levels. Therefore, the differences in the studies in this direction of the researchers are high and varied. Recently, they have focused on using nano-refrigerants in the cooling system [1–6]. As a result of the studies, it has also been seen that lower-volume engines can be produced with the same power. In

[*] Sorumlu yazar: akapicioglu@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1]0000-0003-3237-9003, [2]0000-0003-3238-9113, [3]0000-0003-2982-0312

addition, It is possible to diversify research on cooling systems with the cylinder and piston surface coating method [7], with the technique of using different radiator materials [8], with the use of various additives included in the fuel [9], with the addition of additives to the engine oil [10], with the anti-wear studies [11], by making new engine part designs [12, 13] etc. with different studies.

The cooling system's responsibility is to keep the vehicle engine's temperature within the desired limit. This responsibility is to remove excess heat generated by the internal combustion engine to prevent overheating engine parts and engine oil [14]. In the cooling systems of internal combustion engines, either air or liquid refrigerant coolers are used. While air or liquid coolants prevent the engine from overheating, at the same time also undertake the task of enabling the highest engine performance to be obtained. However, to avoid damaging the engine parts of the heat energy obtained in the engine cylinders, it is a must that some of it is discharged to the outside through the cooling system without being used. However, in order not to damage the engine parts of the heat energy obtained in the engine cylinders, it is a necessity that some of it are discharged to the outside through the cooling system without being used. The instantaneously occurring temperature of approximately 2000 °C in the cylinder decreases to an average value with the cold mixture entering the combustion chamber. The temperature at which the engines are theoretically most efficient is considered to be between 500 - 900 °C, depending on the structure of the engines and the work they will do.

Considered the thermal and mechanical strengths of the engine parts, the high temperatures occurring in the cylinder must be removed from the engine [15]. The cooling system used to fulfill this task removes 33-39% of the heat energy released by the combustion of fuel in gasoline engines and 28-35% in diesel engines [16]. Along with that, even this average temperature reduces the mechanical strength of the engine parts [17].

Air-cooled systems cause significant reductions in engine performance in hot climate conditions. The air-refrigerant cooling system is simple and is generally preferred for cold climate conditions. On the other hand, a liquid refrigerant cooling system is preferred for all-season conditions. The pump that circulates refrigerants in both air-refrigerant and liquid-refrigerant cooling systems causes the engine power to decrease [18]. On the other hand, ethylene glycol, which is used to improve the boiling and freezing points of the refrigerant in liquid refrigerant cooling systems, adversely affects thermal conduction. Many studies have been carried out in the literature on cooling liquids and cooling systems in internal combustion piston engines. These studies show that it is possible to use refrigerants in different systems in the future, as well as that the cooling system in engines is open to development and change. The availability of gaseous refrigerants in engine cooling systems, which has yet to find a place in the literature, can be seen as one of these developments and change methods.

The preliminary study system installed can be thought of as the application of heat pipe design to the engine cooling system. Many studies on heat pipe systems have been carried out in the past. Domestic water heating [19] and automotive headlight cooling [20] are some of these works. In addition, many studies are being carried out today, such as cooling electronic systems such as mobile phones [21], air conditioning systems [22], and heating by utilizing geothermal resources [23]. The system, which is established with a heat pipe working logic in engine cooling systems, is thought to be an important preliminary study that needs to be worked on in this field. As stated above, it will be possible to eliminate the deficiencies in classical systems by using heat pipe design. The transportation of heat from a hot environment to a cold environment and the fact that no pumping mechanism is needed and at the same time refrigerant gases can be used in these systems is seen as a unique subject of study.

It is seen that R134a refrigerant, which is planned to be used as a refrigerant in the engine, has the possibility of being used in different current studies both experimentally and theoretically. For example, while evaluating the effect of R134a gas charge amounts on cooling in a system with variable compressor strokes [24], in the study conducted by Zhai et al. (2024) the flame retardancy properties of R134a gas was examined [25]. In addition, the comparison of the effect of using different amounts of R134a and R1234yf refrigerants in different amounts [26], as well as studies comparing these gases in terms of cooling are seen in the literature. In the studies that have been conducted, the statements that R134a is a better option [26–28] are included in these studies. At the same time, it is thought that the use of R134a refrigerant gas in the heat pipe, which can be preferred for space constraints in small-sized devices such as mobile phones and computers, will make significant contributions to engine cooling.

In the study a new cooling system using gaseous refrigerant as a coolant was studied to eliminate the existing deficiencies in the existing cooling systems and minimize the existing problems. Here, the possible contribution of the latent heat of evaporation of the refrigerant to the engine cooling performance is investigated. Gas refrigerants are an ideal option to solve the problems encountered in all climate conditions in cooling systems using air or liquid refrigerants. In other words, the problem of freezing in the refrigerant in winter conditions and the problems of boiling and overheating by insufficient cooling in summer season conditions will be eliminated. Since there will be no temperature difference around the cylinder when the engine is not running, there will be no refrigerant movement in engine cooling. However, the heat energy generated by the combustion effect that will

occur in the cylinder as a result of the engine's operation will lead to the realization of a forward and upward movement of the refrigerant by heating. In the cooling system, there will be no need to use a pump with the principle that the refrigerant will naturally circulate with the pressure change difference caused by the temperature effect. Therefore, it is seen as more advantageous than the classical systems used.

It is helpful to pay attention to the global warming potential (GWP) and ozone layer depletion potential (ODP) values in terms of the damages caused to the environment by the gases used as the refrigerant in the system, which is considered a new design. Hydrofluorocarbon (HFC) refrigerants used in cooling systems should have no or low global warming values within the framework of legal norms. Due to this situation, the EURO-F gas regulations, the Montreal Protocol, and the Kyoto protocol have placed significant restrictions on refrigerants with high global warming potential [29,30]. In addition to these values, it is important to determine whether the gases used as refrigerants are toxic and flammable. In this regard, gases have been determined by classifying them as seen in Table 1 below by ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). Thanks to this classification, the effects of gas refrigerants on health can be understood [31,32]. At the point of determining the refrigerants to be used, as it can be understood when Table 1 is examined, the importance of refrigerants with low toxicity levels and A1 level, which is the lowest level of toxicity, should be addressed. With a new cooling system design that is planned to be used, it is aimed at creating a more environmentally friendly product.

The aim of this study was to determine whether a gas phase refrigerant could be used in an internal combustion engine cooling system installed as a prototype. In the study, surface temperature values were determined by using different amounts of refrigerants, and heat transfer rates were calculated.

Table 1. ASHRAE classification.

		Toxicity	
		Low	**High**
Flammability	**High**	A3	B3
	Mid	A2	B2
	Low	A2L	B2L
	None	A1	B1

As far as the authors know, it will contribute to the literature since there is no experimental and theoretical study in this area. In addition, the structures of the cooling systems will undoubtedly be reduced thanks to the gaseous refrigerants planned to be used. The shrinkage that will occur in the cooling system will also allow the engine structure to shrink; therefore, the fact that it will affect the weight of the vehicle will also allow the fuel consumption to decrease. This will allow for the reduction of harmful emissions caused by internal combustion engines. It should not be ignored that it will positively affect both economic and environmental health by producing less harmful emissions with less fuel consumption.

2. Material and Method

2.1. Test refrigerant

R134a gas, whose properties are given in Table 2, is preferred as the refrigerant used in the internal combustion engine cooling system. The following features were taken into consideration in the selection of the gas:

- High latent heat of evaporation to benefit from phase change,
- Low boiling point in atmospheric conditions,
- To be harmless to the environment and human health,
- High critical temperature and pressure,
- No risk of chemical reaction depending on the system to be used,
- Not to cause corrosion,
- Easy supply and low cost.

Chlorofluorocarbon (CFC) dichlorodifluoromethane (CCl_2F_2), known as R12 from the ASHRAE classification, is a refrigerant widely used in refrigeration systems and air-conditioning after its discovery in the 1930s [33]. In addition, the fact that it is the gas closest to the properties of the R12 gas, which has been banned today, has also been influential in the choice made. Because R12 gas, due to its properties, has been used as a very effective gas in the field of cooling. As a result of the research made by the General Motors company, it was decided that the most useful one among the refrigerants developed was R12, which was named Freon. Mass production was started for R12 gas in 1931 [34]. In the Montreal Protocol, R134a gas has been proposed as an alternative refrigerant to R12 [35].

Table 2. Properties of R134a and R12 refrigerants [31,32,36,37].

Refrigerant	Refrigerant Group	Chemical Formula	Security Class	GWP	ODP	Critical temperature (°C)	Critical Pressure (Bar)	Boiling Point (°C)
R134a	HFC	CH_2FCF_3	A1	1300	0	101.1	40.59	-26.07
R12	CFC	CCl_2F_2	A1	10200	1	111.97	41.4	-29.75

2.2. Installation of the experimental mechanism

It aimed to calculate the convection heat transfer coefficient of the R134a refrigerant in the establishment of the experimental setup. The schematic view of the experimental setup is given in Fig. 1 and its installed state is given in Fig. 2. This setup aims to create a simulator of the cylinder structure in an internal combustion engine. While creating this structure, the copper cylinder represents the cylinder in the internal combustion engine. The engine oil filled into the cylinder was increased to different temperature values and used to reach the desired temperature values of the cylinder wall. With the spiral structure formed by wrapping a copper pipe around the cylinder, the heat taken from the cylinder is transferred to the radiator with the help of the same copper pipe. The refrigerant cooled in the radiator is provided to reach the entrance of the spiral structure around the cylinder with the copper return pipe. In this way, it has been aimed that the refrigerant heated around the cylinder will circulate and heat transfer within the copper pipe. Temperature values were recorded with the Graphtec GL240 data logger device with the help of T-type thermocouples placed in certain parts of the established experimental system. In addition, the pressure and temperature values of the gas circulating in the system during the operation were determined with the help of the Testo 550 digital manifold measuring device.

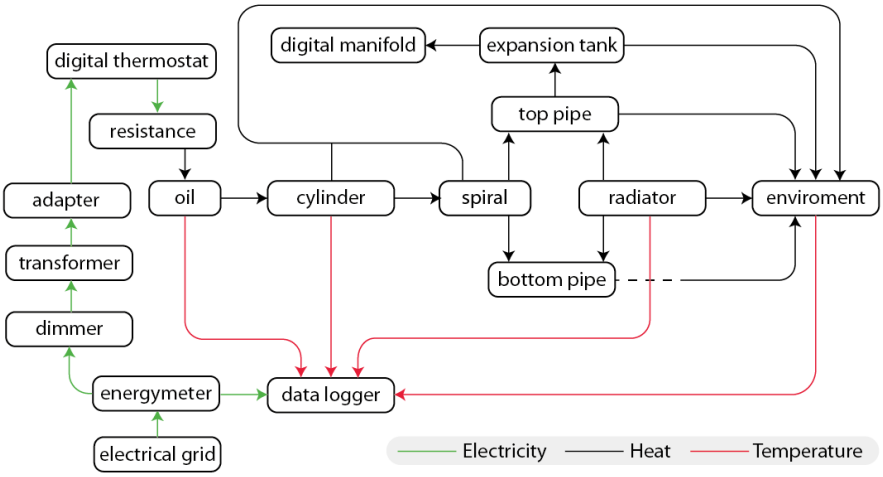


Figure 1. Experimental setup schematic.

After the system installation shown in Fig. 2, the air in the system was discharged with the help of a vacuum device to ensure the circulation of the gas refrigerant in the experimental setup. After this process, five different amounts of refrigerant (400, 450, 500, 550, and 600 g) were filled into the experiment system with the help of a digital scale.

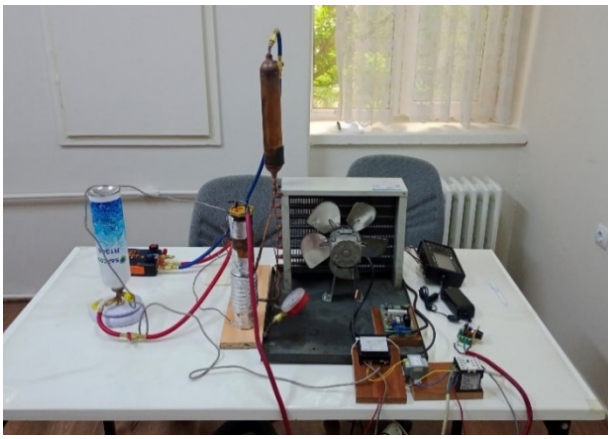


Figure 2. The experimental setup.

Thermocouple connections were made to the positions shown in Fig. 3 to see the temperature changes during the system's operation. The recorded temperature values were used in coordination with Excel and Refprop programs. Thermocouple positions and liquid-gas distribution in the system are visualized with solid models created using the Catia program.

2.3. Experiment process

Different amounts of refrigerant were filled into the system, and the oil temperature was fixed at the predetermined temperature value (50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, and 120 °C) at each filling. The aim here is to compare the test results obtained according to different refrigerant amounts and cylinder temperatures to determine the most efficient state of the system and to see its operability. Table 3 shows the experimentally studied refrigerant quantities and the studies carried out depending on the fixed cylinder temperatures.

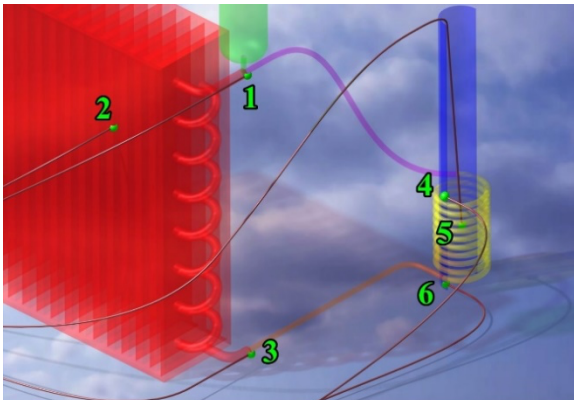


Figure 3. Thermocouple locations. (1. Radiator inlet, 2. Radiator fins, 3. Radiator outlet, 4. Spiral top end, 5. Oil, 6. Spiral bottom end).

Table 3. The number of experiments and variables.

Number of Experiments	**Refrigerant Amount** (g)	**Oil Temperature** (°C)
8	400	50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120
8	450	50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120
8	500	50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120
8	550	50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120
8	600	50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120

Experiments were repeated three times for each refrigerant amount seen in Table 3. During the experiments, the ambient temperature was set at an average of 20 °C. For each experiment, besides the temperature and pressure values of the gas, the temperature values obtained from the thermocouples placed at eight different points were recorded. Two thermocouples for oil temperature adjustment in the cylinder and one thermocouple for measuring the ambient temperature were positioned in the experimental environment. The remaining 5 thermocouples were connected to the radiator inlet, radiator outlet, radiator fins, and spiral top and bottom parts.

2.4. Calculation method

The temperature values obtained with the help of the thermocouples shown in Fig. 3 and the pressure values measured through the digital manifold have been used for the calculations. The calculation method is based on the principle that the total heat loss from the system to the experimental environment and the heat stored in the system is equal to the heat drawn from the spiral part. The convection heat transfer coefficient of the refrigerant was calculated based on the heat drawn from the system. The following equations were used to calculate the liquid-gas ratios of the liquid and gas phase refrigerant in the system [38]:

$$\vartheta ln\frac{P_{sat}}{P_{cr}} = -7.686556\,\theta + 2.311791\,\theta^{3/2} - 2.039554\,\theta^{2} - 3.583758\,\theta^{4} \tag{1}$$

Where P_{sat} (MPa) is the pressure of the saturated vapor (Eq. 1), P_{cr} (MPa) is the critical point pressure of the refrigerant (Eq. 1), $\vartheta = T_{sat}/T_{cr}$ is the ratio of the gas saturation temperature to the critical point temperature, $\theta = 1 - \vartheta$ is the ratio of the difference between the critical and gas $P_{cr} = -7.6$ saturation temperatures to the critical point temperature. The value of saturated liquid density (ρ')is calculated from Eq. 2 [38]:

$$\rho' = 518.2 + 884.13\,\theta^{1/3} + 485.84\,\theta^{2/3} + 193.29\,\theta^{10/3} \tag{2}$$

The density value of the saturated steam can be calculated with the help of Eq. 3 [38]:

$$ln\frac{\rho''}{\rho_0} = -2.837294\,\theta^{1/3} - 7.875988\,\theta^{2/3} + 4.478586\,\theta^{1/2} - 14.140125\,\theta^{9/4} - 52{,}361297\,\theta^{11/2} \tag{3}$$

Where ρ'' (kg/m^3) is the density of saturated steam, and ρ_0 is the reference density determined for this equation as 516.86 kg/m^3. The liquid-gas volumes of the refrigerant can be calculated [34] with the help of Eq.4:

$$x = \frac{v_T - v_{sat,l}}{v_{sat,g} - v_{sat,l}} = \frac{m_v}{m_T} \tag{4}$$

Where x degree of dryness, v_T (total specific volume) is the ratio of the total volume of the refrigerant in the system to the total mass, $v_{sat,l}$ *is* the specific volume of the saturated liquid, $v_{sat,g}$ is the specific volume of the saturated steam, m_v is the vapor mass and m_T is the total mass. Eq. 5 is used to calculate the convection heat transfer coefficient:

$$h_{\mathrm{R134a}} = \frac{Q_T}{A_{is}(T_{sat,avg} - T_{sat})} = \frac{Q_{rad} + Q_{p,t} + Q_{p,b} + Q_s + Q_{et} + Q_R}{A_{is}(T_{sat,avg} - T_{sat})} \tag{5}$$

Where h_{R134a} (W/m^{2}K) is the heat transfer coefficient of the R134a refrigerant, Q_T (W) is the total amount of heat drawn from the system, A_{is} (m^2) is the area from which the heat is drawn, that is, the inner surface area of the spiral, $T_{sat,avg}$ (K) is the average cylinder wall temperature obtained by averaging the temperature values measured from the thermocouple connections at the top and bottom of the spiral. $Q_{rad,}$ $Q_{p,t,}$ $Q_{p,b,}$ $Q_{s,}$ and Q_{et} (W) are the heat transferred to the surrounding environment from the radiator, top pipe, bottom pipe, spiral, and expansion tank regions shown in Fig. 3, respectively, and Q_R (W) is the heat stored in the refrigerant. For the regions shown in Fig. 3 was taken an average surface temperature value. Table 4 shows that the surface temperatures of these regions are calculated by averaging the temperatures of which thermocouple locations.

Table 4. Surface temperatures of the regions.

Region	Temperature Averaging Locations
Radiator ($T_{rad,avg}$)	Radiator inlet ($T_{rad,in}$), outlet ($T_{rad,out}$) and fin ($T_{rad,f}$) temperatures
Expansion Tank ($T_{et,avg}$)	Spiral top ($T_{s,up}$) and radiator inlet temperatures
Top Pipe ($T_{tp,avg}$)	Spiral top and radiator inlet temperatures
Bottom Pipe ($T_{bp,avg}$)	Spiral bottom ($T_{s,bp}$) and radiator outlet temperatures
Spiral ($T_{s,avg}$)	Spiral top and spiral bottom temperatures

The following equations (Eq. 6 and 7) are used to calculate the heat transfer from the system to the environment.

$$Q_{con} = hA_s(T_s - T_R) \tag{6}$$

Where Q_{con} (W) is the amount of heat transferred by convection, h (W/m^{2}K) is the convection heat transfer coefficient, A_s (m^2) is the area of the surface where the heat convection takes place, T_s and T_R (K) are the temperatures of the surface and the refrigerant providing the convection, respectively [39]:

$$h = \frac{kNu}{L} \tag{7}$$

Where h (W/m^{2}K) is the convection heat transfer coefficient, k (W/mK) is the thermal conductivity, L (m) is the vertical length for the plates, while the diameter for the horizontal pipes is, and Nu is the Nusselt number. The k and Nu values vary depending on the properties of the refrigerant where natural convection takes place and the surface temperature [40]. The thermal conductivity for the heat transferred to the surrounding air is calculated from Eq. 8 [41]:

$$k_h = 0.02624\left(\frac{T_f}{300}\right)^{0.8646} \tag{8}$$

Where k_h (W/mK) is the thermal conductivity for air, and T_f (K) is the film temperature calculated by averaging the ambient temperature and surface temperature [41]. Two different equations are used to calculate the Nusselt number, Eq. 9 for vertical plates and Eq. 10 for horizontal pipes [40]:

$$Nu = \left(0.825 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{\left[1+\left(0.492/\mathrm{Pr}\right)^{9/16}\right]^{8/27}}\right)^2 \tag{9}$$

$$Nu = \left(0.600 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{\left[1+\left(0.559/\mathrm{Pr}\right)^{9/16}\right]^{8/27}}\right)^2 \tag{10}$$

Where Pr is the Prandtl number, and Ra is the Rayleigh number. The Rayleigh number can be multiplied by the Prandtl and Grashof numbers [40]. Eq. 11 can be used to calculate the Prandtl number for air [41]:

$$\mathrm{Pr}_{air} = 0.68 + 4.69\times10^{-7}(T_f - 540)^2 \tag{11}$$

Eq. 12 is used to calculate the Grashof number [40]:

$$\mathrm{Gr}_L = \frac{g\beta(T_s - T_R)L_c^3}{\nu^2} \tag{12}$$

Where g gravitational acceleration (m/s^2), $\beta = 1/T_f$ volumetric expansion coefficient (1/K), T_s surface temperature (K), T_R refrigerant temperature (K), ν kinematic viscosity of the refrigerant (m^2/s) [40]. The equation used in the calculation of the kinematic viscosity for air (ν_h) is as shown in Eq. 13 [41]:

$$\nu_h = \frac{1.458\times10^{-6}T_f^{1.5}}{\rho_h(T_f + 110.4)} \tag{13}$$

Where ρ_h (kg/m^3) is the density of air and is calculated as shown in Eq. 14 [41]:

$$\rho_h = \frac{P}{R_A T_f} \tag{14}$$

Where P (Pa) is the air pressure, $R_A = 287.05$ J/kgK is the gas constant for air [41]. After all these calculations, the amount of heat transferred to the surrounding environment by convection has been calculated. The following equations are used to calculate the heat stored in the system (Q_{sys}):

$$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_g.C_{p,g}(\Delta T) \tag{15}$$

Where $\dot{m}_\mathrm{g}$ (kg/s) is the mass flow rate of the gas, $C_{p.\mathrm{g}}$ (J/kgK) is the specific heat of the gas, and ΔT is the temperature difference between the two points of the gas [18]. The mass flow rate can be calculated using Eq. 16 [34]:

$$\dot{m} = \rho \mathrm{v} A_c \tag{16}$$

Where ρ (kg/m^3) is the density, A_c (m^2) is the cross-sectional area where the flow occurs, v (m/s) is the flow velocity [34]. The following Eq. 17 is used to determine the flow rate [42]:

$$\mathrm{v} = \sqrt{2(h_{g,f} - h_{g,i})} \tag{17}$$

Where $h_{\mathrm{g},f}$ (J/kgK) and $h_{\mathrm{g},i}$ (J/kgK) are the enthalpy values of the gas in the final and initial states [42]. It is known that $\left(C_{p.\mathrm{g}}(\Delta T)_\mathrm{g}\right)$ value in Eq. 15 is also equal to $\left(h_{\mathrm{g},f} - h_{\mathrm{g},i}\right)$ value [34]. This enthalpy difference has been used while making the calculations. The first value, the saturated vapor enthalpy, is the value when the liquid evaporates, and the last situation value, the enthalpy of the gas at temperature and pressure conditions read from the digital manifold during the experiment, has been taken as the basis.

The Eq. 18 used in the calculation of the enthalpy value of the R134a refrigerant is as follows [38]:

$$h_g = R_g T_g[1 + \tau(\Phi_\tau^\mathrm{o} + \Phi_\tau^r) + \delta\Phi_\delta^r] \tag{18}$$

Where h_g (J/kgK) is the enthalpy of the gas, $R_\mathrm{g} = 81{,}488856$ J/kgK is the gas constant for R134a, T_g (K) is the temperature of the gas, $\tau = T_{cr}/T_\mathrm{g}$ is the ratio of the critical point temperature to the gas temperature, $\delta = \rho_\mathrm{g}/\rho_{cr}$ is the ratio of gas density to critical point density, and ϕ_τ^o, ϕ_τ^r, and ϕ_δ^r are derivatives of general free energy equations [38].

Calculation of ϕ_τ^o, ϕ_τ^r, and ϕ_δ^r values is as seen in equations 19, 20, and 21, respectively [38]:

$$\Phi_\tau^\mathrm{o} = a_2^\mathrm{o} + \frac{a_3^\mathrm{o}}{\tau} + \sum_{j=4}^{N^o} a_j^o t_j^o \tau^{t_j^o - 1} \tag{19}$$

$$\Phi_{\tau}^{r} = \sum_{i=1}^{N_0} a_i t_i \delta^{d_i} \tau^{t_i - 1} + \sum_{k=1}^{4} \left(\exp\left(-\delta^{k}\right) \sum_{i=N_{k-1}+1}^{N_k} a_i t_i \delta^{d_i} \tau^{t_i - 1} \right) \tag{20}$$

$$\Phi_{\delta}^{r} = \sum_{j=1}^{N_0} a_i d_i \delta^{d_i - 1} \tau^{t_i} + \sum_{k=1}^{4} \left(\exp\left(-\delta^{k}\right) \sum_{i=N_{k-1}+1}^{N_k} a_i (d_i - k\delta^{k}) \delta^{d_i - 1} \tau^{t_i} \right) \tag{21}$$

The equation constants used here are shown in Table 5 [38]:

Table 5. Equation constants for equations 19, 20, and 21.

i	a_i	t_i	d_i	N_i	a_i^o	t_i^o	i	a_i	t_i	d_i
0	-	-	-	8	-	-	11	-0.0074859070	5	2
1	0.0558681700	-0.5	2	11	-1.019535	-	12	0.0001017263	1	4
2	0.4982230000	0.0	1	17	9.047135	-	13	-0.5184567000	5	1
3	0.0245869800	0.0	3	20	-1.629789	-	14	-0.0869228800	5	4
4	0.0008570145	0.0	6	21	-9.723916	-0.50	15	0.2057144000	6	1
5	0.0004788584	1.5	6	-	-3.927170	-0.75	16	-0.0050004570	10	2
6	-1.8008080000	1.5	1	-	-	-	17	0.0004603262	10	4
7	0.2671641000	2.0	1	-	-	-	18	-0.0034978360	10	1
8	-0.0478165200	2.0	2	-	-	-	19	0.0069950380	18	5
9	0.0142398700	1.0	5	-	-	-	20	-0.0145218400	22	3
10	0.3324062000	3.0	2	-	-	-	21	-0.0001285458	50	10

3. Findings and Discussion

The pressure of the refrigerant in the gas phase in the system has increased depending on the amount of refrigerant filled into the system. Fig. 4 shows the gas pressures available in the system:

According to the experimentally obtained information, the pressure (Fig. 4) and temperature (Fig. 5) graphs of the gas in the system are quite similar to each other. The temperature values obtained here are very close to the saturation temperature of the refrigerant. In a way, this means that the gas absorbs a small amount of heat after evaporation. This may be due to the fact that the evaporated liquid moves very quickly after passing into the gas phase, so it does not have time to absorb more heat and the heat conduction is low in gases. The purpose of the installed system is also to benefit from the high heat transfer that occurs during evaporation. The variation of gas temperatures in the system is shown in the graphs in Fig. 5.

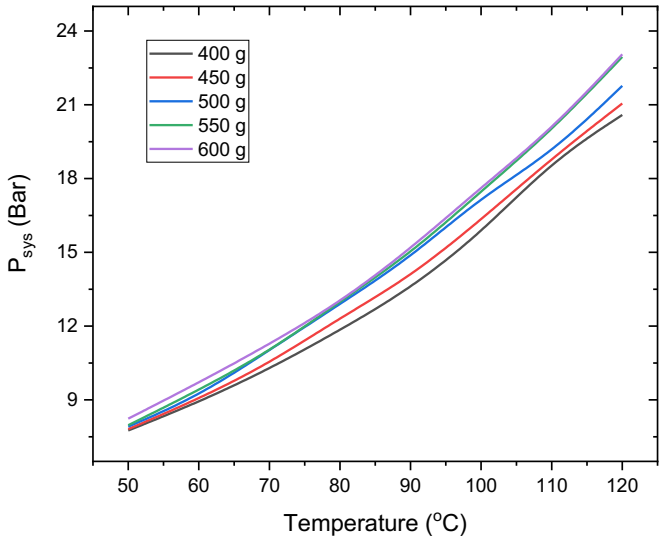


Figure 4. Comparison of the gas pressures in the system according to gas weights.

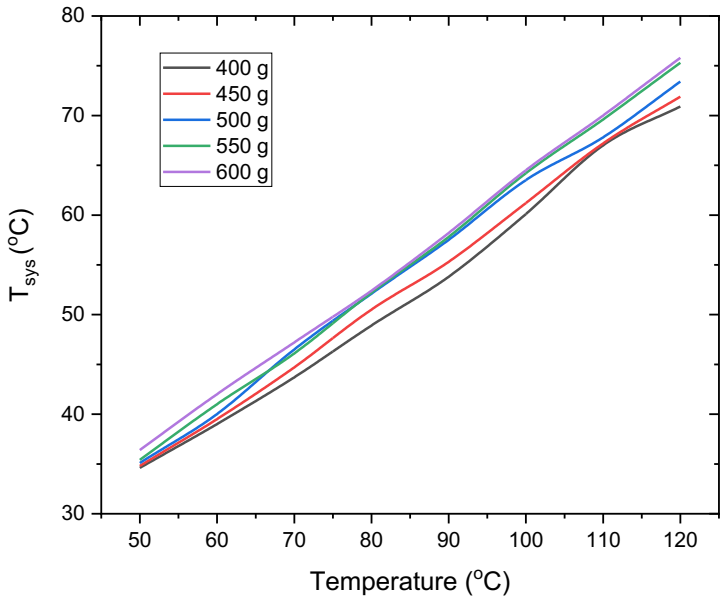


Figure 5. Comparison of the gas temperatures in the system according to gas weights.

As it is known, the temperature values in the graph seen in Fig. 6 were measured from the outer surfaces of the pipe through which the refrigerant flows. These surface temperatures provide input on heat transfer to the environment and approximate information about the refrigerant in the system. The temperature values of the radiator inlet and outlet regions are close to each other. The change in radiator inlet and outlet temperatures is as seen in the graph in Fig. 6.

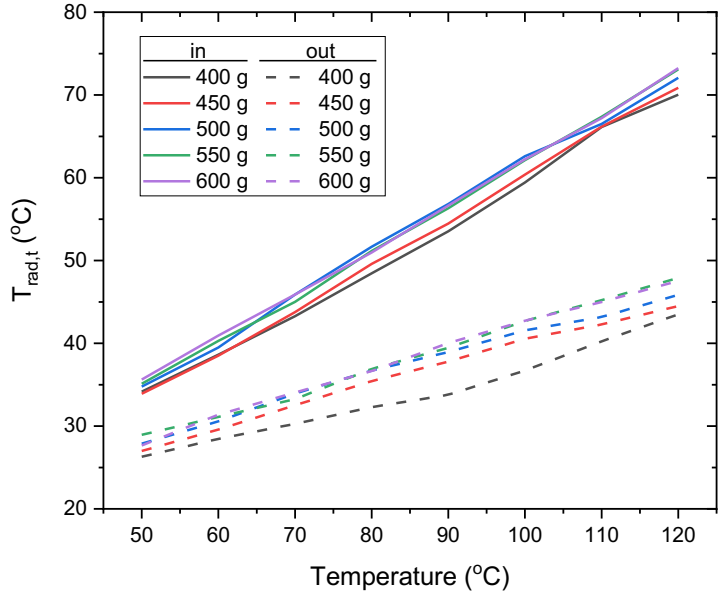


Figure 6. Comparison of radiator inlet and outlet temperatures according to gas weights.

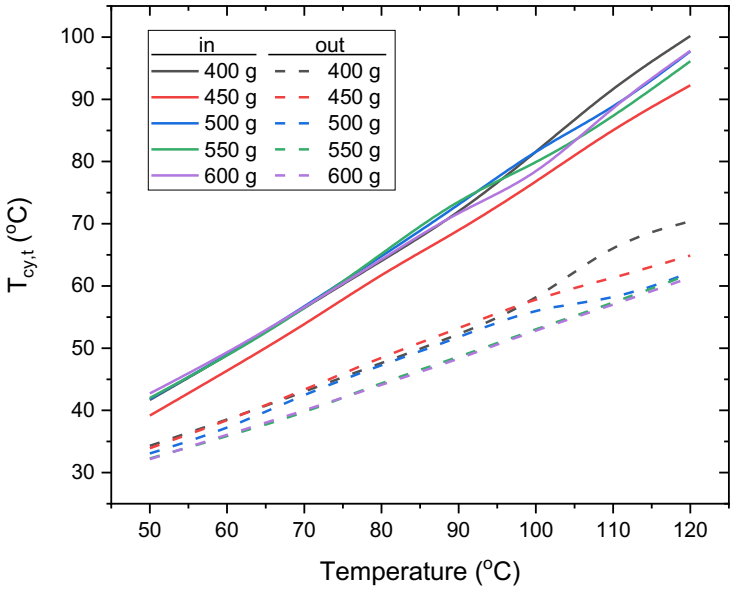


Figure 7. Comparison of cylinder top side outlet and bottom side inlet temperatures according to gas weights**.**

The oil in the cylinder has been heated continuously to a constant temperature to generate cylinder outer surface temperatures at the desired temperature value. For comparisons in different refrigerant masses, it has been seen in all experimental studies that oil temperatures and cylinder outer surface temperatures are heated almost equally. The effect of oil temperature on the temperature change in the cylinder can be seen in Fig. 7. Cylinder top temperatures have the highest temperature values after oil temperatures as a result of the system's operating principle. In the meantime, since the average of the cylinder top and bottom temperatures will be accepted as the cylinder surface temperature, it has an essential effect on the calculation of the heat transfer coefficient of the refrigerant, even if it is near to each other in many experiments.

Depending on the system's working principle, the liquid-gas ratios can give us information about heat transfer. Liquid-gas ratios create differences too small to be seen visually for experiments containing the same amount of refrigerant. For this reason, in Fig. 8, solid models created in the CAD environment and the change of liquid-gas ratios depending on the amount of refrigerant are shown.

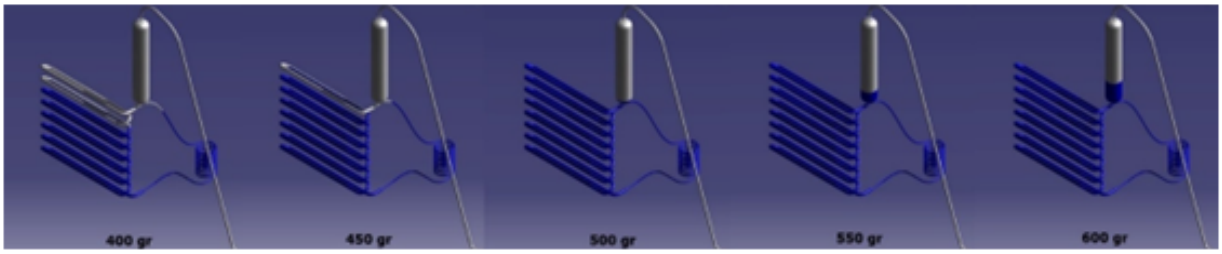


Figure 8. Liquid-gas ratios in the system.

Since no part in the system can cause forced convection, the velocity of the gas in the system calculated based on the test inputs is also of great importance. The refrigerant, which reaches these speeds by only taking the heat, reveals one of the system's advantages. The gas velocities in the system can be examined with the help of the graph shown in Fig. 9.

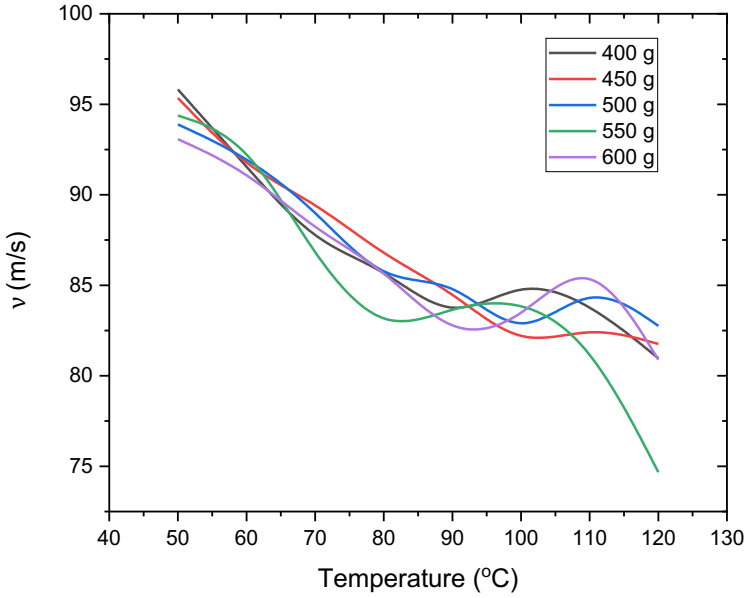


Figure 9. Comparison of the gas velocities according to gas weights.

The total amount of heat withdrawn from the system also has an important place in calculating the convection heat transfer coefficient. Since the surface area where the heat is drawn in the system is the inner surface area of the spiral region, this value will not change according to the experiments. For this reason, the most important parameters affecting the calculation result will be the total heat withdrawn from the system and the top and bottom cylinder temperatures. The total amount of heat drawn from the system obtained after the necessary calculations are made seen in the graph in Fig. 10.

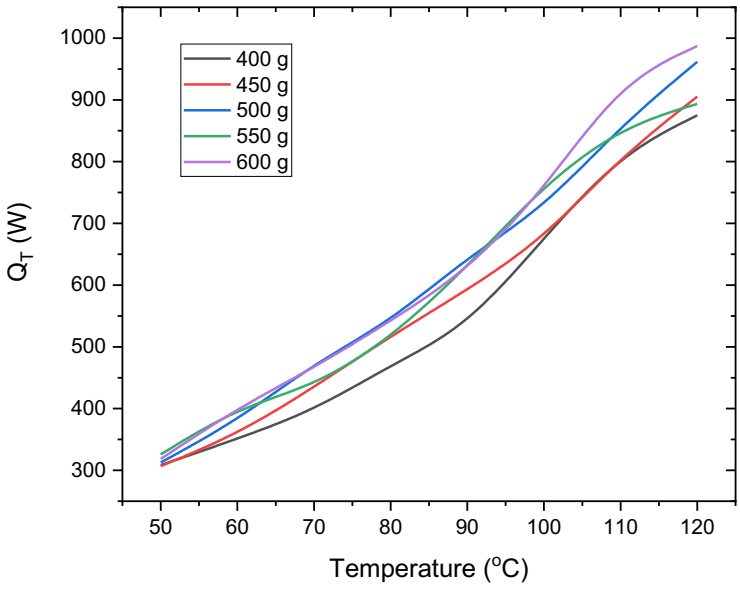


Figure 10. Total amount of heat withdrawn from the system.

The heat transfer coefficient, which will reveal the heat transfer performance of the refrigerant in the created system, is an important feature that gives factual information about whether the system can be used in terms of

performance. Compared to other experiments at 600 g of refrigerant and 100°C oil temperature, a very high heat transfer coefficient was obtained. However, considering the engine's operating conditions, it is inevitable to get a good result at higher temperature values. For this reason, as seen from the graph in Fig. 11, the test result containing 550 g of refrigerant in a system with these characteristics is more satisfactory.

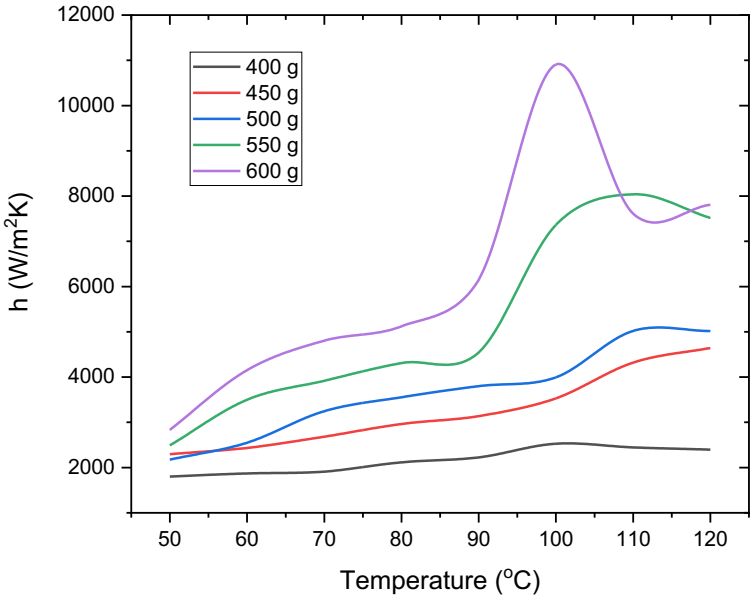


Figure 11. The convection heat transfer coefficients for R134a.

4. Conclusions and Recommendations

This study conducted an experimental investigation of using R134a refrigerant in the engine cooling system. The significant results obtained from the experiments carried out with different refrigerant amounts, and different temperature values can be listed as follows:

In this system, which includes many parameters, the highest heat transfer coefficient value was obtained in the experiment at 100°C containing 600 g of refrigerant. The most efficient result was obtained in the experiment at 120°C containing 550 g of refrigerant.

It is seen that the system is suitable for use in internal combustion engines. The calculated gas velocities show that the refrigerant is transferred naturally, and the heat transfer coefficients reach very high values. It is seen as a high-performance system in drawing the heat from the cylinder walls and transferring it to the radiator. Of course, it will be much more satisfying to set up the system on a real engine and do the necessary experiments.

In addition, experimental studies can be carried out by investigating whether different refrigerants can be used to cool internal combustion engines.

As a result of the successful use of the system in internal combustion engines, there will be some changes in the engine cooling system. The pump will be disabled, but copper pipes will replace the plastic pipes. The necessity of using a fan should be determined by conducting more extensive experiments.

In addition, the availability of gaseous refrigerants as a refrigerant in internal combustion engine cooling systems will allow the system structures to shrink. This will also allow the size of the engine to be reduced. Therefore, the decrease in vehicle weight will indirectly contribute to reducing vehicle production costs and also help to reduce fuel consumption. Reducing fuel consumption will also contribute to the formation of less harmful emissions in terms of both economic benefits and environmental health.

Funding

This work was supported by the Scientific Research Project Fund of Sivas Cumhuriyet University under project number TEKNO – 029.

References

[1] Yuksel T, Kapıcıoğlu A. Experimental Investigation of the Effects on Engine Oil Temperature of Different Nanofluids Used in Vehicle Engine Cooling System. International Journal of Innovative Engineering Applications 2021;5(1);22-29.

[2] Yuksel T, Kapıcıoğlu A. Experimental Investigation of the Effect of Nanofluid Supported Vehicle Engine Cooling System on Engine Emission Values. II. International Conference on Innovative Engineering Applications (CIEA' 2021), Muş: 2021, p. 405–13.

[3] Elsaid AM. Experimental study on the heat transfer performance and friction factor characteristics of Co_3O_4 and Al_2O_3 based $H_2O/(CH_2OH)_2$ nanofluids in a vehicle engine radiator. International Communications in Heat and Mass Transfer 2019; 108:104263.

[4] Che Sidik NA, Witri Mohd Yazid MNA, Mamat R. Recent advancement of nanofluids in engine cooling system. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017;75:137–44.

[5] Hussein AM, Bakar RA, Kadirgama K. Study of forced convection nanofluid heat transfer in the automotive cooling system. Case Studies in Thermal Engineering 2014;2:50–61.

[6] Karagöz Y, Köten H, Tunçer E, Pusat Ş. Effect of Al_2O_3 addition to an internal combustion engine coolant on heat transfer performance. Case Studies in Thermal Engineering 2022;31.

[7] Hazar H, Telceken T, Sevinc H. An experimental study on emission of a diesel engine fuelled with SME (safflower methyl ester) and diesel fuel. Energy 2022;241.

[8] Jadar R, Shashishekar KS, Manohara SR. Nanotechnology Integrated Automobile Radiator. Mater Today Proc 2017;4:12080–4.

[9] Castillo Marcano SJ, Bensaid S, Deorsola FA, Russo N, Fino D. Nanolubricants for diesel engines: Related emissions and compatibility with the after-treatment catalysts. Tribol Int 2014;72:198–207.

[10] Ettefaghi E, Ahmadi H, Rashidi A, Nouralishahi A, Mohtasebi SS. Preparation and thermal properties of oil-based nanofluid from multi-walled carbon nanotubes and engine oil as nano-lubricant. International Communications in Heat and Mass Transfer 2013;46:142–7.

[11] Macián V, Tormos B, Olmeda P, Montoro L. Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis. Tribol Int 2003;36:771–6.

[12] Bağırov H, Can I, Öner C, Sugözü I, Kapıcıoğlu A. Experimental investigation the effects of mixture impoverished on the specific fuel consumption, engine performance and exhaust emissions a pre-combustion chamber gasoline engine. Journal of the Energy Institute 2015;88:205–8.

[13] Patel H, Subhedar DG, Ramani D. Numerical Investigation of performance for Car Radiator Oval Tube. vol. 4. 2017.

[14] Kula S, Bulut E, Altay E, Sümer O, Öztürk F. Smart cooling design using dual loop cooling to increase engine efficiency and decrease fuel emissions with artificial intelligence. Case Studies in Thermal Engineering 2022:102351.

[15] Sabancı A, Işık A. İçten Yanmalı Motorlar. Ankara: Nobel Akademik; 2012.

[16] Yardım MH. Motor Teknolojisi. Ankara: Nobel Akademik; 2015.

[17] Kuyumcu İ. Motor Tekniği. Ankara: Hatiboğlu; 1999.

[18] Bağırov H, Ertaş HA. İçten Yanmalı Pistonlu Motorlar Cilt 1. Sivas: Cumhuriyet Üniversitesi Yayınları; 2017.

[19] Mathioulakis E, Belessiotis V. A New Heat-Pipe Type Solar Domestic Hot Water System. vol. 72. 2002.

[20] Singh R, Mochizuki M, Yamada T, Nguyen T. Cooling of LED headlamp in automotive by heat pipes. Appl Therm Eng 2020;166.

[21] Domiciano KG, Krambeck L, Henriques Mantelli MB. Development of thin loop heat pipe for compact electronics. Exp Therm Fluid Sci 2025;168.

[22] Mayoof OT, Yasin NJ, Abedalh AS. Experimental investigation for utilization of U-shaped heat pipe heat exchanger in the air-conditioning system. International Communications in Heat and Mass Transfer 2025;163.

[23] Lim H, Lee S, Lee J. Effective snow removal devices for road pavement using geothermal heat pipe. Appl Therm Eng 2025;265.

[24] Li Z, Jiang H, Chen X, Liang K. Optimal refrigerant charge and energy efficiency of an oil-free refrigeration system using R134a. Appl Therm Eng 2020;164. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114473.

[25] Zhai R, Tan S, Zhuang Y, Wang Z, Ye B, Shi Y. Effect of flame retardant R134a on the flammability characteristics of R1234yf. Energy 2024;313.

[26] Belman-Flores JM, Rangel-Hernández VH, Usón S, Rubio-Maya C. Energy and exergy analysis of R1234yf as drop-in replacement for R134a in a domestic refrigeration system. Energy 2017;132:116–25.

[27] Vaghela JK. Comparative Evaluation of an Automobile Air - Conditioning System Using R134a and Its Alternative Refrigerants. Energy Procedia, vol. 109, Elsevier Ltd; 2017, p. 153–60.

[28] Illán-Gómez F, García-Cascales JR. Experimental comparison of an air-to-water refrigeration system working with R134a and R1234yf. International Journal of Refrigeration 2019;97:124–31.

[29] European Commission, Fluorinated greenhouse gases, 2021. https://ec.europa.eu/clima/policies /f-gas_en (accessed Septemper 02, 2022) 2021.

[30] United Nations, Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change. New York, USA: 1997.

[31] Devotta S, Chelani A, Vonsild A. Prediction of flammability classifications of refrigerants by artificial neural network and random forest model. International Journal of Refrigeration 2021;131:947–55.

[32] ASHRAE. Designation and safety classification of refrigerants. 2016.

[33] Padilla M, Revellin R, Bonjour J. Exergy analysis of R413A as replacement of R12 in a domestic refrigeration system. Energy Convers Manag 2010;51:2195–201.
[34] Çengel Y.A., Boles M.A. Thermodynamics An Engineering Approach. McGraw-Hill; 2013.
[35] Kumar KS, Rajagopal K. Computational and experimental investigation of low ODP and low GWP HCFC-123 and HC-290 refrigerant mixture alternate to CFC-12. Energy Convers Manag 2007;48:3053–62.
[36] Morrow JA, Huber RA, Nawaz K, Derby MM. Flow condensation heat transfer performance of natural and emerging synthetic refrigerants. International Journal of Refrigeration 2021;132:293–321.
[37] Danfoss A/S, Danfoss Ref Tools, 2024.
[38] Tillner Roth R, Baehr HD. An International Standard Formulation for the Thermodynamic Properties of 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC-134a) for Temperatures from 170 K to 455 K and Pressures up to 70 MPa. J Phys Chem Ref Data 1994;23:657–729.
[39] Incropera F.P., Dewitt D.P., Bergman T.L., Lavine AS. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 2007.
[40] Çengel Y.A. Heat Transfer a Practical Approach. 2003.
[41] Dixon J.C. The Shock Absorber Handbook. 2007.
[42] Çengel Y.A., Cimbala J.M. Fluid Mechanics Fundamentals and Applications. 2006.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 651-663, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1659595

Doğu Anadolu Fay Zonu Ilıca Segmentindeki Traverten Oluşumlarına Bir Örnek: Hacılar (Bingöl) Sırt Tipi Traverteni

Serap ÇOLAK EROL[1*], Ercan AKSOY[2]
[1,2] Jeoloji Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
[*1] serapcolak@firat.edu.tr, [2] eaksoy@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 17/03/2025; Kabul/Accepted: 03/07/2025)

Öz: Bu çalışmada Bingöl şehir merkezinin yaklaşık 34 km kuzeydoğusunda bulunan ve Türkiye'nin ikinci büyük neotektonik yapısı özelliğine sahip sol yanal doğrultu atımlı Doğu Anadolu Fay Zonu'nun Ilıca segmenti üzerindeki sırt tipi traverten oluşumu ele alınmıştır. Paleozoyik-Mesozoyik yaşlı Bitlis Metamorfitleri'nin Bingöl çevresindeki yüzlekleri, traverten oluşumunda kaynak kaya rolü oynamakta olup genellikle mermerlerle karakterize edilir. Çoğunlukla piroklastik kayaçlardan oluşan Solhan Volkanitleri'nin ise bu sıcaklığı koruyan bir örtü kaya rolü oynadığı düşünülmektedir. Traverten örneklerinde belirlenen element miktarları, Ca: 370140-380789 ppm, Mg: 7116.30-9468.30 ppm, Sr: 7104-16292 ppm düzeyindedir. Yüksek Sr içeriği, sırt tipi traverteni çökelten suların derin dolaşımlı olduğunu göstermektedir. $\delta^{13}C$ değerleri 4.9 ile 6.1 (‰ PDB), $\delta^{18}O$ değerleri ise -18.6 ile -15.0 (‰ PDB) arasındadır. Pozitif $\delta^{13}C$ değerleri, magmatik faaliyetlerin dışında termo-metamorfik süreçler sonucunda ortaya çıkan CO_2'nin katkısını göstermektedir. Örneklerden elde edilen U-Th yaş verileri, traverten çökeliminin günümüzden en azından 7000 yıl önce Holosen'de (MIS 1, Marine Isotope Stage'e denk gelen zamanda) başlamış olduğuna işaret etmektedir.

Anahtar kelimeler: Doğu Anadolu Fay Zonu, Ilıca segmenti, sırt tipi traverten, Bingöl, U-Th yaş analizi.

An Example of Travertine Formations in the Ilıca Segment of the East Anatolian Fault Zone: Hacılar (Bingöl) Ridge Type Travertine

Abstract: In this study, the formation of ridge type travertine on the Ilıca segment of the left-lateral strike-slip East Anatolian Fault Zone, which is located approximately 34 km northeast of Bingöl city center and has the second largest neotectonic structure feature in Turkey, is discussed. The outcrops of the Paleozoic-Mesozoic Bitlis Metamorphites around Bingöl play the role of source rock in the formation of travertine and are generally characterized by marbles. It is thought that the Solhan Volcanics, which mostly consist of pyroclastic rocks, play the role of a cap rock that maintains this temperature. The element amounts determined in the travertine samples are Ca: 370140-380789 ppm, Mg: 7116.30-9468.30 ppm, Sr: 7104-16292 ppm. The high Sr content indicates that the waters that precipitated the ridge type travertine had deep circulation. $\delta^{13}C$ values range from 4.9 to 6.1 (‰ PDB), and $\delta^{18}O$ values range from -18.6 to -15.0 (‰ PDB). Positive $\delta^{13}C$ values indicate the contribution of CO_2 resulting from thermo-metamorphic processes other than magmatic activities. U-Th age data obtained from the samples indicate that travertine deposition started at least 7000 years ago in the Holocene (corresponding to MIS 1, Marine Isotope Stage).

Key words: The East Anatolian Fault Zone, Ilıca segment, ridge type travertine, Bingöl, U-Th age analysis.

1. Giriş

Traverten, karstik ve sıcak su kaynaklarının çevresinde, küçük nehirler ve bataklıklarda oluşabilen, kimyasal ve/veya biyokimyasal yolla çökelebilen sık dokulu kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) birikimleri olarak adlandırılır ve birincil minerali kalsittir [1-5].

Barnes ve diğerlerinin belirttiği gibi faylanmalar, hidrotermal akışkanın yüzeye taşınmasında önemli rol oynadığından, dünya çapında traverten çökelimi ile tektonik olarak aktif olan zonlar arasında çok yakın bir ilişki vardır [6]. Bundan dolayı travertenler, bölgesel tektoniğin bazı belirtilerini yansıtırlar. Pleyistosen döneminden günümüze kadar birçok traverten kütlesi oluşmaya devam ettiğinden [7] hem aktif hem de aktif olmayan travertenlerin varlığı, tektonik aktivitenin günümüzde ya da yakın geçmişte hâlâ devam ettiğine işaret etmektedir. Aktif ve aktif olmayan travertenlerin aynı bölgede bulunması, tektonik aktivitenin binlerce yıldır sürdüğünün bir göstergesidir. Travertenler, çökelme sırası ve çökelme sonrası tektonik kayıtları barındırdığından bu süreçlerde yaşanan tektonik hareketlilik hakkında değerli bilgiler sunar [8].

[*] Sorumlu yazar: serapcolak@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0003-1957-3012, [2] 0000-0001-5078-7217

Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ), ülkemizin depremselliği açısından en önemli fay sistemlerinden biri olup kuzeydoğuda Karlıova (Bingöl) ile güneybatıda Akdeniz arasında uzanır. Fay zonu, Anadolu bloğu ile Arap-Afrika plakaları arasında ortaya çıkan etkileşimi, yanal bir hareketle karşılar [9-15]. DAFZ, günümüze kadar farklı disiplinlerden birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve Doğu Akdeniz'in en önemli aktif tektonik yapılarından biri olarak nitelendirilmiştir. Faylar ve travertenler arasındaki ilişki, ülkemizde pek çok araştırmacı tarafından detaylı bir şekilde incelenmiştir [16-32].

2. Jeolojik-Tektonik Özellikler

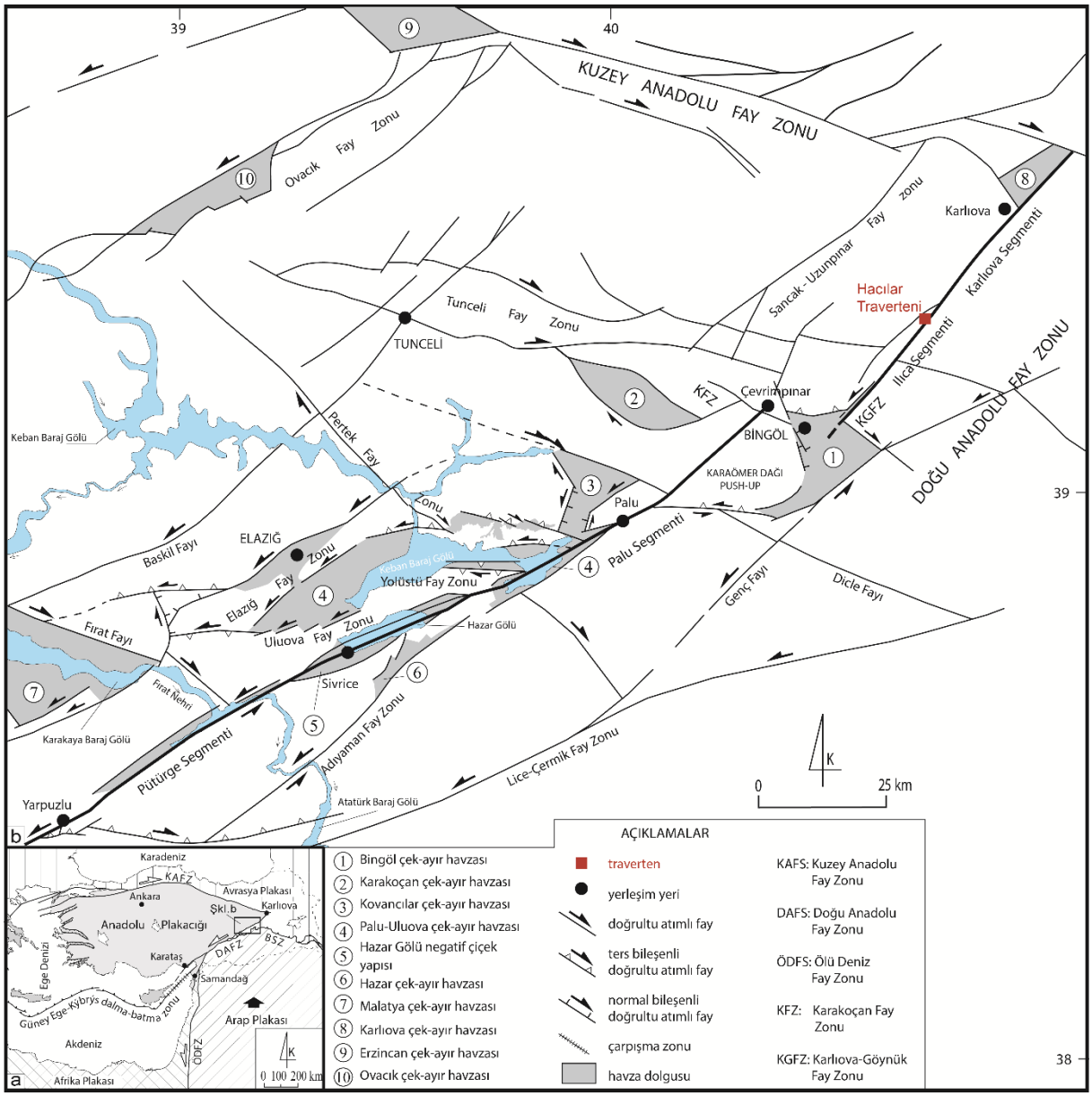
Çalışmanın odak noktasını oluşturan Hacılar traverteni, Bingöl-Karlıova karayolunun (Erzurum-Bingöl D950 numaralı devlet karayolu) 43. kilometresinde yer alan Hacılar Köyü'nün (Karlıova / Bingöl) yaklaşık 1.5 km güneybatısında yüzeylemektedir. Şekil 1 ([12]'den değiştirilerek) ve 2'de [28] gösterilen ve Hacılar traverteni olarak adlandırılan bu yüzlek, Doğu Anadolu Fay Zonu'nun Ilıca segmenti üzerinde depolanmıştır. Morfolojik yapıya bağlı sınıflama türüne göre *sırt tipi traverten* kategorisine girmektedir. Şekil 2'deki 1 no'lu sırt, köyün yerleşim alanı içinde kalmış olup, deniz seviyesinin 1570 m üzerinde yer alır [28]. Bu sırtı oluşturan travertenler, köylüler tarafından yapı taşı olarak kullanıldığından ötürü söz konusu sırt tahrip edilmiştir. Şekil 2 ve 5'de gösterilen 2 no'lu sırt ise köyün 1.5 km batı-güneybatısında ve deniz seviyesinin 1540 m üzerinde yer alan sırttır. 3 no'lu sırt Hacılar Köyü'nün yaklaşık 2 km güneybatısında, deniz seviyesinin 1570 m üzerinde bulunur. Bu çalışmada köyün sadece 1.5 km batı-güneybatısındaki 2 no'lu sırt incelenmiştir.

Hacılar Köyü çevresinde Pliyosen yaşlı Solhan Volkanitleri ile Paleozoyik-Mesozoyik yaşlı Bitlis Metamorfitleri yüzeyler. Solhan Volkanitleri'ni karasal kökenli sedimanter kayaçlar, bazaltik-andezitik bileşimli lav, obsidiyen, aglomera, volkanik breş, lapilli, tüf ve kül içeren piroklastik kayaçlar oluşturmaktadır [33]. Bitlis Metamorfitleri ise Hacılar Köyü yakınında üst gruba ait mermerlerle temsil edilmektedir. Fay zonu içinde olmalarından dolayı, fazlasıyla ezik ve breşik bir yapı niteliği kazanan mermerlerin bu yapısı, hidrotermal akışkanların dolaşımı ve yüzeye çıkması için uygun bir ortam oluşturur. Büyük kısmı mermerlerden oluşan Bitlis Metamorfitleri'nin, traverten oluşumunu sağlayan sıcak sular için hazne kaya rolü oynadığı; çoğunlukla piroklastik kayaçlardan ibaret olan Solhan Volkanitleri'nin ise bu sıcaklığı koruyan bir örtü kaya niteliği taşıdığı düşünülmektedir (Şekil 3 ve 4 [28]).

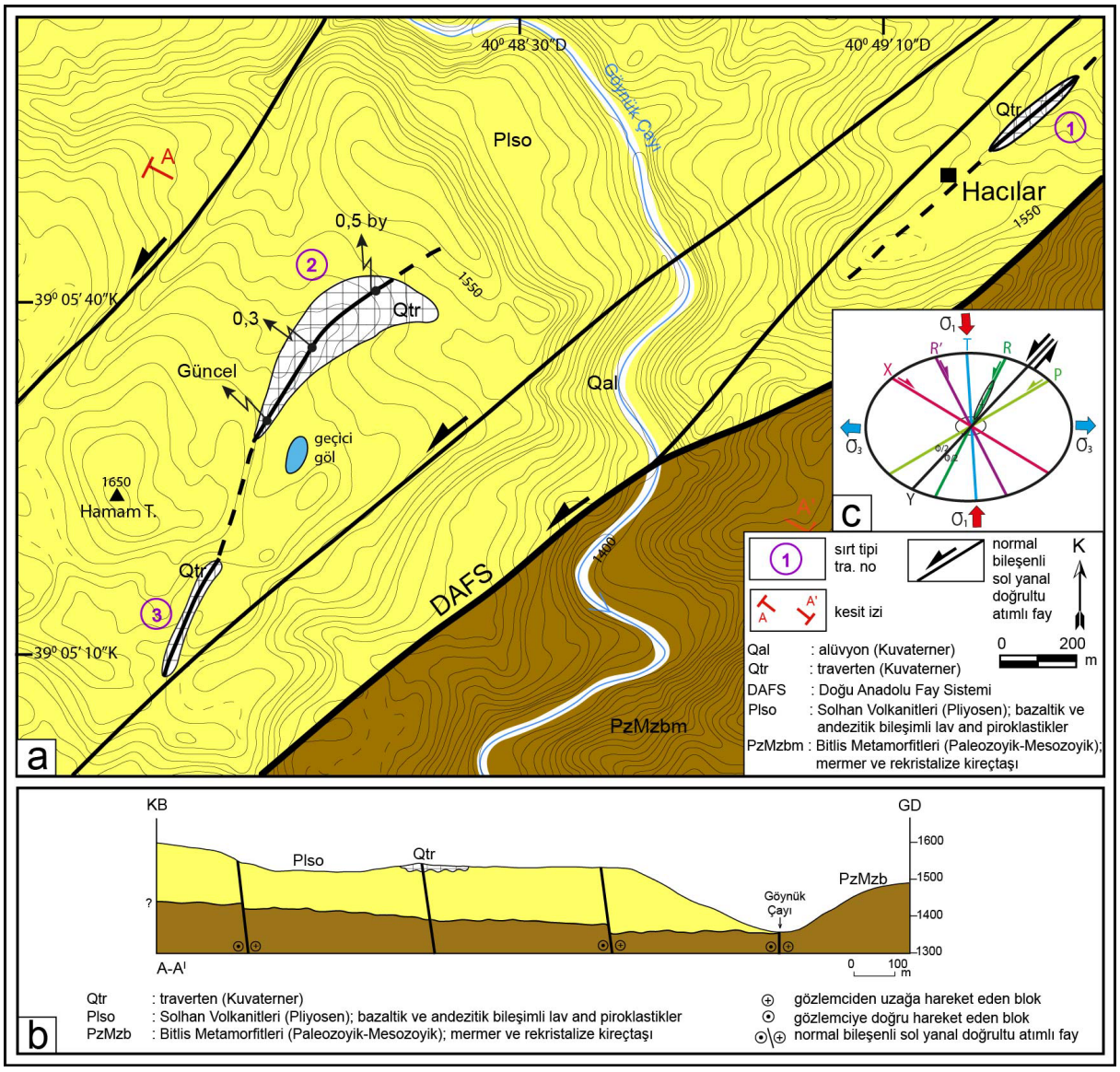
Şekil 5'te görülen Hacılar sırt tipi travertenin üzerinde yer aldığı Solhan Volkanitleri, Doğu Anadolu Bölgesi'nde kendisinden yaşlı birimleri keserek yüzeye kadar ulaşan volkanizma ürünlerinden oluşur ve farklı alanlarda farklı kayaç birimlerini örter. Hacılar Köyü yakınında ise genellikle bazaltik-andezitik bileşime sahip piroklastiklerle temsil edilen birimin taban kısmında, Paleozoyik-Mesozoyik yaşlı Bitlis Metamorfitleri'nin mermer ve şistleri bulunur [33]. Hacılar sırt tipi traverteni yakın çevresinde, her iki birim arasındaki sınırı, DAFZ'nin Ilıca segmenti oluşturur (Şekil 2). Hacılar Köyü'nün yakın çevresinde fayın dallanması ve örgülü yapıya sahip olmasından dolayı, doğrultu atımlı faylara özgü yapılardan olan uzamış sırtlar ile çizgisel dizilimli heyelanlar oldukça yaygındır.

Traverten sırtları, ana kayadaki kırıklar boyunca yükselen sıcak sulardan oluşan traverten depolanmalarını karakterize eden yaygın morfotektonik oluşumlardır [5, 16, 18, 26, 34-38]. Sırtların uzunlukları 2 km, genişlikleri 400 m ve yükseklikleri 20 m'ye kadar olabilen ve harita görünüşlerinde çizgisel veya eğri biçimli olan yapılardır [39].

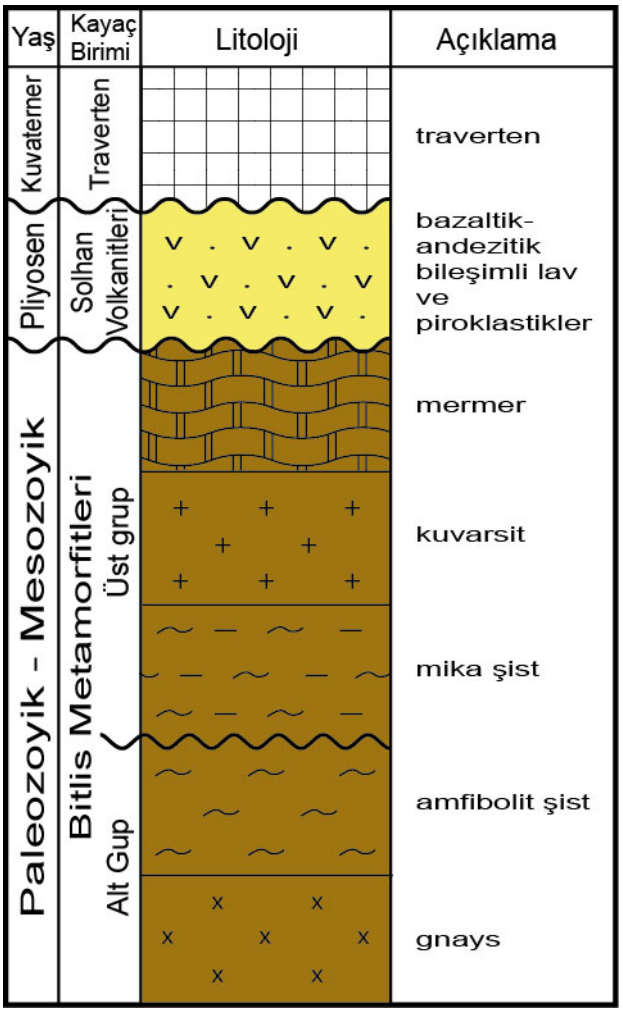
Çalışma alanında yer alan traverten sırtının ekseni, harita görünüşü dikkate alındığında GD'ya doğru içbükey bir görünüm sergilemektedir. Ana fay ile üzerinde traverten sırtının geliştiği kırık arasında 10° lik bir açı vardır. Şekil 6'da verilen çatlak ekseni için hazırlanan doğrultu gül diyagramına göre ([21]'den değiştirilerek) K 25° D ve K 55° D olmak üzere iki kırık takımı şeklinde yoğunlaşıp ortalama doğrultusu, K 40° D' dur. DAFZ'nun ana kırığının bu bölgedeki doğrultusu, K 50° D'dur.



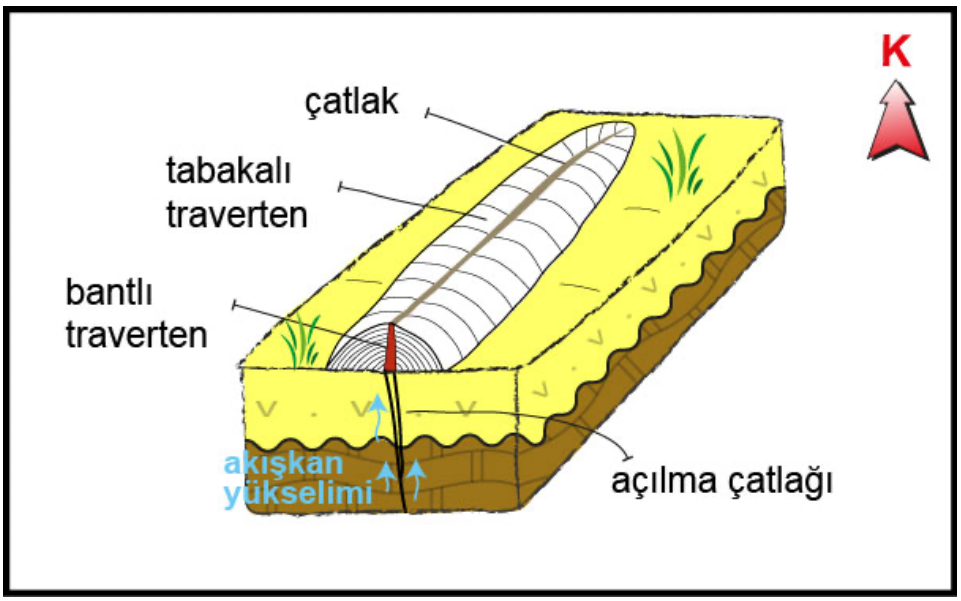
Şekil 1. Çalışma sahasına ait harita. a-Doğu Akdeniz Bölgesi'nin ana plakaları ve bunları sınırlayan faylar (sadeleştirilmiş) b- Çalışma sahasının yeri ve Bingöl-Elazığ dolayında Doğu Anadolu Fay Zonu'nu meydana getiren ana fay zonlarını ve doğrultu atım havzalarını gösteren tektonik harita



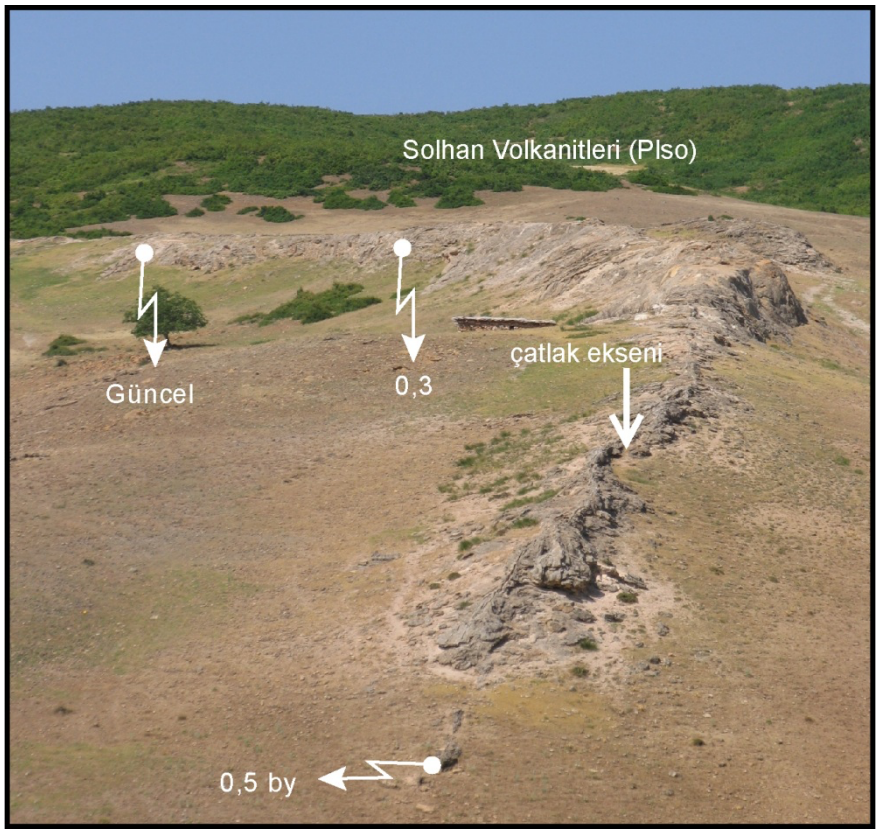
Şekil 2. Hacılar sırt tipi traverten çevresine ait
a- jeolojik harita b- enine jeolojik kesit; c- travertenin deformasyon elipsoidi üzerindeki konumu



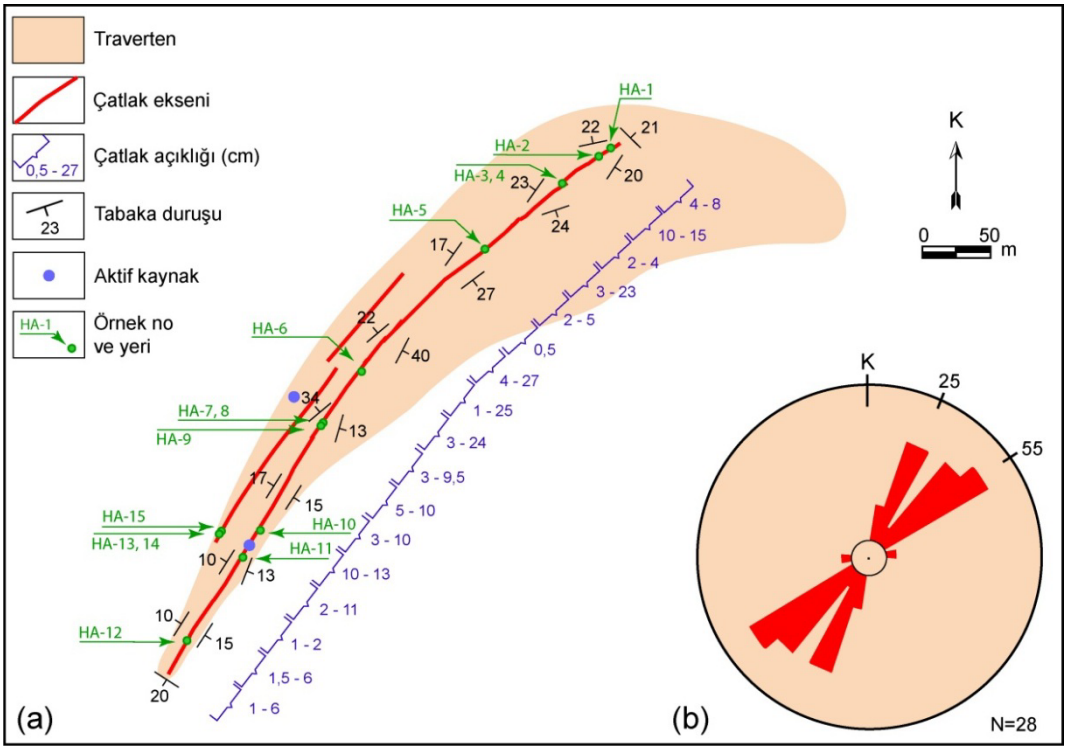
Şekil 3. Hacılar sırt tipi traverten çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik dikme kesiti



Şekil 4. Hacılar sırt tipi travertenin oluşum modeli



Şekil 5. Hacılar Köyü'nün 1.5 km GB'sında Solhan Volkanitleri üzerinde yer alan sırt tipi travertenin arazi görünümü; by: bin yıl. Bakış, B'ya



Şekil 6. a- Sırt haritası; b- çatlak ekseni doğrultu gül diyagram

3.Yöntem ve Bulgular

3.1.Depolanma Özellikleri

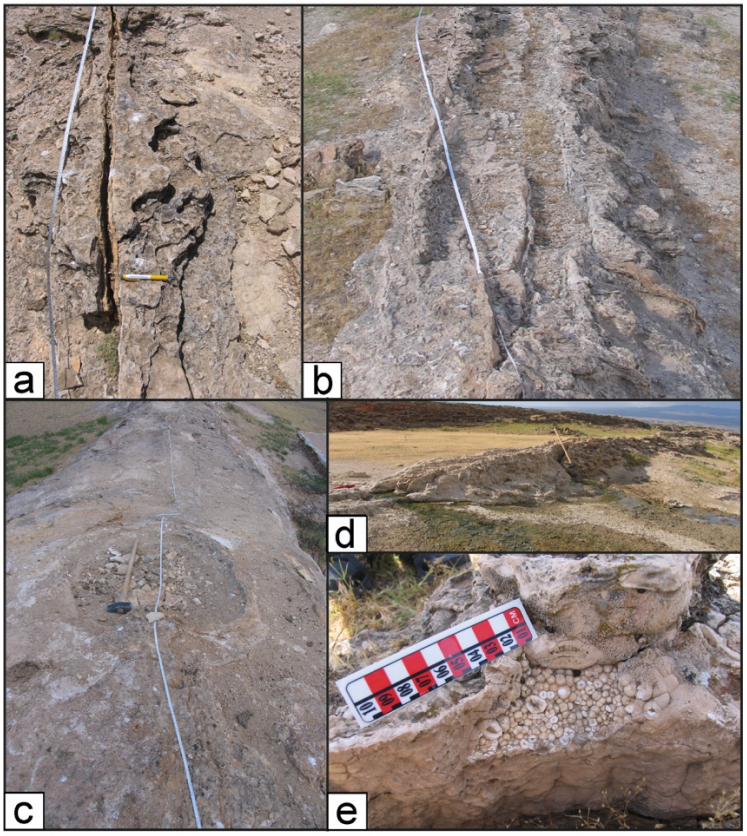
Saha çalışmaları sırasında sırt eksenin doğrultusu ve doğrultudaki değişimler jeolog pusulası ile ölçülmüştür. Aynı şekilde sırt ekseninin her iki tarafında yer alan eğimli traverten tabakalarının eğim ve doğrultuları pusula yardımıyla ölçülmüştür. Traverten sırtı, fotoğraflanmış ve haritalanmıştır. Buna göre sırt tipi travertenin çatlak ve yamaçlarına ait depolanma özellikleri tespit edilmiştir.

Çatlak

Sırtın ana çatlağı, 520 m uzunluğunda bir yay şeklinde olup iç bükey kısmı GD'ya bakmaktadır (Şekil 2, 5, 6). Sırt ekseni boyunca, bazı kesimlerde bir adet basit çatlak (Şekil 7a), bazı kesimlerde ise çoklu (Şekil 7b), birbirine paralel ve yer yer sıçramalar yapan kademeli çatlaklar gelişmiştir. Çatlakların açıklık miktarı, sırtın orta bölümünde en yüksek değerlerde seyrederken (27cm), uçlara doğru açıklık miktarı azalmaktadır (0.5cm) ve çatlak duvarları, düşey konumlu bantlı travertenlerle kaplıdır. Bu konumda yer alan kalsit kristalleri, sıkı, boşluksuz ve ince kristallidir. Ana çatlağın bazı kesimlerinde, kaynak ağız çapının 15-220 cm aralığında olduğu ve sıcak suların yüzeye ulaştığı gözlenmektedir (Şekil 7c, d). Bazı kaynak ağızlarında ve çatlak duvarlarına tutunmuş şekilde, 2 cm'ye ulaşan çaplara sahip pizoidler gözlenmiştir (Şekil 7e).

Sırt Yamaçları

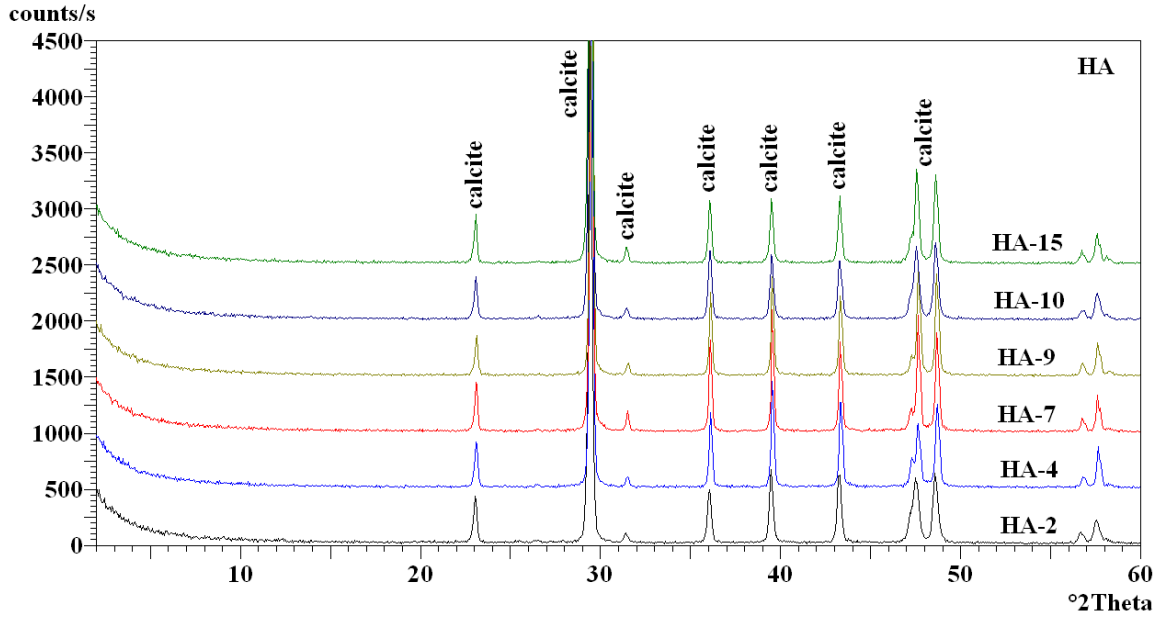
Sırt yamaçları, tabakalı travertenlerden oluşmakta olup, yamaç yüzeylerinde traverten tabakalarının eğimleri, kısa mesafede sık sık değişmekte ve 40°'ye kadar eğimlerle sırt ekseninden uzaklaşmaktadır (Şekil 6). Tabaka eğimlerinin çatlak eksenine dik bir şekilde geliştiği gözlenmiş olup, çatlak uçlarında çatlak eksenine paralel gelişim söz konusudur. Bu eğimlerin tektonizma etkiyle oluşmadığı ve ilksel olarak kazanılan bir özellik olduğu düşünülmektedir. Kristalin kabuk tipi travertenler [5, 41], tabakalı travertenlerin en önemli bileşeni olan ve yamaç yüzeylerinde termal suyun hızlı ve türbülanslı akışı ile oluşan litotiptir. Kalınlıkları 10 cm seviyelerine kadar ulaşan kristalin kabuk traverten tabakaları, depolanma yüzeyine dik gelişmiş sedir ağacı görünümüne sahip kalsit kristal demetlerinden kuruludur.



Şekil 7. Hacılar sırt tipi traverteninin saha görüntüleri. a- Basit çatlak, b- kademeli çatlaklar, c ve d- aktif ve pasif kaynak ağzı, e- pizoid örneği

3.2.Mineralojik Bileşim

Çatlak ve yamaçlardaki traverten çökeltilerini oluşturan ve submikroskopik tane boyuna sahip (optik mikroskop ile incelenemeyecek boyutlardaki) karbonat minerallerini belirlemek amacıyla Jeolojik ve Jeokimyasal Araştırma Enstitüsü'ndeki (Budapeşte, Macaristan) Philips PW1730 difraktometresi kullanılarak 45 kV ve 35 mA'da CuKα radyasyonuyla X-ışını kırınım yöntemi (XRD) tekniğiyle numuneler analiz edildi. Bu amaçla, taze, hava koşullarına maruz kalmamış numunelerden elde edilen rastgele yönlendirilmiş tozlar kullanıldı ve yarı-kantitatif mineral bileşimi, ilgili yönteme göre [42] belirlendi. Buna göre Şekil 8'de görülen [21] Hacılar sırt tipi travertenine ait 6 adet örneğin XRD difraktogramı incelendiğinde tamamen kalsitten oluştuğu ve bazı örneklerde eser miktarda kuvarsa rastlandığı gözlenmiştir.



Şekil 8. Hacılar traverten örneklerinin XRD difraktogramı

Traverten örneklerine ait element bileşimleri Tablo 1'de verilmiştir [21]. Örneklerde en yüksek element konsantrasyonlarına Ca ile Mg sahiptir ve ppm seviyeleri sırasıyla 380789 ppm ve 9468 ppm'dir. Sr içerikleri de, 7104-16292 ppm arasında değişmekte ve çok yüksek konsantrasyon seviyelerine sahiptir. Dünya ölçeğinde travertenlerdeki Sr içeriğinin 20-14000 ppm arasında değiştiği bilindiğinden [43] Hacılar traverten örneklerindeki Sr içeriğinin yüksekliğine bağlı olarak traverten çökelten termal suların, derin dolaşımlı sular oldukları düşünülmektedir.

Tablo 1. Hacılar traverten örneklerinin element konsantrasyonları (ppm)

Hacılar Örnek No	Ca	Si	Al	Fe	Mg	Mn	Ba	Sr
HA-2	370140	6030	2858	2308.14	7960.61	< 7745	107	15007
HA-7	379645	1963	371	5595.49	8201.84	< 7745	45	7104
HA-9	380217	1075	476	3217.41	8563.68	< 7745	65	9210
HA-9A	374714	2104	847	1818.53	9468.30	< 7745	117	16292
HA-10	376643	1169	318	5595.49	7116.30	< 7745	109	13728
HA-15	380789	1075	212	3357.29	8865.22	< 7745	81	11431

3.3. Duraylı İzotop Bileşimi

Çatlak ve yamaçlardaki traverten oluşumunun duraylı izotop sonuçları, bunların kökeni hakkında bilgi sağlama potansiyeline sahiptir [22, 43, 44]. Bantlı travertenlerin duraylı izotop analizleri, IGGR-HAS'ta (Jeoloji ve Jeokimyasal Araştırma Enstitüsü, Macaristan Bilimler Akademisi, Astronomi ve Yer Bilimleri Araştırma

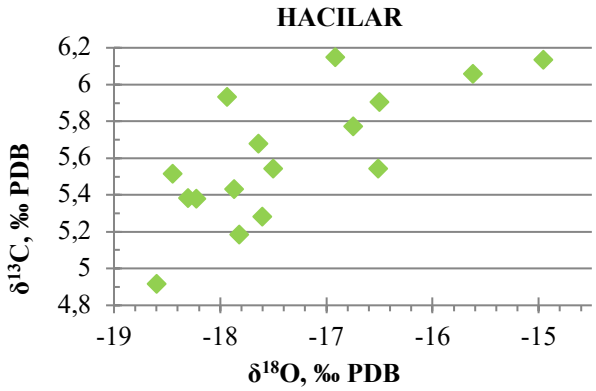
Merkezi) gerçekleştirildi. Yığın karbonat örneklerinin karbon ve oksijen izotop analizleri, sürekli akış tekniği kullanılarak gerçekleştirildi [45]. $^{13}C/^{12}C$ ve $^{18}O/^{16}O$ oranları, CO_2 gazlarında Finnigan Thermo delta plus XP kütle spektrometresi kullanılarak belirlendi. Tüm örnekler en azından iki kez ölçüldü ve izotopik bileşimler, Vienna Pee Dee Belemnite'e (VPDB; $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$) göre binde δ gösteriminde ifade edildi.

Termojen yani kireçtaşlarından çözünen veya doğrudan üst mantodan gelen CO_2 kaynaklı çökeller, yaygın olarak volkanik veya tektonik aktivitenin olduğu bölgelerde gözlenir. Meteojen çökeller ise topraktan ve atmosferden gelen CO_2'yi kullanan çökellerdir [46]. Termojen travertenlerin duraylı izotop kayıtları genellikle pozitif değerler verirken, meteojen travertenlerin (ör., tufaların) duraylı izotop kayıtları genellikle negatif değerler verir [43]. Pozitif $\delta^{13}C$ değerleri, magmatik faaliyetlerin dışında termo-metamorfik süreçler sonucunda ortaya çıkan CO_2'nin katkısını gösterirken, negatif $\delta^{13}C$ değerleri olasılıkla derin kökenli CO_2 ve toprak zonundan gelen CO_2'nin birleşmesini gösterir.

Köken belirleme amacıyla bu sırt tipi travertenler üzerinde $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$ duraylı izotop analizleri yapılmıştır. Tablo 2'de görülen sonuçlara göre [21] Hacılar traverten örneklerinin $\delta^{13}C$ değerlerinin +4.9 ile +6.1 (‰ PDB) arasında olduğu; $\delta^{18}O$ değerlerinin ise -18.6 ile -15.0 (‰ PDB) arasında değiştiği görülmektedir. Şekil 9'da [28] Hacılar traverten örneklerinin $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$ izotop değerlerinin grafik dağılımı verilmiştir. Gerek $\delta^{13}C$, gerekse $\delta^{18}O$ değerlerinin oldukça homojen bir dağılım sunduğu görülmektedir. Tüm örnekler hidrotermal kökenli olmakla birlikte, bantlı travertenlerin oluştuğu çatlak boşluğu, göreceli olarak daha homojen bir ortam olması nedeniyle birbirine çok yakın ^{13}C değerleri vermiştir.

Tablo 2. Hacılar traverten örneklerinin $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$ duraylı izotop değerleri

Hacılar Örnek No	Traverten tipi	$\delta^{13}C$ (‰ PDB)	$\delta^{18}O$ (‰ PDB)
HA-1	Bantlı	5.5	-16.5
HA-2	Kristalin kabuk	6.1	-16.9
HA-3	Bantlı	5.4	-18.3
HA-4	Bantlı	5.5	-18.4
HA-5	Bantlı	5.3	-17.6
HA-6	Bantlı	5.5	-17.5
HA-7	Bantlı	5.8	-16.8
HA-8	Kristalin kabuk	5.4	-17.9
HA-9	Pizolit	6.1	-15.0
HA-10	Kristalin kabuk	5.9	-17.9
HA-10a	Bantlı	5.9	-16.5
HA-11	Oolit	5.7	-17.6
HA-12	Bantlı	5.2	-17.8
HA-13	Bantlı	4.9	-18.6
HA-14	Bantlı	6.1	-15.6
HA-15	Bantlı	5.4	-18.2



Şekil 9. Hacılar traverten örneklerinin $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$ izotop değerlerinin grafik dağılımı

3.4.Yaş Bulguları

Traverten ve ilişkili karbonat damarlarının tarihlendirilmesi önemlidir. Çünkü tektonik ve paleosismik aktivitenin zamanlaması üzerinde kısıtlamalar getirir [27, 39, 44]. U-Th tarihlemesi için, boşluk dolduran kalsit çimentolarından kaynaklanan ikincil kirlenmeleri önlemek amacıyla açık renkli, yoğun ve görünüşte gözeneksiz birincil örnekler (çoğunlukla bantlı/damar, kristalin kabuk ve sal litotipleri) seçilmiştir. Traverten örneklerinin U serisi tayini, Kanada, Montreal'deki Quebec Üniversitesi'nin GEOTOP araştırma merkezinde gerçekleştirilmiştir.

Uranyum-Toryum, kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) materyallerin yaşını belirlemek amacıyla yaygın şekilde kullanılan bir radyometrik yaşlandırma tekniğidir. Bu çalışmada Smart (1991) temel alınarak kullanılan tekniğin genel ilkeleri oluşturulmuştur [47]. Kuramsal açıdan Ca (kalsiyum) içeren doğal sularda U (uranyum) rahatlıkla çözülebilir. Dolayısıyla çökelti sonucu meydana gelen kayaçlar uranyum izlerini taşır. Th (toryum), U'dan farklı olarak çözeltide çözülemez ve hızlıca hidroliz olur. Katı yüzeyler üzerine sıkıca tutunabildiğinden bu sulardan çökelen kayaçlar genellikle toryum içermez. Uranyum, kalsiyum karbonatın kimyasal veya biyolojik çökelmesi esnasında, aynı anda çökelmekte ve kalsit kristalleri arasında depolanmaktadır. Fakat toryum çökelmemekte ve doğal sulardaki toryum miktarı göz ardı edilmektedir. Dolayısıyla ana izotop olan ^{234}U'a karşın ^{230}Th eksikliği ortaya çıkar. Zamanla $^{230}Th/^{234}U$ oranı, eşitlik sağlanıncaya dek kademeli şekilde yükselir. ^{234}U ve ^{238}U arasında bir eşitsizlik ortaya çıkar ve ^{234}U'nun ayrışması sayesinde $^{230}Th/^{234}U$ oranı giderek artar.

Bir karbonat örneği için Uranyum serisi yaş tekniğinin başarılı şekilde uygulanması için depolanma sırasında kristallerde ^{230}Th var olmaması ve tane yüzeylerindeki toryumun, ^{232}Th olması gereklidir; ayrıca karbonat örneği aynı çözeltiden hemen kristallenmiş olmalıdır. Bu nedenle sonradan gelen toryum kirliliğini takip etmek amacıyla bu uzun ömürlü izotoptan yararlanılabilir. Eğer $^{230}Th/^{232}Th$ değeri 20'den düşükse ^{230}Th için düzeltme gereklidir. Düzeltme için farklı metodlar uygulanmakta olup, taneli ve çok poroziteli örneklerden sakınılmalıdır. Ayrıca sistemin çökelme bittikten sonraki U ve Th sirkülasyonuna kapalı olması gereklidir. Fazla gözeneklilik işaretleri olan örneklerden sakınılmalı, rekristalleşme ve ikincil kristalleşme oluşmamalıdır. U-Th yaşlandırma tekniği, özellikle 400.000-5.000 yıl arasında uygulanabilmektedir [44].

Bu çalışma kapsamında Hacılar traverten sahasından alınan 5 adet traverten örneği için U-Th yaşlandırma tekniği uygulanmış ve Tablo 3'te görülen U-Th yaşları elde edilmiştir [28]. Bu yaş verileri dikkate alındığında Hacılar sırt tipi traverten sahasında traverten çökeliminin günümüzden yaklaşık 7000 yıl önce, Holosen (MIS 1, Marine Isotope Stage)'e denk gelen zamanda başlamış olduğu söylenebilir. Travertenin çökelmesinden sorumlu termal akışkanların taşınmasını ve CO_2 salınımının bu zaman aralığında aktif olduğu söylenebilir. Ayrıca batı kısımda bulunan 150 m'lik kısa sırtın 520 m'lik uzun sırttan daha yaşlı olması, kırıkların ana faya doğru gençleştiğini gösterir.

4.Tartışma ve Sonuçlar

Traverten oluşum tipleri, tektonizma ile yakından ilişkilidir. Özellikle termojen kökenli traverten oluşumları için jeotermal bir aktiviteye ihtiyaç vardır. Jeotermal aktivite de, tektonizmanın ve/veya vokanizmanın kontrolündedir. Su derine inerken ortamda var olan $CaCO_3$'ı çözüp bünyesine alır ve daha sonra ısınıp yeryüzüne taşınır. Bu taşınma, fay ve çatlak gibi tektonik hatlar boyunca olur.

Traverten birikimi, ekstansiyonel tektoniğin etkili olduğu yerlerde daha yaygındır [16, 18, 22, 23, 34, 48, 49, 50]. Bu tür yerlerde, genellikle çok sayıda ekstansiyonel kırıkla birlikte görülen normal faylanma sonucu oluşan hasar bölgeleri, termal sıvıların dolaşımı için uygun ortamlardır ve dolayısıyla traverten birikimi için önemli bir potansiyele sahiptir [35, 51]. Buna karşılık, büyük doğrultu atımlı fay zonları boyunca traverten çökelmesi daha az yaygındır. Basınç sırtları, serbestleyen/sıkıştıran büklümler ve doğrultu atımlı havzanın bir kısmını çevreleyen normal fayların kesişimiyle sınırlıdır. Sıvı dolaşımı, hidrolik kanalların oluşmasına neden olan yoğun şekilde kırılmış kaya kütleleri tarafından kontrol edilir. Bu nedenle hidrotermal sistemler ve kaynak karbonatları, kırıklar tarafından kontrol edilir [51]. Sonuç olarak hem ekstansiyonel hem de doğrultu atımlı tektonik ortamlarda, traverten çökelmesi için ön koşul parametreleri şunlardır: (1) sıvıların dolaşımına izin veren geçirgen temel kayaçlardaki bir kırık sistemi ve (2) CO_2 ve bikarbonat açısından zengin aşırı basınçlı hidrotermal sular. Karbonat temel kayaçlarındaki kırıklar, meteorik suların yeraltına inmesine ve hidrotermal sıvıların yüzeye çıkmasına izin veren doğal yollardır [22]. Bu çalışmada incelenen Hacılar traverteni, Doğu Anadolu Fay Zonu'nu meydana getiren segmentlerden biri olan Ilıca segmentinin aktivitesine bağlı olarak genişlemeli bir alanda çökelmiştir. Bitlis Metamorfitleri'nin mermerleri, bu traverten çökelimine köken olan ana kayadır.

Tablo 3. Hacılar traverten sahası için U-Th yaşlandırma analiz sonuçları

	Örnek No				
	HA-1	**HA-7**	**HA-12**	**HA-14**	**HA-15**
^{238}U ppm	0.505	0.404	0.442	0.440	0.485
±	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002
^{232}Th ppm	0.602	0.032	0.030	0.010	0.001
±	0.007	0.000	0.000	0.000	0.005
^{234}U/^{238}U	4.124	4.549	4.477	4.495	4.755
±	0.022	0.029	0.030	0.038	0.021
^{230}Th/^{234}U	0.082	0.008	0.004	0.056	0.064
±	0.002	0.000	0.001	0.001	0.001
^{230}Th/^{238}U	0.339	0.034	0.018	0.253	0.303
±	0.006	0.001	0.002	0.004	0.002
^{230}Th/^{232}Th	0.870	1.302	0.799	35.697	38.248
±	0.019	0.024	0.095	0.638	0.328
Hesaplanan yaş (binyıl)	9.246	0.820	0.438	6.263	7.112
Hata	0.179	0.015	0.051	0.110	0.062
Düzeltilen yaş (binyıl)	**0.485**	**0.300**	**0.000**	**6.123**	**6.965**
Hata	4.942	0.283	0.000	0.127	0.089

Önceki çalışmalarda, traverten yataklarından ve özellikle damar travertenlerinden elde edilen U serisi yaş verileri, çatlak sırtlarındaki genişlemenin hesaplanması, traverten dolu çatlakların uzunluğu boyunca yanal yayılımın [16, 25, 34, 39] hesaplanması, fay aktivitesinin ve sismisitenin belirlenmesi gibi bazı neotektonik yorumlar için kullanılmıştır. Jeotermal alanlarda, hidrotermal sıvıların dolaşımı ve yükselmesi ve dolayısıyla traverten çökelmesi faylanma ve kırılma dönemlerinde kolaylaşır [35]. Buna göre, travertenlerden elde edilen mutlak tarihleme sonuçları tektonik aktivite veya faylanma dönemlerine karşılık gelir [39, 51]. Bölgeyi etkileyen genel sıkışma doğrultusunun, K-G olduğu ve makaslama zonlarında oluşan sintetik kırıkların (R kırıkları) ana fayla 10°-30° arasında açı yaptığı göz önünde bulundurulduğunda, bu sırt tipi travertenin bir sintetik kırık (R kırığı) üzerinde açılmaya bağlı olarak geliştiği sonucuna varılır. Genç bir sırt olduğundan ve dolayısıyla yeterli kalınlıkta gelişmediğinden bantlı travertenlerin sırt boyunca yanal açılma hızı belirlenememiştir.

Duraylı izotop analizlerinden elde edilen $\delta^{13}C$ değerlerinin 4.9 ile 6.1 (‰ PDB) aralığında; $\delta^{18}O$ izotop değerlerinin ise -18.6 ile -15.0 (‰ PDB) aralığında olduğu görülmüştür. Tüm örnekler hidrotermal kökenlidir. Gerçekleştirilen XRD analizleri, travertenlerin tamamen kalsitten meydana geldiğini göstermektedir.

U-Th yaşlandırma tekniği yoluyla elde edilen yaş verileri, Hacılar bölgesindeki traverten oluşumunun günümüzden en az 7000 yıl önce başladığını göstermektedir. Bu yaş değerinin büyük bir makaslama zonu olan sol yanal doğrultu atımlı Doğu Anadolu Fay Zonu'nun oluşum yaşıyla uyumlu olduğu görülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 110Y172 ve FUBAP 2023 no'lu projeler kapsamında desteklenmiş olup Serap ÇOLAK EROL'un doktora tezinden üretilmiştir. Ayrıca yazarlar, Pamukkale Üniversitesi'nden Mehmet ÖZKUL'a teşekkür eder.

Kaynaklar

[1] Bates RL, Jackson JA. Glossary of Geology (2nd edition). Virginia, USA: American Geology Institute Falls Church, 1980.
[2] Julia R. Travertines, In: Carbonate Depositional Environments. Scholle PA, Bebout DG, Moore CH (Eds). Tulsa, Oklahoma, USA: Mem Am Assoc Pet Geol Memoir, 1983; 33, 64-72.

[3] Chafetz HS, Folk RL. Travertines, depositional morphology and the bacterially constructed constituents. Journal of Sedimantary Petrology 1984; 54: 289-316.
[4] Wyatt, A. Challinor's Dictionary of Geology (6th edition). Cardiff, UK: University of Wales Press, 1986.
[5] Guo L, Riding R. Hot-springs travertine facies and sequences, Late Pleistocene, Rapolano Terme, Italy. Sedimentology 1998; 45: 163-180.
[6] Sibson RH, Moore JM, Rankin AJ. Seismic pumping a hydrothermal fluid transport mechanism. J Geol Soc London 1975; 131: 653-659.
[7] Heimann A, Sass E. Travertines in the northern Hula Valley, Israel. Sedimentology 1989; 36(1): 95-108.
[8] Altunel E. Pamukkale travertenlerinin morfolojik özellikleri, yaşları ve neotektonik önemleri. MTA Dergisi 1996; 118: 47-64.
[9] Arpat E, Şaroğlu F. Doğu Anadolu Fayı ile ilgili bazı gözlem ve düşünceler. MTA Bült 1972; 73: 1-9.
[10] Jackson J, McKenzie D. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt between western Turkey and Pakistan. Geoph J Royal Astr Soc 1984; 77: 185-264.
[11] Şengör AMC, Görür N, Şaroğlu F. Strike-slip faulting and related basin formation in zone of tectonic escape: Turkey as a case study, In: Strike-slip deformation, basin deformation and sedimentation. Biddle KT, Christie-Blick N (Eds). Soc Econ Paleont and Min Spec Publ, 1985; 37: 227-264.
[12] Koçyiğit A, Aksoy E, İnceöz M. Basic neotectonic characteristics of the Sivrice Fault Zone in the Sivrice-Palu area, East Anatolian Fault System (EAFS), Turkey. International Workshop on the North Anatolian, East Anatolian and Dead Sea Fault systems; Recent progress in Tectonics and Paleoseismology 2003; 31 August to 12 September 2003; METU-Ankara-Turkey. Pre-International workshop excursion guide-book, 20 p.
[13] Şaroğlu F, Emre Ö, Kuşçu İ. The East Anatolian fault zones of Turkey. Annales Tectonicae 1992; 6: 99-125.
[14] Westaway R. Kinematics of the Middle East and Eastern Mediterranean updated. Turkish J Earth Sci J 2003; 12: 5-46.
[15] Gürsoy H, Tatar O, Piper JDA, Heiman A, Mesci L. Neotectonic deformation linking the East Anatolian and Karatas-Osmaniye intracontinental transform fault zones in the Gulf of İskenderun, Southern Turkey, deduced from paleomagnetic study of the Ceyhan-Osmaniye volcanic. Tectonics 2003; 22 (6): 1067.
[16] Altunel E, Hancock PL. Morphology and structural setting of Quaternary travertines at Pamukkale, Turkey. Geological Journal 1993; 28: 335-346.
[17] Çakır Z, Tectonic significance of Quaternary travertine deposits in the Gediz and Menderes grabens, Western Turkey. MSc, Bristol University, UK, 1996
[18] Çakır Z. Along–strike discontinuity of active normal faults and its influence on Quaternary travertine deposition: Examples from western Turkey. Tr J of Earth Sciences 1999; 8: 67-80.
[19] Ayaz E, Sıcak Çermik (Yıldızeli-Sivas) yöresindeki traverten sahalarının jeolojisi ve travertenlerin endüstriyel özellikleri. Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, 1998.
[20] Karabacak V, Ihlara Vadisi civarındaki traverten oluşumları ve tektonik önemleri. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 2002.
[21] Çolak Erol S, Doğu Anadolu Fay Sistemi'nin kuzeydoğu bölümündeki travertenlerin neotektonik önemi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2014.
[22] Özkul M, Kele S, Gökgöz A, Shen CC, Jones B, Baykara MO, Fórizs I, Nemeth T, Chang YW, Alçiçek MC. Comparison of the Quaternary travertine sites in the Denizli extensional basin based on their depositional and geochemical data. Sedimentary Geology 2013; 294: 179-204.
[23] Özkul M, Gökgöz A, Kele S, Baykara MO, Shen CC, Chang YW, Kaya A, Hançer M, Aratman C, Akın T, Örü Z. Sedimentological and geochemical characteristics of a fluvial travertine: a case from the eastern Mediterranean region. Sedimentology 2014; 61: 291-318.
[24] Mesci BL, Sıcak Çermik ve yakın yöresindeki (Sivas) travertenlerin gelişimi ve aktif tektonikle ilişkisi. Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, 2004.
[25] Mesci BL, Gürsoy H, Tatar O. The evolution of travertine masses in the Sivas area (Central Turkey) and their relationship to active tectonics. Turkish Journal of Earth Sciences 2008; 17: 219-240.
[26] Mesci BL. Active tectonics of the Ortaköy fissure-ridge-type travertines: Implications for the Quaternary stress state of the Neotectonic structures of the Central Anatolia, Turkey. Geodinamica Acta 2013b; 25: 12-25.
[27] Uysal T, Feng Y, Zhao J, Altunel E, Weatherley D, Karabacak V, Cengiz O, Golding SD, Lawrence MG, Collerson KD. U-series dating and geochemical tracing of late Quaternary travertines in co-seismic fissures, Earth and Planetary Science Letters 2007; 257: 450-462.
[28] Çolak Erol S, Özkul M, Aksoy E, Kele S, Ghaleb B. Travertine occurences along major strike-slip fault zones: Structural, depositional and geochemical constraints from the Eastern Anatolian Fault System (EAFS), Turkey. Geodinamica Acta 2015; 27 (2-3): 154-173.
[29] Çolak Erol S. Doğrultu atımlı fay sistemlerindeki traverten oluşumlarının jeolojik, tektonik, jeokimyasal ve jeokronolojik özelliklerine Sivrice (Elazığ) güneybatısı'ndan bir örnek. Türkiye Jeoloji Bülteni 2016; 59(3): 341-356.
[30] Çolak Erol S, Aksoy E, Özkul M. Bağdere tufası'nın jeolojik, jeokimyasal ve jeokronolojik özellikleri (Elazığ, D Türkiye). Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2022; 34(1): 377-388.
[31] Koçak İ, Temiz U, Öksüz N. Salanda Fay Zonu (SFZ) ile ilişkili traverten oluşumlarının paleoiklimsel önemi. Müh Bil ve Araş Dergisi 2021; 3(2): 218-225.

[32] Demirkıran Z, Elçi H. Urganli (Manisa) travertenlerinin morfolojik özellikleri ve tektonizma ile ilişkisi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2022; 10(3): 1027-1042.
[33] Şaroğlu F, Güner Y. Doğu Anadolu'nun jeomorfolojik gelişimine etki eden öğeler: jeomorfoloji, tektonik volkanizma ilişkileri. Türkiye Jeol. Kur. Bült 1981; 24(2): 39-50.
[34] Altunel E, Karacabak V. Determination of horizontal extension from fissure-ridge travertines: a case study from the Denizli Basin, southwestern Turkey. Geodinamica Acta 2005; 18: 333-342.
[35] Brogi A, Capezzuoli E. Travertine deposition and faulting: the fault-related travertine fissure ridge at Terme S. Giovanni, Rapolano Terme (Italy). Int J Earth Sci (Geol Rundsch) 2009; 98: 931-947.
[36] De Filippis L, Faccenna C, Billi A, Anzalo E, Brilli M, Özkul M, Soligo M, Tuccimei M, Villa I. Growth of Fissure Ridge Travertines from Geothermal Springs of Denizli Basin, Western Turkey. Geological Society of America Bulletin 2012; 124 (9-10) :1629-1645.
[37] Mesci BL. Özgün Niteliklere Sahip Travertenler ve Önemleri: Sivas Yöresi Travetenlerinden Örnekler. Türkiye Jeoloji Bülteni 2013a; 56 (1): 23-37.
[38] Brogi A, Capezzuoli E, Alçiçek MC, Gandin A. Evolution of a fault-controlled fissure-ridge type travertine deposit in the western Anatolia extensional province: the Çukurbağ fissure-ridge (Pamukkale, Turkey). Journal of the Geological Society 2014; 171 (3): 425-441.
[39] Hancock PL, Chalmers RML, Altunel E, Çakır Z. Travitonics: using travertines in active fault studies. Journal of Structural Geology 1999; 21: 903-916.
[40] Koçyiğit A, Aksoy E, İnceöz M. Basic neotectonic characteristics of the Sivrice Fault Zone in the Sivrice-Palu area, East Anatolian Fault System (EAFS), Turkey. International Workshop on the North Anatolian, East Anatolian and Dead Sea Fault systems; Recent progress in Tectonics and Paleoseismology 2003; 31 August to 12 September 2003; METU-Ankara-Turkey. Pre-International workshop excursion guide-book, 20 p.
[41] Özkul M, Varol B, Alçiçek MC. Denizli travertenlerinin petrografik özellikleri ve depolanma ortamları. MTA Dergisi 2002; 125: 13-29.
[42] Bárdossy Gy, Bottyán L, Gadó P, Griger Á, Sasvári J. Automated quantitative phase analysis of bauxites. American Mineralogist 1980; 65: 135-141.
[43] Pentecost A. Travertine. Berlin, Germany: Springer Verlag, 2005.
[44] Uysal IT, Feng Y, Zhao J, Işık V, Nuriel P, Golding SD. Hydrothermal CO2 degassing in seismically active zones during the late Quaternary. Chemical Geology 2009; 265: 442-454.
[45] Spötl C, Vennemann T. Continuous-flow isotope ratio mass spectrometric analysis of carbonate minerals. Rapid communications in mass spectrometry 2003; 17(9): 1004-1006.
[46] Deocampo D M. The geochemistry of continental carbonates. Developments in Sedimentology 2010; 62: 1-59.
[47] Smart PL. Uranium series dating, In: Quaternary dating Methods-a User's Guide. Smart PL, Francis PD (Eds). London, UK: Qart Res Assoc Tech Guide 4, 1991; 45-83.
[48] De Filippis L, Faccenna C, Billi A, Anzalo E, Brilli M, Özkul M, Soligo M, Tuccimei M and Villa I. Growth of Fissure Ridge Travertines from Geothermal Springs of Denizli Basin, Western Turkey. Geological Society of America Bulletin 2012; 124 (9-10):1629-1645.
[49] [Kele S, Özkul M, Gökgöz A, Fórizs I, Baykara MO, Alçiçek MC, Németh T. Stable isotope geochemical and facies study of Pamukkale travertines: new evidences of low-temperature non-equilibrium calcite-water fractionation. Sedimentary Geology 2011; 238: 191-212.
[50] Selim HH, Yanık G. Development of the Cambazlı (Turgutlu/MANISA) fissure-ridge-type travertine and relationship with active tectonics. Gediz Graben, Turkey. Quaternary International 2009; 199 (1-2); 157-163.
[51] Brogi A, Capezzuoli E, Buracchi E, Branca M. Tectonic control on travertine and calcareous tufa deposition in a low-temperature geothermal system (Sarteano, Central Italy). Journal of the Geological Society 2012; 169(4): 461-476.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 665-684, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1648971

Elazığ Hamzabey Barajı, Baraj Göl Aynası Altında Kalan Bitki Türleri

Gülden DOĞAN[1*], Eyüp BAĞCI[2]
[1,2]Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, 23169, Elazığ, Türkiye
[1]gdogan@firat.edu.tr, [2]ebagci@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 28/02/2025; Kabul/Accepted:21/07/2025)

Öz: Elazığ ili Hamzabey Barajı yapım aşamasında, alana yapılan arazi çalışmaları sonucunda, baraj havzası içinde kalan alanda kapalı ve açık tohumlu bitkilerden (Angiospermae/ Gymnospermae) 48 familyaya ait 177 taksonun (Açık tohumlu bitkilerden 1 takson-*Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus*) doğal olarak yayılış gösterdiği tespit edilmiştir. Baraj alanı içinde ekilebilen tarım alanlarının bulunduğu, nadasa bırakılan toprakların da var olduğu saptanmıştır. Genel olarak step vejetasyon tipinin hakim olduğu bölgeyi baştan sona kadar dolaşan Caro Deresi etrafında az da olsa sulak alanların oluştuğu ve buralarda *Juncus* gibi bazı sucul habitat bitkilerinin geliştiği de gözlenmiştir. Araştırma alanında 19 endemik taksona rastlanmış olup, bunlardan 18 taksonun IUCN kategorisine göre tehlike altında olduğu ve bunlar için koruma önlemlerinin alınması gerektiği tespit edilmiştir. Bunların dışında çok sayıda tıbbi ve ekonomik değere sahip, süs ve yem bitkisi olarak kullanılabilecek bazı bitki türlerinin de doğal olarak yayılış gösterdiği de belirlenmiştir. Bu grup bitkilerin populasyonları gerek ülke gerekse il bazında zengin olduğu için ilave bir önleme gerek duyulmamıştır. Ancak bunlardan bazı önemli taksonların tek populasyonlarına rastlanmış olup (*Orchis laxiflora*, *Orchis punctulata* ve *Trifolium physodes* var. *physodes* gibi), bu taksonların değişik amaçlarla kullanılabilme özelliğine sahip olması da göz önüne alınarak, koruma altına alınmaları önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Elazığ, Hamzabey Barajı, bitki türleri, endemik.

Elazığ Hamzabey Dam, Plant Species Below The Dam Lake Surface Area

Abstract: As a consequence of the field studies conducted during the construction phase of the Hamzabey Dam in Elazığ province, it was ascertained that 177 taxa belonging to 48 families of Angiospermae and Gymnospermae plants (1 taxon from Gymnospermae plants-*Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus*) naturally proliferate in the area within the dam basin. It has been determined that there are arable agricultural lands and fallow lands within the dam area. It was also observed that some wetlands were formed around the Caro stream, which traverses the region, which is generally dominated by steppe vegetation type, and some aquatic habitat plants such as Juncus developed in these areas. In the research area, 19 endemic taxa were found and it was determined that 18 of these taxa are endangered according to the IUCN category and protection measures should be taken for them. Apart from these, it has also been determined that a large number of plant species that have medicinal and economic value and can be used as ornamental and fodder plants are naturally distributed. Since the populations of this group of plants are rich both in the country and in the province, no additional measures were required. However, single populations of some important taxa were found, and considering the fact that these taxa can be used for different purposes (*Orchis laxiflora*, *O*rchis *punctulata* and *Trifolium physodes* var. *physodes*), it is recommended that they be taken under protection.

Key words: Elazığ, Hamzabey Dam, plant species, endemic.

1. Giriş

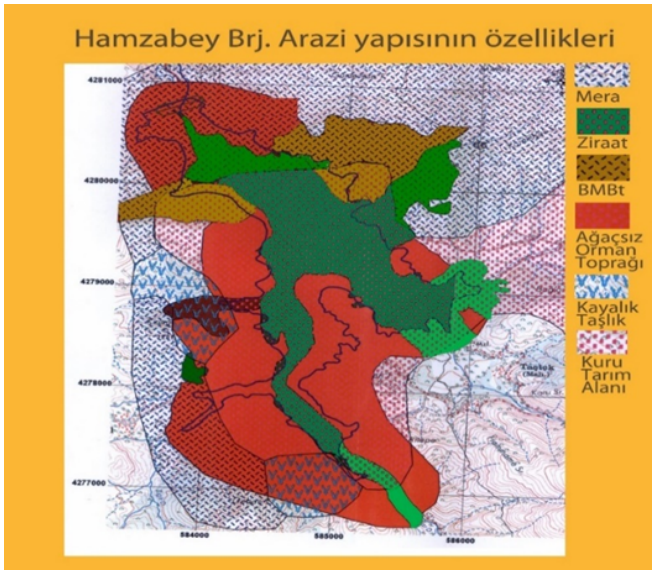
Hamzabey Barajı, Elazığ kentinin ve yakın çevresinin su ihtiyacını karşılamak üzere tasarlanmış ve 2012 yılında yapımına başlanmış olup, 2020 yılında faaliyete geçmiştir. Hamzabey Baraj alanının yer aldığı Baltaşı Ovası, Mastar Dağı'nın doğu kısmında Hazar Gölü ile Palu arasında bulunup, Yukarı Fırat Havzası "Güney Doğu Toros Kıvrım Sistemi" içerisinde yer alan depresyon ovalarından biridir [1]. Baltaşı Ovası'nın kuzeyinde Keban Baraj Gölü, güneyinde Sori ve Rut Dağları, doğusunda Kömüş Dağı ve batısında Mastar dağlık kütlesiyle sınırlı olup yaklaşık 136 km^2'lik bir alan kaplar. Palu ilçesinin yaklaşık 4 km güneydoğusunda yer alan içme suyu projesinin en önemli yapısı olan Hamzabey Barajı, Elazığ il merkezine yaklaşık olarak 75 km, Palu ilçesine 5 km mesafede olup, Caro Çayı üzerinde yer almaktadır. Baraj yerine ulaşım, asfalt olan Elazığ-Bingöl Yolu ve devamında stabilize yol ile sağlanabilmektedir [2].

2010 Hamzabey ÇED raporuna göre; Hamzabey Barajı'nın Mutlak Koruma Alanında kalan orman sayılan alan miktarı 17,63 ha'dır. Alanda Milli Park, Tohum Meşçeresi, Av Yaban Hayatı, Av Üretme Sahası ve benzeri alanlar bulunmamaktadır. Proje alanında milli parklar, tabiat parkları, tabiat anıtları, tabiatı koruma alanları, yaban

* Sorumlu yazar: gdogan@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-7668-3368, [2]0000-0002-1824-9424

hayatı koruma, yerleştirme ve geliştirme sahaları, tabiat varlıkları, biyogenetik rezerv alanları, biyosfer rezervleri, özel çevre koruma bölgeleri, özel koruma alanları ve koruma altına alınmış diğer alanlar bulunmamaktadır [3].

Faaliyet alanının bulunduğu bölge, Davis (1967) [4] tarafından verilen Türkiye Florası'nda kullanılan kareleme sistemine göre (Grid sistem) B7 ve B8 kareleri içerisinde yer almakta ve bitki coğrafyası bakımından da İran-Turan Fitocoğrafik Bölgesi içerisinde bulunmaktadır. Doğal bitki örtüsü kısa ve orta boylu çayır ve otlar olan sahanın değişik noktalarından toprak numuneleri alınarak yapılan analizler sonucu, toprak türünün kumlu balçık, balçık, kumlu killi balçık ve kil şeklinde olduğu belirlenmiştir. Bu topraklar serin veya yarı nemli iklimde bulunur. Topraklar yılın büyük bölümünde kuru olup ancak nadir durumlarda nemlilik arz eder [5].
Arazi yapısı genel olarak; mera, ziraat, ağaçsız orman toprağı, kayalık taşlık ve kuru tarım alanı şeklindedir (Şekil 1).



Şekil 1. Arazi yapısının genel özellikleri [3].

Hamzabey (Baltaşı) Baraj alanının da yer aldığı Elazığ ili sınırları, Tunceli, Bingöl kısmen de Malatya ve Muş illerinin yer aldığı Yukarı Fırat Havzası'nda yetişen bitki türleri üzerinde yapılan floristik çalışmalar sonucunda Fabaceae, Asteraceae, Brassicaceae, Lamiaceae, Caryophyllaceae ve Poaceae familyalarının; *Astragalus* L., *Trifolium* Tourn. ex L., *Alyssum* L., *Silene* L. ve *Vicia* L. cinslerinin de yoğun olarak bulunduğu bilinmektedir [6]. Ayrıca bölge, bitkisel bakımdan önemli gen merkezleri arasındadır. Türkiye'nin sahip olduğu bitkisel zenginlik, tür çeşitliliği ile yüksek endemizm oranı da bölgeyi önemli kılmaktadır.

Çalışmanın amacı: Mevcut çalışma, "Elazığ İli İçme Suyu Projesi" kapsamında gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamında Caro Deresi üzerinde Hamzabey Barajının kurulması planlanmıştır. Hamzabey Barajının yapılan işletme çalışmalarında, Elazığ kentinin ve yakın çevresinin 2040 hedef yılı ihtiyacını karşılayamadığı görülmüştür. Meydana gelecek su açığını tamamlamak amacıyla, Tarhana Deresi üzerine kurulacak bir regulatör ve buna bağlı kanal ve tünel sistemiyle, taşkın dönemlerinde Tarhana Deresine gelen fazla suyun baraja derive edilmesi planlanmıştır. Barajdan alınacak su, yapılacak isale hattı ile arıtma tesisine taşınacaktır. Burada arıtıldıktan sonra alınacak su, Elazığ şehir merkezi ile merkez yakınlarındaki Yazıkonak, Yurtbaşı, Akçakiraz, Mollakendi belediyeleri ile Şahinkaya ve Sarıçubuk köylerinin içme ve kullanma suyu karşılanacaktır. Tarhana Deresi derivasyonlu Hamzabey Barajı'ndan karşılanacak su miktarı 44,18x80 m^3/yıl olarak öngörülmüştür. Bu çerçevede yapılan projeksiyon çalışmasında Elazığ Kent merkezi ve yakın çevresinin 2040 yılı nüfusu 693.757 kişi ve su ihtiyacı da 62.20x10 m^3/yıl olarak belirlenmiştir. Bu nedenle bahse konu barajın yapılması büyük önem arz etmekle birlikte başka su kaynaklarına da ihtiyaç duyulmaktadır.

DSİ Genel Müdürlüğünce ülke genelinde su tutulacak (baraj) alanlarda, risk altında olan, ekonomik (tıbbi, aromatik…) değeri olan, endemik, lokal endemik, nadir ve nesli tehlikede olan bitki türlerini tespit etmeye yönelik alanın florasını ortaya koymak amacıyla yapılan bu çalışmada; bitkilerden taşınabilir özellikte olanlarının tespitini

yapmak, bu bitki türlerinin neslini devam ettirebileceği, iklim, toprak yapısı ve ekolojik özellikler açısından en uygun habitatı tespit etmek bu projenin amaç ve kapsamını oluşturmaktadır. Barajların yapılması veya ekolojik sistemlere antropojenik bir etki yapılması durumunda mevcut ekosistemin değişikliğe uğrayacağı ve olumsuz sonuçların ortaya çıkacağı bilinen bir gerçektir. Bu bağlamda; Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğü ile bazı devlet kurumları arasında yapılan protokol gereği; su tutma gibi faaliyetlerle ekolojik değişikliğe uğrayacak bölgelerde bitki türlerinin öncelikle tespit edilmesi, karakterizasyonunun yapılması, koruma altına alınacak türlerin ve başta lokal endemikler olmak üzere tüm endemiklerin belirlenmesi, tehlike altında ve sınıra yaklaşmış olan türlerin de tespit edilerek, su tutma öncesinde uygun habitatlara taşınarak kurtarılması ve sürdürülebilirliklerinin sağlanması amaçlı bu çalışma, ülkenin ekolojik mirasının korunması yönünde yapılmış anlamlı çalışmalardan biridir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Bitki örneklerinin toplanması ve teşhis edilmesi

Bitki örnekleri 2013 yılında yapılan arazi gezileri sonucunda doğal habitatlarında gözlemlenerek, populasyon oluşturabilen ve popülasyonu temsil edebilecek, çiçekli vejetasyon dönemlerinde toplanmaya çalışılmıştır. Araziden toplanan her örneğe bir kayıt numarası verilmiş ve arazi defterine işlenmiştir. Bu bitki örnekleri herbaryum tekniklerine göre kurutulmuş, teşhisleri için de, Türkiye Florası [4] ile çeşitli sanal herbaryumlardan ve Fırat Üniversitesi Herbaryumu (FUH)'ndan faydalanılmıştır. Her bitkinin familya, cins ve tür adı, türkçe ismi, çiçeklenme dönemi, habitat özellikleri, endemizm durumu [7], ayrıca tehlike kategorileri de "Türkiye Bitkileri Kırmızı Kitabı" [8]'na göre belirlenerek bulgular kısmında familya alfabetik sırasına göre verilmiştir.

2.2. Ekolojik çalışmalar

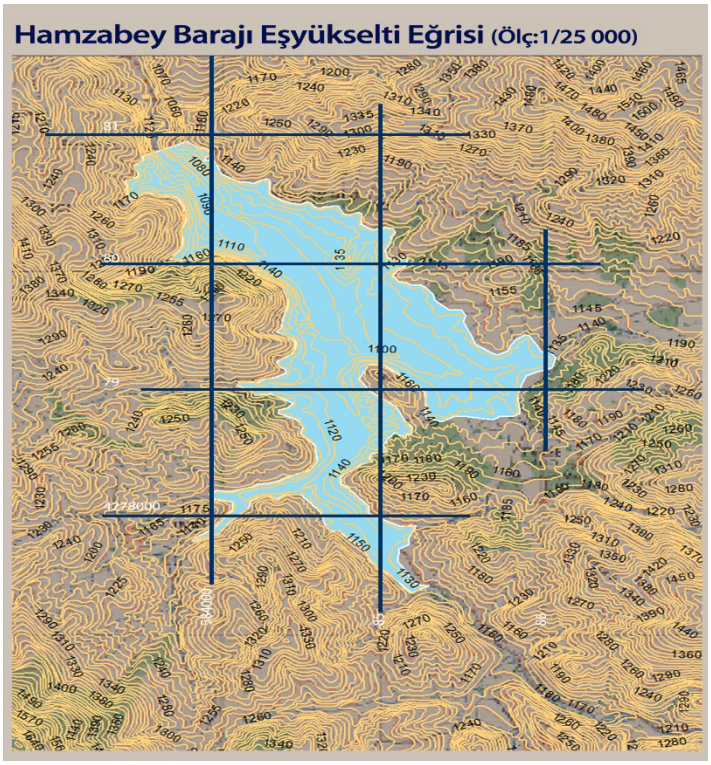
Bitki örneklerinin yetişme alanlarına göre alanın toprak yapısı, toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin tespiti için, proje ekibi ve G.D.A. Ormancılık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü ekipleri tarafından Şekil 2'de gösterilen baraj havzasının bitki yetişen habitatlarından toprak profil örnekleri alınarak toprak analizleri yapılmış ve sonuçlar bulgular kısmında tablo halinde sunulmuştur (Tablo 1).

Koordinat Alma ve Toprak Analizleri: Bölgeye ait bazı habitatların ve bitki türlerinin GPS yardımı ile koordinat ataması yapılmıştır. Buna göre baraj havzası içinde yer alacak ve ayna içinde kalarak su dolacak bazı bölgelerden özellikle bazı bitki grupları için GPS kayıtları alınmış ve lokalite tespitleri yapılmıştır. Bu 1/25000'lik topoğrafik harita üzerinde gösterilmiştir (Şekil 3).

Bölgeye Ait İklimsel Verilerinin Elde Edilmesi: Alana ait iklimsel veriler Elazığ Meteoroloji Müdürlüğü'nden alınarak yıllık ortalama sıcaklık, yağış ve aylara göre yıllık ortalama yağış-sıcaklık durumu bulgular kısmında grafikler halinde düzenlenmiştir.



Şekil 2. Hamzabey Baraj havzası toprak yapısı ve numune alım noktaları.



Şekil 3. Hamzabey Barajı eşyükselti eğrisi

3. BULGULAR

3.1. Çalışma Alanında Belirlenen Taksonlar

Yapılan arazi çalışmaları sonucunda incelenen baraj havzası içinde doğal olarak yetişen, kapalı ve açık tohumlu bitkilerden (Angiospermae/ Gymnospermae) 48 familyaya ait 177 takson, (Açık tohumlu bitkilerden 1 takson-*Juniperus oxycedrus* L. subsp. *oxycedrus*)' un doğal olarak yayılış gösterdiği saptanmıştır. Baraj aynası içinde ekilebilen tarım alanlarının bulunduğu, nadasa bırakılan toprakların var olduğu saptanmıştır. Genel olarak step vejetasyon tipinin hakim olduğu Baraj aynasını baştan sona kadar dolaşan Caro Deresi etrafında çok az da olsa sulak alanların oluştuğu ve buralarda *Juncus* L. gibi bazı sucul habitat bitkilerinin geliştiği söylenebilir.

Çalışma alanında tespit edilen familya ve türlere ait detaylı bilgiler aşağıda alfabetik sıraya göre verilmiştir.

AMARYLLIDACEAE
Allium ampeloprasum L.: Pırasa, Kaya sarmısağı, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; *Pinus* ormanları, maki, çalı, kayalık, kayalık stepler, zeytinlik, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1036

ANACARDIACEAE
Rhus coriaria L.: Sumak, Çok yıllık, Çiçeklenme; 6-7 aylar, Habitatı; çalılık ve ormanlık alanlar, 21 Haziran 2013, Bağcı 1047
Pistacia terebinthus L. subsp. *palaestina* Boiss. Engler: Menengiç, Çok yıllık, Çiçeklenme; 3-5 aylar, Habitatı; kayalık yamaçlar, maki, 27 Mart 2013, Bağcı 1000

APIACEAE
Artedia squamata L.: Karabenek, Tek yıllık, Çiçeklenme; 4-7 aylar, Habitatı; tepeler, yamaçlar, çalılık ve tarla kenarları, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1109
Turgenia latifolia (L.) Hoffm.: Pıtrak, Tek yıllık, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; çorak ekili alanlar, 14 Haziran 2013, Bağcı 1050

Daucus carota L.: Havuç, Çok yıllık, Çiçeklenme; 6-7 aylar, Habitatı; çayırlar, yamaçlar ve tarlalar, 14 Haziran 2013, Bağcı 1067
Pimpinella kotschyana Boiss.: Meyane, Kır anasonu, İki veya çok yıllık, Çiçeklenme; 6-8 aylar, Habitatı; taşlı yerler, step, 1 Ağustos 2013, Bağcı 1160
Heracleum antasiaticum Manden: Kamşam, Çok yıllık, Çiçeklenme; 6-7 aylar, Habitatı; orman kenarı, çalılık ve dere yakınları, 14 Haziran 2013, Bağcı 1054

ARACEAE
Biarum carduchorum (Schott.) Engler.: Sucuk, Çok yıllık, Çiçeklenme; 8-9 aylar, Habitatı; kalkerli ve volkanik tepeler, otlaklar, kurak nehir kıyıları, 1 Ağustos 2013, Bağcı 1175

ASCLEPIADACEAE
Cionura erecta (L.) Griseb: Bodur otu, Babrik, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-9 aylar, Habitatı; hareketli kayalar, uçurumlar ve kıyılar, 7 Haziran 2013, Bağcı 1066

ASPARAGACACEAE
Asparagus plumosus Baker.: Kuşkonmaz, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; sulak, kumlu ve killi topraklar, ormanlık yerler, 14 Mayıs 2013, Bağcı 1016
Ornithogalum tenuifolium Guss.: Köpeksoğanı, tükürük otu, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-7 aylar, Habitatı; yamaçlar, tarlalar, yol kenarları, koruluklar, 14 Mayıs 2013, Bağcı 1038
Muscari comosum (L.) Mill.: Morbaş, Çok yıllık, Çiçeklenme; 3-7 aylar, Habitatı; *Pinus* ormanları, maki, çalı, kayalık, 27 Mart 2013, Bağcı 1005
Muscari neglectum Guss.: Arapüzümü, Çok yıllık, Çiçeklenme; 3-5 aylar, Habitatı; *Pinus* korulukları, maki çalılık, çayırlık, kalkerli kayalı yamaçlar, kumullar, 27 Mart 2013, Bağcı 1006

ASTERACEAE
Bellis perennis L.: Koyun gözü, Çayır papatyası, Çok yıllık ot, Çiçeklenme; 3-8 aylar, Habitatı; nemli alan, orman, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1114
Anthemis kotschyana Boiss. var. *kotschyana*: Papatya, Çok yıllık ot, Çiçeklenme; 5-9 aylar, Habitatı; step, uçurum, ekili yamaç, *Pinus* ve *Quercus* ormanları, 7 Haziran 2013, Bağcı 1074
Anthemis tinctoria L. var. *tinctoria*: Boyacı papatyası, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-9 aylar, Habitatı; step, tarla içi ve kenarları, çalılıklar, 7 Haziran 2013, Bağcı 1076
Anthemis coelopoda Boiss. var. *coelopoda*: Tek yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; step, tarla, yol kenarı, 7 Haziran, 2013, Bağcı 1049
Taraxacum crepidiforme DC. subsp. *crepidiforme*: Gelin göbeği, Çok yıllık ot, Çiçeklenme; 6-8 aylar, Habitatı; nemli alpin çayır, eriyen kar örtü yakını, 7 Haziran 2013, Bağcı 1077
Senecio vernalis Waldst & Kit.: Ekin otu, Çok yıllık ot, Çiçeklenme; 2-8 aylar, Habitatı; kumlu boş alanlar, kayalık yamaç, 14 Mayıs 2013, Bağcı 1018
Crupina crupinastrum (Moris) Vis.: Gelin döndüren, Tek yıllık ot, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; *Pinus* orman açıklığı, step, tarla kenarı, kayalık kireç taşı, 14 Haziran 2013, Bağcı 1075
Achillea pseudoaleppica Hub. &Mor.: Tatarcı otu, Çok yıllık ot, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; step, kalkerli yamaç, çalılık, Endemik, Tehlike kategorisi; LR (cd), 10 Temmuz 2013, Bağcı 1118
Carduus nutans L. subsp. *nutans*: Eşek dikeni, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-7 aylar, Habitatı; step ve taşlık alanlar, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1137
Centaurea depressa (*Cyanus depressus*) Bieb.: Acımık, Tek yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; tarla, yol kenarı, 14 Mayıs 2013, Bağcı 1019
Centaurea derderifolia Wagenitz: Bağsarıbaşı, Çok yıllık, Çiçeklenme; 6-7 aylar, Habitatı; step ve tepelik yerler, 7 Haziran 2013, Bağcı 1048
Centaurea pyrrhoblephara (*Psephellus pyrrhoblephara*) Boiss.: Deli tülübaş, Çok yıllık, Çiçeklenme; 6-7 aylar, Habitatı; kayalık, kireçtaşı yamaç, Endemik, Tehlike kategorisi; LR (lc), 10 Temmuz 2013, Bağcı 1156
Centaurea virgata Lam.: Acı süpürge, Çok yıllık, Çiçeklenme; 6-9 aylar, Habitatı; kurak tepeler, step, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1139
Centaurea iberica Trev. ex Sprengel: Deligöz dikeni, Tek ve çok yıllık, Çiçeklenme; 6-8 aylar, Habitatı; tarla, yol kenarı, boş alanlar, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1110
Centaurea stapfiana Wagenitz: Deligöz dikeni, Çok yıllık, Çiçeklenme; 7-8 aylar, Habitatı; tarla, yamaç, Endemik, Tehlike kategorisi; LR (nt), 10 Temmuz 2013, Bağcı 1119

Centaurea urvillei subsp. *armata* Wagenitz: Kötürüm, çok yıllık, Çiçeklenme; 6-8 aylar, Habitatı; kurak taşlık yamaç, kayalar, 21 Haziran 2013, Bağcı 1084
Centaurea solstitialis L. subsp. *solstitialis*: Zerdali dikeni, Tek yıllık, Çiçeklenme; 6-8 aylar, Habitatı; *Pinus* ormanları, kurak yamaçlar, nadasa bırakılmış tarlalar, 21 Haziran 2013, Bağcı 1085
Crepis alpina L.: Yürek otu, Tek yıllık, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; orman, bazalt kaya, yamaç, step, nadasa bırakılmış tarlalar, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1017
Crepis foetida L. subsp. *rhoedifolia* (M. Bieb.) Celak: Tüylü kanat, kokar otu, Tek yıllık, Çiçeklenme; 5-10 aylar, Habitatı; maki, kaya, deniz kumulu, tarla, *Pinus* ormanları, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1023
Cichorium intybus L.: Hindiba, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-9 aylar, Habitatı; ekili tarla, çayırlık, boş alan, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1022
Eupatorium cannabinum L.: Koyun pıtrağı, Çok yıllık, Çiçeklenme; 7-10 aylar, Habitatı; kaya araları, nemli alanlar, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1111
Urospermum picroides (L.) Schmidt.: Tek yıllık, Çiçeklenme; 3-6 aylar, Habitatı; çayırlık arası, boş alan, 30 Haziran 2013, Bağcı 1052
Tragopogon longirostris Bisch. ex Schultz Bip. var. *longirostris*: Yemlik, İki yıllık, Çiçeklenme; 4-7 aylar, Habitatı; kayalık yamaç, tarla, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1021
Tragopogon aureus Boiss.: Sarı yemlik, Çok yıllık, Çiçeklenme; 6-9 aylar, Habitatı; kayalık yamaç, tarla, step, Endemik, Tehlike kategorisi; LR (lc), 7 Haziran 2013, Bağcı 1051
Helichrysum plicatum DC. subsp. *plicatum*: Mantuvar, Çok yıllık ot, Çiçeklenme; 6-8 aylar, Habitatı; *Pinus nigra* ve *Abies cilicica* orman açıklığı, çalılık, kayalık yamaç, 22 Temmuz 2013, Bağcı 1120
Cnicus benedictus L. var. *benedictus*: Şevketi bostan, Tek yıllık ot, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; step, tarla, yol kenarı, çalılık, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1007
Gundelia tournefortii L. var. *armata* Freyn. & Sint: Kenger, Çok yıllık ot, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; kayalık kireçtaşı yamaç, volkanik yamaç, step, tuzlu göl yakını, orman açıklığı, nadasa bırakılmış tarla, 30 Haziran 2013, Bağcı 1078, İr.-Tur. Element.
Picnomon acarna (L.) Cass.: Tarla devedikeni, Tek yıllık ot, Çiçeklenme; 7-10 aylar, Habitatı; garik, çakıllı çağıllık, kuru akarsu yatağı, boş alan, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1140, Akdeniz Element.

BORAGINACEAE
Buglossoides arvensis (L.) Johnston: Tarla taşkeseni, Tek yıllık, Çiçeklenme; 2-6 aylar, Habitatı; tarla kenarı, kireçtaşı yamaçlar, nadas tarlaları, 27 Mart 2013, Bağcı 1001
Anchusa strigosa Banks & Sol.: Güriz, İki yada çok yıllık, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; serpantin üzerinde, kireçtaşı yamaçlar, çorak yerler, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1020
Echium italicum L.: Kurt kuyruğu, İki yıllık, Çiçeklenme; 5-8 aylar, Habitatı; kireçtaşı kayalıklar, tahrip edilmiş arazi, 22 Temmuz 2013, Bağcı 1121
Myosotis heteropoda Trautv.: Çayır boncuğu, Tek yıllık, Çiçeklenme; 4-5 aylar, Habitatı; otlak, kireç taşı kayalıklar, 24 Nisan 2013, Bağcı 1008
Nonea stenosolen Boiss. & Baul.: Nona, Sormuk otu, Çok yıllık ot, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; tarla, yol kenarı, bozkır, kayalıklar, Endemik, Tehlike Kategorisi; LR (lc), 21 Haziran 2013, Bağcı 1086
Onosma sericeum Willd.: Emzik otu, Altındamla, Çok yıllık ot, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; serpantin, *Quercus* altları, kayalık, 21 Haziran 2013, Bağcı 1087
Alkanna megacarpa DC.: Havaciva otu, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; kuru yamaçlar, kireçtaşı tepeler, Endemik, Tehlike Kategorisi; LR (lc), 25 Mayıs 2013, Bağcı 1025
Heliotropium europaeum L.: Akrep otu, Tek yıllık, Çiçeklenme; 6-9 aylar, Habitatı; tarlalar, meyvelikler, 1 Ağustos 2013, Bağcı 1169

BRASSICACEAE
Alyssum hirsutum Bieb.: Kıllı Kuduz otu, Çok yıllık ot, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; bozuk alan, ruderal alan, ekili alan, step, 8 Mayıs 2013, Bağcı 1026
Aethionema arabicum (L.) Andrz. ex DC.: Arap taşçantası, Tek yıllık ot, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; tarla, taşlık yamaç, 24 Nisan 2013, Bağcı 1009
Barbarea plantaginea DC.: İki yıllık, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; su kenarı, çalılık, 7 Haziran 2013, Bağcı 1088
Cardaria draba (L.) Desu subsp. *draba:* Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-5 aylar, Habitatı; ekili alanlar, 8 Mayıs 2013, Bağcı 1027

Capsella bursa-pastoris (L.) Medik.: Kuşkuş otu, Tek yıllık, Çiçeklenme; 1-12 aylar, Habitatı; ekili alanlar, boş alanlar, 27 Mart 2013, Bağcı 1002
Diplotaxis tenuifolia (L.) DC.*:* Yabani roka, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; yol kenarı, kayalık yamaç, 30 Haziran 2013, Bağcı 1053
Thlaspi perfoliatum L.: Çayır akça çiçeği, Tek yıllık, Çiçeklenme; 2-5 aylar, Habitatı; ekili alanlar, boş alanlar, 8 Mayıs 2013, Bağcı 1024
Fibigia clypeata (L.) Medik: Sikke otu, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; kayalık yamaç, 30 Haziran 2013, Bağcı 1089

CAMPANULACEAE
Campanula strigosa Banks.& Sol: Çıngarak otu, Tek yıllık, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; taşlık yamaç, kayalık yamaç, yol kenarı, 30 Haziran 2013, Bağcı 1055

CARYOPHYLLACEAE
Holosteum umbellatum L. var. *umbellatum*: Şemsiye teli, Çiçeklenme; 3-5 aylar, Habitatı; tarla içi, yamaçlar, 27 Mart 2013, Bağcı 1003
Saponaria prostrata Willd. subsp. *prostrata*: Ebem terliği, Tek, iki ve çok yıllık, Çiçeklenme; 4-7 aylar, Habitatı; tarla kenarları, Endemik, Tehlike kategorisi; LR (lc), 10 Temmuz 2013, Bağcı 1141
Silene conoidea L.: Şıvan otu, Tek yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; tarlalar, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1122
Vaccaria pyramidata Medik. var. *grandiflora*: İnek otu, Arap baklası, Tek yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; tarlalar, step, 30 Haziran 2013, Bağcı 1090
Agrostemma githago L.: Buğday çiçeği, Tek yıllık, Çiçeklenme; 4-7 aylar, Habitatı; mısır tarlaları, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1112

CONVULVULACEAE
Convolvulus holosericeus Bieb. subsp. *macrocalycinus* Hausskn. & Bornm. ex. Bornm.: Hoş gündüz sefası, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-9 aylar, Habitatı; *Pinus* brutia ormanlığı, maki, kuru bozkır, kumlu, aşınmış, şistli killi ve kalkerli tepeler, Endemik, Tehlike kategorisi; LR (nt), 22 Temmuz 2013, Bağcı 1167
Convolvulus arvensis L.: Hamıza, tarla sarmaşığı, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-9 aylar, Habitatı; tahrip edilmiş kumlu bozkır, nehirler ve göller, 8 Ağustos 2013, Bağcı 1173
Convolvulus betonicifolius (Miller) subsp. *peduncularis* (Boiss.) Parris: Kuzu sarmaşığı, Çok yıllık, ot, Çiçeklenme; 5-8 aylar, Habitatı; tahrip edilmiş bozkır, kuru kayalık yamaçlar ve kenarları, nadas ve ekilmiş tarlalar, bağlar, Endemik, 8 Ağustos 2013, Bağcı 1174
Convolvulus carduchorum Davis: Yapıkotu, Çok yıllık, Çiçeklenme; 6-7 aylar, Habitatı; *Astragalus* bozkırı, tahrip edilmiş bozkır, serpantin üstlerinde, Endemik, Tehlike kategorisi; LR (lc), 10 Temmuz 2013, Bağcı 1142

CUPRESSACEAE
Juniperus oxycedrus L. subsp. *oxycedrus*: Ardıç, çok yıllık, çalı-ağaç, Habitatı; çam ormanı, maki, meşe çalılığı, 30 Haziran 2013, Bağcı 1079

DIPSACACEAE
Pterocephalus plumosus (L.) Coulfer.: Gökcücükotu, Tek yıllık, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; taşlı yamaçlar, yol kenarı, 30 Haziran 2013, Bağcı 1056
Scabiosa persica Boiss.: Uyuz otu, tek yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; kayalık yamaçlar, nadas bırakılmış tarlalar, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1113
Cephalaria aristata K. Koch: Çoruh pelemiri, Tek yıllık, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; tarla, bozuk alanlar, 14 Haziran 2013, Bağcı 1091

ELAEAGNACEA
Elaeagnus angustifolia L.: Çalı gaga, Kuş iğdesi, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; dereler ve nehir kıyıları, 14 Haziran 2013, Bağcı 1058

EUPHORBIACEAE
Euphorbia cheiradenia Boiss. & Hoh: Şirker, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-8 aylar, Habitatı; kayalık alanlar, yamaçlar, step, *Quercus* çalılıkları, 22 Temmuz 2013, Bağcı 1144

Euphorbia virgata Waldst. & Kit: Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-9 aylar, Habitatı; *Quercus* ormanı ve çalılığı, step, otlak alan, kayalık yamaç, su kenarı, bataklık, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1115

FABACEAE

Lotus gebelia Vent.*:* Gül gazalboynuzu, Çok yıllık, Çiçeklenme; 3-6 aylar, Habitatı; kuru yerler, 30 Haziran 2013, Bağcı 1092

Pisum sativum L. subsp. *elatius* (Bieb.) Aschers Groebz. var. *elatius*: Bezelye, Tek yıllık, Çiçeklenme; 4-5 aylar, Habitatı; kayalık çimenlik yamaçlar, harabeler, tarlalar, 30 Haziran 2013, Bağcı 1057

Cicer echinospermum Davis.: Kirpi nohutu, Tek yıllık, Çiçeklenme; 4-5 aylar, Habitatı; çimenlik yerler, nadas tarlaları, Endemik, Tehlike kategorisi; VU, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1029

Trifolium pratense L. var. *pratense*: Çayırgülü, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-9 aylar, Habitatı; çayırlar, yol kenarları, 1 Ağustos 2013, Bağcı 1166

Trifolium physodes var. *physodes* Stev. ex Bieb.: Meşeüçgülü, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; çayırlar, yol kenarları, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1148

Medicago minima (L.) Bart. var. *minima*: Gurnik, Tek yıllık, Çiçeklenme; 3-5 aylar, Habitatı; bozkır, kireçtaşı yamaçlar, tarlalar, kumullar, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1028

Medicago radiata L.: Hilalyonca, Tek yıllık, Çiçeklenme; 3-5 aylar, Habitatı; bozkır, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1030

Medicago rigidula L.: Kabayonca, Tek yıllık, Çiçeklenme; 3-7 aylar, Habitatı; nadasa bırakılmış tarlalar, yol kenarları, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1123

Melilotus officinalis (L.) Desr.: Kokulu yonca, Tek yıllık, Çiçeklenme; 5-9 aylar, Habitatı; tahrip edilmiş yerler, 14 Haziran 2013, Bağcı 1149

Trigonella velutina Boiss.: İpekboyotu, Tek yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; kireç taşı ve kayalık yamaçlar, bozkır, 14 Haziran 2013, Bağcı 1143

Vicia sericocarpa Fenzl. var. *seriocarpa*: Yabani fiğ, Tek yıllık, Çiçeklenme; 3-6 aylar, Habitatı; bozkır, kireçtaşı yamaçlar, 30 Haziran 2013, Bağcı 1080

Vicia cracca L. subsp. *stenophylla* Vel.: Meşe fiği, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; tahıl ve nadas tarlaları, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1124

Vicia sativa (L.) subsp. *sativa*: Fiğ, Tek yıllık, Çiçeklenme; 3-5 aylar, Habitatı; kireç taşı ve kayalıklar, tahıl ve nadas tarlaları, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1032

Vicia ervilia (L.) Willd.: Küşne, Tek yıllık, Çiçeklenme; 3-6 aylar, Habitatı; meşe çalılığı, tarla, bağlar, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1034

Astragalus compactus Lam.: Guni, Çok yıllık, Çiçeklenme; 7-8 aylar, Habitatı; bozkır, tepelikli yamaçlar, Endemik, Tehlike kategorisi; LR (lc), 22 Temmuz 2013, Bağcı 1116

Astragalus kurdicus Boiss. var. *muschianus* (Kotschy & Boiss.) Chamberlain: Ahırgeveni, Çok yıllık, Çiçeklenme; 6-8 aylar, Habitatı; kayalık yamaçlar, Endemik, 22 Temmuz 2013, Bağcı 1150

Sophora alopecuroides L. var. *alopecuroides*: Acımeyan, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-7 aylar, Habitatı; tarla kenarları, nehir, göl gibi kıyılarda, seyrek olarak kumullarda, 22 Temmuz 2013, Bağcı 1125

Ebenus haussknechtii Bornm. ex Hub.-Mor: Harputmorgeveni, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; taşlık, kayalık alanlar, Endemik, Tehlike kategorisi; LR (nt), 10 Temmuz 2013, Bağcı 1145

FAGACEAE

Quercus infectoria subsp. *boissieri* (Reuter) O. Schwarz: Mazı meşesi, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; saf birlik, maki, step, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1033

FUMARIACEAE

Fumaria asepala Boiss.: Ak şahtare, Tek yıllık, Çiçeklenme; 4-8 aylar, Habitatı; tarla, bağ, yamaç, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1046

GERANIACEAE

Geranium tuberosum L. subsp. *tuberosum*: Çakmuz, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; taşlı yamaçlar, bozulmuş habitatlar, nadas tarlalar, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1035

Erodium cicutarium (L.) Henit. subsp. *cicutarium*: İğnelik, Tek yıllık, Çiçeklenme; 3-5 aylar, Habitatı; yol kenarları, bozuk tarla içleri, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1031

GLOBULARIACEAE
Globularia trichosantha subsp. *trichosantha* Fish. & C.A. Mey.: Köseyayılımı, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-7 aylar, Habitatı; kayalık yamaçlar, sık ormanlar, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1117

HYPERIACEAE
Hypericum lydium Boiss.: Caye sancıyan, Çok yıllık, Çiçeklenme; 6-7 aylar, Habitatı; kayalık yamaçlar, *Pinus* korulukları, 14 Haziran 2013, Bağcı 1081
Hypericum scabrum L.: Karahasançayı, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-8 aylar, Habitatı; açık koruluklar, step, kuru kayalık yamaçlar,14 Haziran 2013, Bağcı 1059
Hypericum uniglandulosum Hausskn. ex Bornm.: Kemaliye kantaronu, Çok yıllık, Çiçeklenme; 6-7 aylar, Habitatı; volkanik tepeler ve step, Endemik, Tehlike kategorisi; LR (nt), 14 Haziran 2013, Bağcı 1082
Hypericum perforatum L.: Binbirdelik otu, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-8 aylar, Habitatı; kuru habitatlar, 14 Haziran 2013, Bağcı 1083
Hypericum triquetrifolium Turra: Pırpır otu, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-9 aylar, Habitatı; açık kuru taşlı ve kumlu yerler, kültür tarlaları, 14 Haziran 2013, Bağcı 1061

JUNCACEAE
Juncus articulatus L.: Camış otu, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-8 aylar, Habitatı; akarsu kenarları, ıslak yerler, 22 Temmuz 2013, Bağcı 1126

LAMIACEAE
Salvia multicaulis Vahl: Kürt reyhanı, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-7 aylar, Habitatı; kireçtaşı yamaçlar şist ve kumlu yamaçlar, hareketli kayalıklar, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1157
Salvia palaestina Bentham: Sürmeli şalba, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; kireçtaşı ve volkanik kayalık yamaçlar, meşe çalılıkları, bağlar, nadasa bırakılmış tarlalar, 14 Haziran 2013, Bağcı 1096
Salvia candidissima Vahl subsp. *candidissima*: Galabor, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-9 aylar, Habitatı; kayalık kireçtaşı ve şist bayırlar, çalılıklar, *Pinus*, *Quercus*, *Abies* ve *Cedrus* topluluk alanları, nadasa bırakılmış tarlalar, 14 Haziran 2013, Bağcı 1060
Salvia virgata Jacq.: Fatmanaotu, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-9 aylar, Habitatı; çalı koruluk, çayırlar, nadas tarlaları, yol kenarları, 14 Haziran 2013, Bağcı 1093
Salvia aethiopis L.: Habeşadaçayı, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-8 aylar, Habitatı; bozkır, volkanik ve kireçtaşı yamaçlar, nadas tarlaları, yol kenarları, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1128
Stachys lavandulifolia Vahl. subsp. *lavandulifolia*: Tüylüçay, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-8 aylar, Habitatı; kalkerli volkanik kaya yamaçları, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1146
Stachys iberica M. Bieb. subsp. *iberica* var. *iberica*: Tokdeliçay, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-8 aylar, Habitatı; kireçtaşı kaya yamaçları ve çalılıklar, nehir kıyıları, 22 Temmuz 2013, Bağcı 1151
Prunella vulgaris L.: Gelinciklemeotu, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-8 aylar, Habitatı; tarlalar, nemli yerler, 1 Temmuz 2013, Bağcı 1127
Ziziphora persica Bunge.: Karareyhan, Tek yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; bozkır, yamaç, tarlalar, step, yamaçlar, Bozkır, tarlalar, step, yamaçlar, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1152
Ziziphora capitata L.: Anuk, Dağreyhanı, Tek yıllık, Çiçeklenme; 4-8 aylar, Habitatı; kuru açık yerler, kayalık, bozkır, yamaç, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1147
Marrubium cuneatum Russell.: Elkurtaran, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; tebeşirli kıyı kenarları, tarlalar, bağlar, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1037
Marrubium globosum Montbret & Aucher ex Benth. subsp. *globosum*: Bozcaboğum, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-8 aylar, Habitatı; kayalık yamaçlar, Endemik, Tehlike kategorisi; LR (lc), 7 Haziran 2013, Bağcı 1097
Mentha spicata L. subsp. *spicata*: Eşeknanesi, Kıvırcık nane, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-8 aylar, Habitatı; ıslak kıyılar, dere kenarları, 7 Haziran 2013, Bağcı 1155
Teucrium multicaule Montbret & Aucher ex. Benth.: Haptutan, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-7 aylar, Habitatı; bozkır, nadasa bırakılmış tarlalar, 7 Haziran 2013, Bağcı 1062
Teucrium polium L.: Acıyavşan, Çok yıllık, Çiçeklenme; 6-9 aylar, Habitatı; meşe çalıları, kumullar, kuru yerler, kayalık yerler, 7 Haziran 2013, Bağcı 1129
Teucrium chamaedrys L. subsp. *syspirense* (K. Koch.) Rech. f.: Sıcakotu, Çok yıllık, Çiçeklenme; 6-8 aylar, Habitatı; seyrek ormanlar, uçurumlar, yamaçlar, bozkırlar, 7 Haziran 2013, Bağcı 1158
Lamium amplexicaule L.: Baltutan, Tek yıllık, Çiçeklenme; 2-11 aylar, Habitatı; tepe etekleri, seyrek bozkır, ekilmiş arazi, yol kenarları, çorak yerler, 27 Mart 2013, Bağcı 1004

Scutellaria orientalis L. subsp. *bicolor* (Hochost.) J.R. Edm.: Alacakaside, Çok yıllık, Çiçeklenme; 6-7 aylar, Habitatı; bozkır, volkanik, kayalık ve sistli yamaçlar, Endemik, Tehlike kategorisi; LR (lc), 14 Haziran 2013, Bağcı 1094
Thymus kotschyanus Boiss. & Hohen subsp. *kotschyanus*: Kekik, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; çıplak dağ yamaçları, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1130
Phlomis oppositiflora Boiss. & Hausskn.: Has çalba, Çok yıllık, Çiçeklenme; 6-7 aylar, Habitatı; kalkerli yamaçlar, bozkır, Endemik, Tehlike kategorisi; LR (lc), 30 Haziran 2013, Bağcı 1095

LILIAECEA
Gagea villosa var. *villosa* M. (Bieb.) Sweet: Tüylü yıldız, Çok yıllık, Çiçeklenme; 3-5 aylar, Habitatı; step, tarlalar, kayalık yamaçlar, 24 Nisan 2013, Bağcı 1010

LINACEAE
Linum mucronatum Bertol. subsp. *mucronatum*: Sarı keten, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; tarlalar, kayalık yamaçlar, step, 14 Haziran 2013, Bağcı 1064

LYTHRACEAE
Lythrum salicaria L.: Aklar ot, hevhulma, Çok yıllık, Çiçeklenme; 6-8 aylar, Habitatı; ıslak yerler, kuru nehir yatakları, 30 Haziran 2013, Bağcı 1165
Lythrum tribracteatum Salzm. ex Ten: Üçaklarotu, Tek yıllık, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; ıslak yerler, 30 Haziran 2013, Bağcı 1098

MALVACEAE
Alcea calvertii Boiss.: Hıraçiçeği, Çok yıllık, Çiçeklenme; 6-8 aylar, Habitatı; aşınmış kıyılar, volkanik tepeler, Endemik, Tehlike kategorisi; LR (lc), 1 Ağustos 2013, Bağcı 1172

MORACEAE
Morus alba L.: Akdut, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; kültür, 30 Haziran 2013, Bağcı 1063
Maclura pomifera (Raf.) C.K. Schneid.: Ayıdutu, yalancı portakal ağacı, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; rutubetli yerler, yol kenarı, çit ve süs bitkisi, 22 Temmuz 2013, Bağcı 1131

ORCHIDACEAE
Orchis laxiflora Lam.: Salepsümbülü, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-5 aylar, Habitatı; yaş çayırlık, batalık, 24 Nisan 2013, Bağcı 1011
Orchis punctulata Steven ex Lindley: Selef, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; çalılıklar, orman kenarları, 8 Mayıs 2013, Bağcı 1039

OROBANCHACEAE
Orobanche crenata Forssk.: Zıpırotu, Parazit, Çiçeklenme; 3-5 aylar, Habitatı; diğer bitkiler üzerinde, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1041

PAPAVERACEAE
Papaver rhoeas L.: Gelincik, Çok yıllık, Çiçeklenme; 3-8 aylar, Habitatı; tarla, boş yerler, 25 Mayıs 2013, Bağcı 1040

POACEAE
Chrysopogon gryllus (L.) Trin.: Buzağıotu, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; step, tarla, orman, 22 Temmuz 2013, Bağcı 1133
Poa bulbosa L.: Yumrulusalkım, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; step, orman, kuru çalılık, 22 Temmuz 2013, Bağcı 1132
Melica persica Kunth: Aceminciotu, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; kayalık tepeler, step, 30 Haziran 2013, Bağcı 1099
Hordeum bulbosum L.: Boncukarpa, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; step, kuru çalılık, yamaçlar, çok sulu otlaklar, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1135
Aegilops triuncialis L. subsp. *triuncialis*: Üçkılçık, Tek yıllık, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; çayır, step, ekilmeyen araziler, 30 Haziran 2013, Bağcı 1065

Sorghum halepense (L.) Pers.: Ekinsüpürgesi, Tek yıllık, Çiçeklenme; 5-11 aylar, Habitatı; kumullar, çayır, 8 Ağustos 2013, Bağcı 1162
Cynosurus echinatus L.: Toptarakotu, Tek yıllık, Çiçeklenme; 5-8 aylar, Habitatı; koruluklar, tepe, çayır, tarlalar, yol kenarları, 8 Ağustos 2013, Bağcı 1163
Echinochloa crus-galli (L.) P. Beauv.: Darıca otu, Tek yıllık, Çiçeklenme; 6-10 aylar, Habitatı; nemli yerler, çukurlar, 8 Ağustos 2013, Bağcı 1164
Taeniatherum caput-medusae subsp. *asper* (Simonkai.) Melderis: Eğrikılçık, Tek yıllık, Çiçeklenme; 5-8 aylar, Habitatı; step, nadas, yol kenarı, 8 Ağustos 2013, Bağcı 1171
Stipa holosericea Trin: Dirgenkılaç, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-8 aylar, Habitatı; step, kuru yerler ve kayalık dağ yamaçları, 8 Ağustos 2013, Bağcı 1170

PRIMULACEAE
Androsace maxima L.: Tavukkursağı, Tek yıllık, Çiçeklenme; 4-5 aylar, Habitatı; kayalıklar, 24 Nisan 2013, Bağcı 1012

POLYGALACEAE
Polygala pruinosa Boiss. subsp. *pruinosa*: Puslusütotu, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-7 aylar, Habitatı; yamaç, tepe, 22 Temmuz 2013, Bağcı 1134

PLUMBAGINACEAE
Acantholimon saxifragiforme Hausskn. & Sint. ex Bokhari.: Harputkardikeni, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; kayalık yamaç, tepe, Endemik, Tehlike kategorisi; VU, 22 Temmuz 2013, Bağcı 1159

PLANTAGINACEAE
Plantago lanceolata L.: Damarlıca, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-10 aylar, Habitatı; kayalık yamaç, deniz kıyıları, 10 Temmuz 2013, Bağcı 1153

RANUNCULACEAE
Ranunculus arvensis L.: Mustafaçiçeği, Tek yıllık, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; ekili alanlar, ekin tarlaları, 14 Mayıs 2013, Bağcı 1043
Ranunculus costantinapolinatus DC. d'Urv.: Kağıthaneçiçeği, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; nemli yerler, Endemik, 14 Mayıs 2013, Bağcı 1042
Ranunculus cuneatus Boiss.: Körükotu, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; kireç taşı, yamaç, nadasa bırakılmış tarlalar, 14 Mayıs 2013, Bağcı 1045
Adonis flammea Jacq.: Cinlalesi, Tek yıllık, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; tarla, step, kayalık, 24 Nisan 2013, Bağcı 1013
Ceratocephalus falcatus (L.) Pers.: Yelotu, Tek yıllık, Çiçeklenme; 4-5 aylar, Habitatı; çıplak yerler, 24 Nisan 2013, Bağcı 1014

RUBIACEAE
Asperula arvensis L.: Tarlabelumotu, Tek yıllık, Çiçeklenme; 3-7 aylar, Habitatı; açık alanlar, tarlalar ve boş alanlar, 21 Haziran 2013, Bağcı 1101
Cruciata articulata (L.) Ehrend.: Kulaklısarılıkotu, Tek yıllık, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; yamaç, nadasa bırakılmış tarlalar, tebeşirli alanlar, 21 Haziran 2013, Bağcı 1102
Galium humifusum M. Bieb.: Çimeniplikçiği, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-9 aylar, Habitatı; otlu, çalılık yerler, 21 Haziran 2013, Bağcı 1138

RHAMNACEAE
Paliurus spina-christi P. Mill.: Karaçalı, Çalı dikeni, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; nehir vadileri, çorak yerler, boğazlar, 22 Temmuz 2013, Bağcı 1154

ROSACEAE
Amygdalus communis L.: Badem, Çok yıllık, Çiçeklenme; 3-4 aylar, Habitatı; doğal, kuru yamaçlar, kalkerli geçitler, çalı ve meşe ormanlıkları, 12 Nisan 2013, Bağcı 1015
Crataegus meyeri Pojark.: Roğuk, Alıç, Çok yıllık, çalı veya ağaççık, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; çayır, 30 Haziran 2013, Bağcı 1108

Crataegus monogyna Jacq.: Yemişen, Çok yıllık, çalı veya ağaççık, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; tepe kenarları, maki, yol kenarları, karışık ormanlar, 30 Haziran 2013, Bağcı 1068
Potentilla reptans L.: Reşatınotu, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-7 aylar, Habitatı; dere ve göl kenarları, 8 Mayıs 2013, Bağcı 1044
Rosa sp.: Yabani gül, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; çayır, yol kenarı, 30 Haziran 2013, Bağcı 1100
Rubus discolor Weihe. & Ness.: Kuş üzümü, Bük üzümü, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-7 aylar, Habitatı; orman, çalı, kıyı, 22 Temmuz 2013, Bağcı 1136
Rubus fruticosus L.: Böğürtlen, Çok yıllık, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; çayır, tarla içi, 22 Temmuz 2013, Bağcı 1103
Sanguisorba minor Scop. subsp. *minor*: Küçük çayırdüğmesi, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; ıslak çayırlıklar, dere kenarları, 21 Haziran 2013, Bağcı 1069
Prunus spinosa L.: Çakaleriği, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; çalılar, 21 Haziran 2013, Bağcı 1073

SALICACEAE
Salix triandra L. subsp. *bornmüelleri* (Hausskn.) A.K. Skvortsov: Bağsöğüdü, Çok yıllık, çalı küçük ağaç, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; bataklık, su kenarı, 30 Haziran 2013, Bağcı 1104

SANTALACEAE
Thesium impressum Steudel ex. A. DC.: Güvelek, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-6 aylar, Habitatı; kayalık yamaçlar, 30 Haziran 2013, Bağcı 1070

SCROPHULARIACEAE
Scrophularia xanthoglossa var. *decipiens* (Boiss.&Kotschy) Boiss.: Serkele, Çok veya iki yıllık, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; kayalık yamaçlar, *Artemisia* ve *Astragalus* bozkırı, tarla kenarları, yol kenarları, 14 Haziran 2013, Bağcı 1105
Verbascum cheiranthifolium Boiss. var. *cheiranthifolium*: Bozkulak, İki yıllık, Çiçeklenme; 6-8 aylar, Habitatı; ormanlar, *Quercus* çalılıkları, bozkırlar, otlaklar, kireçtaşı kayalıklar, 14 Haziran 2013, Bağcı 1106

SOLANACEAE
Solanum dulcamara L.: Yaban yasemini, kır yasemini, tilki üzümü, sofur, yaban asması, Çok yıllık, Çiçeklenme; 5-9 aylar, Habitatı; dere kenarları, bataklıklar sazlıklar, kuru dere yatakları, 1 Ağustos 2013, Bağcı 1168

TAMARICACEAE
Tamarix smyrnensis Bunge: Ilgın, Çok yıllık, çalı, Çiçeklenme; 4-8 aylar, Habitatı; nehir kıyıları, 1 Ağustos 2013, Bağcı 1161

TAXACEAE
Taxus baccata L.: Porsuk, Çok yıllık, ağaç, Habitatı; yamaçlar, 30 Haziran 2013, Bağcı 1071

VALERIANACEAE
Valerianella vesicaria (L.) Moench: Kuzugevreği, Tek yıllık, Çiçeklenme; 4-6 aylar, Habitatı; kayalık yamaçlar, tarlalar, 30 Haziran 2013, Bağcı 1107

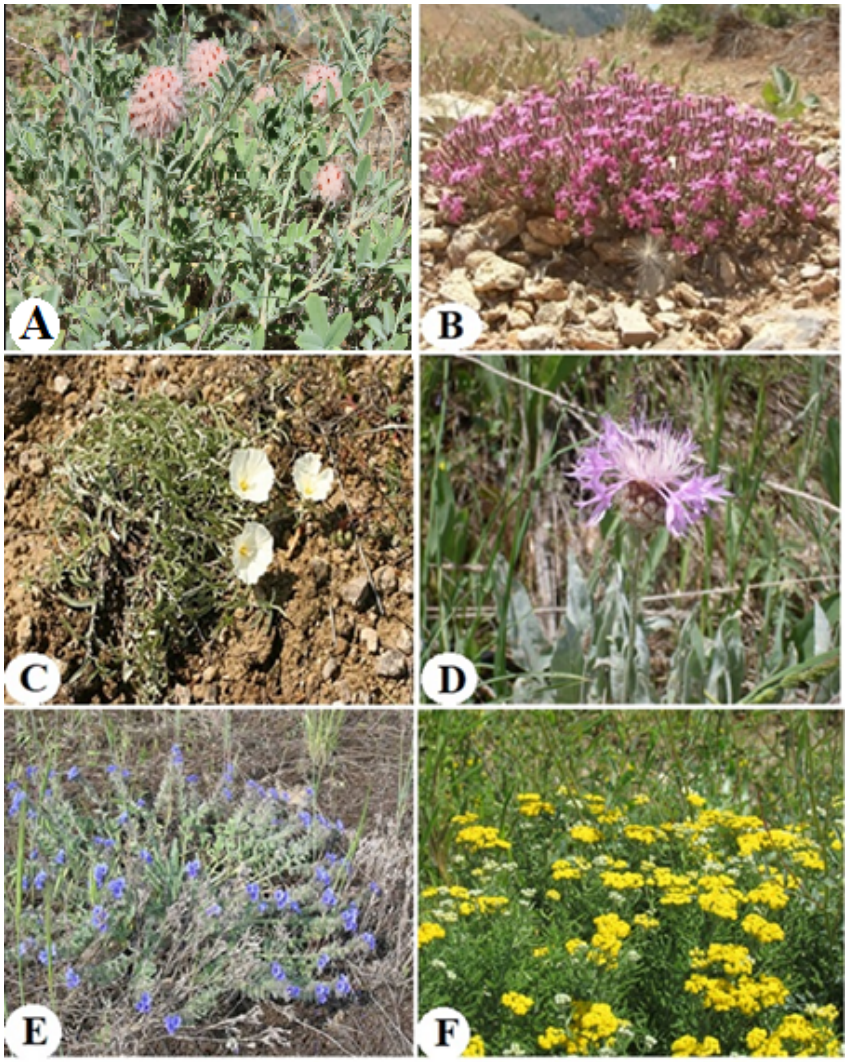
VITACEAE
Vitis vinifera L.: Asma, Çok yıllık, Habitatı; kültür bitkisi, 30 Haziran 2013, Bağcı 1072

3.2.Özelliklerine Göre Bitkiler

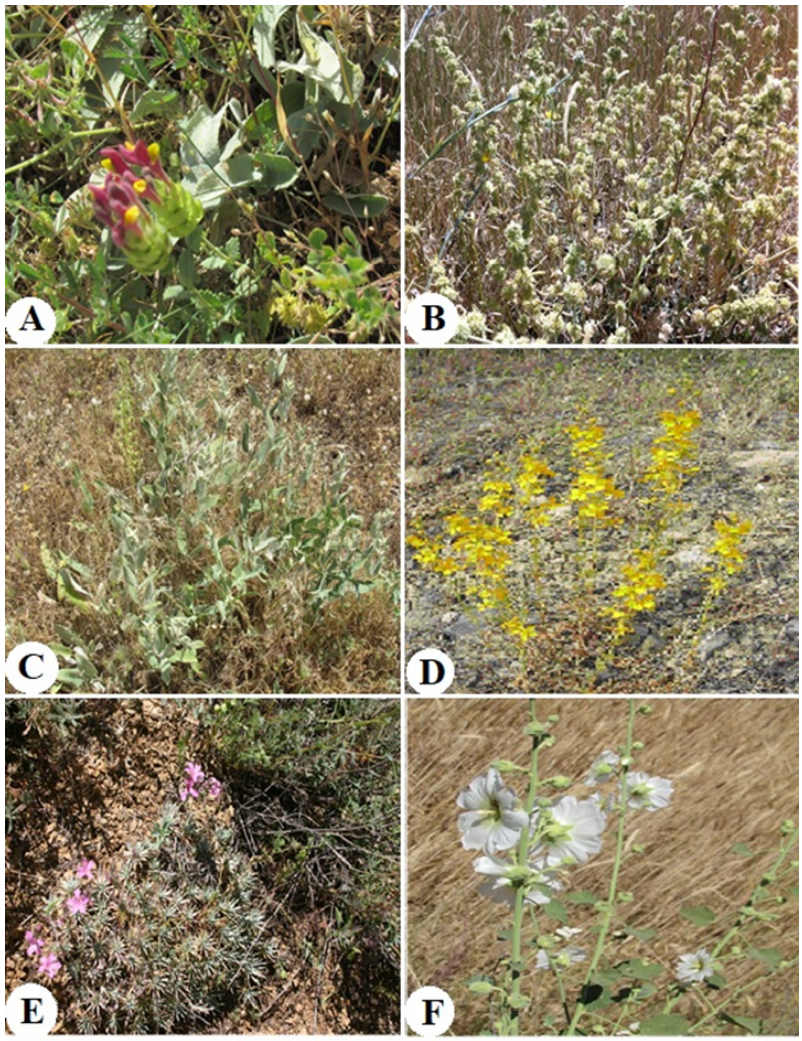
Endemik bitkiler

Araştırma alanında 19 endemik taksona rastlanmış olup, bunlardan 18 taksonun Türkiye Bitkileri Kırmızı Kitabı'na göre [8] tehlike altında olduğu ve bunlar için koruma önlemlerinin alınması gerektiği tespit edilmiştir. Bu bitkiler; *Achillea pseudoaleppica, Tragopogon aureus*, *Alkanna megacarpa*, *Saponaria prostrata* subsp. *prostrata, Cicer echinospermum*, *Scutellaria orientalis* subsp. *bicolor, Marrubium globosum* subsp. *globosum*, *Phlomis oppositiflora*, *Alcea calvertii*, *Centaurea derderiifolia*, *Centaurea stapfiana*, *Centaurea pyrrhoblephara* (*Psephellus pyrrhoblepharus*), *Nonea stenosolen, Ebenus haussknechtii*, *Hypericum uniglandulosum*, *Convolvulus*

holosericeus subsp. *macrocalycinus*, *Convolvulus carduchorum* ve *Acantholimon saxifragiforme* şeklindedir. Ancak son yıllarda yapılan güncel düzenlemelere göre bu türlerden 9 tanesinin tehlike altında olduğu, diğerlerinin doğal populasyon oluşturma kapasitelerinin yeterli olduğundan tehlike altında olmadıkları ve yine yukarıda belirtilen bu türlerden *Acantholimon saxifragiforme* türünün endemikliğinin düştüğü belirlenmiştir. Tehlike altındaki endemik türlerden *Cicer echinospermum* türünün VU kategorisinde yani neslinin tükenme riskinin yüksek olduğu; *Centaurea stapfiana* ve *Ebenus haussknechtii* türlerinin NT kategorisinde yani tehdite yakın oldukları, aynı zamanda *Alkanna megacarpa*, *Marrubium globosum* subsp. *globosum*, *Phlomis oppositiflora*, *Alcea calvertii*, *Nonea stenosolen, Saponaria prostrata* subsp. *prostrata* taksonlarının ise LC kategorisinde (düşük riskli) yer aldıkları görülmektedir [9]. Alandan toplanan endemik bitkilerin bir kısmının doğal habitatlarından çekilen fotoğrafları Şekil 4 ve 5'de verilmiştir. Bunların dışında çok sayıda tıbbi, ticari değere sahip, gıda, süs ve hayvancılıkta yem bitkisi olarak kullanılabilecek bitki türlerinin de doğal olarak yayılış gösterdiği belirlenmiştir (Tablo 1-4). Bu grup bitkilerin populasyonları gerek ülke gerekse il bazında zengin olduğu için ilave bir önleme gerek duyulmamaktadır. Ama bunlardan bazı önemli taksonların (*Orchis laxiflora* ve *O. punctulata* (Sahlep türleri) (Orchidaceae) ve *Trifolium physodes* var. *physodes* (Fabaceae)' in değişik amaçlarla kullanılabilme özelliğinden dolayı tek populasyonlarına rastlanmış olup koruma altına alınması önemli görülmüştür.



Şekil 4. Endemik bazı türlerin habitusu **A:** *Ebenus haussknechtii,* **B:** *Saponaria prostrata* subsp. *prostrata,* **C:** *Convolvulus holosericeus* subsp. *macrocalycinus,* **D:** *Centaurea pyrrhoblephara* (*Psephellus pyrrhoblephara*), **E:** *Alkanna megacarpa*, **F:** *Achillea pseudoaleppica*



Şekil 5. Endemik bazı türlerin habitusu **A:** *Scutellaria orientalis* subsp. *bicolor*, **B:** , *Marrubium globosum* subsp. *globosum* **C:** *Phlomis oppositiflora*, **D:** *Hypericum uniglandulosum*, **E:** *Acantholimon saxifragiforme,* **F:** *Alcea calvertii.*

Tablo 1. Süs bitkileri listesi.

Pimpinella kotschyana	*Gagea villosa* var. *villosa*
Crupina crupinastrum	*Linum mucronatum* subsp. *mucronatum*
Campanula strigosa	*Lythrum tribracteatum*
Saponaria prostrata subsp. *prostrata*	*Salix triandra* subsp. *bornmuelleri*
Trifolium physodes var. *physodes*	*Tamarix smyrnensis*
Muscari comosum	*Androsace maxima*

Tablo 2. Tıbbi özelliği olan bitkiler listesi.

Heracleum antasiaticum	*Astragalus compactus*
Biarum carduchorum	*Melilotus officinalis*
Cionura erecta	*Sophora alopecuroides* var. *alopecuroides*
Asparagus plumosus	*Ebenus haussknechtii*
Bellis perennis	*Quercus infectoria* subsp. *boissieri*
Anthemis kotschyana var. *kotschyana*	*Erodium cicutarium* subsp. *cicutarium*
Taraxacum crepidiforme subsp. *crepidiforme*	*Globularia trichosantha*
Senecio vernalis	*Hypericum scabrum*
Achillea pseudoaleppica	*Hypericum perforatum*
Centaurea depressa (*Cyanus depressus*)	*Mentha spicata* subsp. *spicata*
Centaurea derderiifolia	*Salvia multicaulis*
Centaurea pyrrhoblephara	*Salvia palaestina*
Centaurea iberica	*Stachys lavandulifolia* subsp. *lavandulifolia*
Centaurea virgata	*Stachys iberica* subsp. *iberica* var. *iberica*
Crepis alpina	*Ziziphora capitata*
Crepis foetida subsp. *rhoedifolia*	*Teucrium multicaule*
Cichorium intybus	*Teucrium polium*
Eupatorium cannabinum	*Teucrium chamaedrys* subsp. *sysprense*
Helichrysum plicatum subsp. *plicatum*	*Scutellaria orientalis* subsp. *bicolor*
Gundelia tournefortii var. *armata*	*Thymus kotschyanus* var. *kotschyanus*
Picnomon acarna	*Phlomis oppositiflora*
Heliotropium europaeum	*Muscari comosum*
Echium italicum	*Orobanche crenata*
Alkanna megacarpa	*Polygala pruinosa* subsp. *pruinosa*
Onosma sericeum	*Ranunculus arvensis*
Capsella bursa-pastoris	*Plantago lanceolata*
Vaccaria pyramidata var. *grandiflora*	*Ranunculus costantinapolinatus*
Juniperus oxycedrus L. subsp. *oxycedrus*	*Paliurus spina- christi*
Elaeagnus angustifolia	*Crataegus meyeri*
Euphorbia cheiradenia	*Sanguisorba minor* subsp. *minor*
Euphorbia virgata	*Valerianella vesicaria*

Tablo 3. Gıda olarak kullanılan bitkiler listesi.

Rhus coriara	*Lamium amplexicaule*
Pistacia terebinthus subsp. *palaestina*	*Lythrum salicaria*
Daucus carota	*Morus alba*
Carduus nutans subsp. *nutans*	*Orchis laxiflora*
Tragopogon longirostris var. *longirostris*	*Orchis punctulata*
Tragopogon aureus	*Hordeum bulbosum*
Cardaria draba subsp. *draba*	*Poa bulbosa*
Diplotaxis tenuifolia	*Amygdalus communis*
Convolvulus betonicifolius subsp. *peduncularis*	*Rubus fruticosus*
Pisum sativum subsp. *elatius* var. *elatius*	*Rubus discolor*
Trifolium pratense var. *pratense*	*Prunus spinosa*
Cicer echinospermum	*Solanum dulcamara*
Vicia sativa subsp. *sativa*	*Taxus baccata*
Geranium tuberosum subsp. *tuberosum*	*Vitis vinifera*

Tablo 4. Ticari özelliğe sahip (boyama, herbisit ve hayvancılıkta) bitkiler listesi.

Anthemis tinctoria var. *tinctoria*	*Hordeum murinum* subsp. *glaucum*
Cnicus benedictus var. *benedictus*	*Vicia ervilia*
Aethionema arabicum	*Papaver rhoeas*
Silene conoidea	*Chrysopogon gryllus*
Convolvulus arvensis	*Aegilops triuncialis* subsp. *triuncialis*
Astragalus kurdicus var. *muschianus*	*Sorghum halepense*
Medicago minima var. *minima*	*Cynosurus echinatus*
Medicago rigidula	*Acantholimon saxifragiforme*

3.3. Ekolojik Bulgular

Toprak Analizleri: Çalışma alanında yapılan inceleme ve gözlemler sonucunda baraj havzasında doğal olarak yetişen bitkilerin ve bunların ekosistemleri ve ekolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla bir seri analiz yapılmıştır. Toprak örnekleri üzerinde yapılan fiziksel ve kimyasal analizlerden elde edilen veriler Tablo 5'de sunulmuştur.

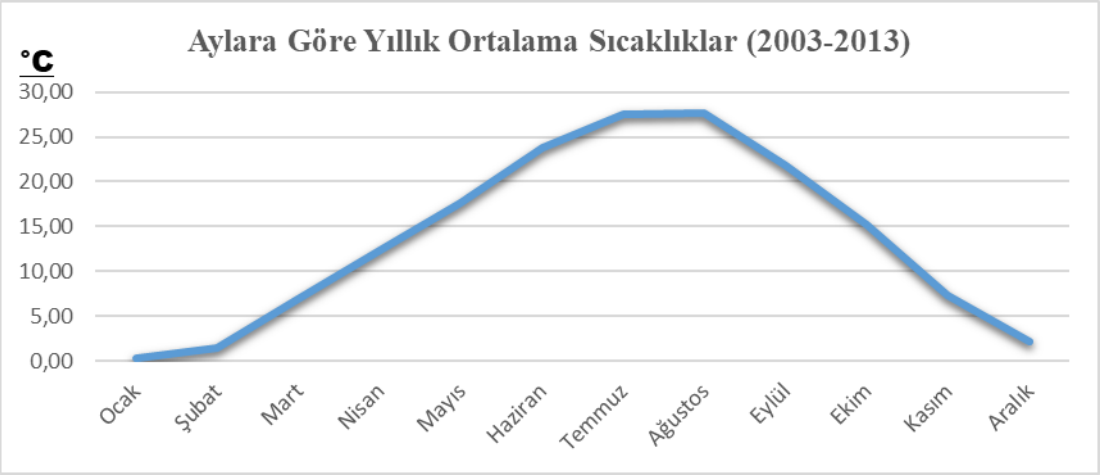
Tablo 5. Çalışma Alanına Ait Toprak Numune Analiz Cetveli

Örnek Alınan Yer	Profil No	Lab. No.	FİZİKSEL ANALİZ					PH	Tuz mmhos/cm	Total Kireç %	Organik Madde %	AZOT %	P2O5 ppm	K2O ppm	Na ppm
			%				Toprak Türü								
			Kum	Kil	Toz	Toz+Kil									
Kuyruk kısmı	1	1026	78,52	7,90	13,58	21,48	Kumlu Balçık	8,01	0,261	1,51	0,860	0,042	12,14	52,90	28,28
İki tarla arası nokta	2	1027	32,75	17,85	49,40	67,25	Balçık	7,86	0,152	1,57	3,303	0,165	92,40	414,72	6,46
Doğu kısmına açılan alanın kuzey kısmı	3	1028	27,53	44,28	28,19	72,47	Kil	7,38	0,107	1,64	3,167	0,158	20,19	243,12	10,36
Evlerin doğusundaki sırt kısmı	4	1029	53,92	21,70	24,38	46,08	Kumlu Killi Balçık	6,85	0,192	6,94	2,285	0,114	21,19	272,88	6,33
Şantiye altı su üstü	5	1030	49,10	27,76	23,14	50,90	Kumlu Killi Balçık	7,14	0,111	7,65	2,014	0,100	23,25	308,64	6,28

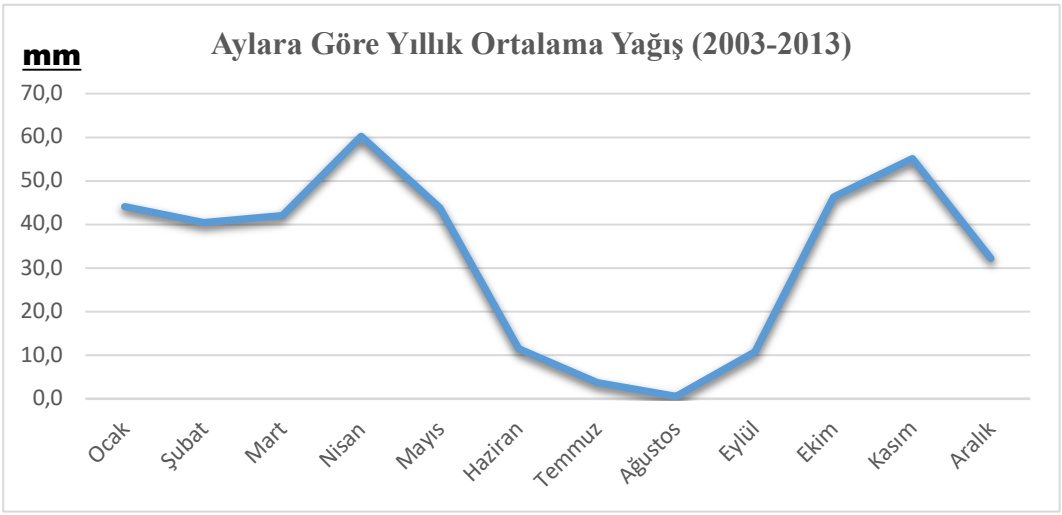
TOPRAK ANALİZ CETVELİ

Örnek alınan yer	Profil No	Lab. No	Fiziksel analiz					PH	Tuz mmhos/cm	Total kireç	Organik Madde	P2O5 ppm	K2O ppm	Na ppm
			%				Toprak Türü							
			Kum	Kil	Toz	Toz+Kil								
Karacabağ Altın Ölçek yol ayrımı	1	583	61,50	16,20	22,30	38,50	Kumlu balçık	7,82	**0,094**	**8,91**	**3,2**	**34,5**	29,15	13,08
	2	584	82,21	8,93	8,85	17,79	Balçıklı kum	7,97	**0,079**	**5,90**	**3,8**	**25,1**	**28,98**	**9,515**
Şantiyenin karşısı	3	585	65,21	18,48	16,31	34,79	Kumlu balçık	**7,73**	**0,092**	**3,75**	**2,4**	**93,1**	**133,7**	**13,21**
Derivasyon tünelinin karşısı	4	586	60,00	22,16	17,82	40,00	Kumlu killi balçık	**7,71**	**0,100**	**2,31**	**4,5**	**22,2**	**318,1**	**17,34**
		587	63,56	20,32	16,12	36,44		**7,85**	**0,104**	**7,42**	**4,0**	**53,4**	**78,39**	**13,06**

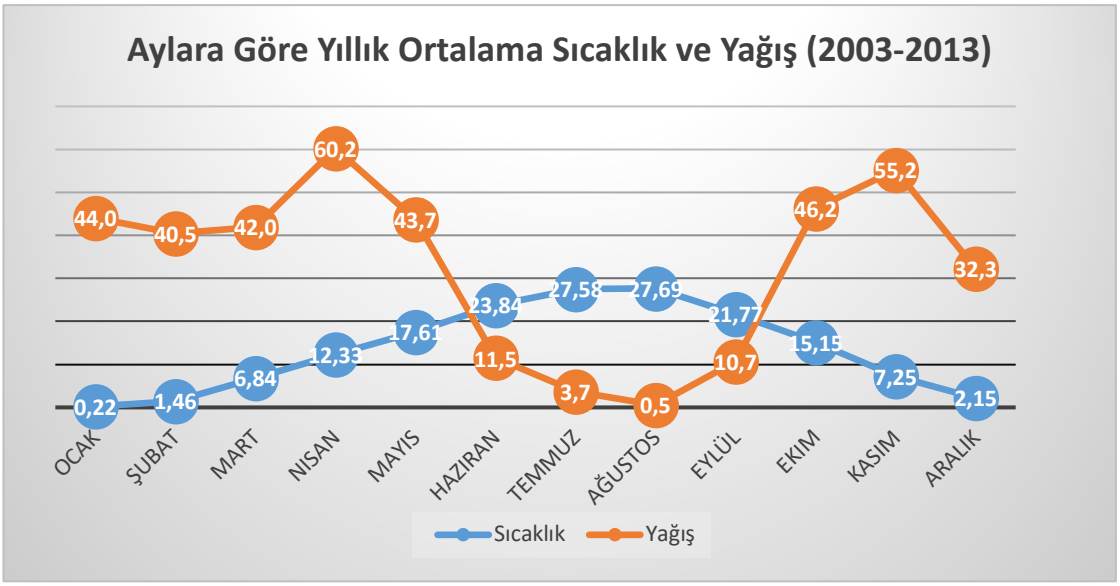
Bölgeye Ait İklimsel Veriler: Elazığ Meteoroloji Müdürlüğün'den temin edilen yıllık ve aylık yağış miktarları, ortalama sıcaklık verileri ve bu veriler grafiksel olarak sunulmuştur (Şekil 6,7,8).



Şekil 6. Çalışma alanına ait aylara göre yıllık ortalama sıcaklıklar.



Şekil 7. Çalışma alanına ait aylara göre yıllık ortalama yağış.



Şekil 8. Çalışma alanına ait aylara göre yıllık ortalama sıcaklık ve yağış.

4.Tartışma ve Sonuçlar

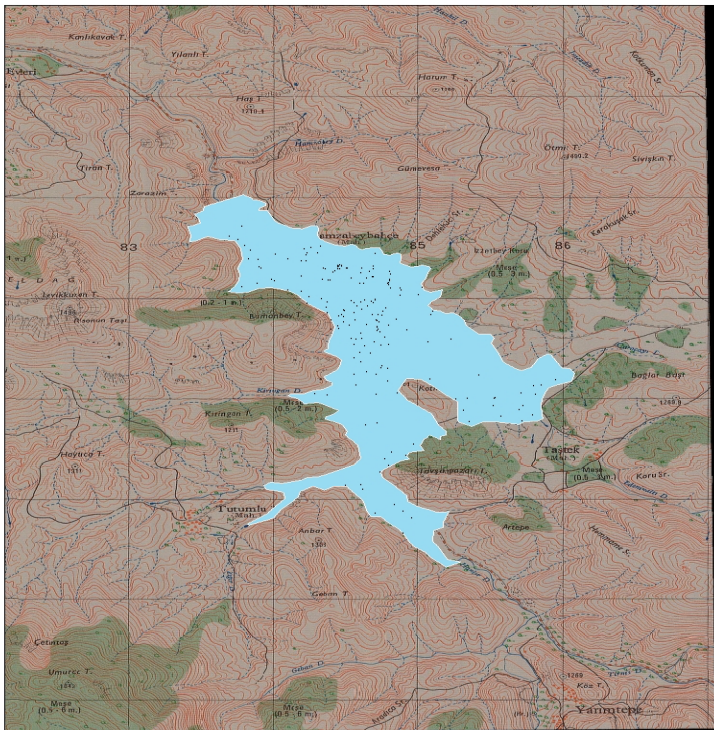
Hamzabey Baraj Havzası 2013 yılı içerisinde bir vejetasyon döneminde periyodik olarak bitki toplama, bitki populasyonlarını ve populasyon yoğunluklarını ortaya koyma amaçlarıyla yapılan arazi çalışmaları sonucunda; 48 familyaya ait 177 bitki taksonu saptanmış, teşhis edilmiş, fotoğraflandırılmış ve bazı bitkilere ait GPS koordinatları alınarak NETCAD programında harita üzerinde koordinatlanarak gösterilmiştir (Şekil 9). Ayrıca çalışma alanının farklı yerlerinden toprak örnekleri alınarak alanın genel toprak yapısı, mineral madde durumu, toprak çeşitleri vb. özellikleri ortaya konarak mevsimsel yağış ve sıcaklık değerleri göz önüne alınıp bölgenin ekolojik potansiyeli ortaya konmuştur. Projenin ana temasını oluşturan ve değerli sayılabilecek tıbbi aromatik değere sahip, süs bitkisi olarak kullanılabilecek, ekonomik değeri olup bitkisel üretim bakımından değerlendirilebilecek bitkilerin belirlenmesi veya biyoçeşitlilik bağlamında değerli olan ve yok olma tehlikesi ve tehdidi altında olan bitkilerin tespit edilmesi ve taşınmasına yönelik önemli bulgular da elde edilmiştir.

Hamzabey Baraj Havzası'na yakın bir alan olan Arıcak İlçesi'nde Yapar ve Behçet tarafından yapılan floristik çalışma sonucunda; 3200 vasküler bitki örneği toplanmış, yapılan değerlendirmeler sonucunda 87 familya, 454 cinse ait toplam 1122 takson tespit edilmiştir. En fazla takson içeren ilk 5 familyanın sırasıyla; Asteraceae 146 (%13), Fabaceae 103 (%9,2), Poaceae 95 (%8,5), Brassicaceae 83 (%7,4) ve Lamiaceae 67 (%5,9) olduğu, aynı zamanda en fazla takson içeren ilk 5 cinsin ise; *Trifolium* 25 (%2,2), *Astragalus* 22 (%2), *Silene* 18 (%1,6) *Galium* 18 (%1,6), ve *Alyssum* 14 (%1,2) cinsleri olduğu belirlenmiştir. Araştırma sonucunda belirlenen bu taksonlardan 102 tanesinin endemik olduğu da yazarlar tarafından rapor edilmiştir [10]. Baraj havzasından tarafımızca belirlenen 177 taksondan en fazla takson sayısına sahip ilk 5 familya sırasıyla; Asteraceae (28 takson), Lamiaceae (20 takson), Fabaceae (19 takson), Poaceae (9 takson) ve Brassicaceae (8 takson) şeklinde olup Yapar ve Behçet'in verileri ile yüksek oranda benzerlik gösterdiği görülmektedir.

Alanda tıbbi, gıda, süs bitkisi, yakacak, ticari (boya ve herbisit gibi) ve hayvancılıkta kullanımı tarafımızca belirlenen birçok bitkinin, Olgun [2019] tarafından çalışma alanımıza en yakın bölge olan Arıcak İlçesi ile ilgili "Arıcak (Elazığ) İlçesinin Etnobotanik Özellikleri" başlıklı tez çalışmasında da benzer amaçlarla kullanıldığı yöre halkı ile yüz yüze yapılan anket görüşmeleri sonucu belirlenmiştir. Bu bitkiler; *Anthemis, Achillea*, *Helichrysum, Gundelia, Juniperus, Elaeagnus, Euphorbia, Astragalus, Quercus, Hypericum, Mentha, Salvia, Stachys, Teucrium, Thymus, Phlomis, Ranunculus, Plantago, Paliurus, Crataegus, Rhus, Pistacia, Tragopogon, Morus, Amygdalus, Rubus, Prunus, Vitis, Onosma, Pisum, Cicer, Silene, Onobrychis, Tamarix, Hordeum, Sorghum, Papaver, Medicago, Salix* gibi cinslere ait türlerdir [11].

Bu çalışma sonucunda 19 endemik taksondan 4 tanesinin koruma önlemi gerektiren ve tehdit altında olan bitkiler olması nedeniyle ve 3 bitkinin de süs bitkisi olarak kullanılabilme ve yumrularının değerlendirilebilme

olanağı olması nedeniyle öncelikli olarak taşınması önerilmiştir. Endemik 4 taksondan başka bölge için değerli sayılabilecek ve yumrularının üretilerek değerlendirilebileceği Orchidaceae familyasından 2 sahlep (*Orchis laxiflora* ve *O. punctulata*) türü tespit edilmiş olup, bunların da uygun habitatlara taşınması önerilmiştir. Ayrıca ornemantasyon amaçlı kullanılabilecek Fabaceae familyasından *Trifolium physodes* var. *physodes*' in tek bir populasyonuna rastlanmış olup bunun da taşınması gerekliliği vurgulanmıştır. Bütün bu tespitlerin ardından iki Sahlep türü (*Orchis laxiflora* ve *O. punctulata*) bölge halkına tanıtılmak amacıyla Milli Parklar Palu Orman İşletme Şefliği bahçesine taşınarak demonstrasyon sahası oluşturulup, birkaç örnek de Elazığ Orman Fidanlık Müdürlüğü'ne teslim edilerek yetiştirilmesi ve tanıtılması sağlandı. Ayrıca endemik taksonlardan *Saponaria prostrata* subsp. *prostrata* (LC) taksonu doğal habitatından toprağı ile birlikte baraj havzası dışında yakın bir alana taşınarak, bitkinin takibi Elazığ Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğü'ne teslim edilmiştir.



Şekil 9. Hamzabey baraj havzasından toplanan bitkilerin koordinat dağılımı.

Alanda endemik olup, süs bitkisi olarak kullanılan ve önceden VU kategorisinde olup, daha sonradan CR kategorisine alınan *Acantholimon saxifragiforme* türü Elazığ ve yakın çevresinde doğal yayılış göstermekte ve zengin populasyonlar oluşturmaktadır. Bu nedenle, bu türün populasyonlarının taşınması gerekli görülmemiştir. Zira son yıllarda yapılan düzenlemelerde türün endemikliğinin de düştüğü görülmektedir [9]. Bununla beraber, taşınması öncelikli olarak önerilebilecek taksonlar: *Centaurea stapfiana* (NT)*, Ebenus haussknechtii* (NT)*; Saponaria prostrata* subsp. *prostrata* (LC)*, Cicer echinospermum* (VU) türleri Elazığ ve çevresinde bulunan, fakat populasyon oluşturma zorluğu çeken, tıbbi ve süs bitkisi olarak kullanılabilme özelliğine sahip bitki gruplarıdır. Bu bitkilerin habitatları oldukça kısıtlı ve populasyonlardaki birey sayılarının az olduğu ve populasyon oluşturma kapasitelerinin zayıf olduğu tespit edilmiştir. Bu bitkilerin mevcut populasyonlarının kaybolmaması ve yaşayan birey sayılarının artması için, baraj havzası yakında yer alan uygun habitatlara taşınma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Taşınması elzem olarak belirlenen taksonlardan *Saponaria prostrata* subsp. *prostrata* (LC) (Ebem terliği, yatık sabun otu bitkisi); süs bitkisi kapsamında kullanılabilme potansiyeli olan bir bitki türü olarak değerlendirilebilir. Tıbbi amaçlı ve gıda tüketim maddesi olarak yumruları kullanılan nişasta deposu olan sahlep türlerinin yumrularının aşırı toplanması ve aşırı kullanılması nedeniyle ciddi yok olma tehditi altında olduğu bilinmektedir.

Bundan dolayıdır ki, birçok ilimizde Tarım müdürlükleri ve Araştırma Enstitüleri tarafından koruma ve kültüre alınma çalışmaları yapılmakta olup, Elazığ ilinde de bu çalışmalara bu türlerle başlanabileceği önerilmiştir. Sahlep bitkisinin genel olarak kireçli toprakları sevdiği ve çayırlarda yetişen sahleplerin yumrularının ormanlık alanda yetişenlere göre daha küçük olduğu bilinmektedir. Baklagil bitkilerinden olan *Ebenus hausknechtii* (NT) için taşlık kayalık yamaçlar, tarla içi, yamaç vb. habitatların, *Cicer echinospermum* (NT) için ise yine tarla içi gibi yumuşak toprak habitatlarının uygun olduğu bilindiğinden, taşıma işlemleri sırasında bu habitat özellikleri dikkate alınmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma, T.C Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğü, XV. Bölge Müdürlüğü, Elazığ Şube Müdürlüğü tarafından" Elazığ ili Palu İlçesi Hamzabey Barajı Baraj Göl Aynası Altında Kalacak Bitki Türlerinin Tespiti Projesi" adıyla 11.04.2013 tarihli olarak desteklenen proje verilerine dayanmaktadır.

Kaynaklar

[1] Akkan E. Elazığ ve Keban Barajı Çevresinde Coğrafya Araştırmaları. Coğrafya Araştırmaları Dergisi 1972; (5-6): 175-214.
[2] Günek H, Öz T. Palu (Elazığ) Yerleşmesi ve Yakın Çevresinin Uzaktan Algılama Yöntemiyle 1990-2017 Yılları Arasında Arazi Kullanımındaki Değişimlerin Belirlenmesi. Fırat Üniversitesi Harput Uygulama ve Araştırma Merkezi, Uluslararası Palu Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 2018; s. 289.
[3] Elazığ İçme Suyu Projesi (Hamzabey Barajı Ve Tarhana Derivasyonu Alternatifi), ÇED Raporu 2010. Ankara.
[4] [4] Davis PH. Flora of Turkey and the East Aegean Islands. Vol 1-9. Edinburg, UK: Edinburgh University Press. 1965-1985.
[5] Bayrak M. Palu İlçesi'nin (Elazığ) Coğrafi Etüdü. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Coğrafya Anabilim Dalı, 2016, Elazığ.)
[6] Evren H. Elazığ Yöresinden Toplanmış Fabaceae ve Asteraceae Familyalarına Ait Tıbbi ve Endüstriyel Bitkiler. Fırat Havzası Tıbbi ve Endüstriyel Bitkileri Sempozyumu, Edl.: Prof. Dr. Ş. Baltepe, Doç. Dr. T. Babaç, Y. Doç. Dr. H. Evren, Elazığ, Türkiye, 6-8 Ekim (1986) 127-135.
[7] Güner A, Aslan S, Ekim T, Vural M, Babaç MT. Türkiye Bitkileri Listesi (Damarlı Bitkiler). İstanbul: Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi ve Flora Araştırmaları Derneği Yayını. 2012.
[8] Ekim T, Koyuncu M, Vural M, Duman H, Aytaç Z, Adıgüzel N. Türkiye Bitkileri Kırmızı Kitabı. Ankara: Türkiye Tabiatını Koruma Derneği ve Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Yayını, Barışcan Ofset. 2000.
[9] http://www.tehditaltindabitkiler.org.tr/v2/ (https://www.bizimbitkiler.org.tr/list.html)
[10] Yapar Y, Behçet L. Arıcak İlçesi (Elazığ -Türkiye) Florası. Bağbahçe Bilim Dergisi 2024; 11(2): 109-142.
[11] Olgun Ş. Arıcak (Elazığ) İlçesinin Etnobotanik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 2019, Bingöl.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 685-698, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1665680

Investigation of the Bioactivity Properties of $TiZrCrNb_{0.3}Ta_{0.07}$ Medium Entropy Alloy Produced from TNTZ Waste

Nihal YAYLA[1*], Ömer GÜLER[2], Yakup SAY[3], Harun GÜZEL[4]

[1] Department of Strategic Raw Materials and Advanced Technology Applications, Munzur University, Tunceli, Türkiye
[2] Rare Earth Elements Application and Research Center, Munzur University, Tunceli, Türkiye
[3] Department of Metallurgical and Materials Engineering, Munzur University, Tunceli, Türkiye
[4] Department of Metallurgical and Materials Engineering, Mersin University, Mersin, Türkiye
[*1] nhlyayla@gmail.com, [2] omerguler@munzur.edu.tr, [3] yakupsay@munzur.edu.tr, [4] harun.guzel@etikrom.com

Geliş/Received: 27/03/2025 **Kabul/Accepted: 14/05/2025**

Abstract: High entropy alloys (HEAs) and medium entropy alloys (MEAs) have garnered significant attention as alternative materials in various fields due to their superior physical and chemical properties compared to conventional alloys. One of the most promising applications of this innovative material class is in biomaterials. In this study, a bio-medium entropy alloy (BioMEA), $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$, was successfully synthesized using non-toxic elements (Ti, Zr, Cr, Nb and Ta) through arc melting of TNTZ alloy waste. The produced BioMEA was comprehensively characterized using scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), and X-ray diffraction (XRD) to analyze its structural and chemical properties. Additionally, the in-vitro degradation, ion release, and bioactivity properties of the alloy were evaluated and compared with those of the conventional TNTZ alloy, with a focus on the effects of heat treatment. The results demonstrated that heat treatment did not cause significant changes in the microstructure of the $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy but led to the formation of intermetallic compounds such as Cr_2Zr and Cr_2Ta on the surface. Degradation tests revealed an unexpected mass gain across all sample groups after a four-week immersion period due to surface precipitation, surpassing the expected mass loss from degradation. Ion release analyses showed similar behavior between the $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ and TNTZ alloys, with ion release levels in the ppb range, confirming that Ti was released at non-toxic levels. Bioactivity tests identified low lesvels of Ca-P-O deposition on all sample surfaces, with the highest bioactivity observed in the heat-treated $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ sample. Overall, the findings suggest that the $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy has the potential to serve as an alternative biomaterial to the TNTZ alloy, with its bioactivity properties being further enhanced through heat treatment. Further studies are recommended to optimize its bioactivity and evaluate its in-vivo performance for biomedical applications.

Key words: Medium-entropy alloys, TNTZ waste recycling, TiZrCrNbTa alloy, bioactivity, metal ion release.

TNTZ Atıklarından Üretilen $TiZrCrNb_{0.3}Ta_{0.07}$ Orta Entropili Alaşımın Biyoaktivite Özelliklerinin Araştırılması

Öz: Yüksek entropili alaşımlar ve orta entropili alaşımlar, üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde geleneksel alaşımlara kıyasla çeşitli alanlarda alternatif malzemeler olarak önemli bir ilgi görmektedir. Bu yenilikçi malzeme sınıfının en umut verici uygulama alanlarından biri biyomalzemelerdir. Bu çalışmada, toksik olmayan elementler (Ti, Zr, Cr, Nb ve Ta) kullanılarak, TNTZ alaşımı atığından ark ergitme yöntemiyle başarıyla sentezlenen bir biyo-orta entropili alaşım, $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$, elde edilmiştir. Üretilen biyo-orta entropili alaşımın yapısal ve kimyasal özellikleri; taramalı elektron mikroskobu, enerji saçınımlı X-ışını spektroskopisi ve X-ışını difraksiyonu teknikleriyle kapsamlı bir şekilde karakterize edilmiştir. Ayrıca, alaşımın in-vitro degradasyon davranışı, iyon salınımı ve biyouyumluluğu değerlendirilmiş ve bu özellikler ısıl işlemin etkisi dikkate alınarak konvansiyonel TNTZ alaşımıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ısıl işlemin $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alaşımının mikroyapısında belirgin bir değişikliğe yol açmadığını, ancak yüzeyde Cr_2Zr ve Cr_2Ta gibi intermetalik fazların oluşumuna neden olduğunu göstermiştir. Degradasyon testleri, dört haftalık daldırma süreci sonunda tüm numune gruplarında beklenen kütle kaybının aksine, yüzeydeki çökelmelere bağlı olarak net kütle artışı gözlemlendiğini ortaya koymuştur. İyon salınım analizlerinde, $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ ve TNTZ alaşımlarının benzer davranışlar sergilediği ve iyon salınım seviyelerinin ppb aralığında olduğu tespit edilmiş; özellikle salınan titanyum iyonlarının toksik olmayan düzeylerde olduğu doğrulanmıştır. Biyouyumluluk testlerinde, tüm numunelerin yüzeylerinde düşük seviyede Ca-P-O birikimi gözlemlenmiş; en yüksek biyouyumluluk ise ısıl işlem uygulanmış $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ numunesinde saptanmıştır. Genel olarak, elde edilen bulgular $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alaşımının TNTZ alaşımına alternatif bir biyomalzeme olarak kullanılabileceğini ve ısıl işlemle biyouyumluluğunun daha da artırılabileceğini göstermektedir. Biyolojik uygulamalarda in-vivo performansının değerlendirilmesi ve biyouyumluluğunun optimize edilmesi için ileri düzey çalışmalar önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: Orta entropili alaşımlar, TNTZ atık geri dönüşümü, TiZrCrNbTa alaşımı, biyoaktivite, metal iyon salınımı.

[*] Sorumlu yazar: nhlyayla@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0001-7170-4572, [2] 0000-0003-4334-7314, [3] 0000-0001-5005-8516, [4] 0009-0006-2316-136X

1. Introduction

In response to increasing demands for energy efficiency and sustainability, the continuous development of high-performance materials has become imperative. Traditional alloys typically exhibit a structure where the primary element constitutes a significant atomic fraction, while smaller quantities of other alloying elements are added to enhance specific properties. Within this context, an alloy family based on a principal element is formulated, with various alloying elements incorporated to optimize desired performance characteristics [1, 2]. Moreover, due to the limited number of elements available in the periodic table, the range of alloy families that can be developed is inherently constrained. To overcome this limitation and transcend conventional boundaries, a novel alloy concept known as compositionally complex alloys — including high-entropy alloys (HEAs) and medium-entropy alloys (MEAs) — has been introduced [3-5]. This approach is based on combining multiple principal elements, typically in equiatomic ratios and relatively high concentrations. By doing so, the limitations of conventional alloys have been overcome, enabling the design of novel materials with versatile properties [6].

MEAs, which typically contain three to four principal elements, represent a subclass of compositionally complex alloys where the configurational entropy is lower than in HEAs but still significant enough to promote the formation of solid solution phases. While HEAs are defined as alloys that consist of at least five principal metallic elements, each with an atomic percentage ranging between 5% and 35% [7-10], MEAs contain fewer elements and exhibit lower mixing entropy, yet they often demonstrate similar or even superior mechanical and corrosion resistance properties, especially when optimized for biomedical applications [11-13]. According to Yeh and colleagues, HEAs are defined as alloys where the configurational mixing entropy (ΔS_{mix}) dominates the solidification thermodynamics, thereby favoring the formation of random solid solution phases over intermetallic compounds. In their initial studies, they proposed the criterion of $\Delta S_{mix} \geq \ln(5)R$ for HEA castings. This criterion implies the mixing of at least five elements in equiatomic composition [14-16]. For MEAs, the configurational entropy lies in the range of $\ln(3)R \leq \Delta S_{mix} < \ln(5)R$, corresponding typically to alloys containing three or four principal elements in near-equiatomic or non-equiatomic ratios. In the case of MEAs, the ΔS_{mix} value falls below this threshold but remains sufficient to influence phase stability and mechanical behavior [17-20]. The selection of five elements as the lower limit is considered a critical factor to ensure that the mixing entropy is sufficiently high to balance the mixing enthalpy, thereby promoting the formation of solid solution phases [21].

MEAs, like HEAs, exhibit remarkable properties such as high strength, enhanced wear resistance, and excellent corrosion behavior. These properties stem from the interplay of thermodynamic and structural effects similar to those in HEAs. Among these, four fundamental effects have been identified [4, 22, 23]. (i) The high-entropy effect from a thermodynamic perspective; (ii) the sluggish diffusion effect from a kinetic perspective; (iii) the severe lattice distortion effect from a structural standpoint; and (iv) the overall "cocktail effect" arising from the unique interplay of composition, structure, and microstructure [24-26]. Despite the compositional complexity, many MEAs also exhibit simple structures such as face-centered cubic (FCC), body-centered cubic (BCC), or hexagonal close-packed (HCP) phases, rather than forming complex intermetallic compounds. This is attributed to the balance of mixing entropy and enthalpy, which in MEAs is carefully tuned through element selection. The synergistic combination of the four effects, although moderated compared to HEAs, still endows MEAs with outstanding mechanical and chemical properties [27-33]. The performance of HEAs is highly dependent on the manufacturing methods and the parameters employed during synthesis. HEAs are produced using both conventional and advanced alloy synthesis techniques, which can be classified into four main categories based on the state of the elements during the synthesis process: (i) liquid-state synthesis, (ii) solid-state synthesis, (iii) gas-phase synthesis, and (iv) novel synthesis methods, particularly electrochemical processes. These techniques are employed to optimize the structural and mechanical properties of HEAs [34, 35].

In surgical operations, metallic implants are frequently chosen, particularly in hard tissue applications. However, it is known that metallic implants have problems such as low biocompability, inadequate corrosion resistance, mechanical incompatibility, high density and potential ion release, which can lead to toxicity and allergic tissue reactions [36, 37]. The advantages of titanium alloys over stainless steel and Co-Cr alloys include their low density, high strength, corrosion resistance, and biocompatibility [38]. However, titanium alloys are considered bioinert materials, and extensive research efforts are ongoing to enhance their biocompatibility [39, 40]. Due to their superior properties, MEAs and HEAs have the potential to serve as alternatives to conventional alloys in metallic biomaterials. With their high corrosion resistance and biocompatibility, medium-entropy alloys have recently gained attention as a promising subclass within the broader family of Bio-HEAs, often referred to as "Bio-MEAs" when configurational entropy falls within a moderate range. In biomedical applications, these alloys demonstrate promising attributes such as excellent antibacterial properties, exceptional biocompatibility, and outstanding corrosion resistance. These features position Bio-MEAs as an innovative and effective material

class capable of providing advanced solutions in the biomedical field [41-46]. Studies have demonstrated that both HEAs and MEAs have the potential to complement existing materials in biomedical applications [47, 48]. The selection of constituent elements for Bio-HEAs and Bio-MEAs are critically important to ensure biocompatibility and safety. Elements such as Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, V, Mo, Mg, Cu, Zn, Co, Cr, W, Ag, Al, and Sn are commonly preferred in these alloys, as they exhibit no toxic effects in implantation sites and pose no risk to tissue cells. For instance, systematic experiments conducted on the Ti-Zr-Hf-Nb-Ta alloy have revealed that these components exhibit no toxicity or allergic complications. Similarly, alloys such as TiTaNbZr, TiMoNbZr, TiMoTaNbZr, TiZrHfNbTa, TiZrHfNb, and TiNbHfTaZrMo stand out as promising biomaterial candidates due to their high mechanical strength, wear resistance, and corrosion resistance [49-52]. Several studies have investigated equimolar and non-equimolar compositions of alloys such as TiTaNbZr, TiMoNbZr, TiMoTaNbZr, TiZrHfNbTa, TiZrHfNb, and TiNbHfTaZrMo as potential metallic biomaterials. These alloys have demonstrated exceptional properties, including high yield strength (800–1600 MPa), high plasticity, and superior wear resistance. The TiNbTaZrMo alloy has been reported to exhibit excellent friction and corrosion resistance alongside good biocompatibility. Similarly, the TiZrHfNbTa alloy has shown high biocorrosion resistance and biocompatibility comparable to that of the Ti6Al4V alloy [53-56]. In addition, alloys such as $Ti_{40}Zr_{40}Nb_5Ta_{15}$ [57], $Ti_{40}Zr_{25}Nb_{25}Ta_5Mo_5$ [58], $TiZrHfNbFe_{0.5}$ [59] and $Ti_{0.5}ZrNbTaMo$ [60] have been observed to exhibit higher wear resistance compared to the Ti6Al4V alloy. These properties position these compositionally complex alloys — especially MEAs — as promising candidates for potential biomaterials.

In this study, TiZrCrNbTa MEAs, which represent a medium-entropy alloy system and have not been previously investigated, were produced using arc melting by utilizing waste from the Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (TNTZ) alloy. Following production, the alloy underwent heat treatment, and the structural changes before and after the treatment were characterized in detail. Additionally, the in-vitro degradation, ion release, and bioactivity properties of this novel alloy were compared with those of TNTZ alloys. The potential of TiZrCrNbTa MEAs as alternative biomaterials was discussed, and the results were interpreted within the context of MEA design principles and found to be consistent with data reported in the literature.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

The $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy was synthesized by adding equimolar amounts of high-purity (99.5%) elemental Ti, Zr, and Cr powders (supplied by Nanografi) into Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (TNTZ) alloy waste, the chemical composition of which is listed in Table 1. The constituent powders were mixed using a high-energy ball mill (Retsch PM100) at a speed of 200 rpm for 1 hour under an argon atmosphere to achieve a homogeneous mixture. No significant contamination from the milling media was detected in the subsequent XRD and EDS analyses. Following the mixing process, the powder mixture was compacted into pellets at room temperature under a pressure of 100 MPa using a hydraulic press. The resulting pellets were then melted five times using an arc melting process under a protective argon atmosphere to produce Bio-MEA alloys. The produced Bio-MEA alloys underwent homogenization heat treatment at 1000°C for 15 hours in an argon atmosphere. The process flow chart is illustrated in Figure 1.

Table 1. Chemical compositions of TNTZ waste and $TiZrCrNb_{0.3}Ta_{0.07}$ alloy.

	Chemical Composition (wt.%)				
	Ti	**Nb**	**Ta**	**Zr**	**Cr**
TNTZ	52.79	29.00	13.00	4.60	0
$TiZrCrNb_{0.3}Ta_{0.07}$	20.67	12.03	5.47	39.38	22.45

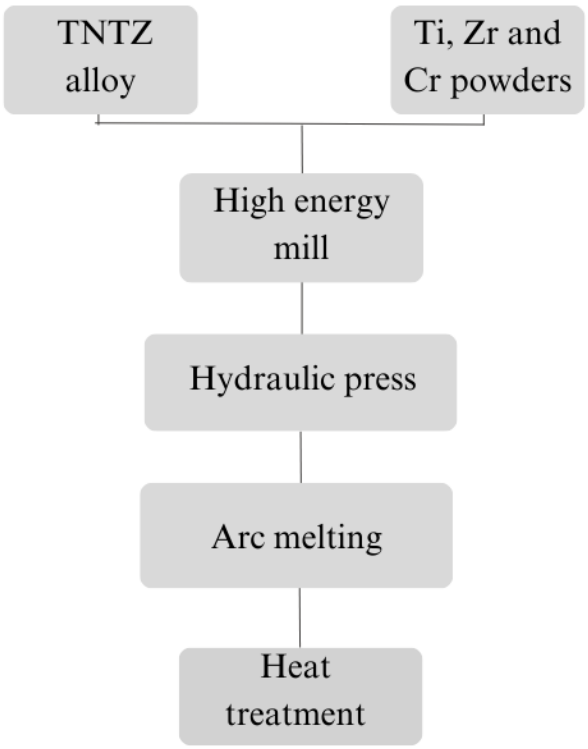


Figure 1. Process flow chart.

2.2. Theorical Calculations

ΔS_{mix}, ΔH_{mix}, VEC, Ω, δ and T_m parameters of the $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy were calculated using the High-Entropy Alloys Predicting Software (HEAPS) program [61, 62] and the results are presented in Table 2. The table indicates that the ΔSmix value was calculated as 11.18 J/molK, while the ΔHmix value was determined to be 4.92 kJ/mol. These values fall within the ranges of $-11 \leq \Delta S_{mix} \leq 19.5$ J/molK and $-22 \leq \Delta H_{mix} \leq 7.5$ kJ/mol, meeting the criteria for the formation of a solid solution phase.

The calculated configurational entropy of the alloy, ΔSmix 11.18 J/mol K (≈1.34 R), is slightly less than the generally accepted threshold for high entropy alloys (1.61 R). Therefore, this alloy is categorized as a medium entropy alloy (MEA) according to certain definitions.

Table 2. ΔS_{mix}, ΔH_{mix}, VEC, Ω, δ and T_m values of the $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy.

ΔS_{mix} (J/molK)	ΔH_{mix} (kJ/mol)	VEC	Ω	δ (%)	T_m (°C)
11.18	-4.92	4.7	4.89	9.64	1878.85

2.3. Characterization analysis

The microstructure of the reference TNTZ alloy and the synthesized $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy, both before and after heat treatment, was comprehensively examined using SEM/EDS (Hitachi SU3500, Oxford AZtech) and XRD (Rigaku Miniflex 600) analyses. Prior to characterization, the surfaces of the samples were polished using a dual-table metallographic grinding and polishing machine (Metkon). XRD analyses were performed with a Cu-Kα tube over a range of 20–90° at a scanning speed of 2°/min.

2.4. In vitro degradation and ion releases

To evaluate the in-vitro bioactivity properties of the $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy, a four-week immersion test was conducted in simulated body fluid (SBF). The as-cast and heat-treated structures of the alloy were assessed in

terms of degradation, ion release, and bioactivity properties, and compared with those of the TNTZ alloy. The bioactivity tests were performed in SBF, whose chemical composition is provided in Table 3, at a controlled solution temperature of 37°C for a duration of four weeks. The degradation rates were determined by calculating the weight differences between the samples at the beginning and after the four-week immersion period. Each sample group was tested in triplicate, with standard deviations calculated, and the average values were considered. At the end of the four-week immersion, metal ions released from the samples into the SBF solution were detected using an ICP-MS analyzer (Perkin Elmer NexION 350X). For analysis, 1 ml of the SBF solution was collected, mixed with 1% nitric acid (HNO_3), and diluted appropriately with ultrapure water. Ion release analyses were conducted in triplicate for each sample group, and average results were calculated. To determine the bioactivity on the sample surfaces at the end of the immersion period, comprehensive SEM/EDS and XRD analyses were performed. These analyses aimed to identify Ca-P nucleation on the sample surfaces.

Table 3. Chemical composition of simulated body fluid (SBF) solution [63].

NaCla	8.035 g
$NaHCO_3$	0.355 g
KCl	0.225 g
$K_2HPO_4.3H_2O$	0.231 g
$MgCl_2.6H_2O$	0.311 g
HCl (1 molar)	39.0 mL
$CaCl_2$	0.292 g
Na_2SO_4	0.072 g
$(HOCH_2)_3CNH_2$	6.118 g
HCl (1 Molar)	0-5mL (Appropriate amount to adjust pH to ~7.4)

3. Result and Discussion

Figure 2 presents the XRD analyses of the as-cast and heat-treated structures of the $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ MEA and the reference TNTZ alloy prior to degradation. In the XRD pattern of the TNTZ alloy, dominant (β) phase peaks [64] were identified, and these peaks exhibited a homogeneous distribution characteristic of this phase. When comparing the peaks of the alloy's as-cast and heat-treated structures, the presence of characteristic FCC (Face-Centered Cubic) phase peaks at 44° and 75° angles was observed in both samples [65-67]. Additionally, characteristic peaks of the TNTZ alloy were identified at approximately 36°, 54° and 80°. In contrast to the alloy's characteristic peaks, Cr_2Zr peaks were observed at 35°, 41°, 43°, 63°, 67°, 74°, 85° and 89°, while Cr_2Ta peaks were detected at 21° and 30°. Notably, after heat treatment, the Cr_2Ta peak at approximately 30° disappeared, whereas the peak at 21° remained present. These results indicate that the Cr element in the TiZrCrNbTa MEA forms intermetallic compounds with the Zr and Ta elements present in the TNTZ alloy. According to the XRD analysis, the lack of significant differences between the as-cast structure and the heat-treated structure suggests that no new intermetallic compounds were formed after heat treatment. The absence of different phases, despite the application of high-temperature and prolonged heat treatment, indicates the stability of intermetallic compounds formed during the arc melting process. This demonstrates that the heat treatment does not affect the existing phases and does not lead to phase transitions or the formation of new phases within the structure.

The observed FCC phase formation in our $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$alloy is consistent with findings by [68-70], who reported similar FCC structure in TiZrNbTa-based alloys with Cr additions. However, our results show some distinct differences in peak intensities and positions compared to the equiatomic TiZrCrNbTa alloy studied by which exhibited a predominant BCC structure. This difference can be attributed to our non-equiatomic composition with lower Nb and Ta content, which alters the electron concentration and phase stability. The formation of intermetallic compounds (Cr_2Zr and Cr_2Ta) after heat treatment aligns with observations by who documented similar precipitation behavior in Cr-containing refractory MEAs after prolonged thermal exposure. Interestingly, reported that such intermetallic phases, when present in controlled amounts, can enhance both mechanical properties and bioactivity of Ti-based alloys through microstructural refinement and surface energy modification [71, 72].

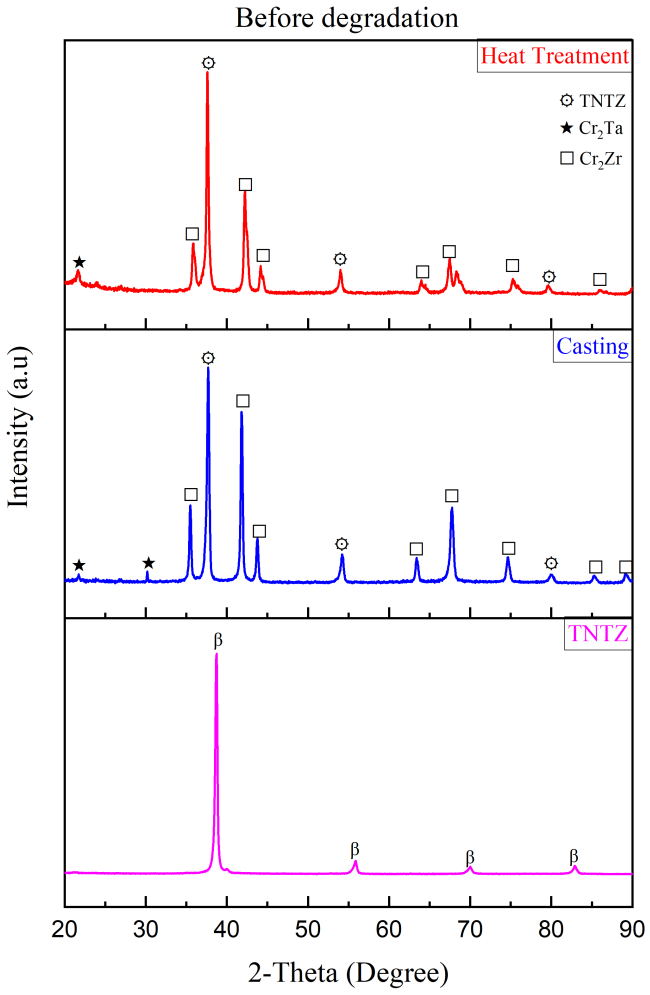
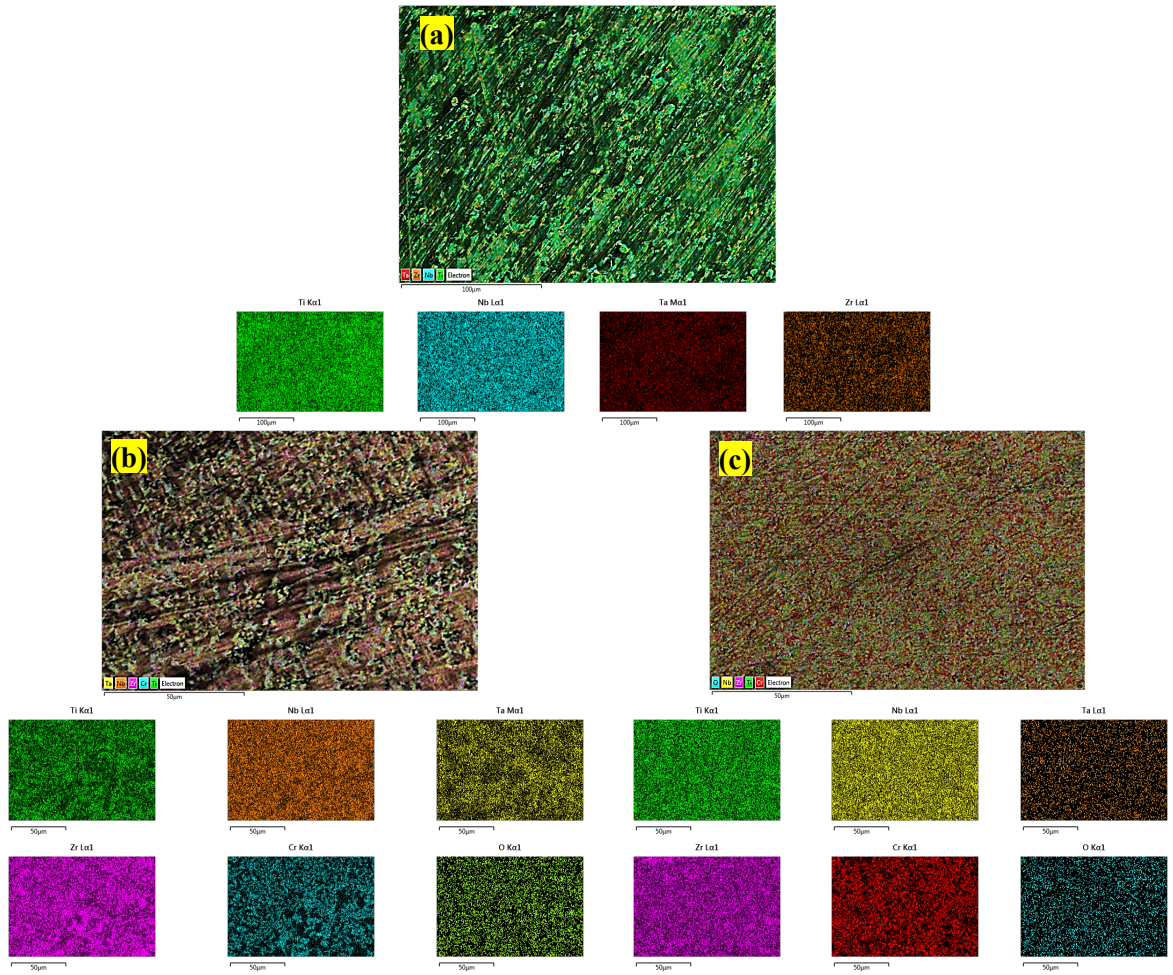


Figure 2. XRD analyses before degradation; TNTZ alloy, casting and heat treatment $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy.

Figure 3 presents the EDS elemental mapping images and elemental analysis results of the TNTZ alloy and the $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloys, both before and after heat treatment, prior to degradation. Figure 3-a shows that the elements constituting the TNTZ alloy are distributed homogeneously throughout the alloy. Similarly, Figure 3-b indicates a homogeneous elemental distribution on the surface of the as-cast $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy; however, micro-pores are observed on the surface. Additionally, Zr- and Cr-rich regions were identified in the as-cast structure of the alloy, which are believed to result from rapid cooling or thermal effects during the production process. Similar findings have also been reported by other researchers [73-75]. The Cr_2Zr and Cr_2Ta phases identified in the XRD analysis results support this observation. Figure 3-c shows that the homogeneous elemental distribution was re-established, microstructural irregularities were reduced, yet minor localized accumulations of Cr and Zr elements persisted. According to the EDS elemental analysis results, the TNTZ alloy contains Ti (50.9 wt%), Nb (31.0 wt%), Ta (13.9 wt%), and Zr (4.2 wt%) as its primary constituents. In the as-cast MEA structure, the proportions of Zr (38.5 wt%) and Cr (18.9 wt%) significantly increased, while the Ti and Nb contents decreased. Post-heat treatment EDS spectra were similar to the as-cast structure, but the oxygen content increased slightly from 4.5% to 5.0%. This increase may be attributed to minor surface oxide formation during the heat treatment process.



EDS analysis results

Elements	Ti	Nb	Ta	Zr	Cr	Ca	P	O
TNTZ	50.9	31.0	13.9	4.2	-	-	-	-
Casting	21.7	12.0	4.5	38.5	18.9	-	-	4.5
Heat Treatment	21.6	11.5	4.3	38.5	19.1	-	-	5.0

Figure 3. EDS elemental mapping images and elemental analysis results of (a) TNTZ alloy before degradation, (b) before heat treatment and (c) after heat treatment $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloys.

The XRD analyses presented in Figure 4 illustrate the examination of phase structures in different sample groups. The XRD results of the TNTZ alloy indicate no significant changes in its structure following degradation. According to the analysis, the β-phase remains the dominant crystal structure in the alloy, clearly demonstrating that the degradation process did not significantly affect the crystal structure and that the TNTZ alloy retains its structural stability. Similarly, the as-cast structure of the $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy showed no notable differences after degradation, similar to the TNTZ alloy. However, minor shifts in peaks were observed in the XRD analyses, with a notable increase in the intensity of the Cr2Ta peak around 32°. Interestingly, this peak is located in close proximity to characteristic hydroxyapatite peaks typically observed in XRD analyses at 31.7°, 32.9°, and 34.1° [76-78]. This similarity suggests that the phases and precipitates formed on the alloy surface during degradation may exhibit a structure analogous to hydroxyapatite. Furthermore, the increase in peak intensity is thought to result from Ca-P nucleation on the sample surface during the degradation process. The XRD analyses of the heat-treated alloy post-degradation showed results similar to those obtained before degradation, consistent with other groups. However, the emergence of a peak around 32° after degradation supports the presence of Ca-P nucleation on the surface. Nevertheless, XRD analyses alone are insufficient for a comprehensive evaluation of the bioactivity on

the sample surfaces. To thoroughly assess bioactivity, the XRD results must be corroborated with EDS analyses. This combination enables a more detailed investigation of the chemical changes occurring on the surface.

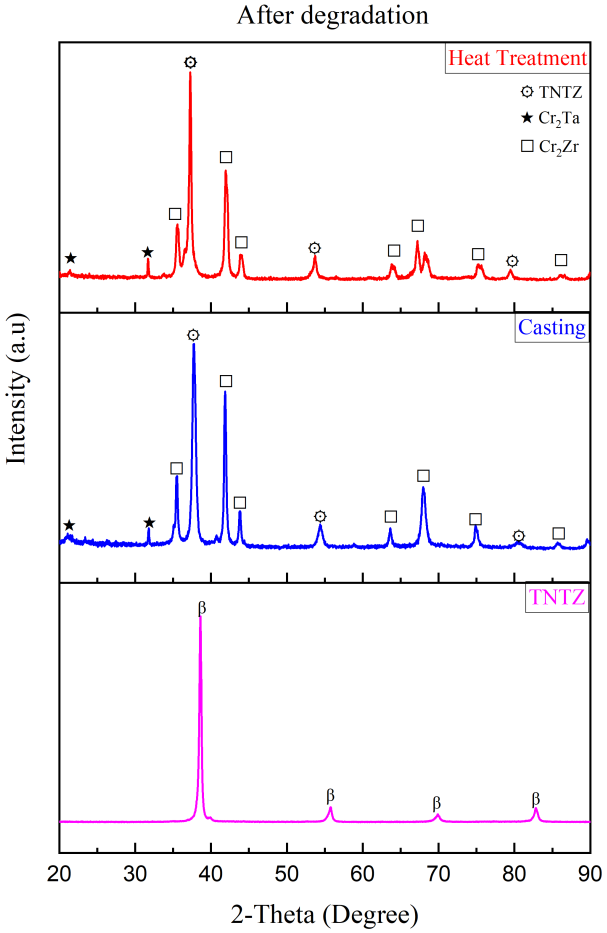
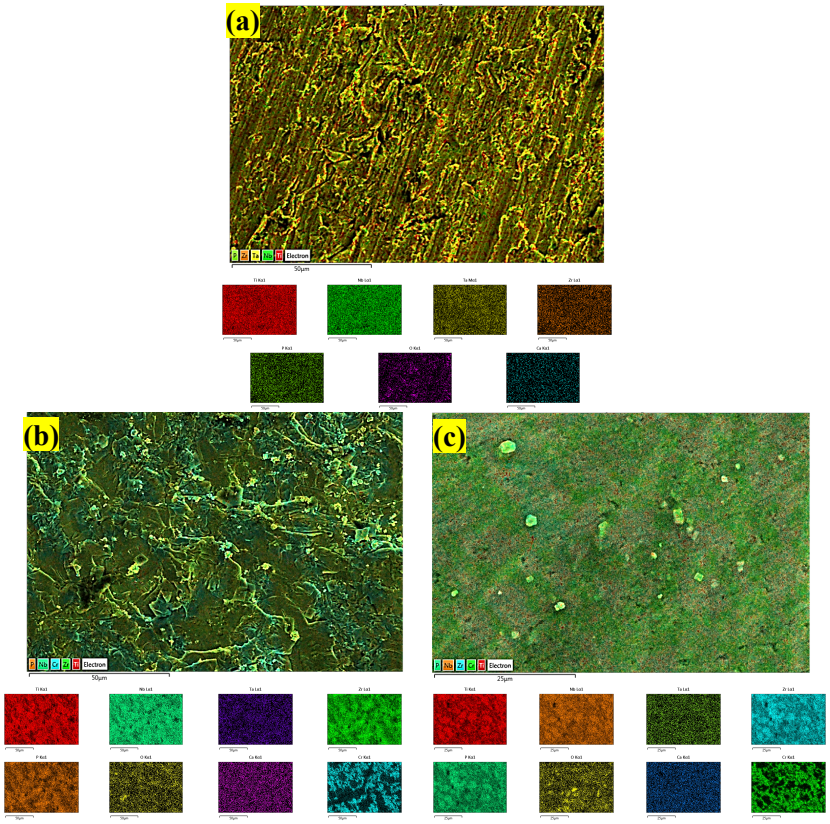


Figure 4. XRD analyses after degradation; TNTZ alloy, casting and heat treatment $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy.

Figure 5 presents the EDS elemental mapping images and elemental analysis results of the sample groups after degradation. In Figure 5-a, the TNTZ alloy exhibits a significant increase in surface irregularities and roughness post-degradation. Notably, the linear structures on the surface appear disrupted, and bioactive precipitates are observed on the material's surface. In Figure 5-b, the as-cast $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy also shows pronounced surface changes after degradation. Specifically, an increase in micro-pores and a more complex, roughened surface structure are evident. These observations suggest the formation of bioactive phases, such as apatite or salt precipitates, on the material's surface during degradation. Additionally, noticeable surface cracks and increased irregularities are observed, which may indicate an increase in Ca-P nucleation on the material's surface due to chemical interactions. Figure 5-c highlights more prominent morphological changes on the material surface. Bioactive precipitates and irregularities, including Ca-P nucleation, are clearly observed. These irregularities, formed after degradation, indicate that the material encounters Ca-P accumulation in the biological environment, leading to enhanced bioactivity. While microstructural homogeneity decreases, irregular surface structures become apparent. Moreover, the size and distribution of the precipitates suggest that the material's surface becomes more biologically active as a biomaterial. The EDS elemental analysis results post-degradation reveal a significant decrease in major elements such as Ti (48.3 wt%), Nb (25.2 wt%), and Ta (11.7 wt%). This reduction implies that chemical reactions and surface degradation have led to mass loss in the primary components of the material. In particular, the decrease in Nb and Ta content suggests that these elements are more prone to dissolution in the SBF medium or may be displaced during apatite formation on the surface. Compared to pre-degradation conditions, the presence of oxygen (13.7 wt%), calcium (0.1 wt%), and phosphorus (1.0 wt%) indicates the formation of Ca-P nucleation and bioactive phases such as apatite on the surface. The increase in

oxygen content further supports intensified oxidation processes on the surface, aligning with the observed enhancement in the material's bioactivity. These findings highlight the potential of the alloy as an active biomaterial in biological environments.



Elements	Ti	Nb	Ta	Zr	Cr	Ca	P	O
TNTZ	48.3	25.2	11.7	-	-	0.1	1.0	13.7
Casting	21.2	14.2	7.1	28.3	26.7	0.2	0.2	2.0
Heat Treatment	16.7	9.8	5.4	29.7	21.5	0.1	0.5	15.4

Figure 5. EDS elemental mapping images and elemental analysis results of (a) TNTZ alloy after degradation, (b) before heat treatment and (c) after heat treatment $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloys.

Table 4 presents the degradation results of the alloy samples after a four-week immersion period in SBF. Degradation in biomaterials refers to the mass loss that occurs due to chemical or biological breakdown when the material interacts with body fluids. However, contrary to expectations, the results indicate a mass increase rather than a loss across all sample groups. This phenomenon suggests that surface precipitations during immersion in SBF were more dominant than mass loss due to degradation. For the TNTZ alloy, the degradation percentages ranged between -2.11% and -2.28%, with an average value of -1.74%. In the as-cast $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy, the degradation percentages ranged from -1.03% to -2.13%, with an average of -1.66%. Meanwhile, the heat-treated $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy exhibited degradation percentages ranging from -1.24% to -1.86%, with an average of -1.58%. The observed negative degradation percentages indicate that the precipitation processes occurring on the sample surfaces during immersion led to mass accumulation. This is consistent with other studies in the literature, where surface deposition of bioactive phases, such as calcium phosphate (Ca-P), was found to significantly contribute to mass gain in similar SBF immersion experiments. The formation of such bioactive phases highlights the potential of these alloys for use as biomaterials, as the precipitates likely represent apatite-like phases associated with enhanced bioactivity. The slightly lower degradation rates in the heat-treated $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy compared to its as-cast counterpart could be attributed to the increased surface homogeneity and structural stability provided by heat treatment. These findings align with prior research demonstrating that heat-treated alloys

often exhibit reduced susceptibility to degradation due to improved structural integrity and reduced microstructural irregularities [79-82]. In conclusion, the mass increase observed in all sample groups reflects the dominant role of surface precipitation over degradation. This suggests that the $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy, both in its as-cast and heat-treated forms, possesses strong potential as a bioactive material, capable of promoting the formation of bioactive layers in simulated physiological conditions. Future studies should focus on correlating these findings with in-vivo performance to validate the material's suitability for biomedical applications.

Table 4. Degradation amounts of alloys after four weeks of waiting.

Alloy	Measurement	Before Degradation (g)	After Degradation (g)	Difference (g)	% Degradation	Average	Standard Deviation
TNTZ	1	11.7736	12.0216	-0.248	-2.11	-1.74	0.79
	2	11.9305	12.0282	-0.0977	-0.82		
	3	12.4975	12.7824	-0.2849	-2.28		
$TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ casting structure	1	12.0484	12.2684	-0.22	-1.83	-1.66	0.57
	2	12.2828	12.4094	-0.1266	-1.03		
	3	11.5922	11.8388	-0.2466	-2.13		
$TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ heat treated	1	10.8417	10.9762	-0.1345	-1.24	-1.58	0.31
	2	12.4926	12.7244	-0.2318	-1.86		
	3	12.6705	12.8777	-0.2072	-1.64		

Figure 6 illustrates the ion release amounts (ppb/mm²) of the samples immersed in SBF for four weeks. Regarding Ti release, similar amounts were observed for the TNTZ alloy, as-cast, and heat-treated $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloys. However, a slight reduction in Ti release was noted in the heat-treated samples, likely due to improved surface stability. Nb release was negligible across all samples, with no significant increase or decrease observed after heat treatment, indicating that Nb remains chemically stable under these conditions. Ta release was relatively high in the TNTZ alloy but substantially decreased in both as-cast and heat-treated $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloys, suggesting that Ta becomes less soluble when incorporated into the high-entropy alloy system. Zr release exhibited an increase in the as-cast and heat-treated samples compared to the TNTZ alloy, with the heat-treated samples showing a pronounced elevation. This suggests that heat treatment enhances the dissolution of Zr, potentially due to microstructural changes such as grain refinement or phase redistribution. Cr release was observed exclusively in the high-entropy alloys, with a significant increase following heat treatment. This behavior indicates that Cr dissolution is strongly influenced by the surface properties altered during heat treatment. Overall, the ion release data suggest that heat treatment impacts the surface characteristics and solubility of certain elements, particularly Zr and Cr. These findings are consistent with other studies in the literature, which report that heat treatment can modify the surface chemistry and microstructure of high-entropy alloys, thereby affecting their ion release behavior in simulated physiological environments. Such alterations could have implications for the bioactivity and biocompatibility of the materials, as higher ion release may correlate with enhanced surface reactivity and Ca-P nucleation in SBF conditions [83-85].

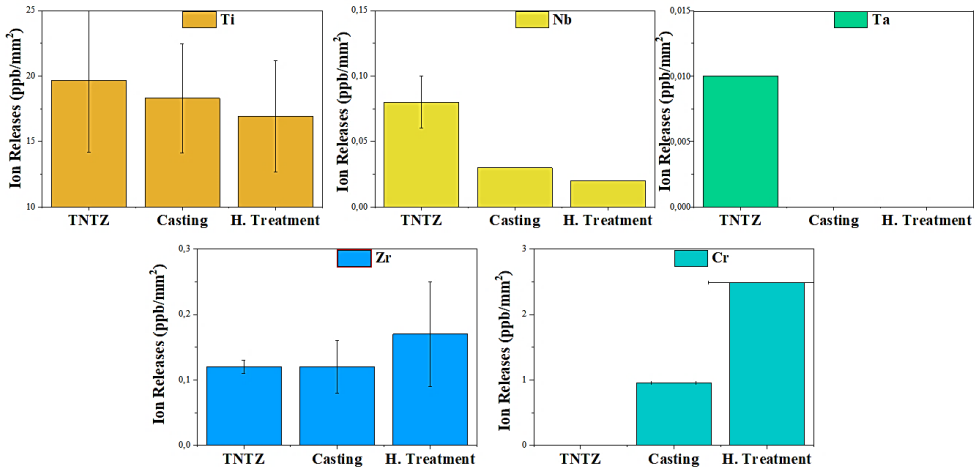


Figure 6. Ion release amounts of samples kept in SBF environment for four weeks (ppb/mm²).

4. Conclusion

In this study, the $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ medium-entropy alloy (MEA) was successfully synthesized using Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (TNTZ) waste through arc melting, followed by homogenization heat treatment. Structural characterization, degradation behavior, ion release, and bioactivity analyses were conducted, yielding the following key findings:

- Structural Analysis: No significant structural differences were observed between the as-cast and heat-treated samples, indicating stability in the microstructure.
- Intermetallic Compound Formation: The addition of Cr to the TNTZ waste resulted in the formation of certain intermetallic compounds within the alloy matrix. XRD analysis confirmed the formation of a dominant FCC phase in the as-cast alloy, with the development of Cr_2Zr and Cr_2Ta intermetallic compounds upon heat treatment.
- Degradation Analysis: After a four-week immersion in SBF, all sample groups exhibited mass gain rather than mass loss. This indicates that surface precipitation processes, particularly the formation of bioactive layers, outweighed the effects of material degradation.
- Ion Release: The ion release behavior of the synthesized MEA was comparable to that of the TNTZ alloy. Ti ions were detected in all samples, with release levels remaining in the ppb range, suggesting excellent corrosion resistance.
- Bioactivity Analysis: The presence of Ca-P-O phases was detected in low amounts on all sample surfaces, with the highest bioactivity observed in the heat-treated $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy.
- General Findings: The degradation, ion release, and bioactivity results demonstrate that the $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ alloy exhibits properties similar to those of the TNTZ alloy. Notably, the heat-treated alloy exhibited superior bioactivity, suggesting its potential as an alternative biomaterial to TNTZ.

In conclusion, the $TiZrCrNb_{0.25}Ta_{0.05}$ MEA synthesized in this study has shown promise as a potential biomaterial, particularly when subjected to heat treatment. These structural features, combined with the observed low ion release and enhanced bioactivity after heat treatment, support the alloy's potential as an alternative biomaterial to TNTZ. However, further research is necessary to enhance its bioactivity properties and to evaluate its in-vivo performance for practical biomedical applications.

References

[1] Senkov O, Miller J, Miracle D, Woodward C. Accelerated exploration of multi-principal element alloys with solid solution phases. Nat Commun 2015; 6(1):6529.
[2] Lu Z, Wang H, Chen M, Baker I, Yeh J, Liu C, et al. An assessment on the future development of high-entropy alloys: Summary from a recent workshop. Intermetallics. 2015; 66:67-76.
[3] Tsai M-H, Yeh J-W. High-entropy alloys: a critical review. Mater Res Lett 2014; 2(3):107-23.
[4] Yeh J-W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. Jom. 2013; 65:1759-71.

[5] Wu X. Chemical short-range orders in high-/medium-entropy alloys. J Mater Sci Technol 2023; 147:189-96.
[6] George EP, Ritchie RO. High-entropy materials. MRS Bull 2022; 47(2):145-50.
[7] Miracle DB, Miller JD, Senkov ON, Woodward C, Uchic MD, Tiley J. Exploration and development of high entropy alloys for structural applications. Entropy. 2014; 16(1):494-525.
[8] Zhang W, Liaw PK, Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. Sci China Mater 2018; 61(1):2-22.
[9] Gao MC, Yeh J-W, Liaw PK, Zhang Y. High-entropy alloys: fundamentals and applications: Springer; 2016.
[10] Zhang Y, Yang X, Liaw P. Alloy design and properties optimization of high-entropy alloys. Jom. 2012; 64:830-8.
[11] Wong K-K, Hsu H-C, Wu S-C, Ho W-F. A review: Design from beta titanium alloys to medium-entropy alloys for biomedical applications. Materials 2023; 16(21):7046.
[12] Xu X, Li Z, Lai W, Wang B, Xu Q, Zhang Z, et al. Improved wear and corrosion resistance of biomedical TiZrNbTaMo medium-entropy alloy by thermal oxidation treatment. Tribol Int 2023; 189:108897.
[13] Zhu D, Li X, Chai S, Chee T-S, Kim C, Li L, et al. Evaluation of wear, corrosion, and biocompatibility of a novel biomedical TiZr-based medium entropy alloy. J Mech Behav Biomed Mater 2025:106951.
[14] Miracle DB, Senkov ON. A critical review of high entropy alloys and related concepts. Acta Mater 2017; 122:448-511.
[15] Ye Y, Wang Q, Lu J, Liu C, Yang Y. High-entropy alloy: challenges and prospects. Mater Today 2016; 19(6):349-62.
[16] Zhang LS, Ma GL, Fu LC, Tian JY. Recent progress in high-entropy alloys. Adv Mater Res. 2013; 631:227-32.
[17] Zhou H, Mao J, Jiang H, Zhang H, Wei W, Qin S, et al. Effect of rare-earth element Y addition on microstructure and mechanical properties of CrFeNi2 medium entropy alloy. Intermetallics. 2023; 163:108079.
[18] Lin S, Lai W, Vogel F, Tong X, You D, Li W, et al. Mechanical and corrosion properties of biomedical (TiZr) 90-xNbxTa5Mo5 medium entropy alloys. Int J Refract Met Hard Mater 2023; 116:106361.
[19] Odetola PI, Babalola BJ, Afolabi AE, Anamu US, Olorundaisi E, Umba MC, et al. Exploring high entropy alloys: A review on thermodynamic design and computational modeling strategies for advanced materials applications. Heliyon. 2024.
[20] Bu QZ, Zhang JX, Zhang HR, Li R, Zhang T, Liu L, et al. Separating the Role of Mixing-Entropy on the Dynamics of Glass-Forming Liquids. Adv Sci 2025:2502568.
[21] Jien-Wei Y. Recent progress in high entropy alloys. Ann. Chim. Sci. Mat. 2006; 31(6):633-48.
[22] Senkov O, Miller J, Miracle D, Woodward C. Accelerated exploration of multi-principal element alloys for structural applications. Calphad. 2015; 50:32-48.
[23] MacDonald B, Fu Z, Zheng B, Chen W, Lin Y, Chen F, et al. Recent progress in high entropy alloy research. Jom 2017; 69:2024-31.
[24] Zhang Y, Zuo TT, Tang Z, Gao MC, Dahmen KA, Liaw PK, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys. Prog Mater Sci 2014; 61:1-93.
[25] Hsu W-L, Tsai C-W, Yeh A-C, Yeh J-W. Clarifying the four core effects of high-entropy materials. Nat Rev Chem 2024:1-15.
[26] Murty BS, Yeh J-W, Ranganathan S, Bhattacharjee PP. High-entropy alloys: Elsevier; 2019.
[27] Li W, Xie D, Li D, Zhang Y, Gao Y, Liaw PK. Mechanical behavior of high-entropy alloys. Prog Mater Sci 2021; 118:100777.
[28] Yeh JW, Chen YL, Lin SJ, Chen SK, editors. High-entropy alloys–a new era of exploitation. Mater Sci Forum; 2007: Trans Tech Publ.
[29] Yang Y-C, Liu C, Lin C-Y, Xia Z. Core effect of local atomic configuration and design principles in AlxCoCrFeNi high-entropy alloys. Scr Mater 2020; 178:181-6.
[30] X. Chang MZ, K. Liu, L. Fu. Phase engineering of high-entropy alloys. Adv. Mater. 2020; 32(14):1907226.
[31] Kozak R, Sologubenko A, Steurer W. Single-phase high-entropy alloys–an overview. Z Kristallogr Cryst Mater 2015; 230(1):55-68.
[32] Shuai C, Xie J, Jiang X, Peng S, Wang C. Additively manufactured high entropy alloy with high wear resistance for biomedical implant. Vacuum. 2024; 221:112939.
[33] Xu D, Wang M, Li T, Wei X, Lu Y. A critical review of the mechanical properties of CoCrNi-based medium-entropy alloys. Microstructures. 2022; 2(1):N/A-N/A.
[34] Alshataif YA, Sivasankaran S, Al-Mufadi FA, Alaboodi AS, Ammar HR. Manufacturing methods, microstructural and mechanical properties evolutions of high-entropy alloys: a review. Met. Mater. Int. 2020; 26:1099-133.
[35] Kumari P, Gupta AK, Mishra RK, Ahmad M, Shahi RR. A comprehensive review: recent progress on magnetic high entropy alloys and oxides. J Magn Magn Mater 2022; 554:169142.
[36] Leyens C, Peters M. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications: Wiley Online Library; 2006.
[37] Veiga C, Davim JP, Loureiro A. Properties and applications of titanium alloys: a brief review. Rev Adv Mater Sci 2012; 32(2):133-48.
[38] Zhang LC, Chen LY. A review on biomedical titanium alloys: recent progress and prospect. Adv Eng Mater 2019; 21(4):1801215.
[39] Bandyopadhyay A, Mitra I, Goodman SB, Kumar M, Bose S. Improving biocompatibility for next generation of metallic implants. Prog Mater Sci 2023; 133:101053.
[40] Khan FS, Khalid M, Ali AH, Bazighifan O, Ghanim F. Results Eng.
[41] Ahmady AR, Ekhlasi A, Nouri A, Nazarpak MH, Gong P, Solouk A. High entropy alloy coatings for biomedical applications: A review. Smart Mater Manuf 2023; 1:100009.

[42] Castro D, Jaeger P, Baptista AC, Oliveira JP. An overview of high-entropy alloys as biomaterials. Metals. 2021; 11(4):648.
[43] Shi Z, Fang Q, Liaw PK, Li J. Corrosion-Resistant Biomedical High-Entropy Alloys: A Review Adv Eng Mater 2023; 25(22):2300968.
[44] San S, Adhikari P, Sakidja R, Brechtl J, Liaw PK, Ching W-Y. Porosity modeling in a TiNbTaZrMo high-entropy alloy for biomedical applications. RSC Adv 2023; 13(51):36468-76.
[45] Bololoi AE, Geambazu LE, Antoniac IV, Bololoi RV, Manea CA, Cojocaru VD, et al. Solid-State Processing of CoCrMoNbTi High-Entropy Alloy for Biomedical Applications. Materials. 2023; 16(19):6520.
[46] Say Y. Synthesis and characterization of TiNbZrMo medium-entropy bio-composites: Microstructure, mechanical properties, and in vitro degradation. J Biomed Mater Res B Appl Biomater 2024; 112(6):e35415.
[47] de Oliveira TG, Fagundes DV, Capellato P, Sachs D, da Silva AAAP. A review of biomaterials based on high-entropy alloys. Metals 2022; 12(11):1940.
[48] Gokcekaya O, Ishimoto T, Nishikawa Y, Kim YS, Matsugaki A, Ozasa R, et al. Novel single crystalline-like non-equiatomic TiZrHfNbTaMo bio-high entropy alloy (BioHEA) developed by laser powder bed fusion. Mater Res Lett 2023; 11(4):274-80.
[49] Feng J, Tang Y, Liu J, Zhang P, Liu C, Wang L. Bio-high entropy alloys: Progress, challenges, and opportunities. Front Bioeng Biotechnol 2022; 10:977282.
[50] Li C, Ma Y, Yang X, Hou M. New TiTaNbZrMo high-entropy alloys for metallic biomaterials. Mater Res Express 2021; 8(10):105403.
[51] Xiang T, Du P, Bao W, Cai Z, Li K, Xie G. Bimodal grain size structure design to optimize the mechanical properties of TiZrNbTa high entropy alloys/Ti composites. Mater Sci Eng A 2022; 849:143488.
[52] Zhu D, Hu S, Fu Y, Zhao N, Liu D. A review of preparation methods, friction and wear, corrosion, and biocompatibility of biomedical high-entropy alloys. J Mater Sci 2024; 59(4):1153-83.
[53] Yang W, Pang S, Liu Y, Wang Q, Liaw PK, Zhang T. Design and properties of novel Ti–Zr–Hf–Nb–Ta high-entropy alloys for biomedical applications. Intermetallics. 2022; 141:107421.
[54] Yang W, Liu Y, Pang S, Liaw PK, Zhang T. Bio-corrosion behavior and in vitro biocompatibility of equimolar TiZrHfNbTa high-entropy alloy. Intermetallics. 2020; 124:106845.
[55] Zhao X, Huang H, Su Y, Qiao L, Yan Y. Exploring high corrosion-resistant refractory high-entropy alloy via a combined experimental and simulation study. npj Mater Degrad 2024; 8(1):77.
[56] Rajabi M, Dehghani K, Shahmir H. Development of a novel Ti35Nb25Zr15Mo15V10 high-entropy alloy for metallic biomaterials. Phys B Condens Matter 2024:416283.
[57] Li Z, Lai W, Tong X, You D, Li W, Wang X. Design of TiZrNbTa multi-principal element alloys with outstanding mechanical properties and wear resistance. Mater Sci Eng A 2022; 845:143203.
[58] Mustafi L, Nguyen VT, Song T, Deng Q, Murdoch BJ, Chen X-B, et al. A strong and ductile biocompatible Ti40Zr25Nb25Ta5Mo5 high entropy alloy. J Mater Res Technol 2024; 30:7885-95.
[59] Wang W, Yang K, Wang Q, Dai P, Fang H, Wu F, et al. Novel Ti-Zr-Hf-Nb-Fe refractory high-entropy alloys for potential biomedical applications. J Alloys Compd 2022; 906:164383.
[60] Hu S, Li T, Su Z, Meng S, Jia Z, Liu D. A novel TiZrNb medium entropy alloy (MEA) with appropriate elastic modulus for biocompatible materials. Mater Sci Eng B 2021; 270:115226.
[61] Martin P, Madrid-Cortes CE, Cáceres C, Araya N, Aguilar C, Cabrera JM. HEAPS: A user-friendly tool for the design and exploration of high-entropy alloys based on semi-empirical parameters. Comput Phys Commun 2022; 278:108398.
[62] Blázquez JS, Manchón-Gordón AF, Vidal-Crespo A, Caballero-Flores R, Ipus JJ, Conde CF. Revisiting Stability Criteria in Ball-Milled High-Entropy Alloys: Do Hume–Rothery and Thermodynamic Rules Equally Apply? Adv Eng Mater 2024:2401148.
[63] Kokubo T, Takadama H. How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity? Biomaterials. 2006; 27(15):2907-15.
[64] Liu G-L, Wang W, Ma W, Guo S, Shen B-G, Liu H-X. A novel Nb–TiNb nanocomposite with single-phase BCC structure for bio-implant applications. Rare Met 2024:1-8.
[65] Guo Y, Yang F, Lu B, Qiu H, Zhu J, Wang D, et al. Competitive relationship between the FCC+ BCC dual phases in the wear mechanism of laser cladding FeCoCrNiAl0. 5Ti0. 5 HEAs coating. Surf Coat Technol 2024; 493:131315.
[66] Panda J, Arya P, Guruvidyathri K, Ravikirana, Murty B. Studies on kinetics of BCC to FCC phase transformation in AlCoCrFeNi equiatomic high entropy alloy. Metall Mater Trans A 2021; 52:1679-88.
[67] Torrento JE, Sousa TdSPd, Cristino da Cruz N, Santos de Almeida G, Zambuzzi WF, Grandini CR, et al. Development of non-equiatomic Bio-HEAs based on TiZrNbTa-(Mo and Mn). APL Mater 2022; 10(8).
[68] Lai C-Y, Chen Y-I. Structural, mechanical, and anticorrosive properties of (TiZrNbTa) Nx films. J Mater Res Technol 2023; 26:8327-36.
[69] Lushnikov S, Filippova T, Mitrokhin S. Hydride Phases Based on TiZrNbTa (Mo1–xVx)(0< x< 1) High-Entropy Alloys. Inorg Mater 2024; 60(11):1337-43.
[70] Zhang S, Chen L, Stepanov A, Lapteva O, Kholodnaya G, Yu X, et al., editors. Irradiation effect of intense pulsed ion beam on (TiZrNbTaCr) C. Proc. 8th Int. Congr. Energy Fluxes Radiat. Eff. 2022.
[71] Su W, Chen L, Huo S, Zhang W, Wang Y, Zhou Y. Fracture mode transition from intergranular to transgranular in (TiZrNbTaCr) C: the grain boundary purification effect of Cr carbide. J Eur Ceram Soc 2024; 44(4):1881-9.
[72] Su W, Chen L, Zhang W, Huo S, Wang Y, Zhou Y. Insights into grain boundary segregation and solubility limit of Cr in (TiZrNbTaCr) C. J Mater Sci Technol 2023; 139:1-9.

[73] Yi J, Yang L, Wang L, Xu M. Lightweight, Refractory High-Entropy Alloy, CrNbTa 0.25 TiZr, with High Yield Strength. Met Mater Int 2022:1-8.
[74] Inoue A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys. Acta Mater. 2000; 48(1):279-306.
[75] Senkov O, Woodward C. Microstructure and properties of a refractory NbCrMo0. 5Ta0. 5TiZr alloy. Mater Sci Eng A 2011; 529:311-20.
[76] Rabiei M, Palevicius A, Monshi A, Nasiri S, Vilkauskas A, Janusas G. Comparing methods for calculating nano crystal size of natural hydroxyapatite using X-ray diffraction. Nanomaterials. 2020; 10(9):1627.
[77] Figueroa-Rosales EX, Martínez-Juárez J, García-Díaz E, Hernández-Cruz D, Sabinas-Hernández SA, Robles-Águila MJ. Photoluminescent properties of hydroxyapatite and hydroxyapatite/multi-walled carbon nanotube composites. Crystals. 2021; 11(7):832.
[78] Serhiienko A, Dontsova T, Yanushevska O, Lapinskyi A, Krymets G. Synthesis and characterization of hydroxyapatite and composite based on it with collagen/alginate. Chem Pap 2021:1-8.
[79] Par M, Gubler A, Attin T, Tarle Z, Tarle A, Tauböck TT. Ion release and hydroxyapatite precipitation of resin composites functionalized with two types of bioactive glass. J Dent 2022; 118:103950.
[80] Temiz A, Alshemary AZ, Akar N, Yaşar M. Rapid casting of biodegradable porous magnesium scaffolds and electrophoretic deposition of 45S5 bioactive glass nanoparticles coatings on porous scaffolds: characterization and in vitro bioactivity analysis. Int J Met Cast 2023; 17(3):1871-82.
[81] Mahato A, De M, Bhattacharjee P, Kumar V, Mukherjee P, Singh G, et al. Role of calcium phosphate and bioactive glass coating on in vivo bone healing of new Mg–Zn–Ca implant. J Mater Sci Mater Med 2021; 32(5):55.
[82] Sfikas AK, Lekatou AG, Emmanouilidou S, Tsirka K. Corrosion Behavior of As-Cast and Heat-Treated Al–Co Alloys in 3.5 wt% NaCl. Mater 2024; 17(3):655.
[83] Guo W, Li J, Qi M, Xu Y, Ezatpour HR. Effects of heat treatment on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of AlCoCrFeNiTi0. 5 high-entropy alloy. J Alloys Compd 2021; 884:161026.
[84] Huaizhi Q, Minglong G, Dongdong Z, Wenda S, Fengfang L, Jing B, et al. Effect of heat treatment time on the microstructure and properties of FeCoNiCuTi high-entropy alloy. J Mater Res Technol 2023; 24:4510-6.
[85] Liang H, Hou J, Jiang L, Qi Z, Zhang M, Cao Z. The Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Al0. 6CoFeNi2V0. 5 High Entropy Alloy Coatings 2024; 14(6):658.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 699-709, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1668498

Anomaly Detection in Unmanned Aerial Vehicle Telemetry Using Automated Machine Learning

Anıl SEZGİN[1*], Rasim KESKİN[2], Aytuğ BOYACI[3]
[1] Research and Development, Siemens A.S., Istanbul, Türkiye
[2] Marmara Teknokent A.S., Kocaeli, Türkiye
[3] Department of Computer Engineering, National Defence University, Air Force Academy, Istanbul, Türkiye
[*1] anil.sezgin@siemens.com, [2] rkeskin@marmarateknokent.com.tr, [3] aytug.boyaci@msu.edu.tr

(Geliş/Received: 31/03/2025; Kabul/Accepted: 15/07/2025)

Abstract: Reliable analysis of UAV telemetry data is critical for mission safety, especially as drones are increasingly deployed in complex and high-risk environments. These data streams often include anomalies arising from sensor faults, environmental disruptions, or cyber-physical attacks, making robust anomaly detection essential. This study introduces an unsupervised anomaly detection framework designed specifically for high-frequency UAV telemetry. It combines domain-driven feature engineering with an AutoML-based optimization pipeline that enables automated model selection and hyperparameter tuning. The framework integrates four unsupervised algorithms—Local Outlier Factor, Isolation Forest, One-Class SVM, and Elliptic Envelope—ensuring adaptability to the dynamic nature of UAV operations. Evaluated on a real-world dataset of 127,000 samples from 48 UAV missions, the system uses expert-labeled anomaly segments solely for validation to preserve the integrity of unsupervised learning. Among all methods, Local Outlier Factor yielded the best results with 0.920 accuracy, 0.880 precision, 0.850 recall, and 0.860 F1-score. Scalable and low-latency, the proposed solution is well-suited for real-time deployment. By bridging theoretical advances with operational needs, this work contributes to safer and more resilient aerial robotic systems.

Key words: Anomaly detection, unmanned aerial vehicles, automated machine learning.

İnsansız Hava Aracı Telemetrisinde Otomatik Makine Öğrenmesi Tabanlı Anomali Tespiti

Öz: İnsansız Hava Araçlarının (İHA) telemetri verilerinin güvenilir şekilde analiz edilmesi, özellikle karmaşık ve riskli ortamlarda görev başarısı ve operasyonel güvenlik açısından kritik öneme sahiptir. Bu veri akışları, sensör arızaları, çevresel etkenler veya siber-fiziksel saldırılar nedeniyle anormallikler içerebilir. Bu nedenle, sağlam bir anomali tespit mekanizması gereklidir. Bu çalışma, yüksek frekanslı İHA telemetrisi için özel olarak tasarlanmış, gözetimsiz bir anomali tespit çerçevesi sunmaktadır. Yaklaşım, alan bilgisine dayalı özellik mühendisliğini, model seçimi ve hiperparametre ayarlarını otomatikleştiren bir AutoML tabanlı optimizasyon süreciyle birleştirir. Sistem; Local Outlier Factor, Isolation Forest, One-Class SVM ve Elliptic Envelope olmak üzere dört farklı gözetimsiz algoritmayı entegre ederek, İHA operasyonlarının dinamik doğasına uyum sağlar. 48 farklı İHA görevinden toplanan 127.000 örnek içeren gerçek dünya veri kümesi üzerinde yapılan değerlendirmelerde, uzmanlar tarafından etiketlenmiş anomali segmentleri yalnızca doğrulama amacıyla kullanılmıştır. En iyi performans, %92 doğruluk, %88 kesinlik, %85 duyarlılık ve %86 F1-skoru ile Local Outlier Factor algoritması tarafından elde edilmiştir. Gerçek zamanlı uygulamalar için ölçeklenebilir ve düşük gecikmeli olarak tasarlanan bu sistem, İHA'larda otomatik arıza izleme ve güvenli, dayanıklı hava araçları ekosistemlerinin gelişimine önemli katkılar sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Anomali tespiti, insansız hava araçları, otomatik makine öğrenmesi.

1. Introduction

The Unmanned Aerial Vehicles or drones have revolutionized industries ranging from logistics and agriculture to disaster management and defense. With these autonomous systems becoming integrated into the contemporary infrastructure, their networked operation through the Internet of Drones (IoD) has been a revolutionary paradigm. IoD platforms provide real-time communication, coordination, and data exchange between drone fleets to support high-end applications like aerial surveillance, package delivery, and environmental monitoring. Yet, the use of telemetry data—continuous feeds of sensor readings, position reports, and system status messages—presents significant challenges to the provision of operational reliability and security. Anomalies in IoD telemetry data, regardless of whether they are sensor fault-induced, cyberattack-induced, or interference-

[*] Sorumlu yazar: anil.sezgin@siemens.com. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-5754-1380, [2] 0000-0003-4889-2995, [3] 0000-0003-1016-3439

induced, present critical risks to mission failure, safety risks, and economic losses. Classical anomaly detection techniques, which are conventionally recommended for static or low-dimensional data sets, cannot handle the dynamic and high-dimensional characteristics of IoD telemetry and require new techniques with specific application to this field.

UAVs have evolved from niche military equipment to pervasive instruments in the commercial and civilian spheres. Their capability to venture into hostile or unreachable territories, along with developments in autonomy and connectivity, has unlocked uses in precision agriculture, search-and-rescue missions, and urban air mobility. The IoD environment, which networks drones via cloud servers and edge computing nodes, continues to augment their capabilities by facilitating fleet-level control, real-time analytics, and remote command issuance.

Central to IoD operations is telemetry data, a multivariate time-series stream capturing metrics such as:

- Positional Data: Latitude, longitude, altitude, and GPS fix status.
- Kinematic Parameters: Groundspeed, airspeed, climb rate, and orientation (roll, pitch, yaw).
- System Health: Battery voltage, current, energy consumption, and vibration levels.
- Mission-Specific Metrics: Distance to target, waypoint progression.

These parameters must be monitored for flight stability, hardware malfunction, and cyber-physical attack. For example, abrupt voltage fluctuation of the battery indicates faulty power system, and erratic GPS coordinates signal spoofing attacks. Yet, high volume, high velocity, and heterogeneity of telemetry data prevent anomaly detection, especially in real-time analysis-intensive applications.

There are four key challenges in anomaly detection from IoD telemetry data:

1. Temporal Dependencies and High-Dimensionality: Telemetry streams comprise dozens of physically related variables sampled at high rates. For example, a drone's velocity (groundspeed, airspeed) and attitude (roll, pitch, yaw) are physically coupled, and models must discover spatiotemporal correlations rather than isolated features.
2. Unpredictable Operating Environments: UAVs fly in unpredictable environments in which wind gusts, electromagnetic interference, and shifting payloads cause temporary deviations from normal behavior that are indistinguishable from true anomalies.
3. Class Imbalance and Label Scarcity: Anomalies are infrequent occurrences in telemetry data, which results in class-imbalanced datasets. Moreover, labeling anomalies is expensive and usually impossible in real-world deployment.
4. Real-Time Processing Constraints: IoD systems require low-latency anomaly detection to facilitate real-time corrective measures, e.g., rerouting drones or emergency landings.

Classic thresholding approaches and supervised learning break down in these cases. Thresholds are too inflexible to capture variations in context, and supervised models need enormous sets of labeled data that are almost never available. Unsupervised and semi-supervised methods, which learn "normal" patterns from unlabeled data, are an attractive solution but demand careful model and parameter selection—a step still manually and tediously performed.

The incorporation of AutoML in IoD anomaly detection removes the constraints of human model selection and hyperparameter tuning. AutoML simplifies the machine learning pipeline by automating feature engineering, algorithm selection, and hyperparameter tuning required to handle the dynamic and heterogeneous nature of telemetry data. The AutoML process was realized through a custom optimization routine using standard parameter search and tuning strategies, rather than a commercial AutoML platform. In IoD environments, where telemetry feature sets differ greatly across missions and operating conditions, AutoML facilitates adaptive anomaly detection systems that can self-optimize independently. AutoML platforms can assess such trade-offs in real time, choosing the best-performing algorithm based on runtime performance metrics.

This work contributes to the state of the art in methodological innovations specific to IoD anomaly detection. Informing this work is a formalized framework for systematic benchmarking of unsupervised algorithms along UAV-specific operational dimensions like latency, noise robustness, and responsiveness to dynamic environments. This framework provides algorithmic evaluation standardization for real-world IoD deployments. Building on this, we introduce an automated pipeline that streamlines anomaly detection workflows using advanced optimization techniques, tailoring model configurations to telemetry properties on the fly. This automation reduces the reliance on hand-tuning while also making access more democratized for non-machine learning-expert operators. Furthermore, empirical insights are codified into actionable guidelines mapping anomaly types (e.g., sensor failures, communication hijacks) to algorithmic strengths, which simplifies prioritization for practitioners based on mission-critical needs. Together, these contributions close gaps between theoretical developments and practical needs of IoD ecosystems. They enable scalable solutions for autonomous drone networks. Unlike previous approaches, our framework combines AutoML-driven model optimization with expert-validated unsupervised

anomaly detection tailored to the complex, high-frequency nature of UAV telemetry data, ensuring both adaptability and interpretability.

This paper offers the following key contributions:

- A fully unsupervised anomaly detection framework for UAV telemetry, integrating AutoML-based hyperparameter optimization with domain-specific feature engineering.
- A comprehensive benchmarking of four unsupervised models (LOF, Isolation Forest, One-Class SVM, Elliptic Envelope) on a real-world UAV telemetry dataset comprising 127,000 records from 48 missions.
- A validated, real-time ready anomaly detection pipeline, optimized for deployment in resource-constrained aerial platforms with interpretability and scalability in mind.

As UAVs become mainstream technologies, their safe integration into airspace systems is of the highest priority. Our framework addresses this requirement by eliminating the necessity of manual tuning and adapting to evolving telemetry patterns, enabling operators to focus on mission completion. By enhancing resilience to both hardware failure and cyber attacks, this research paves the way for safer, more reliable autonomous systems in an increasingly connected aerial ecosystem.

The remainder of this paper is structured to guide the reader through the research methodology, experimental results, and practical insights. Section 2 reviews related work in UAV anomaly detection, AutoML, and IoT security, contextualizing our contributions within existing literature. Section 3 details the IoD telemetry dataset, preprocessing techniques, and the architecture of the proposed approach. Section 4 presents empirical evaluations of the four anomaly detection algorithms, comparing their performance. Section 5 discusses the implications of our findings, addressing limitations and trade-offs in real-world deployments. Finally, Section 6 concludes with a summary of key contributions and future research directions, including the integration of federated learning for privacy-preserving swarm analytics and edge-AI optimizations for low-latency processing.

2. Related Work

The domain of anomaly detection has witnessed significant advancements across IoT, industrial systems, and unmanned aerial systems, driven by innovations in machine learning, sensor fusion, and decentralized architectures. This section organizes recent research into thematic categories, emphasizing methodologies, challenges, and contributions to handling multivariate time-series data, privacy preservation, and real-time processing.

2.1. Anomaly detection in IoT and industrial systems

IoT and industrial applications demand robust frameworks to manage multivariate sensor data, class imbalance, and dynamic operational environments. Study [1] addresses sensor interdependencies by clustering correlated sensor streams, offering scalability for high-dimensional IoT environments. Complementing this, [2] tackles class imbalance through XGBoost-based feature selection and optimized LSTM loss functions, achieving an AUC-ROC of 0.984. The integration of network and sensor data is explored in [3], where autoencoders and LSTMs enhance detection robustness against stealthy attacks in industrial control systems. [4] further validates the benefits of multi-source data fusion, combining network traffic, sensor readings, and hardware status to achieve 85.41% accuracy in anomaly classification. Challenges in additive manufacturing are addressed by [5], which employs zero-bias deep neural networks (ZBDNN) to detect defects like voids and resin-rich areas with 99.71% accuracy, while [6] leverages GANs to balance datasets and improve defect detection reliability. Automated model selection is tackled in [7], which uses meta-learning to dynamically choose optimal algorithms based on manufacturing data characteristics, reducing dependency on domain expertise. Building on this, the AID4I framework [8] leverages automated machine learning to perform end-to-end intrusion detection in IIoT networks, combining preprocessing, hybrid SHAP-genetic feature selection, and hyperparameter tuning across 14 classifiers. It achieves up to 99.87% accuracy while significantly reducing model development time and manual effort. Study [9] extends these principles to smart transportation, integrating Bayesian change point detection and forecasting to secure connected vehicles with 53.83% higher accuracy than traditional methods.

2.2. UAV-specific anomaly detection techniques

Unmanned Aerial Vehicles demand customized solutions owing to their dependency on multi-sensor infrastructures, dynamic flight environments, and exposure to cyber-physical attacks. Federated learning and multi-modal denoising are employed in research [10] for privacy-preserving anomaly detection in UAV swarms

with 99.01% detection accuracy. [11] secures swarms via Merkle tree-based attestation and Byzantine consensus, which allows decentralized containment of anomalies without exposing data. Sensor fusion is the focus of [12], combining GPS, accelerometer, and gyroscope data to achieve quasi-perfect accuracy (AUC = 1.00). Spatiotemporal correlations are leveraged in [13], where an STC-LSTM-AE model recovers actual flight data with 98.75% accuracy. Hardware-specific challenges are overcome in [14], where wavelet scattering is combined with LSTM autoencoders for detecting propeller failures up to 130 seconds in advance of failure. [15] trains semi-supervised 1D convolutional models on normal flight data to detect signal noise and transient failures, whereas [16] employs Large Language Models (LLMs) with retrieval-augmented generation (RAG) to facilitate contextualized decision-making for UAV missions. Study [17] explores AI-driven fuzzing techniques to uncover vulnerabilities in UAV firmware and protocols, highlighting gaps in proprietary drone security testing. Complementing these efforts, study [18] presents a comprehensive analysis of privacy and security challenges in the Internet of Drones, identifying GPS spoofing, data injection, and command tampering as key threats. The study reviews mitigation strategies such as blockchain-based authentication, lightweight IDS, and cryptographic communication frameworks tailored for UAV networks.

2.3. Addressing data scarcity and concept drift

Anomaly detection in evolving systems must overcome challenges like limited labeled data and dynamic environments. Study [19] addresses data scarcity by aligning simulated and real UAV data via dynamic time warping (DTW), enabling effective knowledge transfer with LSTM-AM models. [20] employs memory-augmented autoencoders (MemAE) to store prototypical flight patterns, achieving AUC scores up to 0.9988 with minimal training data. Online learning is explored in [21], which combines ARF-ADWIN and KNN-ADWIN models with PSO optimization to adapt to IoT data streams in real time. [22] tackles sensor degradation through meta-learning and ensemble strategies, improving F1-scores by 16% in industrial systems. [23] introduces VMD-LSTM hybrids to filter periodic patterns in server telemetry, minimizing false alarms through automatic hyperparameter tuning.

2.4. Privacy-preserving and lightweight detection frameworks

Resource constraints and privacy concerns in distributed systems necessitate efficient and secure anomaly detection methods. [24] combines semi-supervised learning with Mamdani fuzzy inference systems (FIS) to reduce data transmission overhead, achieving 99.70% accuracy in WSNs. [25] deploys a lightweight multi-classification model on UAV firmware, requiring only 48 KB of storage while achieving 89.38% accuracy. Study [26] introduces a Node Performance Score (NPS) for cluster head selection, improving network stability by 258% compared to traditional protocols.

3. Methodology

Although this study employs unsupervised learning techniques for anomaly detection, it strategically integrates domain expertise to enrich the data labeling process for subsequent evaluation. In the early stages of dataset preparation, experienced drone operators and flight engineers meticulously reviewed the telemetry data, identifying and annotating segments that exhibited known or suspected anomalous behavior based on operational context and empirical understanding. These annotations were incorporated into the dataset as labeled anomalies; however, to uphold the unsupervised nature of the detection approach, they were strictly excluded from the training phase of the models. This ensured that the models learned to characterize normal flight behavior independently, without being influenced by predefined notions of anomalies.

The telemetry dataset utilized in this research consists of 48 separate flight sessions, each of which corresponds to an individual UAV mission under different operational and environmental conditions. Throughout the sessions, overall telemetry records of around 127,000 were gathered, covering parameters like GPS location, orientation (roll, pitch, yaw), battery level, and velocity metrics. Among the full dataset, anomalous segments account for roughly 7.5% of the samples, as identified through expert annotation. These anomalies include sensor malfunctions (e.g., GPS dropout, abrupt voltage fluctuations), flight instability (e.g., sudden roll angle changes), and potential cyber-physical interferences (e.g., command spoofing or inconsistent data spikes). The remaining 92.5% of the data reflects stable and expected UAV operation, providing a rich foundation for unsupervised learning. This distribution captures the real-world scarcity of anomalies, highlighting the inherent detection challenges while providing realistic test conditions. By clearly defining the number of flight sessions, anomaly

ratio, and deviation nature, this study seeks to enhance transparency, reproducibility, and contextual insight for follow-on researchers expanding on this dataset.

The anomaly data with labels was only consulted in the evaluation step, where we used it to calculate the performance of the anomaly detection models. We could compare the models' anomaly predictions and the ground truth labels that the experts saw for calculating strong supervised metrics like precision, recall, F1-score, and accuracy. This mixed approach—unsupervised model training with supervised validation—is a pragmatic trade-off that leverages the best of both paradigms. It enables learning unbiased from normal data and still permits strict, quantifiable validation against expert judgment. The use of labeled anomalies in validation improves not just the interpretability of results, but renders the outputs of the models meaningful in the context of real-world expectations and domain-specific implications. This kind of paradigm is particularly worthwhile in safety-critical contexts like drone surveillance, where it is as important to identify small deviations as to exclude false positives. This article outlines an accurate and structured approach to anomaly detection in drone telemetry data through a fusion of traditional outlier detection techniques and domain-specific feature engineering. As elucidated in Table 1, the procedure starts with the importing of raw telemetry data in the JSON format comprising high-resolution sensor measurements of drones and ground truth labels for anomalies. These datasets usually consist of high-frequency time-series like GPS location, accelerometer, gyroscope, battery voltage, and orientation readings necessary to log operational states and mark abnormal behavior. In preprocessing, we extract all relevant numerical features and anomaly labels, and we cleanse the dataset of noise and inconsistencies. This includes filtering missing values, normalizing timestamps, and synchronizing asynchronous sensor streams. Besides, domain-specific features are crafted to better capture flight dynamics, e.g., velocity magnitude from GPS, roll-pitch-yaw angles transformation, and energy consumption rates over time. Statistical metrics such as moving averages, standard deviations, and z-scores are also calculated to enhance feature richness and highlight subtle deviations in behavior. Following feature construction, an Automated Machine Learning pipeline is employed to efficiently explore and optimize a variety of anomaly detection algorithms and their hyperparameters. This enables the systematic selection of high-performing models tailored to the complex patterns present in drone telemetry data, thereby improving detection accuracy and reducing manual tuning efforts.

Table 1. Algorithm of anomaly detection pipeline for drone telemetry.

1. LOAD flight telemetry data from JSON files containing drone sensor readings and anomaly labels
2. PREPROCESS data:
a. EXTRACT numerical features and anomaly labels
b. ENGINEER domain-specific features
c. CALCULATE statistical indicators
3. SPLIT data into train/validation/test sets
4. OPTIMIZE detection algorithms:
a. Isolation Forest
b. One-Class SVM
c. Local Outlier Factor
d. Elliptic Envelope
5. DETECT anomalies:
a. SCALE features using to handle outliers
b. TRAIN models on normal data
c. GENERATE anomaly scores and binary predictions
6. EVALUATE results:
a. CALCULATE metrics
b. VISUALIZE data
7. SAVE optimized models for deployment

The data is then split into training, validation, and testing sets with temporal integrity to avoid data leakage—the most important consideration when dealing with time-series analysis. The highlight of our solution is the hyperparameter optimization of four anomaly detection algorithms: Isolation Forest, One-Class Support Vector Machine, Local Outlier Factor, and Elliptic Envelope. These four unsupervised models are all specialized in high-dimensional anomaly detection and each makes different assumptions about the distribution of the data. All the features are normalized to a standard range before training the models to counter the effect of extreme values and for algorithmic stability. The models are trained on normal flight data only to learn the baseline behavior, and the models produce anomaly scores when they see the test data. Binary anomaly predictions are obtained by taking suitable thresholds on the scores.

Evaluation of detection performance entails calculation of common classification metrics such as precision, recall, F1-score, accuracy, and confusion bias to evaluate the trade-off between true and false predictions of different anomaly detection models. Such metrics give an in-depth knowledge of the trade-off between sensitivity and specificity that is most important in scenarios where anomalies are rare and false alarms lead to inefficiencies in operations. For visualization, individual metric values for each method are plotted as bar charts to enable quick comparative evaluation. Radar charts provide summary visualization by superimposing all the metrics, showing a bird's-eye view of the model performance summary. Confusion matrices also show in-depth understanding of model performance on normal and anomalous examples by graphically visualizing true positives, false positives, true negatives, and false negatives to help identify patterns of misclassifications. Time-series overlays also aid interpretability by emphasizing anomaly regions along temporal sequences. Both of these assessment methods allow quantitative benchmarking and qualitative diagnostics of model trustworthiness. Finally, the tuned models are serialized and persisted for convenient deployment into real-time drone telemetry monitoring systems.

4. Results and Experiments

4.1. Quantitative evaluation

The performance of the proposed unsupervised anomaly detection framework was systematically evaluated using four distinct algorithms—Local Outlier Factor, Elliptic Envelope, Isolation Forest, and One-Class Support Vector Machine. To provide a robust comparative overview, we compiled two key tables that encapsulate the performance metrics and confusion matrix outcomes across these methods. These metrics allow us to assess not only how well each algorithm detects anomalies, but also how their predictions align with the expert-labeled ground truth.

In Table 2, LOF stands out as the most effective method, achieving the highest accuracy (0.920), precision (0.880), recall (0.850), and F1-score (0.860). This combination reflects a well-balanced detection capability, minimizing both false positives and false negatives. The model's Confusion Bias of 0.080—significantly lower than the others—demonstrates its robustness in maintaining an equitable error rate, meaning it neither over-predicts anomalies nor overlooks true ones. This characteristic is particularly valuable in drone telemetry applications, where both missed anomalies and false alarms can have operational consequences.

By contrast, the Elliptic Envelope method shows moderate performance with balanced but slightly inferior values in all metrics and a higher confusion bias of 0.160, suggesting a tendency to overflag normal operations as anomalous. Meanwhile, Isolation Forest and One-Class SVM both deliver relatively lower F1-scores (0.700 and 0.720, respectively) and higher confusion biases, indicating reduced reliability. This table not only support the numerical evaluation of our models but also acts as a reference point for understanding the trade-offs each algorithm brings to real-world deployment. The consistency of LOF across metrics substantiates its selection as the most suitable candidate for robust and interpretable drone anomaly detection in this study. It is important to note that achieving precision and recall above 85% in unsupervised settings, especially with imbalanced and high-dimensional data, reflects substantial detection capability in practical UAV scenarios.

Table 2. Performance metrics for anomaly detection methods.

Method	Accuracy	Precision	Recall	F1-score	Confusion Bias
Local Outlier Factor	0.920	0.880	0.850	0.860	0.080
Elliptic Envelope	0.780	0.760	0.740	0.750	0.160
Isolation Forest	0.730	0.720	0.680	0.700	0.200
One-Class SVM	0.750	0.730	0.710	0.720	0.180

4.2. Comparative analysis and interpretation

The proposed unsupervised anomaly detector's performance was compared thoroughly with four algorithms—Local Outlier Factor, Elliptic Envelope, Isolation Forest, and One-Class Support Vector Machine (SVM). To measure their performance in detecting anomalous behavior in drone telemetry data, expert-marked segments of anomalies were employed as ground truth, with supervised metrics being utilized only at the time of evaluation. Quantitative performance was also achieved through the use of accuracy, precision, recall, F1-score, and confusion bias as primary performance metrics. As evident from the tabulated results, the best performing was LOF with an F1-score of 0.860, and accuracy, precision, and recall of 0.920, 0.880, and 0.850 respectively. This

enhanced performance is due to the ability of LOF to leverage local density fluctuations, which are common for high-frequency drone telemetry data under unusual maneuvers or signal disturbances.

Elliptic Envelope was succeeded by an F1-score of 0.750, with comparatively balanced performance yet lower sensitivity to anomaly boundaries, as indicated by its confusion bias of 0.160, which was greater. In comparison, Isolation Forest and One-Class SVM were reasonably less effective, with F1-scores of 0.700 and 0.720, respectively. These trends are supported by the confusion matrices, where LOF produced very low false positive and false negative rates, whereas the other models suffered from higher misclassification rates, especially in classifying borderline anomaly cases. Notably, Isolation Forest recorded the highest confusion bias at 0.200, highlighting its tendency to overflag normal samples as anomalies, a critical drawback for real-time applications that demand reliability and low false alarm rates.

To facilitate interpretability and comparative analysis, a series of visualizations were generated and are presented as follows. These visual tools are essential for visually validating the quantitative insights discussed previously and highlighting the distinct behavioral patterns of each model.

Figure 1 shows the confusion matrix of the Local Outlier Factor method, visually affirming its performance in distinguishing between normal and anomalous instances. The matrix highlights a low number of false positives and false negatives, clearly reflecting LOF's precision and recall balance.

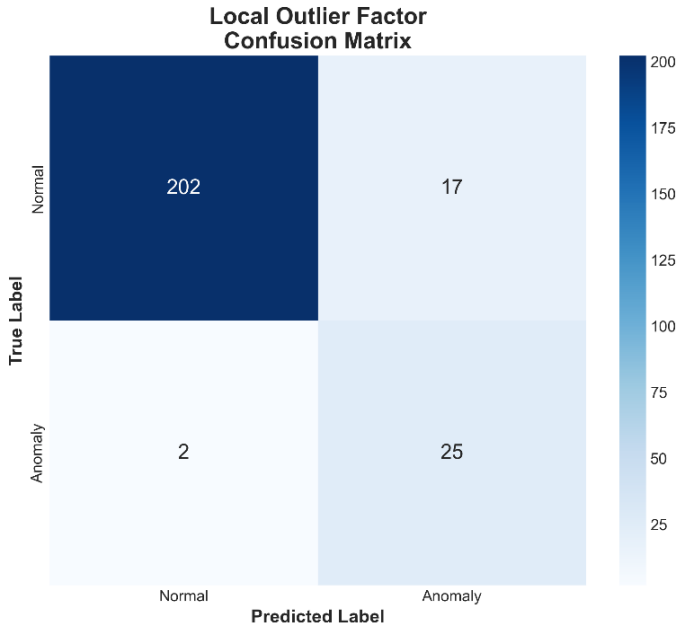


Figure 1. Confusion matrix for Local Outlier Factor.

Following this, Figure 2 presents a grouped bar chart comparing performance metrics—accuracy, precision, recall, and F1-score—across all four methods. This side-by-side layout allows for easy identification of which metric contributes most to a model's overall performance. Notably, the bar chart reinforces LOF's superiority across all metrics.

Finally, Figure 3 illustrates the same evaluation metrics in a radar chart format. This visualization enables quick visual comparison of balance and spread across all metrics. The radar shape for LOF appears the most symmetric and expanded, suggesting a robust and uniformly strong performance profile. In contrast, the other models show noticeable performance drops along at least one metric axis.

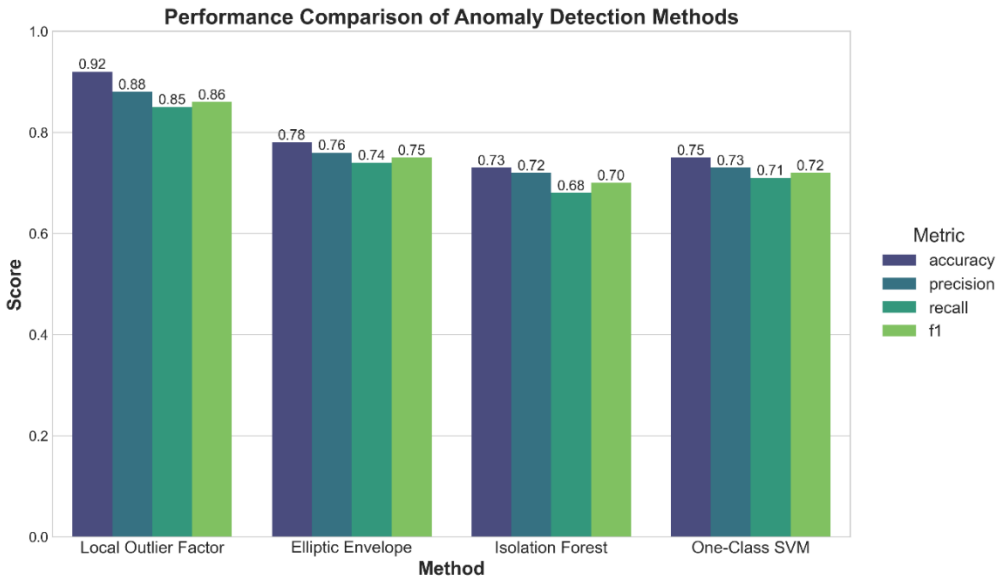


Figure 2. Bar chart of accuracy, precision, recall, and F1-score for all methods.

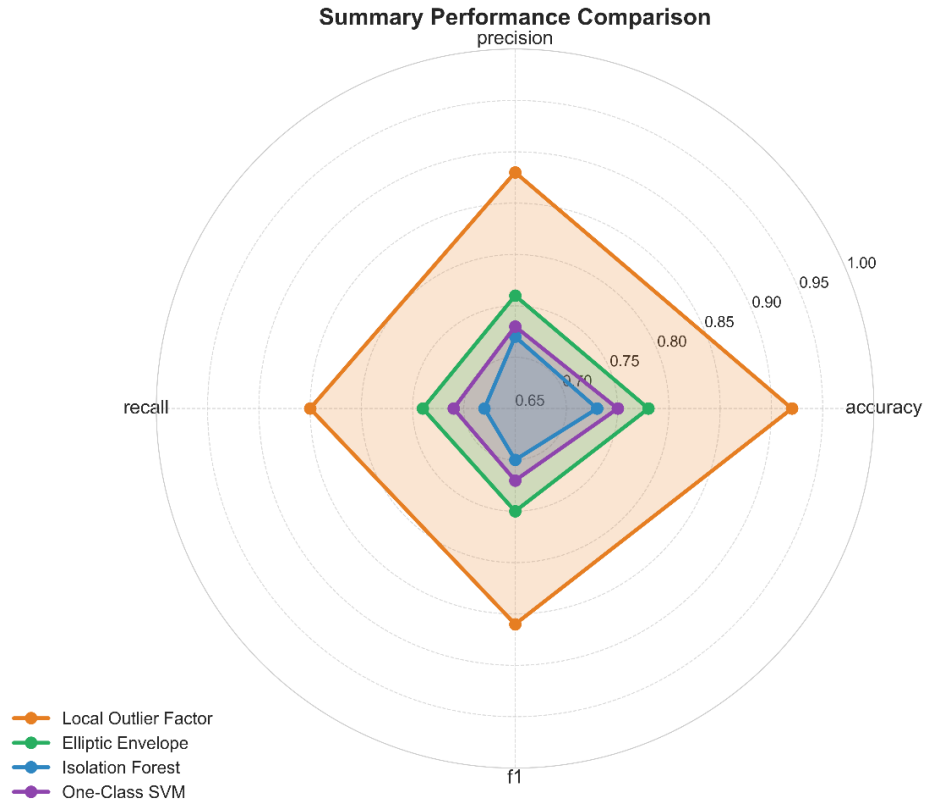


Figure 3. Radar chart comparison of all methods across key metrics.

Beyond metric comparisons, these results underscore the critical importance of aligning algorithmic selection with the specific operational demands and constraints of drone anomaly detection. In practical aerial operations,

false positives can lead to unnecessary mission interruptions, while false negatives risk overlooking critical safety failures. Thus, selecting a model that minimizes both types of errors is crucial. In this context, while Isolation Forest and One-Class SVM are widely regarded for their simplicity and ability to generalize across datasets, our findings reveal that these advantages are offset by their elevated confusion biases and greater rate of false alarms. For applications involving real-time, high-frequency telemetry data, such noise sensitivity may compromise mission integrity, especially when anomaly detection serves as a trigger for automated safety responses or operator alerts.

Elliptic Envelope, which assumes Gaussian distribution across multivariate features, struggles in the face of real-world drone telemetry that exhibits complex, non-Gaussian dynamics. Its performance, while consistent in lab conditions or controlled datasets, is often compromised when deployed in naturalistic flight scenarios with environmental disturbances and sensor irregularities. These shortcomings are particularly evident in its higher confusion bias and decreased recall, reflecting a limited capacity to generalize across irregular data segments. By contrast, the Local Outlier Factor algorithm capitalizes on local density estimation, making it inherently more adaptive to heterogeneous feature patterns and abrupt trajectory changes. This adaptability is especially beneficial in UAV anomaly detection, where anomalies are often localized and context-sensitive, such as a sudden deviation in roll angle or GPS dropout.

Taken together, the experimental findings validate not only the performance hierarchy among these algorithms but also the methodological advantage of employing a hybrid framework—unsupervised learning for training, complemented by supervised evaluation against domain-labeled anomalies. This balanced approach enables models to learn patterns independently while still being held to rigorous assessment standards. The clear and consistent superiority of LOF across all evaluation metrics reinforces its practical utility and sets a strong precedent for its integration into real-time drone health monitoring pipelines. Future directions may include expanding this framework to incorporate ensemble strategies or hybridizing with deep learning-based models that can further enhance anomaly localization and predictive capabilities under complex flight conditions.

5. Conclusion

This study explored a holistic and automated unsupervised machine learning anomaly detection system for Veer UAV telemetry systems through expert-guided validation. With a hybrid approach—unsupervised training coupled with supervised testing—the method ensures that models have flexibility in learning patterns from unlabeled datasets and, at the same time, are exhaustively tested on real expectations. Such balance is crucial in safety-critical drone flights where both false positives and false negatives lead to severe mission-level consequences.

Of the methods tested, the Local Outlier Factor algorithm proved most consistent and strongest under all performance metrics. Its ability to identify outliers in local density is especially suited to the non-linear, context-dependent nature of drone telemetry. Conversely, approaches that presume global distribution patterns, like the Elliptic Envelope and Isolation Forest algorithms, were more susceptible to confusion biases and less sensitive when subjected to adaptive telemetry environments. This performance gap underscores the necessity of adapting anomaly detection techniques to the specific statistical characteristics of UAV data streams.

The value of this research lies beyond mere algorithm selection. It highlights the necessity for feature engineering across domains, maintaining data integrity within time-series subdomains, and exploiting visualization techniques for enhancing model interpretability. By employing AutoML for hyperparameter optimization, the suggested pipeline minimizes manual tuning requirements, thus making it accessible to practitioners lacking deep machine learning expertise. Collectively, these design choices provide a reproducible and scalable pipeline for the integration of anomaly detection within real-world UAV systems.

6. Future Research

Building on the current work, future research is encouraged to investigate the fusion of semi-supervised and self-supervised learning approaches to further enhance the performance of anomaly detection. Semi-supervised approaches, which can leverage limited quantities of labeled data, would increase sensitivity to subtle and context-dependent anomalies. Self-supervised approaches, on the other hand, provide a hopeful path to acquiring generalizable representations from vast volumes of unlabeled telemetry data—enabling more robust anomaly detection for varied UAV types as well as mission profiles.

The other promising direction is the application of deep learning architectures specifically designed for time-series analysis. Recurrent neural networks, LSTM networks, and Transformer-based models are capable of

learning temporal dependencies and long-range correlations in telemetry data efficiently. In conjunction with reconstruction-based models such as variational autoencoders, these techniques may enable the detection of anomalous sequences and system degradation patterns more effectively. Incorporating ensemble learning—combining LOF with neural models—could yield more robust performance across different scenarios.
Real-time deployment also demands attention. For low-latency onboard anomaly detection, models must be edge-computing optimized. This involves pruning, quantization, and architectural reduction to meet the computational constraints of UAV platforms. The inclusion of human-in-the-loop mechanisms, explainable AI, and uncertainty-aware predictions will be required to develop the trust and operational transparency of anomaly notifications. In total, future systems must be developed to operate within overall UAV autonomy systems, communicating with mission planning and control algorithms to facilitate adaptive behavior, e.g., rerouting, emergency landing, or automated diagnostics in the field.

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to Siemens A.S for their valuable support throughout the completion of this study. This work also benefited from the use of the Hypersense platform and its dataset, which were instrumental in the development and evaluation of the proposed system.

References

[1] Idrees R, Maiti A, Garg S. A clustering algorithm for detecting differential deviations in the multivariate time-series IoT data based on sensor relationship. Knowl Inf Syst 2024; 67: 2641-2690.
[2] Chen Z, Li Z, Huang J, Liu S, Long H. An effective method for anomaly detection in industrial Internet of Things using XGBoost and LSTM. Sci Rep 2024; 14: 1-23.
[3] Canonico R, Esposito G, Navarro A, Romano SP, Sperlí G, Vignali A. An anomaly-based approach for cyber-physical threat detection using network and sensor data. Comput Commun 2025; 234: 1-14.
[4] Kuchar K, Fujdiak R. Analyzing anomalies in industrial networks: A data-driven approach to enhance security in manufacturing processes. Comput Secur 2025; 153: 1-15.
[5] Kumar D, Agraharam PC, Liu Y, Namilae S. Anomaly detection for composite manufacturing using AI models. J Intell Manuf 2024; 1-17.
[6] Chung J, Shen B, Kong ZJ. Anomaly detection in additive manufacturing processes using supervised classification with imbalanced sensor data based on generative adversarial network. J Intell Manuf 2024; 35: 2387-2406.
[7] Engbers H, Freitag M. Automated model selection for multivariate anomaly detection in manufacturing systems. J Intell Manuf 2024; 1-19.
[8] Sezgin A, Boyacı A. AID4I: An Intrusion Detection Framework for Industrial Internet of Things Using Automated Machine Learning. Comput Mater Continua 2023; 76(2): 2121-2143.
[9] Singh A, Rathore H. Advancing connected vehicle security through real-time sensor anomaly detection and recovery. Veh Commun 2025; 52: 1-11.
[10] Lu Y, Yang T, Zhao C, Chen W, Zeng R. A swarm anomaly detection model for IoT UAVs based on a multi-modal denoising autoencoder and federated learning. Comput Ind Eng 2024; 196: 1-22.
[11] Li T, Lin W, Ma R, Ma Z, Shen Y, Ma J. CoDetect: Cooperative Anomaly Detection with Privacy Protection Towards UAV Swarm. Sci China Inf Sci 2024; 67: 1-2.
[12] Alzahrani MY. Enhancing Drone Security Through Multi-Sensor Anomaly Detection and Machine Learning. SN Comput Sci 2024; 5: 1-10.
[13] Yang L, Li S, Li C, Zhu C, Zhang A, Liang G. Data-driven unsupervised anomaly detection and recovery of unmanned aerial vehicle flight data based on spatiotemporal correlation. Sci China Technol Sci 2023; 66: 1304-1316.
[14] Ozkat EC. Vibration data-driven anomaly detection in UAVs: A deep learning approach. Eng Sci Technol Int J 2024; 54: 1-11.
[15] Ahn H, Chung S. Deep learning-based anomaly detection for individual drone vehicles performing swarm missions. Expert Syst Appl 2024; 244: 1-14.
[16] Sezgin A. Scenario-Driven Evaluation of Autonomous Agents: Integrating Large Language Model for UAV Mission Reliability. Drones 2025; 9(3): 1-21.
[17] Malviya VK, Minn W, Shar LK, Jiang L. Fuzzing drones for anomaly detection: A systematic literature review. Comput Secur 2025; 148: 1-14.
[18] Sezgin A, Boyacı A. Securing the Skies: Exploring Privacy and Security Challenges in Internet of Drones. In: 10th Int Conf on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST); 2023; Istanbul, Türkiye.

[19] Liu D, Wang N, Guo K, Wang B. Ensemble Transfer Learning Based Cross-Domain UAV Actuator Fault Detection. IEEE Sens J 2023; 23(4): 16363-16372.
[20] Yoo JD, Kim GM, Song MG, Kim HK. MeNU: Memorizing normality for UAV anomaly detection with a few sensor values. Comput Secur 2025; 150: 1-15.
[21] Wu Y, Liu L, Yu Y, Chen G, Hu J. Online ensemble learning-based anomaly detection for IoT systems. Appl Soft Comput 2025; 173: 1-12.
[22] Schaller M, Kruse M, Ortega A, Lindauer M, Rosenhahn B. AutoML for multi-class anomaly compensation of sensor drift. Meas 2025; 250: 1-14.
[23] Vajda DL, Do TV, Bérczes T, Farkas K. Machine learning-based real-time anomaly detection using data pre-processing in the telemetry of server farms. Sci Rep 2024; 14: 1-22.
[24] Abdullah RY, Posonia AM, Nisha UB. An Enhanced Anomaly Forecasting in Distributed Wireless Sensor Network Using Fuzzy Model. Int J Fuzzy Syst 2022; 24: 3327-3347.
[25] Wei X, Xu Y, Zhang H, Sun C, Li X, Huang F, Ma J. Sensor attack online classification for UAVs using machine learning. Comput Secur 2025; 150: 1-18.
[26] Sharma T, Balyan A, Singh AK. Machine Learning-Based Energy Optimization and Anomaly Detection for Heterogeneous Wireless Sensor Network. SN Comput Sci 2024; 5: 1-16.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 711-721, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1674044

Multi-Input CNN Models for Breast Cancer Detection Using BreakHis Database

Adnan KÖŞKER[1], Ümit BUDAK[2*], Musa ÇIBUK[3], Abdulkadir ŞENGÜR[4]

[1,2] Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Bitlis Eren University, Bitlis, Turkey
[3] Computer Engineering, Faculty of Engineering, Bitlis Eren University, Bitlis, Turkey
[4] Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Technology, Fırat University, Elazığ, Turkey
[1] adnankosker@hotmail.com, [*2] ubudak@beu.edu.tr, [3] mcibuk@beu.edu.tr, [4] ksengur@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 11/04/2025; Kabul/Accepted: 10/06/2025)

Abstract: Breast cancer (BC) is one of the diseases that women suffer most, especially in the world. Routine breast checks are vital for both early diagnosis and early treatment of the person concerned. Computer aided diagnosis systems have also come a long way in being a helpful tool for pathologists during diagnosis. In this work, a novel convolutional neural network (CNN) is proposed for the effective diagnosis of BC from histopathological images. Since classical CNNs have only one input, the network is to use only the raw images from the dataset in the training process. This limits the network from using an extra feature as an input. However, the proposed model has two inputs, unlike classical CNN structures. One input of the network uses histopathological raw images and the other input uses deep features of related images. All of the experimental studies were performed on the widely used BreaKHis dataset. For the test of performance, the accuracy criterion was preferred and the 5-fold cross-validation technique was taken into account. Accuracy scores of 99.94%, 98.94%, 99.05%, and 97.30% were obtained in 40×, 100×, 200× and 400× sub-datasets, respectively. While the results obtained were highly effective values for the diagnosis of BC, they were also far superior to other results reported in the literature.

Key words: Multi-input CNN, breast cancer diagnosis, histopathological image, BreaKHis database.

BreakHis Veritabanı Kullanılarak Meme Kanseri Tespiti için Çok Girişli CNN Modelleri

Öz: Meme kanseri (MK), özellikle dünya genelinde kadınların en çok muzdarip olduğu hastalıklardan biridir. Rutin meme kontrolleri, hem erken teşhis hem de ilgili kişinin erken tedavisi açısından hayati öneme sahiptir. Bilgisayar destekli teşhis sistemleri, patoloji uzmanlarına teşhis sırasında yardımcı olan bir araç olma konusunda önemli bir yol kat etmiştir. Bu çalışmada, histopatolojik görüntülerden BC'nin etkili bir şekilde teşhisi için yeni bir evrişimli sinir ağı (CNN) önerilmiştir. Geleneksel CNN'lerin yalnızca bir girişi olduğu için, eğitim sürecinde yalnızca veri kümesindeki ham görüntüler kullanılmaktadır. Bu durum, ağın ek bir özelliği giriş olarak kullanmasını sınırlandırmaktadır. Ancak, önerilen model klasik CNN yapılarından farklı olarak iki girişe sahiptir. Ağın bir girişi histopatolojik ham görüntüleri, diğer girişi ise ilgili görüntülerin derin özelliklerini kullanmaktadır. Tüm deneysel çalışmalar, yaygın olarak kullanılan BreaKHis veri kümesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Performans testi için doğruluk ölçütü tercih edilmiş ve 5 katlı çapraz doğrulama tekniği kullanılmıştır. 40×, 100×, 200× ve 400× alt veri kümelerinde sırasıyla %99,94, %98,94, %99,05 ve %97,30 doğruluk skorları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, MK teşhisi için son derece etkili değerler olmasının yanı sıra, literatürde raporlanan diğer sonuçlara kıyasla çok daha üstün niteliktedir.

Anahtar kelimeler: Çok girişli CNN, meme kanseri teşhisi, histopatolojik görüntü, BreaKHis veritabanı.

1. Introduction

Breast cancer (BC) is one of the most common cancers worldwide, especially among women [1]. Thousands of people pass away each year due to delays in the diagnosis and treatment of breast cancer [2]. Early identification and detection of breast cancer both significantly improve the likelihood of effective therapy and lessen the emotional and physical suffering experienced by patients. There are several non-invasive biomedical imaging methods available for the early identification of breast cancer, including positron emission tomography (PET), ultrasonography, magnetic resonance imaging (MRI), computed tomography (CT), and contrast-enhanced digital mammography (CE) [3]. On the other hand, histological evaluation of the tissue's microscopic structure is provided via breast biopsies. Microscopic structure of tissue obtained from breast biopsies is assessed histologically by pathologists, who then use a visual evaluation of histological samples under a microscope to reach the final BC diagnosis [4]. Histopathology seeks to distinguish between benign and cancerous cells, as well

* Corresponding author: ubudak@beu.edu.tr. ORCID Information: [1] 0009-0007-9622-8016, [2] 0000-0003-4082-383X, [3] 0000-0001-9028-2221, [4] 0000-0003-1614-2639

as normal tissue. Histopathological examination has some drawbacks, including the necessity for extensive time-consuming zooming, focusing, and scrolling on the image, which depends on the pathologists' expertise, alertness, and level of weariness [4]. Classification of histopathological images for BC detection is a critical task in modern medicine. With the increasing use of digital pathology, there is a need for automated methods to classify histopathologic images of breast tissue and identify the presence of cancer.

In this paper, a different deep convolutional neural network model is presented for the classification of breast cancer from histopathological images. In order to confirm the reliability of the method, it is aimed to classify the histopathological images taken from the BreaKHis database [24]. However, some images in the database may not be fully detected by a CNN with a single-input. Therefore, a new end-to-end network model called a two-input convolutional neural network is proposed for the diagnosis of breast cancer, unlike the traditional CNN understanding. One of the inputs of the network is set to receive the raw images in the dataset, while the other input is set to use the deep features extracted from the related images. Some popular pre-trained network structures were preferred while creating multi-input CNN structures. These are AlexNet, VGG16, Inception-v3, MobileNet-v2 and ResNet-101. For example, for training the multi-input VGG16 network, one of the inputs was a raw image. The other input of the network contains the features taken from the fully connected (fc) layer of the traditional VGG16 network. The feature input of each multi-input network thus created is fed with the features extracted from the fc layer of the corresponding conventional pre-trained network.

The following parts of the paper are organized as follows: Section 2 contains literature studies. In section 3, the proposed method is introduced. In section 4, experimental works, obtained results, and comparisons with other studies are given. Finally, section 5 contains the conclusions.

2. Related Work

One approach to histopathologic image classification is to use machine learning algorithms, which can learn to distinguish between normal and cancerous tissue based on patterns in the images. These algorithms can be trained using annotated image datasets, in which experts have labeled the tissue as normal or cancerous. One example of a machine learning algorithm used for this purpose is convolutional neural networks (CNNs). CNNs have been shown to be effective at image classification tasks and have been used in several studies for the classification of histopathologic images of breast tissue.

In Wang et al. [5]' work, a CNN was trained on a dataset of 400 hematoxylin and eosin (H&E) stained breast histopathology images and achieved an accuracy of 95.5% in classifying the images as normal or cancerous. The authors also compared the performance of their CNN to that of a support vector machine (SVM) and found that the CNN outperformed the SVM, suggesting that CNNs may be a more effective method for histopathologic image classification. Li et al. [6] used a deep learning approach, specifically a combination of a CNN and a long short-term memory (LSTM) network, to classify histopathologic images of breast tissue. The authors found that their approach achieved an accuracy of 97.3% on a dataset of 1000 H&E stained images. Das et al. [7] used a random forest classifier to classify breast histopathology images and achieved an accuracy of 93.4%.

Kather et al. [8] used a combination of a CNN and a SVM to classify breast histopathology images and achieved an accuracy of 96.5%. The authors also used a technique called "transfer learning" to fine-tune their CNN, which improved the accuracy of the model. Wu et al. [9] used a CNN to classify breast histopathology images and achieved an accuracy of 95.8%. The authors also evaluated the performance of their CNN on different subtypes of breast cancer and found that it was most accurate for the detection of ductal carcinoma in situ (DCIS). Ghaffarian et al. [10] used a deep belief network (DBN) to classify breast histopathology images and achieved an accuracy of 97.4%.

Jalal et al. [11] used a combination of a CNN and a multi-layer perceptron (MLP) to classify breast histopathology images and achieved an accuracy of 97.4%. The authors also evaluated the performance of their model on different subtypes of breast cancer and found that it was most accurate for the detection of invasive ductal carcinoma. Zhang et al. [12] used a CNN to classify breast histopathology images and achieved an accuracy of 96.7%. The authors also compared the performance of their CNN to that of a SVM and found that the CNN outperformed the SVM, demonstrating the superiority of CNNs for this task. Chen et al. [13] used a hybrid approach combining a CNN and a genetic algorithm to classify breast histopathology images and achieved an accuracy of 95.3%.

Deniz et al. [14] used a pretrained CNN model and modified it accordingly to address the issue at hand using transfer learning and deep feature extraction techniques. The authors used both AlexNet and VGG16 models for feature extraction, with AlexNet being employed for additional fine-tuning. Support vector machines (SVM) was then used to classify the collected features.

For automatically detecting breast cancer from histopathological images, Demir et al. [15] proposed a novel and robust method based on the convolutional-LSTM (CLSTM) learning model, the pre-processing method using marker-controlled watershed segmentation algorithm (MWSA), and the optimized SVM classifier (HPIs).

A novel deep feature generation method for breast cancer diagnosis utilizing histopathology images was described by Liu et al. [16]. This framework makes use of the popular 16 pre-trained CNN models as feature generators. These deep feature generators were applied to each row and column of the input picture that was utilized throughout the feature generating phase. The top three feature vectors were then chosen as the final feature vector based on the iterative neighborhood component analysis using a feature selection technique. Finally, a deep neural network was used to classify the chosen characteristics.

Peta et al. [17] proposed an innovative and effective explainable artificial intelligence-based breast cancer categorization framework that can improve learning interpretations and decision-making processes. The authors created a unique adaptive unsharp mask filtering approach to improve the quality of breast histopathology images. In addition, an efficient explainable soft attentive efficientNet model for classifying breast cancer from histopathological images was constructed.

Atwan et al. [18] introduced an ensemble deep transfer convolutional neural network for the classification of breast cancer using histopathological images. The pre-trained models, ResNet50 and MobileNet, were used to extract high-level features by freezing the front layer parameters and fine-tuning the final layers. K-Nearest Neighborhood, Support Vector Machines, logistic regression, and neural networks were used as basic classifiers. The predictions of each classifier were integrated using the majority vote and product techniques.

Koshy et al. [19] utilized a deep neural network architecture to classify microscopic images of breast tumor tissue obtained from excisional biopsy. LMHistNet, a hybrid convolutional neural network model with asymmetric convolutions and Levenberg-Marquardt optimization, was utilized to classify breast cancer images into binary and eight subcategories. The convolution block attention module was used for adaptive feature refinement. The training was enhanced by minimizing the internal covariance shift and using the hinge loss function to increase convergence. Extracting diverse characteristics from histopathology images allowed for efficient magnification-dependent, independent binary, and eight-class classifications.

Karthiga et al. [20] proposed a new approach for detecting breast cancer using histopathology images, which relies on deep learning models for automation. Traditional supervised training, however, is limited due to an absence of annotated data. To tackle this, the authors used the Deep Belief Network, which was trained via unsupervised pre-training and fine-tuning. However, inactive elements within Deep Belief Network's hidden units may affect performance. To address this issue, they used regularization approaches, which enhanced classification accuracy. The accuracy scores of 98% and 96%, achieved respectively for the BreakHis and Kaggle datasets, offer promising results.

Addo et al. [21] developed a new deep-learning model that was based on the multiscale depth-wise separable convolution for breast cancer diagnosis. The developed technique divides input tensors into independent pieces, each undergoing a different kernel size inside a single convolution layer. The authors designed a pooling module to collect vast statistical data across channels and geographical dimensions, as well as a multi-head self-attention mechanism to detect long-range pixel relationships. These ideas provided different features, improving representation and promoting pixel variety during training. These advances significantly reduced computing complexity, which was critical for medical devices with limited resources. The model's performance on publicly accessible breast cancer histopathology imaging datasets demonstrated its effectiveness.

Abdulaal et al. [22] used transfer learning to create a novel self-learning algorithm for breast cancer classification from histopathology images. They used a variety of pre-trained deep neural networks, including Inception V3, VGG19, AlexNet, ResNet-18, GoogleNet, ShuffleNet, MobileNet, ResNet 101, Inception ResNetV2, and SqueezeNet. Self-learning was used particularly for sub-image categorization, which resulted in higher accuracy compared to evaluating the complete image. The authors used a hierarchical self-learning strategy to gradually correct erroneous labels while exploiting past knowledge of early labeling errors. Using the Inception-V3Net pretrained network, they eventually obtained an accuracy of 99.1% after four stages of label correction.

Ouahab [23] proposed a multi-modal cnn method using both CT and X-ray images for covid-19 detection. The accuracy performance of this end-to-end model, where the network has two inputs, was reported as 99%.

3. Materials and Methods

An illustration is given in Figure 1 to show the overall workflow of the proposed study. As can be seen from the figure, the proposed model has two inputs. While one of the inputs uses color histopathological raw images, the other input uses features extracted from the fc layer of a pre-trained CNN network.

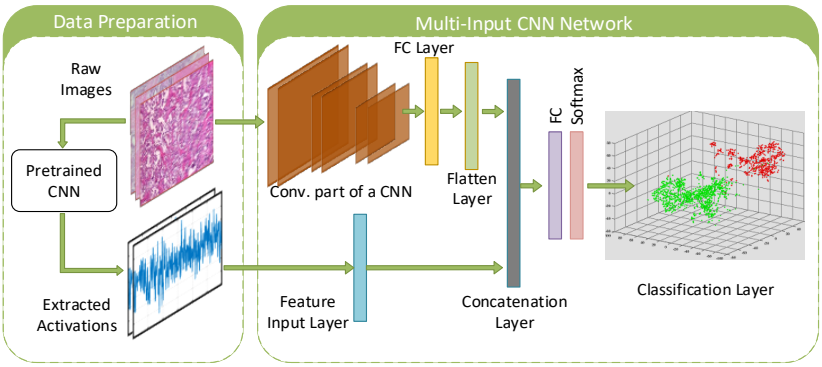


Figure 1. Proposed multi-input CNN structure.

The multi-input CNN structure is built on some of the well-known pre-trained networks. These are AlexNet, Inception-v3, MobileNet-v2, ResNet-101 and VGG16.

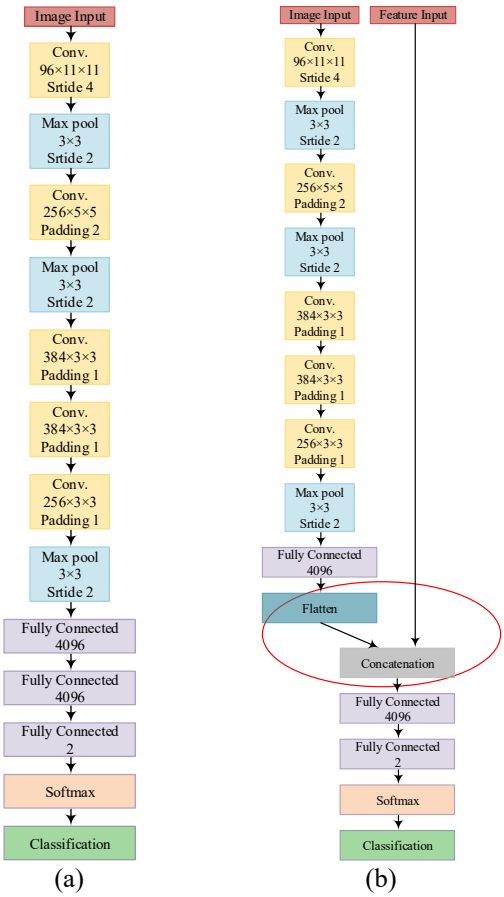


Figure 2. Process of converting a CNN to a multi-input structure. a) Part of the pre-trained AlexNet network, b) Structure of converted to the multi-input.

The revised network structure is shown in Figure 2. For example, some layers of the classical AlexNet network are given in Figure 2(a). Figure 2(b) shows how this network is transformed into a multi-input network structure. By breaking the connection between “fc6” and “relu6”, the fully connected layer is flattened. The output of the flattening process is also concatenated with a feature input layer and connected to the "relu6" layer. This rule was followed when other familiar network structures were also revised. To summarize Figure 1, for example, let AlexNet be used for the activations extracted in the Data preparation block. So, the network trained in the Multi-Input CNN block will be a network built on the AlexNet backbone.

4. Experimental Works and Results

In order to measure the performance of the proposed method, the BreakHis database was used in all of the experiments [4]. This database contains a sufficient number of histopathological samples to provide statistical evaluations of CAD systems. The samples were produced by staining breast tissue with hematoxylin and eosin during a clinical study throughout 2014. During the sample collection period in which 82 volunteers participated, a total of 7909 images were obtained, some of which were benign and the rest were malignant. In addition, this database includes sub-databases with 40×, 100×, 200×, and 400× magnification factors. More details about the database can be found in Table 1.

Table 1. BreakHis database.

Magnification factor	*Benign*	*Malignant*	*Total*
40×	625	1370	1995
100×	644	1437	2081
200×	623	1390	2013
400×	588	1232	1820
Total	2480	5429	7909
Num. of patient	24	58	82

All experiments were performed on a computer with a 14-core Intel(R) Xeon(R) Gold 6132 @2.60 GHz CPU and an NVIDIA Quadro P6000 GPU. The programs were executed in the MATLAB R2023b environment installed on a Windows operating system.

The 5-fold cross-validation technique was preferred because separating the sub-datasets used into random training and test sets each time did not allow us to fairly evaluate the performance of the proposed networks. In other words, four parts of the data set, which was divided into five parts in each cycle, were used for training, while the remaining part was used for testing. This also reveals the overall performance on the data set.

The same hyperparameters were used for training all MI and baseline networks. During the training, the stochastic gradient descent with momentum *“sgdm”* algorithm, one of the best optimizers, was used. Mini batch size, max epoch, and initial learning rate values were chosen as 32, 150, and 10^{-4}, respectively. In addition, the learning rate was gradually reduced by 1/2 in every 30 epochs. The obtained results are reported in Table 2.

Table 2 presents a comparative performance analysis of several CNN architectures in both their standard (baseline) and modified multi-input (MI) forms across four different magnification levels (40×, 100×, 200×, and 400×). The results reveal several notable trends regarding the effect of network architecture and input strategy on classification accuracy.

Firstly, among the baseline models, VGG16 consistently achieved the highest classification accuracy across all magnification subsets, with values ranging from 96.69% (400×) to 98.45% (40×). Conversely, AlexNet and MobileNet-v2 demonstrated relatively lower performance, particularly under higher magnification factors (e.g., AlexNet at 400×: 93.65%).

When evaluating the proposed multi-input models, substantial improvements in classification accuracy are observed across all architectures. This suggests that the multi-input strategy, which presumably fuses information from multiple resolution bands or data perspectives, effectively enriches feature representation and enhances discriminative capability. Notably, MI-VGG16 achieved the highest accuracy in all magnification levels, peaking

at 99.94% for the 40× subset. Even for models that underperformed in their baseline versions (e.g., MobileNet-v2), the MI variants showed significant gains, with MI-MobileNet-v2 reaching up to 99.29% accuracy at 40×.

Table 2. Comparative Performance Evaluation of Baseline and Multi-Input CNN Architectures Across Varying Magnification Subsets.

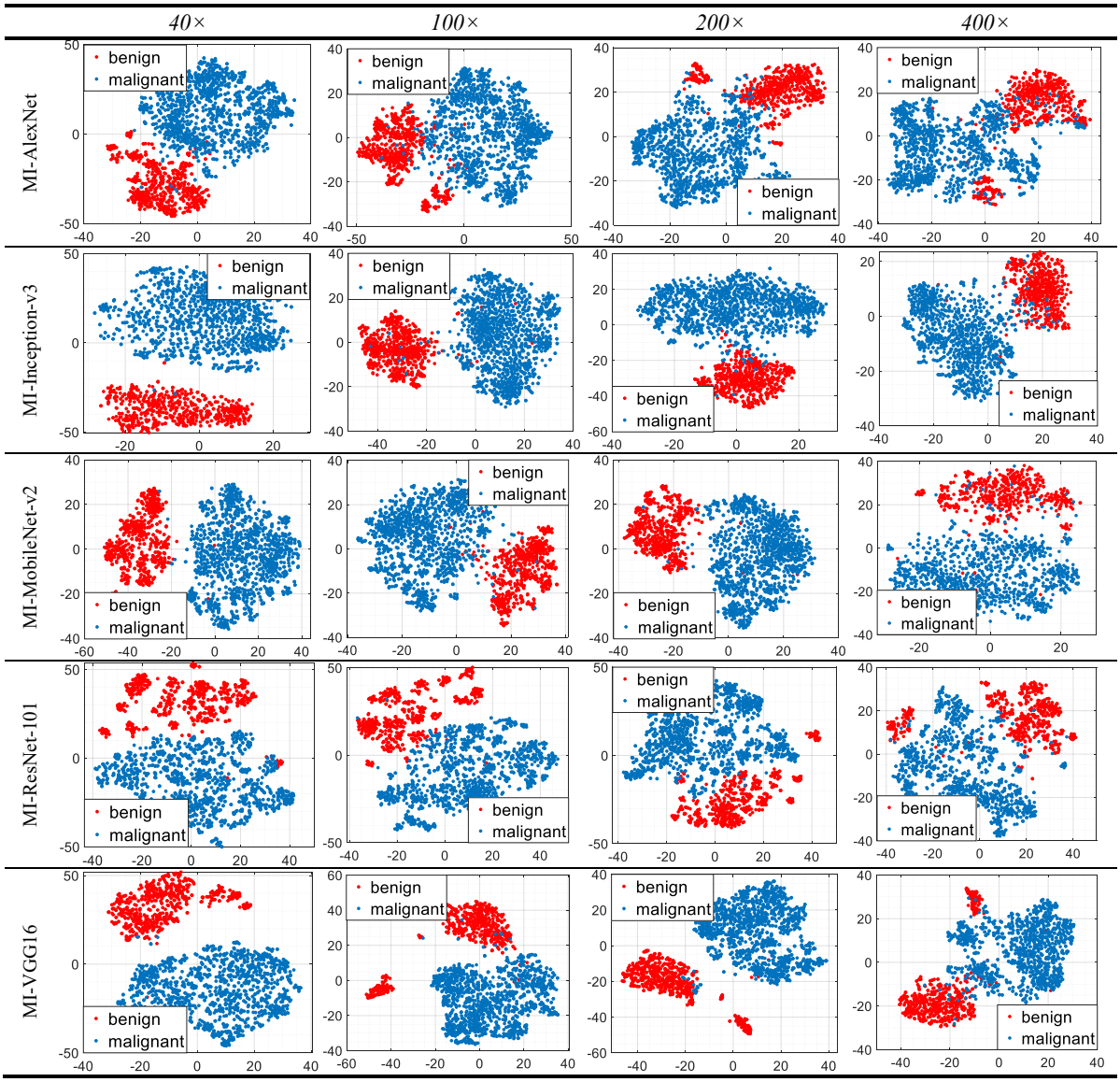
	Method	*Accuracy (%)*			
		40×	*100×*	*200×*	*400×*
Baseline	*AlexNet*	97.50	96.32	96.81	93.65
	Inception-v3	97.95	97.04	97.01	95.75
	MobileNet-v2	98.35	96.85	96.86	95.31
	ResNet-101	98.39	97.23	97.25	96.19
	VGG16	98.45	98.09	98.30	96.69
Proposed	*MI-AlexNet*	98.79	98.07	98.26	96.64
	MI-Inception-v3	99.84	98.27	97.76	96.70
	MI-MobileNet-v2	99.29	97.93	98.36	96.48
	MI-ResNet-101	99.44	98.75	98.70	97.14
	MI-VGG16	**99.94**	**98.94**	**99.05**	**97.30**
	MI: Multi-Input				

Furthermore, a quantitative comparison reveals that the multi-input models offer considerable relative improvements over their baseline counterparts. For instance, MI-VGG16 demonstrates an increase of 1.51% at 40×, 0.85% at 100×, 0.76% at 200×, and 0.61% at 400× compared to the baseline VGG16. Similarly, MI-ResNet-101 shows relative gains of 1.05%, 1.52%, 1.45%, and 0.95% across the corresponding magnification levels. These enhancements are consistent across all architectures, with the most substantial improvements often observed at lower magnification levels (e.g., up to 2.34% gain for MI-Inception-v3 at 40× over its baseline). These findings highlight the effectiveness of the multi-input configuration in enhancing classification performance, regardless of the base architecture.

Overall, the results strongly support the conclusion that the multi-input architecture yields consistent and significant improvements in classification accuracy, making it a promising strategy for tasks involving heterogeneous or multiscale data inputs.

In order to visually observe the performance of the proposed multi-input CNN architectures, t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE) was applied to the activations extracted from the “fc” layer of each network trained on sub-datasets. This is actually proof of how properties belonging to different classes are distributed in two-dimensional scale space. As can be seen from Table 3, red-colored features describe benign tissue samples, and blue-colored features describe malignant tissue samples. One of the most important factors affecting classification performance is that the features are far from each other in two-dimensional space. In other words, the homogeneous distribution of the classes within themselves and the heterogeneous distribution between the classes are very important. These distributions also confirm the accuracy results obtained in Table 2.

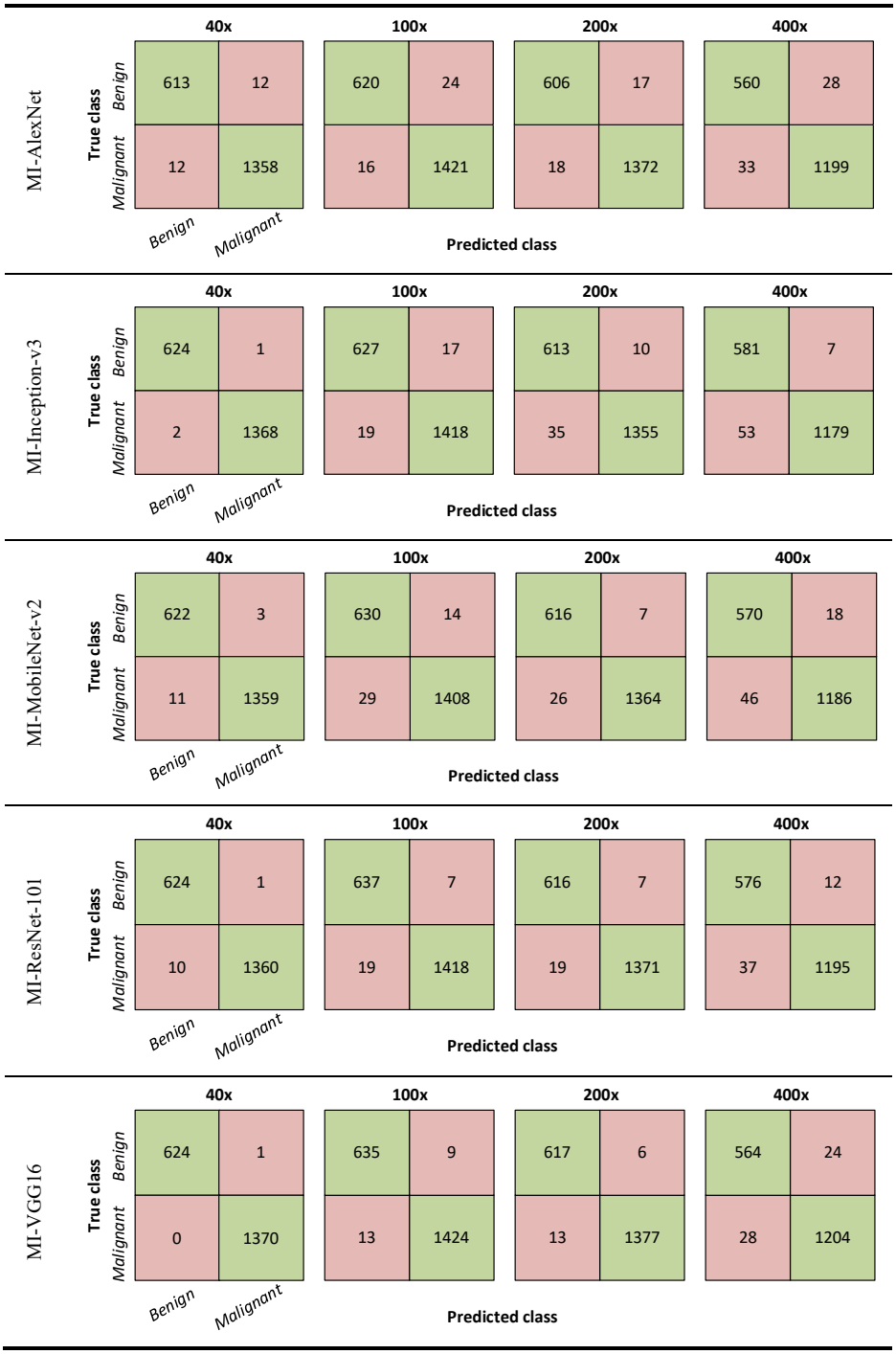
Table 3. Representation of the distribution of dimensionality-reduced features using t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE) on the BreakHis Database.



Confusion matrices of the performance results obtained are presented in Table 4. The first column of Table 4 shows the network on which the multi-input CNN structure is built, while the other columns show the confusion matrices on the sub-datasets. Green areas indicate true positives (TP) and true negatives (TN), while pink areas indicate false positives (FP) and false negatives (FN), respectively. When evaluating classification performance, it is desired that FP and FNs are either very low or zero. This also means the accuracy score will be higher.

A comprehensive comparison of the proposed MI-CNN model with several previously published methods is presented in Table 5. The results highlight a clear trend of increasing classification accuracy over the years, reflecting the advancements in deep learning techniques and architectural improvements. In early studies, such as Spanhol et al. [4], the reported accuracy scores across different magnification levels (40×, 100×, 200×, and 400×) ranged from 79.90% to 85.10%, which served as a baseline for subsequent research. A moderate improvement was observed in later work by Spanhol et al. [25], followed by more significant performance gains in studies published after 2018, such as those by Qi et al. [26], Feng et al. [27], and Nahid et al. [28], all reporting accuracies consistently above 88%.

Table 4. Confusion matrices.



The trend continued with remarkable progress in the works of Ibraheem et al. [29] and Budak et al. [30, 31], who achieved performance exceeding 95% in most magnifications. In particular, Budak et al. [31] reached a peak accuracy of 98.20% at 40× magnification, marking a significant advancement in the field. The most recent studies, such as those by Koshy et al. [19], Addo et al. [21], and Abdulaal et al. [22], have pushed the accuracy even further, with Addo et al. reporting values between 98.93% and 99.36%, representing state-of-the-art results in the literature.

Our proposed method, the MI-CNN model, demonstrates competitive performance, achieving accuracy values of 99.94% (40×), 98.94% (100×), 99.05% (200×), and 97.30% (400×). These results are either comparable

to or surpass those of the most recent and high-performing methods, such as Addo et al. [21]. This indicates the robustness and effectiveness of our multi-input CNN architecture in handling histopathological image classification tasks across various magnification factors. Furthermore, the consistently high accuracy across all magnifications suggests that the proposed model can serve as a reliable and efficient auxiliary diagnostic tool in computer-aided diagnosis (CAD) systems, potentially improving the diagnostic workflow and reducing human error.

Table 5. Comparison of the proposed method with some published works.

Method	*Year*	*Accuracy (%)*			
		40×	*100×*	*200×*	*400×*
Spanhol et al. [4]	2015	81.60	79.90	85.10	82.30
Spanhol et al. [25]	2016	85.60	83.50	82.70	80.70
Qi et al. [26]	2018	89.38	90.72	91.29	89.68
Feng et al. [27]	2018	89.07	88.06	91.46	89.15
Nahid et al. [28]	2018	90.00	90.00	91.00	90.00
Ibraheem et al. [29]	2021	92.27	93.07	97.04	92.09
Deniz et al. [14]	2018	90.96	90.58	91.37	91.30
Budak et al. [30]	2019	95.69	93.61	96.32	94.29
Budak et al. [31]	2020	98.20	97.20	97.80	97.30
Koshy et al. [19]	2024	86.00	99.00	85.00	96.00
Addo et al. [21]	2024	99.21	**99.10**	**99.36**	**98.93**
Abdulaal et al. [22]	2024	99.00	98.30	-	-
Ours (MI-CNN)	**-**	**99.94**	98.94	99.05	97.30

In order to prove the robustness of the proposed method in different object classification problems, we also applied it to the CIFAR-10 dataset [31]. The CIFAR-10 dataset contains 32×32 color images with a total of 60,000 color images. This dataset consists of 10 classes and there are 6,000 images in each class. 50,000 images are pre-arranged to be used in training and the rest for testing. Additionally, this dataset presents a challenging classification problem due to differences in the scale of the image, object orientation, location, and background [32]. For this dataset as well, the hyperparameters and training-test ratios (5-fold cross-validation) used in the experiments presented in Table 2 were employed. Table 6 shows the accuracy performance of the proposed method on the CIFAR-10 dataset. As can be seen from the table, all model performances revised as multi-input structures were reported to be over 99%.

Table 6. The obtained classification results on CIFAR-10 dataset.

Method	*Accuracy (%)*
MI-MobileNet-v2	99.870
MI-Inception-v3	99.930
MI-ResNet-101	99.966
MI-VGG16	99.988
MI-AlexNet	99.990

5. Conclusions

In this study, we developed a multi-input CNN structure for the automatic diagnosis of breast cancer from histopathological images. The reason why this proposed method is preferred is that it has more inputs than classical single-input CNN structures and has the ability to train more features at the same time.

During the experiments, we transformed many known CNNs into a multi-input network structure and interpreted the results. All of the experiments were performed on the BreakHis dataset, which has sufficient numbers and can be easily accessed. While testing the superiority of the method, no artificial data augmentation was used on this data set. As far as we know, there is no study in the literature that achieves such a high classification performance. Therefore, in future studies, we aim to evaluate the performance of CNN structures under different features by increasing the number of entries more.

References

[1] American Cancer Society. About Breast Cancer. Available: https://www.cancer.org/content/dam/CRC/PDF/-Public/8577.00.pdf

[2] American Cancer Society. Cancer Facts & Figures 2018. Available: https://www.cancer.org/content/dam/cancer-org/research/cancer-facts-and-statistics/annual-cancer-facts-and-figures/2018/cancer-facts-and-figures-2018.pdf

[3] Wang L. Early diagnosis of breast cancer. Sensors 2017; 17(7): 1572.

[4] Spanhol FA, Oliveira LS, Petitjean C, Heutte L. A dataset for breast cancer histopathological image classification. IEEE Trans Biomed Eng 2015; 63(7): 1455-1462.

[5] Wang X. Classification of breast histopathology images using convolutional neural networks. J Med Imaging 2018; 5(2): 021020.

[6] Li Y. Classification of breast histopathology images using a deep learning approach. Comput Methods Programs Biomed. 2019; 173: 33-40.

[7] Li J, Shi J, Chen J, Du Z, Huang L. Self-attention random forest for breast cancer image classification. Frontiers in oncology. 2023; 13: 1043463.

[8] Li Y, Wu J, Wu Q. Classification of breast cancer histology images using multi-size and discriminative patches based on deep learning. IEEE Access. 2019; *7*: 21400-21408.

[9] Bardou D, Zhang K, Ahmad S M. Classification of breast cancer based on histology images using convolutional neural networks. IEEE Access. 2018; *6*: 24680-24693.

[10] Hameed Z, Zahia S, Garcia-Zapirain B, Javier Aguirre J, Maria Vanegas A. Breast cancer histopathology image classification using an ensemble of deep learning models. Sensors. 2020; 20(16): 4373.

[11] Desai M, Shah M. An anatomization on breast cancer detection and diagnosis employing multi-layer perceptron neural network (MLP) and Convolutional neural network (CNN). Clinical eHealth. 2021; 4: 1-11.

[12] Araújo T, Aresta G, Castro E, Rouco J, Aguiar P, Eloy C, Campilho A. Classification of breast cancer histology images using convolutional neural networks. PloS one. 2017; 12(6): e0177544.

[13] Yan R, Ren F, Wang Z, Wang L, Zhang T, Liu Y, Zhang F. Breast cancer histopathological image classification using a hybrid deep neural network. Methods. 2020; *173*: 52-60.

[14] Deniz E, Şengür A, Kadiroğlu Z, Guo Y, Bajaj V, Budak Ü. Transfer learning based histopathologic image classification for breast cancer detection. Health Inf Sci Syst 2018; 6(1): 1-7.

[15] Demir F. DeepBreastNet: A novel and robust approach for automated breast cancer detection from histopathological images. Biocybern Biomed Eng 2021; 41(3): 1123-1139.

[16] Liu H, Cui G, Luo Y, Guo Y, Zhao L, Wang Y, Tuncer T. Artificial Intelligence-Based Breast Cancer Diagnosis Using Ultrasound Images and Grid-Based Deep Feature Generator. International Journal of General Medicine. 2022; 15: 2271.

[17] Peta J, Koppu S. Explainable Soft Attentive EfficientNet for breast cancer classification in histopathological images. Biomed Signal Process Control 2024; 90: 105828.

[18] Atwan J, Almansour N, Hashem Ryalat M, Sahran S, Aldabbas H, Albashish D. Ensemble of Deep Features for Breast Cancer Histopathological Image Classification. The Computer Journal. 2024; bxad127.

[19] Koshy SS, Anbarasi LJ. LMHistNet: Levenberg–Marquardt Based Deep Neural Network for Classification of Breast Cancer Histopathological Images. IEEE Access. 2024; *12*: 52051-52066.

[20] Karthiga R, Narasimhan K, Raju N, Amirtharajan R. Automatic approach for breast cancer detection based on deep belief network using histopathology images. Multimedia Tools Appl 2025; 84(4): 4733-4750.

[21] Addo D, Zhou S, Sarpong K, Nartey OT, Abdullah MA, Ukwuoma CC, Al-antari MA. A hybrid lightweight breast cancer classification framework using the histopathological images. Biocybern Biomed Eng 2024; 44(1): 31-54.

[22] Abdulaal AH, Valizadeh M, Amirani M C, Shah A S. A self-learning deep neural network for classification of breast histopathological images. Biomed Signal Process Control 2024; 87: 105418.

[23] Ouahab A. Multimodal convolutional neural networks for detection of covid-19 using chest x-ray and CT images. Opt Mem Neural Networks. 2021; 30(4): 276-283.

[24] Bayramoglu N, Kannala J, Heikkilä J. Deep learning for magnification independent breast cancer histopathology image classification. In 2016 23rd International conference on pattern recognition (ICPR). 2016, December: pp. 2440-2445. IEEE.
[25] Spanhol FA, Oliveira LS, Petitjean C, Heutte L. Breast cancer histopathological image classification using convolutional neural networks. In 2016 international joint conference on neural networks (IJCNN). 2016, July: pp. 2560-2567. IEEE.
[26] Qi Q, Li Y, Wang J, Zheng H, Huang Y, Ding X, Rohde G K. Label-efficient breast cancer histopathological image classification. IEEE J Biomed Health Inf 2018: 23(5), 2108-2116.
[27] Feng Y, Zhang L, Mo J. Deep manifold preserving autoencoder for classifying breast cancer histopathological images. IEEE/ACM Trans Comput Biol Bioinf 2018: 17(1), 91-101.
[28] Nahid AA, Mehrabi MA, Kong Y. Histopathological breast cancer image classification by deep neural network techniques guided by local clustering. Biomed Res Int, 2018.
[29] Ibraheem AM, Rahouma KH, Hamed HF. 3PCNNB-net: Three parallel CNN branches for breast cancer classification through histopathological images. J Med Biol Eng 2021: 41(4), 494-503.
[30] Budak Ü, Cömert Z, Rashid ZN, Şengür A, Çıbuk M. Computer-aided diagnosis system combining FCN and Bi-LSTM model for efficient breast cancer detection from histopathological images. Appl Soft Comput 2019: 85, 105765.
[31] Budak Ü, Güzel AB. Automatic grading system for diagnosis of breast cancer exploiting co-occurrence shearlet transform and histogram features. IRBM. 2020: 41(2), 106-114.
[32] Krizhevsky A, Hinton G. Learning multiple layers of features from tiny images. 2009.
[33] Karpathy A. Lessons learned from manually classifying CIFAR-10. 2011. [Online]. Available: http://karpathy.github.io/2011/04/27/manually-classifying-cifar10/

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 723-735, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1692094

Usage of Artificial Intelligence in Smart Tourism: A CNN-based Landmark Classification for Diyarbakir Province

Yunus KORKMAZ[1*]
[1] Department of Computer Engineering, Dicle University, Diyarbakir, Türkiye
[*] yunus.korkmaz@dicle.edu.tr

(Geliş/Received: 05/05/2025; Kabul/Accepted: 10/07/2025)

Abstract: The integration of artificial intelligence (AI) in the tourism sector has emerged as a transformative approach to enhance the travel experiences and promote regional attractions. This study explores the application of AI in smart tourism by developing a convolutional neural network (CNN)-based landmark classification system for Diyarbakır Province, a culturally rich region in South-East Turkey. The method specifically focuses on classifying images of five popular landmarks in Diyarbakır, leveraging state-of-the-art AI techniques to enhance regional visibility and tourist engagement. To achieve this, a pre-trained CNN model, namely AlexNet, was fine-tuned for the landmark classification task. By adapting the parameters of AlexNet to the specific dataset, the model was optimized for improved feature extraction and classification accuracy for totally 5 classes (places). The proposed framework was evaluated using a carefully curated dataset, yielding a remarkable 97.5% classification accuracy on the test set. The performance of the proposed model highlights the reliability and effectiveness of the methodology in accurately identifying landmarks, even with complex architectural and environmental features. These results can concretely contribute to both academic research and practical applications by providing a lightweight and accurate model that can be embedded into mobile travel applications or digital tourism platforms for real-time landmark recognition, enhancing tourist engagement and regional visibility.

Key words: Smart tourism, artificial intelligence, deep learning, landmark classification.

Akıllı Turizmde Yapay Zeka Kullanımı: Diyarbakır İli için Evrişimsel Sinir Ağı Tabanlı Bir Turistik Yer Sınıflandırması

Öz: Yapay zekanın turizm sektörüne entegrasyonu, seyahat deneyimlerini geliştirmek ve bölgesel cazibe merkezlerini tanıtmak için dönüştürücü bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu çalışma, Türkiye'nin Güneydoğusunda yer alan kültürel açıdan zengin bir bölge olan Diyarbakır ili için Evrişimli Sinir Ağı (CNN) tabanlı bir turistik yer noktası sınıflandırma sistemi geliştirerek akıllı turizmde yapay zeka uygulamasını araştırmaktadır. Yöntem, özellikle bölgesel görünürlüğü ve turist katılımını artırmak için en son yapay zeka tekniklerinden yararlanarak, Diyarbakır'daki beş popüler turistik yer görüntülerini sınıflandırmaya odaklanmaktadır. Bunu başarmak için, AlexNet adlı önceden eğitilmiş bir CNN modeli, turistik yer sınıflandırma görevi için ince ayarlanmıştır. AlexNet'in parametrelerini belirli veri setine uyarlayarak, model toplam 5 sınıf (yer) için iyileştirilmiş özellik çıkarma ve sınıflandırma doğruluğu için optimize edilmiştir. Önerilen model, dikkatlice düzenlenmiş bir veri seti kullanılarak değerlendirilmiş ve test setinde %97,5'lik dikkate değer bir sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. Önerilen modelin performansı, karmaşık mimari ve çevresel özelliklere sahip olsa bile turistik yer noktalarını doğru bir şekilde tanımlamada metodolojinin güvenilirliğini ve etkinliğini vurgulamaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, mobil seyahat uygulamalarına entegre edilebilecek hafif ve doğru bir model sunarak, hem akademik çalışmalara hem de turistik etkileşimi arttırabilecek pratik uygulamalara katkı sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Akıllı turizm, yapay zeka, derin öğrenme, turistik yer sınıflandırma.

1. Introduction

Over the last decade, smart tourism and artificial intelligence have profoundly transformed companies and services in the tourism sector with analytics, defined as the process of analyzing and evaluating data to make better decisions. Advances in computing power, broad data access, advances in machine learning algorithms, and model advancements are leading AI to play an increasingly critical role. Artificial intelligence can practically and effectively perform a number of tasks that are complex for humans, especially mental tasks such as data collection, data analysis and data processing [1].

The incorporation of information and communication technologies (ICT) has transformed tourist destinations into "smart" environments. These technologies enable destinations to develop platforms that gather and share

[*] Corresponding author: yunus.korkmaz@dicle.edu.tr. Author's ORCID number: [1] 0000-0002-6315-5750

valuable information, as well as connect with real-time travel events, all aimed at improving the overall travel experience [2]. This means that in the tourism sector, in the period called "Smart Tourism" or "Tourism 4.0", advances in artificial intelligence, information technologies and robotic systems are rapidly becoming widespread, as in other industries. In particular, innovative applications such as smartphone networks, smart hotel and destination systems, travel agencies, central reservation systems, smart ticket applications and tour guide systems, as well as virtual reality technology, contribute greatly to the sector [3]. Smart tourism has emerged as a result of this developmental trend. It involves collecting data from various sources such as infrastructure, social networks, government entities, and individuals within a destination, and then integrating this information. By utilizing advanced technologies, this data is transformed into real-time experiences and business value propositions. Smart tourism is defined as a tourism model that emphasizes efficiency, sustainability, and enriched visitor experiences [4].

Information technology and tourism together create a "dense information system," where emerging information and communication technologies are driven by new business models [5]. The traditional approach to tourism is slowly being replaced by a more inclusive model, where all stakeholders are increasingly engaged in business processes. The advancement of information accessibility and new technologies has transformed communication in tourism, resulting in improved data access and the distribution of products and services to new markets. As a result, the reduction of barriers—along with increased independence, interaction, dynamics, and flexibility—has also heightened the demand for enhanced data security and privacy within the system [6]. New technologies are having a greater impact than ever on driving strategic business changes and reshaping service delivery in the tourism industry. However, the extent of these changes largely depends on the decisions made by individual companies, as they are autonomous entities that choose whether or not to adopt these innovations. Furthermore, these technologies enable a direct, real-time connection with end users, helping to lower organizational and distribution costs by consolidating communication, commerce, reservations, and additional information into a single channel. In recent years, there has been a notable increase in research on smart tourism, with many scholars utilizing various analytical methods to sequence and integrate studies on the topic. Liu et al. [7] conducted an analysis of 96 academic articles using frequency analysis, network analysis, and text mining techniques. They visualized the research life cycle of smart tourism, identifying two key breakthroughs in 2015 and 2017. They noted that the 2017 breakthrough was driven by the global advancement of smart tourism research.

1.1 Smart Tourism

The term smart tourism was first introduced by Gordon Philips in 2000 and refers to the adoption of a sustainable holistic approach in the management, development, planning and marketing of tourism activities and businesses [8]. As mentioned before in [4], the authors define smart tourism as tourism activities, especially sustainability-oriented, supported by the elements in a destination: physical infrastructure, social connections, government organizations, institutional resources and the collection of visitor data.

The United Nations World Tourism Organization (UNWTO) defined smart tourism in 2009 as a concept based on the criteria of being clean, green, ethical and quality at every stage of the service chain [9]. With the addition of the concepts of bit and smart destination in 2015, smart tourism was accepted as the future of tourism in 2017 [10]. Huang et al. [11] defined smart tourism as an effort to focus on and meet the personal needs of tourists by integrating Information Technology Technologies with daily life and culture. Smart tourism increases the decision-making quality of tourists when making travel plans, helps them visualize and expands their cognitive boundaries thanks to its data-oriented structure [12]. Shen Y. et al. defined smart tourism as aiming to provide customized services to tourists based on real-time communication and location information [13]. Smart tourism, which is called the integration of the tourism sector with information communication technologies and the digital transformation of tourism, refers to a social phenomenon resulting from the combination of touristic experiences with ICT [14,15]. Smart tourism also includes integrating existing smart technologies with touristic experiences, testing tourism activities more actively and effectively, and offering up-to-date solutions to tourists [16]. Binrong W. et al. studied tourism demand forecasting with transformers considering COVID-19 pandemic [37]. They optimized Temporal Fusion Transformer (TFT) with an ADE function. In another up-to-date study, a tour route recommendation system was proposed using User-Generated Content based text mining by Kaibo L. et al. [38]. Jian W. et al. were another researcher worked for evaluation of travel destination using reviews available on Dazhong.com and Ctrip.com websites [39].

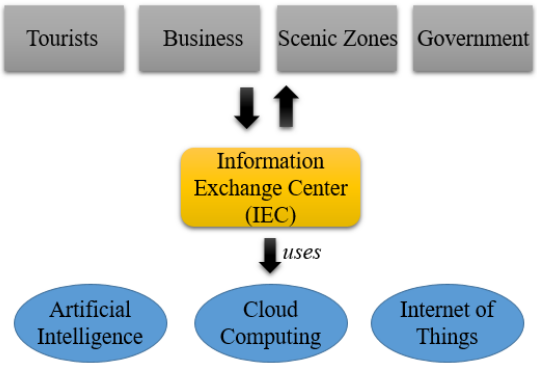


Figure 1. Structure of the smart tourism.

Zhu et al. [17] shows the smart tourism structure in Figure 1. in five elements: tourist, natural area, government, business and information exchange center. Within the framework of this structure, it is seen that tourists forward their requests for purchasing tickets or making reservations to the information exchange center, and the center responds to these requests. On the other hand, the information exchange center responsible for monitoring natural areas should be conveyed to it in order to analyze and archive visitor statistics. The resulting statistical data can then be presented to government officials for future policies. Finally, restaurants, hotels, entertainment and other tourism-related businesses can apply to the information exchange center to promote advertising and promotions to tourists. Smart tourism development is based on the collection, sharing and processing of data generated in its system involving consumers, businesses and destinations. Therefore, the existence of different components is necessary for the effective implementation of Smart tourism. As it is demonstrated by Figure 2, these components are smart experience, smart business ecosystem and smart tourism destination [4].



Figure 2. Components of smart tourism.

While Gretzel et al. states that the smart experience component focuses on making tourist experiences more individual and real-time through technology, Neuhofer et al. [18] defined the factors that contribute to the creation of a smart tourism experience as data collection, connection from anywhere and real-time synchronization. According to the study of Shen Y. et al. [13], the business components of smart tourism are defined as the need for active interlocking of stakeholders, organizational agility and digitalization of basic tourism applications. With the rise of smart tourism, the need for a smart business ecosystem that can respond to emerging new demands and values has emerged. This smart business ecosystem is defined as a system that supports the transformation of tourist resources and the collaborative creation of the tourism experience. Smart destinations apply smart city principles by considering tourists as well as evaluating local people; therefore, it is considered a continuation of smart cities [19]. Kontogianni A. and Alepis E. has researched on literature review of smart tourism. They examined the articles published in last 6 years [20].

1.2 The Artificial Intelligence (AI)

The term artificial intelligence was first used by American computer scientist John McCarthy in 1965. The idea of expanding the definition of artificial intelligence as a theoretical concept arose during the simplification of logical problem-solving processes in computer science. Originally, AI was designed for the purpose of solving often complex and difficult mathematical problems, which included the goal of aiding theoretical thinking [21]. Validating the AI concept was initially quite challenging. Professor Douglas Carl Engelbart, who made significant contributions to expanding understanding in this field, helped achieve agreement among scientists on the subject [22]. Artificial intelligence research has evolved as an independent field of science and is applied in many industries [23-25]. Artificial intelligence, widely used in different industry sectors, can increase the speed of various processes by improving quality and efficiency. As for predictions about the future, it is expected that development will continue to exceed our current knowledge. Therefore, the issue of how we can adapt to the new world shaped by artificial intelligence is of critical importance. Okwor I.A. et al. defined artificial intelligence as programs, algorithms and machines that exhibit intelligence [26]. Samara D. et al. also stated that Artificial Intelligence includes smart technologies and tools, machine learning, Internet of Things, artificial neural networks, big data, smart robots and virtual and augmented reality applications [27].

Advancements in computing, big data, and machine learning are boosting the importance of Artificial Intelligence (AI). Many tasks once done by humans, such as data collection and analysis, now rely on big data and algorithms. Many tasks once performed by humans now depend on big data, processing power, and advanced algorithms, for data collection and analysis. These tasks support intelligent services, impacting provider-customer interactions, and affecting service, operations, management, and marketing [28]. Many studies have been conducted in the literature to examine the progress of artificial intelligence in different scientific fields. There are common points in these studies in terms of specific countries and keywords. By dividing their research into different time periods, the authors aim to illustrate the different themes that have emerged after the spread of artificial intelligence into other disciplines. It is clear that artificial intelligence is generally studied in fields such as engineering, computer science, and medicine and clinical studies, and less so than in the social sciences. Therefore, this study aims to close this gap in tourism and hospitality and provide some useful insights into the potential of artificial intelligence for both academics and practitioners. Additionally, this study proposes to look at the complex problems of the social world from the perspective of artificial intelligence. Various studies have been carried out to examine the development of artificial intelligence in different scientific disciplines. These studies point to common points in the context of familiar countries and keywords. Researchers have divided their studies into time periods, aiming to show the different themes that emerged after the spread of artificial intelligence to other disciplines over time. It has been clearly seen that artificial intelligence is being studied intensively in fields such as engineering, computer science and medicine. However, this level of interest is lower in research in social sciences. In this context, this study aims to close this gap in the field of tourism and accommodation and offers valuable perspectives on the potential of artificial intelligence to both academics and practitioners. In addition, the study proposes to highlight the problems of the complex social world from the perspective of artificial intelligence.

1.3 Industry 4.0

The rapid and complex development of humanity has led to significant changes and transformations in the tourism sector, like all other sectors. This evolution started with Tourism 1.0 and is then expressed as Tourism 2.0, Tourism 3.0 and the Tourism 4.0 period we are currently in. Tourism 4.0 is called smart tourism or digitalization in tourism and includes developments in information technologies, artificial intelligence studies and robotic systems, as in other sectors. Within the scope of the Tourism 4.0 period, applications such as smart hotel and destination systems, central reservation systems, smartphone networks, smart card (ticket) systems, smart tour guide systems, smart travel agency systems and virtual reality have spread to an advanced and wide usage area. This era is an important evolution shaping the future of the tourism industry and aims to make travel experiences smarter and more interactive.

Artificial intelligence-based technologies and smart tourism applications integrated together to provide various facilities for the tourists such as relaxing and enjoyable opportunities before, during and after travel [29]. For example, travelers can preview the destination's attractions through accommodation providers and track the current traffic situation on their travel routes via smart maps. Likewise, it can establish close relationships with customers and make them feel special by following consumer comments online, quickly responding to questions and providing solutions, secure money transfers, baggage tracking and providing services in different areas. Tourism 4.0, which is called “digital transformation” in tourism by representing the latest technological stage

today, affects the lives of tourists and tourism employees with artificial intelligence, internet of things, destination management systems, customer relationship management, central reservation systems, smart phone networks, smart hotel management systems. It includes technologies such as smart tour guide systems, smart ticket (card) systems, smart travel agency systems that make it easier. There are more and more studies including artificial intelligence (AI) and technology-based tourism aspects in this new period of time [30-32]. Moreover, it is an era that entered our lives with Tourism 4.0, which represents the latest technological stage. Technological innovations such as artificial intelligence, internet of things, smart systems and mobile applications bring radical change to the tourism sector. This opens the doors to a more effective, efficient and satisfying tourism experience in the sector.

2. Touristic Landmark Classification based on CNN

The usage of artificial intelligence (AI) has gained attention especially by development in computer science. Machine learning (ML), which can be considered as a term under the AI, is to make machine gain to think like human beings. While the algorithms like Support Vector Machines (SVM) and K-Nearest Neighbors (KNNs) are available for classical ML, artificial neural networks (ANN) achieved better performance especially if someone want to avoid feature extraction techniques. Because the ANN models accept inputs either as features extracted manually or as raw multimedia data. The ANN models were first developed by simple perceptron as demonstrated in Figure 3. The perceptron is the fundamental of everything in ANN area.

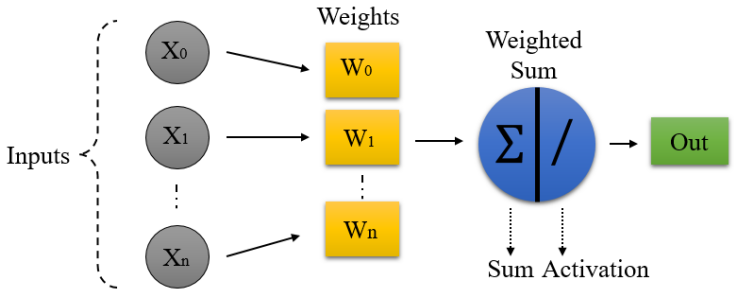


Figure 3. A simple perceptron structure in ANN.

As shown by Figure 3, a simple perceptron accepts inputs ($X_0, X_1, \ldots, X_n$), sums all the items after multiplying inputs and weights one by one, adds a bias (b) to that summation. The result of this sum operation goes through by an activation function. Mathematical representation of how perceptron works can be formulated by Equation 1. Activation function can be unit step, sigmoid (logistic), ReLu (rectified linear unit) etc. Lastly, output of network is compared to the label of current input (by means of supervised learning) by finding the amount of error using subtraction between actual label and predicted output as shown by Equation 2. This whole operation called as "forward propagation".

$$Predicted\ Out = Activation(\ b + \sum_{i=0}^{n} X_i\ .W_i\ ) \tag{1}$$

$$Error_{out} = ActualLabel - PredictedLabel \tag{2}$$

The main aim here is to have zero (0) error. If error was found as non-zero, the perceptron can loop itself to get the error closer to zero. In this case, the specific weight which causes error to get far away from zero should be found and punished in order to minimize the predicted output. Punishing is made via updating this specific error by amount that it caused output to be get away from zero. This process called as "back propagation". Gradient Descent (GD), which is thought as optimization, can be used to find which weights cause more error in perceptron loop. The GD benefits the partial derivatives of predicted output. Equation 3 shows how to calculate the error amount caused by W_0 as an example formulation using partial derivatives. Then W_0 is updated by the amount of $Error_{W_0}$.

$$Error_{W_0} = \frac{\partial(Error_{out})}{\partial W_0} = \frac{\partial(Error_{out})}{\partial \sum} \; x \; \frac{\partial \sum}{\partial W_0} \tag{3}$$

The terms Deep Learning (DL) and Deep Neural Networks (DNNs) has been emerged when simple perceptron remains insufficient to learn or model more complex scientific problems. Deep Learning is also one of the ML types [33] and it uses DNNs. Convolutional Neural Networks (CNN), Long-Short Term Memory (LSTM) and Recurrent Neural Networks (RNN) are some of DNN types. Differences between classical machine learning (ML) algorithms like SVM, KNN etc. and deep learning (DL) algorithms mentioned above occur in feature extraction phase. In the DL, networks extract features from images by themselves using filters (kernels). In the classical ML, manual feature extraction is required before running ML algorithms. This paper has used a CNN-based AlexNet model to develop a touristic landmark classification system for Diyarbakir province which is a city at south-east of Turkey. AlexNet was initially introduced by Alex Krizhevsky et al. [34] to perform classification on the ImageNet dataset, which contains approximately 1.3 million images spanning 1,000 categories. The convolutional neural network (CNN) architecture in AlexNet comprises eight layers, as depicted in Figure 4.

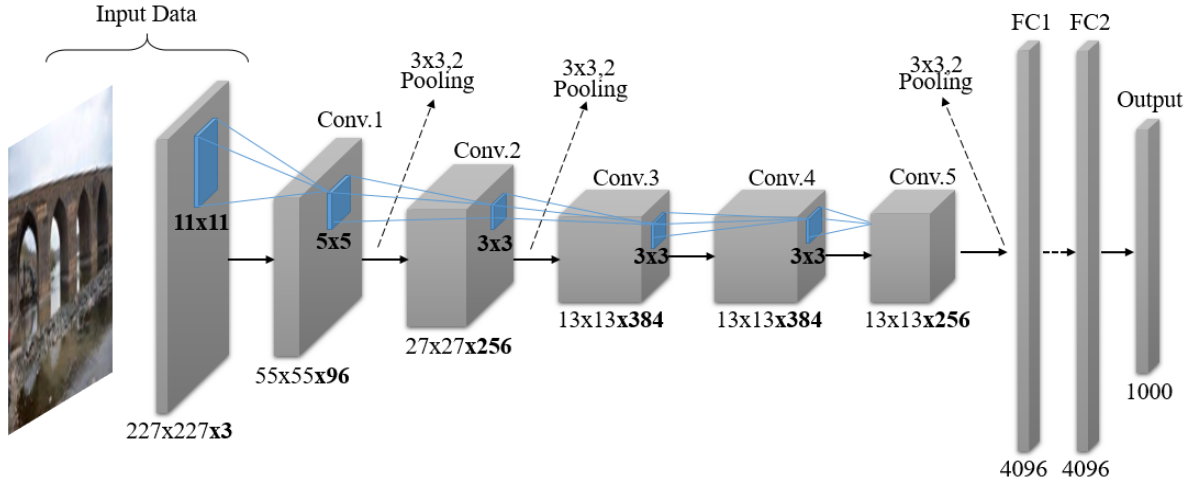


Figure 4. AlexNet CNN model architecture.

In this CNN architecture, the network processes input images with dimensions of 227×227×3 and begins feature extraction through a series of five convolutional layers. The convolutional layers play a crucial role in extracting features from images, with their output size and dimensions determined by the filter sizes used in the convolution operations. As illustrated in Figure 4, AlexNet incorporates three different filter sizes—11×11, 5×5, and 3×3—throughout the training process. Each convolutional layer, along with the first two fully connected layers (FC1 and FC2), is followed by a Rectified Linear Unit (ReLU) activation function. This function, often referred to as a ramp function, outputs the input value if it is positive; otherwise, it returns zero. The use of ReLU helps mitigate the well-known "vanishing gradient" problem. Additionally, a 2D Max Pooling operation is applied after the first two and the final convolutional layers. In AlexNet, the stride for max pooling is set to 2×2, as indicated in Figure 4. At the end of the model, there are three fully connected layers. The first two fully connected layers (FC1 and FC2) each have a dimension of 4096, while the final layer has a dimension of 1000, corresponding to the number of output classes. To prevent overfitting, dropout regularization is applied to FC1 and FC2 with a probability of 0.5 (50%). Following the last fully connected layer, the model utilizes a Softmax activation function to transform the outputs into a probability distribution across the 1000 classes. The class with the highest probability is then selected as the predicted category for the given input image in the current iteration.

The dataset in this work was constructed using 200 variable-sized RGB images belong to 5 classes. 40 images were collected from the web (online sources) for each class available in dataset. Classes exactly refer to landmarks which are "10 Gözlü Köprü (ten-eyed arched bridge)", "Malabadi Köprüsü (Malabadi arched bridge)", "4 Ayaklı Minare (four-legged minaret)", "Tarihi Hasanpaşa Hanı (historical Hasanpaşa inn)" and "Keçi Burcu (goat burj)". Table 1 shows sample images in each of five mentioned historical landmarks. They are all variable-sized RGB

images, and further the images were resized into the form that AlexNet can process them, i.e. reshaped as 227x227x3. Class names for ten-eyed arched bridge, Malabadi arched bridge, four-legged minaret, historical Hasanpaşa inn and goat burj were abbreviated as TEB, MAB, FLM, HHI and GB, respectively, for the further parts of this article.

By default, AlexNet is designed to process images with an input size of 227×227. Therefore, before training begins, all images in the dataset are resized to match this required dimension. Traditionally, AlexNet has demonstrated remarkable classification performance on large-scale datasets such as ImageNet [35], which consists of 1000 categories. In the proposed classification approach, transfer learning is utilized by leveraging a pre-trained AlexNet model. This strategy significantly reduces both training time and computational costs while maintaining high classification efficiency.

Table 1. Image samples for each class in dataset (.jpeg files).

TEB	MAB	FLM	HHI	GB
				
				
				
				
				

Transfer learning serves as an effective technique to accelerate model training by utilizing pre-trained networks rather than constructing them from scratch [36]. In this study, the AlexNet architecture was adapted to address a classification problem with five categories by modifying specific network layers to align with the dataset. The fine-tuning process focused on adjusting the pre-trained network, where initial weights had already been assigned. Table 2 presents an overview of the modified layers, their default values, and the updated parameters after fine-tuning. To enhance learning efficiency in the fully connected layers, the weight learning rate factor (WLrnRateFact) and bias learning rate factor (BiasLrnRateFact) were increased. This adjustment ensures that the newly introduced layers learn at a faster rate compared to the pre-trained ones, enabling more effective adaptation to the target classification task.

Table 2. The adjustments highlighting the default values and their updated configurations after fine-tuning.

Model	Layer(s)	Default	Fine-tuning	#Layers	#Conn	#Params
AlexNet	Fully Connected & Output Layer	*OutputSize*: 1000 *WLrnRateFact*:1 *BiasLrnRateFact*:2	*OutputSize*: 10 *WLrnRateFact*:10 *BiasLrnRateFact*:10	25	24	56.8 M

To assess the computational complexity of the network, Table 2 also includes details on the number of layers (#Layers), connections (#Conn), and learnable parameters (#Params). These metrics provide insights into the model's resource requirements and efficiency. For optimization, the Stochastic Gradient Descent with Momentum (SGDM) algorithm was employed, despite the availability of alternative methods such as AdaGrad, RMSProp, and ADAM. The momentum parameter was set to 0.9, while the initial learning rate (LR) was configured as 0.0001 to ensure stable convergence. The dataset used in this study consists of 200 images, evenly distributed across five classes, with each class containing 40 images. No data augmentation was applied. The dataset was randomly split into training and validation sets with a 70% training ratio. A mini-batch size of 28 was used during training, and validation was performed every five iterations to monitor validation accuracy. Since all deep learning experiments were conducted on a local machine, the number of training epochs was set to 50, providing a balance between computational efficiency and model performance. Additionally, L2 regularization with a coefficient of 0.0001 was applied to prevent overfitting by incorporating a penalty term into the loss function. Although the total size of the fine-tuned AlexNet model is approximately 56.8 MB, this does not impose a significant computational burden on modern systems. The model can be deployed easily on mid-range hardware or integrated into mobile applications without major memory constraints.

3. Results

This section includes the results of CNN-based landmark classification model for Diyarbakir province in order to see clear contribution of artificial intelligence to the smart tourism. The main focus of this study is to develop an automatic recognization system using artificial intelligence technology presented in the field of smart tourism. First, totally 200 images (40 for each class/landmark) were collected from online sources to create a balanced dataset for the transfer learning task. Secondly, a pre-defined neural network called as AlexNet was fine-tuned to adopt collected dataset. After that, the network was implemented using the hyper parameters declared in Table 3. The classification system using CNN-based AlexNet deep learning model was proposed to help tourist visiting the Diyarbakir province. The system achieved 97.5% classification accuracy. The results of the study indicate that artificial intelligence technology in smart tourism is met with increasing interest and the use of technology in the tourism sector indicates a significant growth potential. These findings contribute to a better understanding of the role of technological innovations and artificial intelligence in the tourism industry, and encourage local or global researchers to look at the problem with the aspect of technical approach. As a result, this study has made a significant contribution to usage of artificial intelligence technology in the field of smart tourism. The paper highlights that there is a growing interest in artificial intelligence-focused research in smart tourism and the growth potential of this technology in the tourism sector. This work can be considered as an important step towards understanding technological developments in the tourism industry. It is also crucial to show the results of the AlexNet based landmark classification system. The network was trained over an own-generated dataset including 200 images totally. Table 3 shows the hyper parameters and their values used to train the model.

Table 3. The hyper parameters used for AlexNet training.

Hyperparameters	Value
Solver	SGDM
Number of Iterations	480
Initial Learnin Rate	0.0001
Mini Batch Size	10
Number of Epochs	30

After network iterations, CNN-based AlexNet model achieved 97.5% validation accuracy over the test dataset. Training plot and loss plot of training process were shown by Figure 5 and Figure 6, respectively. Also, confusion matrix related to 97.5% test result was visually given in Figure 7.

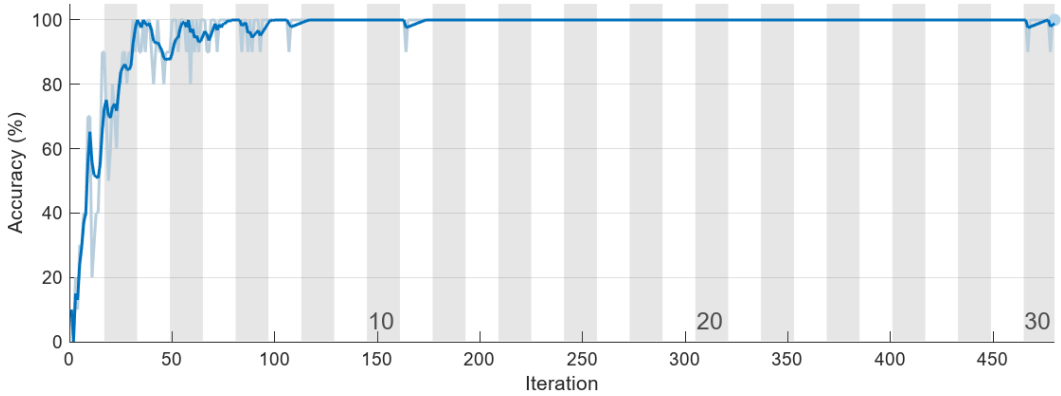


Figure 5. Training plot for the AlexNet-based landmark classification system.

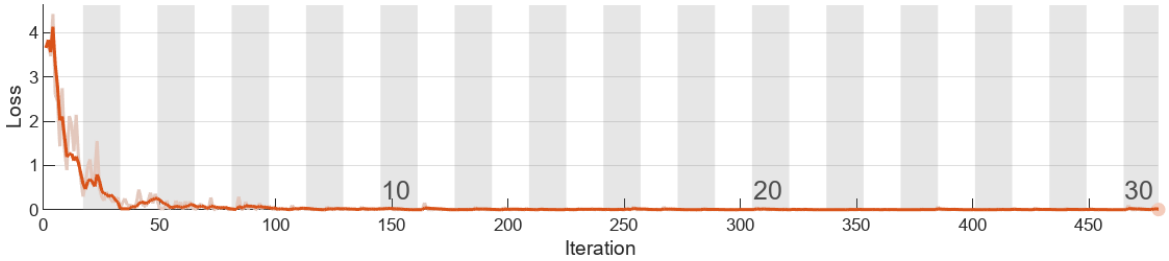


Figure 6. Loss plot for the AlexNet-based landmark classification system.

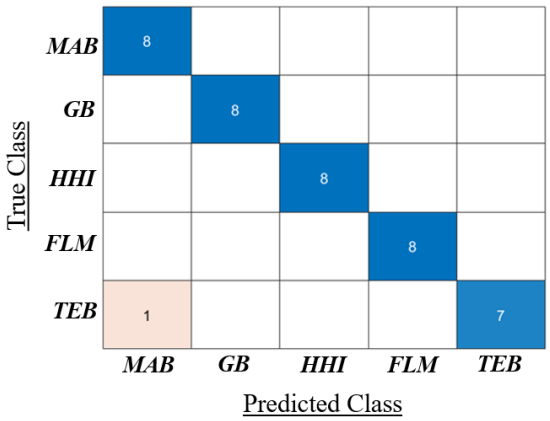


Figure 7. Confusion matrix for the 97.5% classification accuracy.

There are totally 200 images (40 for each class) in dataset. In the test phase, train-test split rate was assigned to %80. This means that 160 (32 for each class) images were used for training while 40 images (8 for each class) were allocated for test of the model. 97.5% test accuracy was reached using only 30 epochs with pre-trained CNN based AlexNet. The results showed how the proposed model with new-generated dataset is successful in classifying landmarks of Diyarbakir province. As one can easily realize from epoch number, the model is as

computationally lightweight as possible. It is important to note that no data augmentation techniques such as rotation, flipping, or cropping were applied during preprocessing. This highlights the raw performance of the model without artificially expanding the training set. Receiver Operating Characteristic (ROC) curve of the proposed landmark classification system was also provided by Figure 8.

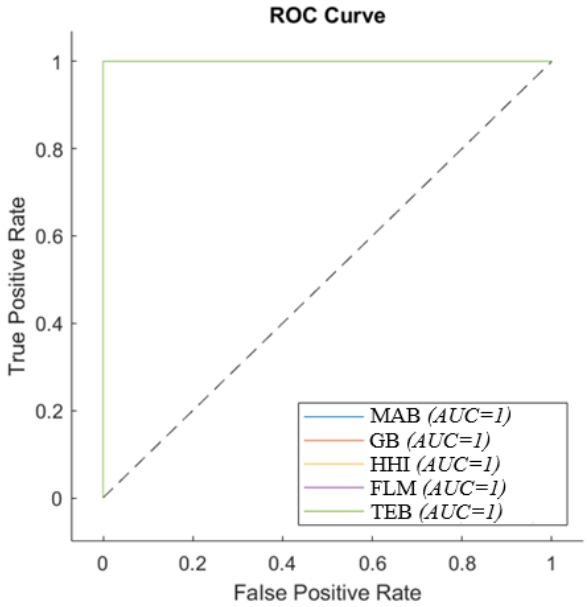


Figure 8. ROC curve of the proposed classification model.

The Receiver Operating Characteristic curve was formed by calculating the True Positive Rate (TPR) and False Positive Rate (FPR) over a range of threshold values, typically chosen at specific intervals. The curve is generated by plotting the TPR against the FPR for each threshold. TPR and FPR were calculated using Equation 4 and Equation 5, respectively, on the basis of confusion matrix given by Figure 9. The ROC curve is generally considered as a cost function for classifiers. The closer Area Under Curve (AUC) value is to 1, the less cost classifier has. As it is inferred from Fig. 8, AUC of all individual class is 1 which points to a well-structured classifier. The ideal prediction method would produce a point located at the upper left corner of the ROC curve, specifically at the coordinate (0, 1). This point indicates perfect performance, with 100% sensitivity (no false negatives) and 100% specificity (no false positives).

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \tag{4}$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \tag{5}$$

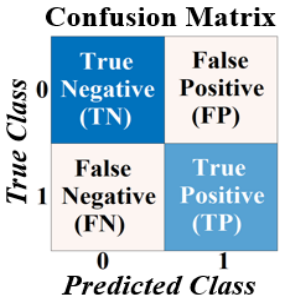


Figure 9. Confusion matrix indicating TN, FP, FN and TP.

4. Discussion

This study focuses on a pre-trained CNN based AlexNet neural network in order to see practical usage of artificial intelligence in smart tourism. The proposed model was created only for Diyarbakir province. But the model can easily be applied to any other city around the world. The results of classification system proved that landmarks in Diyarbakir can be strongly and clearly classified the landmark images with 97.5% accuracy using transfer learning ability of AlexNet. While working with less data can be seen as disadvantages of the proposed model, it also shows lightweightness and robustness of the model. Because in supervised learning approaches of artificial intelligence, more data means more accurate results. So, one can easily increase number of training images and obtain a classification accuracy which is better then 97.5%. Since the AlexNet can be considered as a type of simple/fundamental network among other deep neural networks, the proposed model can be seen as lightweight.

The primary advantage of the proposed model lies in its high accuracy (97.5%) with a relatively small and balanced dataset, demonstrating its robustness and lightweight structure. Additionally, the use of transfer learning significantly reduces training time and computational cost. However, the model has some limitations, including the lack of data augmentation and a small dataset size, which may affect its generalizability to larger-scale implementations. The bigger dataset including more images of Diyarbakir city will of course perform better in classification. The primary advantage of the proposed classification system lies in its reduced computational time for training the CNN model. This efficiency is achieved through the use of transfer learning, which allows the model to converge in just 480 iterations (equivalent to 30 epochs), significantly speeding up the training process. Moreover, confusion matrix shows the class-wise output of CNN-based landmark classification. From Figure 7, one can easily understand that only one image was misclassified among 40 images. This means 39 images were correctly classified in the test set. One image which is belong to TEB class predicted as MAB by the classifier. The image similarity between these two classes can easily be recognized by looking at Table 1. There are water and bridge with nearly the same architecture. Also, having a dataset which was directly collected/gathered from web proved accessibility of the proposed system. One can easily use proposed classification model in real life by directly testing the system with pictures available online.

5. Conclusion & Future Directions

A landmark classification system was proposed using a CNN-based AlexNet classification application in the area of smart tourism. The proposed artificial intelligence model for Diyarbakir province showed 97.5% classification accuracy on own-generated dataset. It is necessary to explore the expanded application areas of artificial intelligence technology in smart tourism and to examine in detail how this technology can enrich the tourism experience. The effects of artificial intelligence-supported tourism applications on consumers' preferences and behaviors need to be analyzed in depth. The effects of artificial intelligence technology on the operational efficiency and competitiveness of tourism businesses need to be comprehensively evaluated. There is also a big need to investigate in detail how smart tourism and artificial intelligence technologies can be integrated with sustainable tourism practices. This of course requires huge dataset for the individual cities. It can be considered as a limitation of the proposed model. One of the limitations of this study is the relatively small dataset, consisting of only 200 images across five landmark classes. Although high classification accuracy was achieved, the small dataset size may affect the model’s ability to generalize to more diverse and larger image sets. Moreover, the lack of a comparative analysis with other deep learning models (e.g., VGG16, ResNet) makes it difficult to benchmark the proposed approach. Future studies can enhance this work by including other models for comparative evaluation and by collecting larger, more representative datasets to better test model scalability and robustness. But even under these limitations, the proposed model achieved 97.5% accuracy. It can be said that the proposed approach turned lack of huge dataset into the advantage obtaining high accuracy with even small dataset. The technical approach of this paper may be carried for any other cities in any other country. This study will be located in an inspiring point where local administrators may develop their own systems for their countries. These suggestions may guide future researchers to conduct more original and in-depth studies in the field of smart tourism and artificial intelligence technologies.

References

[1] Knani M, Echchakoui S, Ladhari R. Artificial intelligence in tourism and hospitality: Bibliometric analysis and research agenda. Int J Hosp Manag, 2022; 107, 103317.

[2] Hott Correa SC, Gosling MdS. Travelers' perception of smart tourism experiences in smart tourism destinations. Tour Plan Dev, 2020; 18, 415–434.

[3] Bhuiyan KH, Jahan I, Zayed NM, Islam KMA, Suyaiya S, Tkachenko O, Nitsenko V. Smart Tourism Ecosystem: A New Dimension toward Sustainable Value Co-Creation. Sustainability, 2022; 14(22): 15043.

[4] Gretzel U, Sigala M, Xiang Z, Koo C. Smart tourism: Foundations and developments. Electron Mark, 2015; 25(3):179-188.

[5] Gössling S. Technology, ICT and tourism: from big data to the big picture. J Sustain Tour, 2020; 29(5): 849–858.

[6] Cui L, Xie G, Qu Y, Gao L, Yang Y. Security and Privacy in Smart Cities: Challenges and Opportunities. IEEE Access, 2018; 6: 46134-46145.

[7] Liu X, Mehraliyev F, Liu C, Schuckert M. The roles of social media in tourists choices of travel components. Tourist Stud, 2020;20(1): 27-48.

[8] Li Y, Hu C, Huang C, Duan L. The concept of smart tourism in the context of tourism information services. Tourism Manag, 2017; 58: 293-300.

[9] Houssein EH, Othman MA, Mohamed WM, Younan M. Internet of Things in Smart Cities: Comprehensive Review, Open Issues, and Challenges. IEEE Internet Things J, 2024; 11(21): 34941-34952.

[10] Cardoso L, Fraga C. Shaping the Future of Destinations: New Clues to Smart Tourism Research from a Neuroscience Methods Approach. Adm Sci, 2024; 14(6):106.

[11] Huang XK, Yuan JZ, Shi MY. Condition and key issues analysis on the smarter tourism construction in China. In International Conference on Multimedia and Signal Processing. 2012, Springer, Berlin, 444-450.

[12] Yoo CW, Goo J, Huang CD, Nam K, Woo M. Improving travel decision support satisfaction with smart tourism technologies: A framework of tourist elaboration likelihood and self-efficacy. Technol Forecast Soc Change. 2017; 123: 330–341.

[13] Shen Y, Wu Y, Song J, Kong X, Pau G. Enabling personalized smart tourism with location-based social networks. PeerJ Comput Sci, 2024; 10:e2375.

[14] Akdu U. Smart Tourism: Issues, Challenges and Opportunities. Emerald Handbook ICT Tourism Hosp, Emerald Publishing Limited, 2020, Leeds, 291-308.

[15] Wu W, Xu C, Zhao M, Li X, Law R. Digital Tourism and Smart Development: State-of-the-Art Review. Sustainability, 2024;16(23):10382.

[16] Rosário AT, Dias JC. Exploring the Landscape of Smart Tourism: A Systematic Bibliometric Review of the Literature of the Internet of Things. Adm Sci, 2024; 14(2): 22.

[17] Zhu W, Zhang L, Li N. Challenges, function changing of government and enterprises in Chinese smart tourism. Inform Commun Technol Tour, 2014; 10;553-564.

[18] Neuhofer B, Buhalis D, Ladkin A. Smart technologies for personalized experiences: a case study in the hospitality domain. Electron Mark, 2015; 25: 243–254.

[19] Gretzel U, Werthner H, Koo C, Lamsfus C. Conceptual foundations for understanding smart tourism ecosystems. Comput Human Behav, 2015; 50:558– 563.

[20] Kontogianni A, Alepis E. Smart tourism: State of the art and literature review for last six years. Array, 2020, 6(100020), 61–69.

[21] Barbierato E, Gatti A. The Challenges of Machine Learning: A Critical Review. Electronics, 2024, 13(2), 416.

[22] Gerlich M. Perceptions and Acceptance of Artificial Intelligence: A Multi-Dimensional Study. Soc Sci, 2023; 12(9): 502.

[23] Korkmaz Y, Boyaci A. Hybrid voice activity detection system based on LSTM and auditory speech features. Biomed Signal Process Control, 2023, Vol:80, 104408.

[24] Korkmaz Y, Boyaci A. Analysis of speaker's gender effects in voice onset time of Turkish stop consonants. 6th International Symposium on Digital Forensic and Security (ISDFS), 2018, Antalya, Turkey.

[25] Korkmaz Y, Boyaci A. Unsupervised and supervised VAD systems using combination of time and frequency domain features. Biomed Signal Process Control, 2020, Vol:61, 102044.

[26] Okwor IA, Hitch G, Hakkim S, Akbar S, Sookhoo D, Kainesie J. Digital Technologies Impact on Healthcare Delivery: A Systematic Review of Artificial Intelligence (AI) and Machine-Learning (ML) Adoption, Challenges, and Opportunities. AI, 2024; 5(4): 1918-1941.

[27] Samara D, Mahnisalis I, Peristeras V. Artificial intelligence and big data in tourism: a systematic literature review. J Hosp Tour Technol, 2020; 11(2): 343-367.

[28] Buhalis D, Sinarta Y. Real-time co-creation and nowness service: lessons from tourism and hospitality. J Travel Tour Mark, 2019; 36(5): 563-582.

[29] Khan N, Khan W, Humayun M, Naz A. Unlocking the Potential: Artificial Intelligence Applications in Sustainable Tourism. The Role of Artificial Intelligence in Regenerative Tourism and Green Destinations, New Perspect Tour Hosp Manag, Emerald Publishing Limited Leeds, 2024, 303-316.

[30] Yersüren S, Özel ÇH. The effect of virtual reality experience quality on destination visit intention and virtual reality travel intention. J Hosp Tour Technol, 2024; 15(1): 70-103.

[31] Han H, Kim SS, Hailu TB, Al-Ansi A, Lee J, Kim JJ. Effects of cognitive, affective and normative drivers of artificial intelligence ChatGPT on continuous use intention. J Hosp Tour Technol, 2024; 15(4): 629-647.
[32] Zhu Y, Zhang RR, Zou Y, Jin D. Investigating customers' responses to artificial intelligence chatbots in online travel agencies: the moderating role of product familiarity. J Hosp Tour Technol, 2023; 14(2): 208-224.
[33] Goodfellow I, Bengio Y, Courville A. Deep Learning, MIT Press, 2016.
[34] Alex K, Sutskever I, Geoffrey EH. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. Adv Neural Inf Process Syst, 2012, pp.1097-1105, 2012.
[35] Deng J, Dong W, Socher R, Li LJ, Li K, Fei-Fei L. ImageNet: A Large-Scale Hierarchical Image Database. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami/USA, 2009, pp.248-255.
[36] Weiss K, Khoshgoftaar TM, Wang D. A survey of transfer learning. J Big Data, 2016, 3(9).
[37] Binrong W, Lin W, Yu-Rong Z. Interpretable tourism demand forecasting with temporal fusion transformers amid COVID-19. Appl Intell, 2023; 53:14493-14514.
[38] Kaibo L, Huwei L, Man S, Junhui Z, Xiaolan L, Li Z. Enhancing scenic recommendation and tour route personalization in tourism using UGC text mining. Appl Intell, 2024; 54:1063-1098.
[39] Jian W, Qing H, Mingshuo C, Yujia L, Hamido F. A group consensus-based travel destination evaluation method with online reviews. Appl Intell, 2022;52:1306-1324.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 737-746, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1700589

Experimental Investigation of the Effect of Raster Angle and Printing Speed on Mechanical Performance and Fracture Behavior of ABS Material Produced by FFF Technology

Mehmet KOPAR[1*], Medeni SÖMER[2], Mahmut Batuhan ÇALIŞKAN[3]

[1] Department of Mechanical and Metal Technologies, Weapon Industry Technician Program, Vocational School, OSTİM Technical University, Ankara, Türkiye

[2] Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies Automotive Technology Program, Vocational School Istanbul Nişantaşı University, Istanbul, Türkiye

[3] Bursa Technology Coordination and R&D Center, Bursa, Türkiye

[*1] mehmet.kopar@ostimteknik.edu.tr, [2] medeni.somer@nisantasi.edu.tr, [3] batuhancaliskan@butekom.org

(Geliş/Received: 16/05/2025; Kabul/Accepted: 02/07/2025)

Abstract: In recent years, developments in polymer material technologies have significantly increased the use of these materials in engineering applications. In this context, acrylonitrile butadiene styrene (ABS) has become a widely preferred thermoplastic in many industries such as automotive, electronics, health and construction due to its lightness, low cost, sustainability and high mechanical strength. Along with traditional production methods, advances in additive manufacturing (AM) technologies offer new opportunities in the production of polymers such as ABS and bring to the agenda the effect of production process parameters on final product performance. Studies in the literature show that production parameters, especially printing speed and raster angle, play a decisive role in mechanical properties. In this study, the effects of printing speed (60, 70 and 80 mm/s) and raster angle (±45° and 0–90°) variables on the mechanical performance of samples produced from ABS material using the FFF method were investigated. As a result of the tensile tests, tensile strengths of 36.26 MPa and 31.77 MPa were obtained for ±45° and 0–90° raster angles at a printing speed of 60 mm/s, respectively. Charpy impact test results revealed that the impact strength increased with the increase in printing speed; 53.88 kJ/m² impact strength was measured at ±45° raster angle and 40.69 kJ/m² impact strength was measured at 0–90° raster angle. SEM analysis showed that the interlayer gaps increased with the increase in printing speed, and this caused a decrease in tensile strength. The findings revealed that the selection of optimum production parameters plays a critical role in improving the mechanical performance of ABS samples. As a result, it was revealed that the printing angle and speed directly affect the mechanical performance of ABS material, and the optimization of these parameters is of critical importance.

Keywords: Acrylonitrile butadiene styrene (ABS), additive manufacturing, raster angle, printing speed, mechanical performance.

FFF Teknolojisi ile Üretilen ABS Malzemenin Mekanik Performansı ve Kırılma Davranışı Üzerinde Raster Açısı ve Baskı Hızının Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Öz: Son yıllarda polimer malzeme teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, bu malzemelerin mühendislik uygulamalarındaki kullanımını önemli ölçüde artırmıştır. Bu kapsamda, akrilonitril bütadien stiren (ABS), hafifliği, düşük maliyeti, sürdürülebilirliği ve yüksek mekanik dayanımı nedeniyle otomotiv, elektronik, sağlık ve yapı gibi birçok endüstride yaygın olarak tercih edilen bir termoplastik olmuştur. Geleneksel üretim yöntemleriyle birlikte, eklemeli imalat teknolojilerinde sağlanan ilerlemeler, ABS gibi polimerlerin üretiminde yeni olanaklar sunmakta ve üretim sürecinin parametrelerinin nihai ürün performansı üzerindeki etkisini gündeme getirmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar, özellikle baskı hızı ve raster açısı gibi üretim parametrelerinin, mekanik özellikler üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Bu çalışmada, FFF yöntemiyle ABS malzemesinden üretilen numunelerin mekanik performansı üzerinde baskı hızı (60, 70 ve 80 mm/sn) ile raster açısı (±45° ve 0–90°) değişkenlerinin etkisi incelenmiştir. Çekme testleri sonucunda, 60 mm/sn baskı hızında ±45° ve 0–90° raster açıları için sırasıyla 36,26 MPa ve 31,77 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir. Charpy darbe testleri sonuçları, baskı hızının artışıyla darbe dayanımının yükseldiğini ortaya koymuş; ±45° raster açısında 53,88 kJ/m², 0–90° raster açısında ise 40,69 kJ/m² darbe dayanımı ölçülmüştür. SEM analizleri, baskı hızındaki artışla birlikte katmanlar arası boşlukların arttığını ve bunun çekme dayanımında düşüşe neden olduğunu göstermiştir. Elde edilen bulgular, optimum üretim parametrelerinin seçiminin, ABS numunelerin mekanik performansını artırmada kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, baskı açısı ve hızının ABS malzemenin mekanik performansını doğrudan etkilediği ve bu parametrelerin optimizasyonunun kritik öneme sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

Anahtar kelimeler: Akrilonitril bütadien stiren (ABS), katmanlı imalat, raster açısı, baskı hızı, mekanik özellikler.

[*] Corresponding author: mehmet.kopar@ostimteknik.edu.tr. ORCID Information: [1] 0000 0001 7347 4192, [2] 0000 0003 4411 3309, [3] 0009 0002 8915 3734

1. Introduction

AM technologies can be classified according to the types of materials and manufacturing processes used. The most common techniques include Fused Deposition Modeling (FFF), Selective Laser Sintering (SLS) and Stereolithography (SLA) [1]. FFF is a method based on the principle of extruding thermoplastic filaments in layers and is preferred for prototyping and small-scale production due to its low cost and ease of use [2-4]. While SLS enables the solidification of powdered materials by laser sintering, SLA produces objects with high precision and smooth surfaces by laser hardening of liquid photopolymers. These technologies offer different advantages based on various criteria such as material selection, surface quality, production speed and cost. For example, FFF offers a low-cost and accessible solution, while SLA and SLS are more suitable for applications that require higher precision and surface quality. Therefore, choosing the right AM technology according to the application requirements is critical for the efficiency and quality of manufacturing processes [5-8].

The disadvantages of FFF, such as structure size limitations and heterogeneity in mechanical properties, require additional solutions to produce large-scale parts [9]. In this context, hybrid approaches such as Large Area Additive Manufacturing (BAAM) have expanded its use in industrial applications by increasing the capability of conventional FFF [10]. Furthermore, mechanical locking and adhesive bonding techniques improve part integration, while methods such as thermal welding are used to repair or join parts. Recent studies highlight the future industrial potential of FFF with innovative applications such as multi-material use and functional graded structures [11].

The parameters of the model to be produced in FFF play an important role in ensuring the quality and control of the parts to be produced as a result. In the same way that the size of the filler in material extrusion steps affects the stress levels, the design choice and mechanical properties of the filler in 3D printing, which are not usually considered, can significantly affect the materials to be used and the production input costs [12]. Filling has an important role in 3D printing. Depending on the pattern and density of the design of the product to be produced, strength, flexibility and weight are determined.

Significant advances have been made in multiple and diverse materials for use in FFF technology. Materials such as Poly-lactic Acid (PLA), Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG), Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Thermoplastic Polyurethane (TPU), Polycarbonate (PC) are among the frequently preferred in this technology [13, 14]. Especially ABS is a commercial thermoplastic polymer widely used in industrial applications due to its advantages such as high impact strength, recyclability and heat resistance [15-18].

To optimize the performance of the processes, the effects of critical process variables such as layer thickness, extrusion temperature, filler density, print speed and cooling parameters on build time, dimensional accuracy, mechanical properties and surface roughness of parts have been studied in detail in the literature [4, 19]. For example, Dizon et al. reported that 50% filler density in PLA and ABS materials critically reduces mechanical strength, whereas 100% filler density increases energy consumption [4]. Tlegenov et al. [19] emphasized that extrusion temperature directly affects surface roughness and temperatures above 220°C provide smoother surfaces on ABS parts. Optimization of these parameters is critical for both material efficiency and product quality. Cristian et al. [20] conducted research in which the mechanical behavior of 3D printed samples with different microstructure configurations were analyzed using ABS polymer in the FFF-based manufacturing process. In the study conducted by Bolat et al. [21], the effects of different post-processing types (heat treatment and water absorption) on mechanical properties of PETG, PLA and ABS samples produced with 3D printing method were evaluated together with the layer thickness factor. It was determined that both tensile and impact strength increased in heat-treated samples; the highest tensile strength was obtained in heat-treated PLA, and the highest impact strength was obtained in heat-treated PETG. It was observed that water absorption increased the mass of the samples and caused an increase in tensile elongation values. While the decrease in layer thickness improved the tensile properties, it decreased the impact strength. In the damage analyses, it was reported that linear cracks in impact samples turned into zigzag-shaped separation lines after heat treatment, and in tensile samples, the damage area changed depending on the material properties and production stability. In their study, Bolat et al. [22] investigated the impact resistance of PLA samples produced by the melt deposition modeling (FDM) method; the effects of infill density and notch angle on impact behavior were evaluated. As a result of the Charpy V-notch tests, it was seen that the increase in infill density positively affected the impact resistance, and the notch geometry was decisive on the fracture mechanism. Damage analyzes performed at micro and macro scales revealed that the deformation was concentrated in the notch region and surface roughness directly affected the impact performance.

In the study conducted by Bolat et al. [23], the effect of filament type and layer height on the dimensional accuracy of tensile test samples produced with PLA, PET-G and ABS materials using the 3D printing method was examined in detail. Dimensional deviations were evaluated in samples produced at different layer heights (0.2 mm,

0.3 mm and 0.4 mm), and a decrease in accuracy was observed, especially at high layer thicknesses. Surface roughness measurements showed that surface quality is sensitive to both material type and printing parameters.

Ergene et al. [24] investigated the hardness, tensile strength and impact behavior of PET-G samples produced with the EYM method at different ambient temperatures. It was observed that as the layer height increased, the hardness values of the samples increased, while the tensile strength decreased. Especially in impact tests, it was determined that the amount of energy absorption was more directly related to the layer height rather than the temperature. In addition, in microscopic examinations, no crack formation was observed in samples with a layer height of 0.4 mm, while cracks extending from the center to the corners were detected in samples produced with thinner layers.

Sezer et al. [25] developed a 6 mm carbon fiber-reinforced ABS composite with the objective of enhancing the mechanical performance of components produced through the FFF technique. Tensile tests on specimens fabricated using this composite filament demonstrated that carbon fiber reinforcement significantly increased material strength; however, higher reinforcement ratios adversely impacted flexibility and manufacturability in the production process. The study also indicated that the printing pattern has a statistically significant effect on mechanical behaviour. In an experimental investigation, Bacak et al. [26] comprehensively examined the mechanical performance of PLA polymer specimens manufactured via FFF by varying printing speeds, temperature settings, and fill density parameters. Similarly, Karaman et al. [27] produced ABS-plus polymer specimens with different infill ratios and orientation angles using an additive manufacturing technique and subjected them to tensile testing. Their results showed that both the infill ratio and orientation angle changes had a substantial influence on the mechanical characteristics of the samples. Solmaz et al. [28] analysed the mechanical performance of cellular sandwich composites produced through additive manufacturing under compressive loads. Their findings revealed that, when ABS and PLA thermoplastic filaments were used to fabricate honeycomb structures with three different cell sizes and heights, PLA-based specimens exhibited superior printing resistance, energy absorption capacity, and structural stability compared to their ABS counterparts.

In a study by Hanon et al. [29], the mechanical properties of tensile test specimens produced from PLA and high temperature resistant PLA (HT-PLA) materials by additive manufacturing (FFF) technique were comparatively investigated under different printing parameters.

When literature studies are examined, it has been determined that determining the mechanical properties of the materials and obtaining maximum performance from the material used have an important effect in determining the suitability of the manufactured parts for working conditions. It is known that the printing parameters in the production of thermoplastic materials used in the melt deposition method, one of the additive manufacturing methods, have a significant effect on the mechanical properties of the materials. Because in productions that do not have optimum production parameters, undesirable situations such as non-adhesion and slippage between layers occur. In this study, it is aimed to investigate the effects of printing speeds and raster angles on ABS samples in the additive manufacturing method. For this purpose, test samples were produced with a 3D printer at two different raster angles (±45°, 0-90°) and three different speeds (60 mm/s, 70 mm/s and 80 mm/s). Five samples were produced for each combination and tensile tests were carried out at a speed of 2 mm/min. Mechanical tests were performed to determine the surface roughness, tensile strength and impact strength of the manufactured samples and the surfaces of the broken samples were examined using a raster electron microscope (SEM). The process of this completed study was carried out in the process steps given in Figure 1.

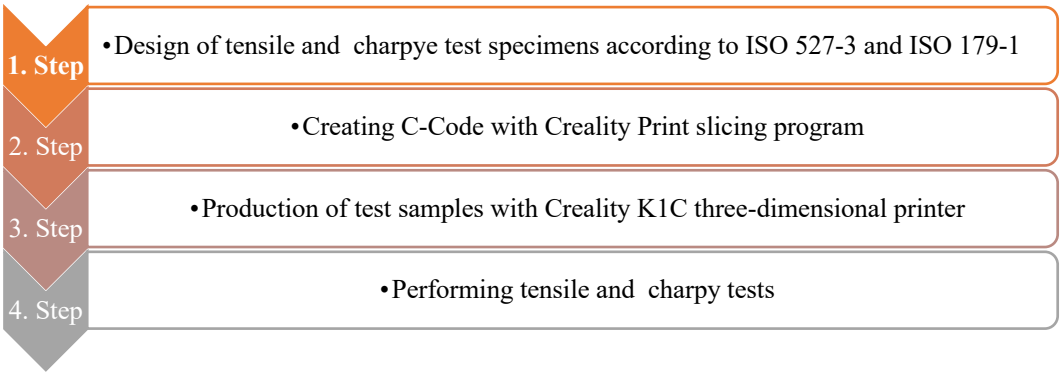


Figure 1. Flowchart of the study.

2. Material and Method

2.1. Study Process and Used Equipment

In this study, the effect of printing speed and raster angles on the mechanical properties of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) material was investigated using the melt deposition method (MDM). Within the scope of the study, tensile and charpy test specimens were produced using the Creality K1C three-dimensional printer shown in Figure 2 using ESUN brand ABS filaments whose mechanical properties are given in Table 1.

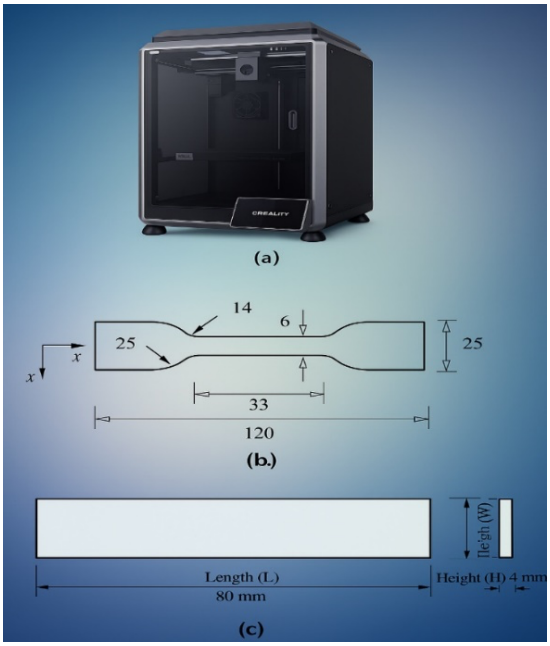


Figure 2. a.) three-dimensional printer used in the study, **b.)** ISO 527-3 tensile test specimen dimensions, **c.)** ISO 179-1 charpy test specimen dimensions.

Table 1. Mechanical properties of ABS material.

Material	Density (g/cm^3)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	charpy impact resistance (kJ/m^2)	Print temperature (°C)	Print area temperature (°C)
ABS	1.04	43	22	29	230-270	95-110

2.2. G-Code Generation

In this study, as shown in Figure 2, the tensile and charpy impact test specimens were first designed according to ISO 527-3 and ISO 179-1 test standards using a computer-aided design program. Then, two different G-codes with ±45° and 0-90° raster angles were created using the Creality Print slicing program to produce the test specimens with a 3D printer. The C-codes generated were transferred to the three-dimensional printer.

2.3. Printing Process

Then, tensile and charpy impact test specimens with ±45° and 0-90° raster angles at 250°C print temperature, 100°C print area temperature and 60, 70 and 80 mm/sec speeds were produced using Creality K1C brand printer as given in Table 2. Five specimens were produced with different raster angles and printing speeds.

Table 2. Production parameters of ABS material.

Setting	Parameter	Units	Value
Infill	Infill Pattern		Line
	Raster Angle	°	±45/ 0-90
Nozzle	Nozzle Diameter	mm	0,4
	Compatible Material Diameter	mm	1,75
Material	Filament Type		ABS
	Filament Color		White
	Additive Manufacturing Technology		FDM
	Printing Temperature	°C	250
	Plate Temperature	°C	100
Speed	Printing Speed	mm/s	60, 70, 80
Cooling	Fan Speed	%	20

2.4. Test Equipment

After the completion of the productions, SHIMADZU-AGS/X branded tensile tester, TESTFORM branded charpy impact tester, HITACHI-TM3030 PLUS branded device was used to obtain SEM images to examine the rupture behavior following the tensile test. To determine the surface roughness values of the tensile test samples, Mitutoyo Surftest SJ-310 device was used. Measurements were carried out in two different directions, perpendicular to the tensile direction (vertical) and parallel to the tensile direction (horizontal), from the middle part of the sample and at least three repetitions were taken in each direction. Thus, the surface roughness was evaluated to represent the effect of production traces in different directions.

3. Results and Discussions

Sammaiah P. et al. [30] and Kuruoglu Y. et al. [31] demonstrated in their investigations that elevated printing speeds during specimen production led to greater surface roughness. These observations are supported by figure 4, which presents the roughness measurements of tensile test samples fabricated with +45° and 0-90° raster angles at different speeds, measured in both vertical and horizontal orientations. Examination of the roughness data from samples produced with both +45° and 0-90° raster angles revealed consistently lower surface roughness values in the horizontal direction compared to vertical measurements, with both orientations showing increased roughness at higher printing speeds. This phenomenon was attributed to the formation of interlayer gaps caused by faster deposition rates and variations in the geometric configuration of deposited layers, as clearly visible in the SEM micrographs provided in Figure 7.

Figure 5 presents the tensile test results for specimens manufactured with ±45° and 0-90° raster angles. Analysis of the data in Figure 5 reveals that among the ±45° raster angle specimens, those printed at 60 mm/s exhibited the maximum tensile strength of 36.26 MPa. The tensile tests showed the 60 mm/s specimens had approximately 1.23% and 4% greater strength compared to those produced at 70 mm/s and 80 mm/s respectively. For specimens with 0-90° raster angles, the highest tensile strength of 31.77 MPa was similarly achieved at 60 mm/s printing speed, with the 70 mm/s and 80 mm/s specimens demonstrating approximately 2.25% and 12% lower strength values correspondingly. These findings align with the research of Kopar et al. [32] and Ansari et al. [33], which confirmed that variations in both raster angles and printing speeds substantially influence material tensile strength.

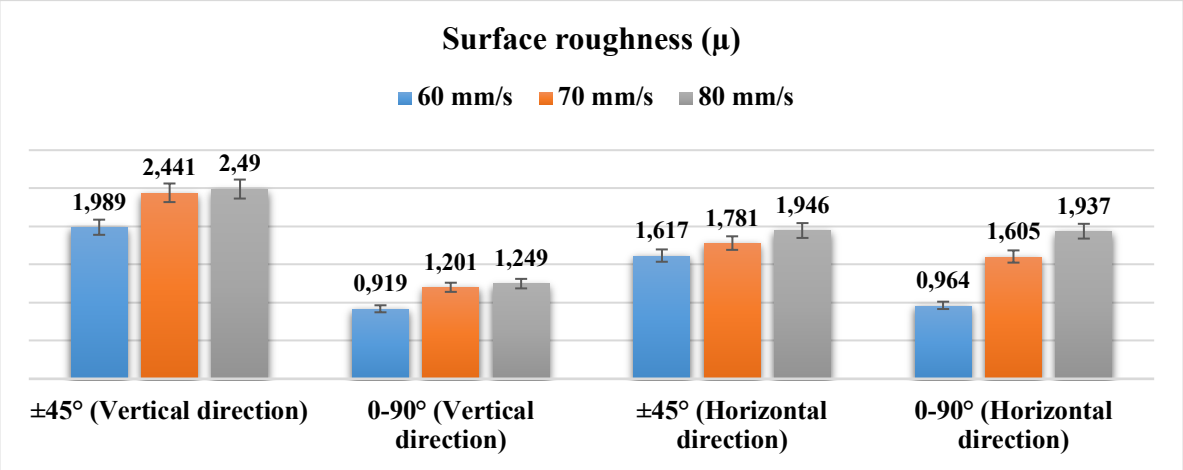


Figure 4. Surface roughness results

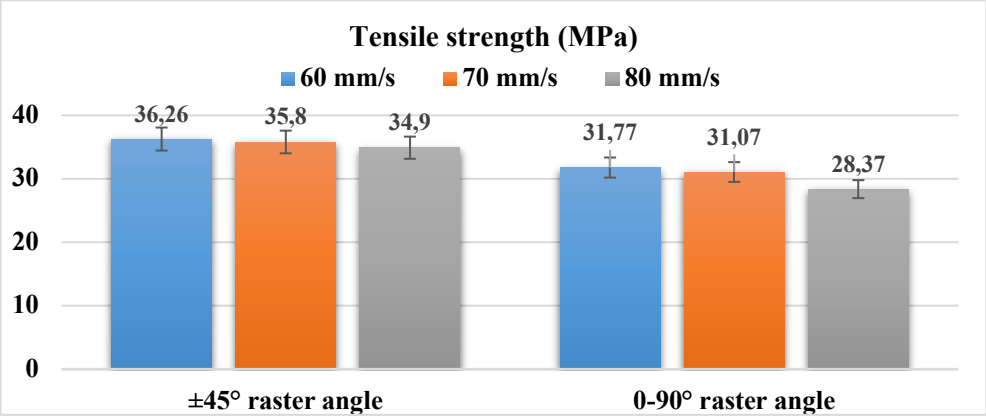


Figure 5. Tensile strength results

Figure 6 displays the Charpy impact test results for specimens manufactured with different raster angles. Examination of figure 6 indicates that among the ±45° raster angle specimens, the sample printed at 60 mm/s demonstrated the highest impact strength of approximately 53.88 kJ/m². Similarly, for specimens with 0-90° raster angles, the maximum impact strength was also achieved at 60 mm/s printing speed. Comparative analysis of the test results between ±45° and 0-90° specimens revealed that the ±45° samples exhibited superior energy absorption capacity. This difference is primarily attributed to the greater brittleness of 0-90° specimens compared to the ±45° specimens, which tend to flex under applied forces.

When the charpy test results obtained were examined, it was determined that with the increase in the printing speed, a decrease occurred just as in the tensile test results. Therefore, because of both the tensile test and the charpy test, it was determined that the optimum printing speed was 60 mm/s.

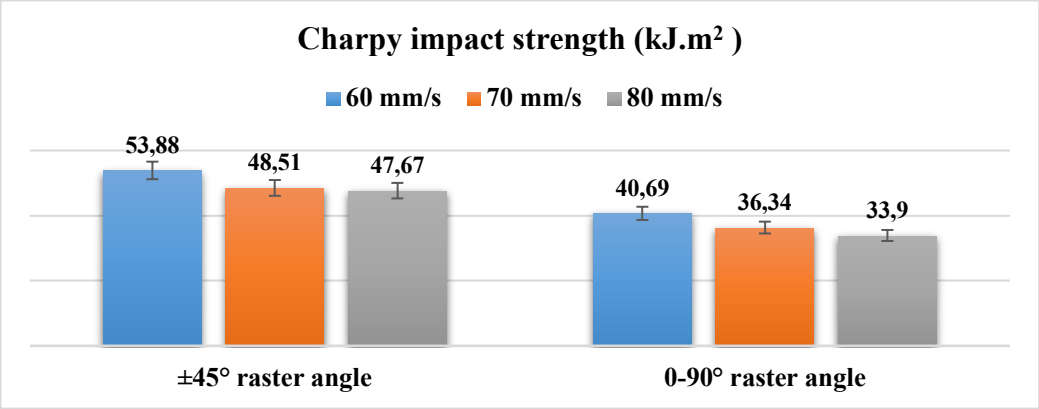


Figure 6. Charpy impact test results.

Figure 7 presents SEM micrographs of fracture surfaces from tensile-tested specimens. Analysis of the ±45° and 0-90° raster angle specimens in figure 7 reveals that interfacial voids became more pronounced with increasing printing speed. These voids were particularly evident in specimens fabricated with 0-90° raster angles. The study found that both printing speed and raster angle significantly affected tensile strength through void formation, with optimal mechanical performance achieved in specimens printed at 60 mm/s.

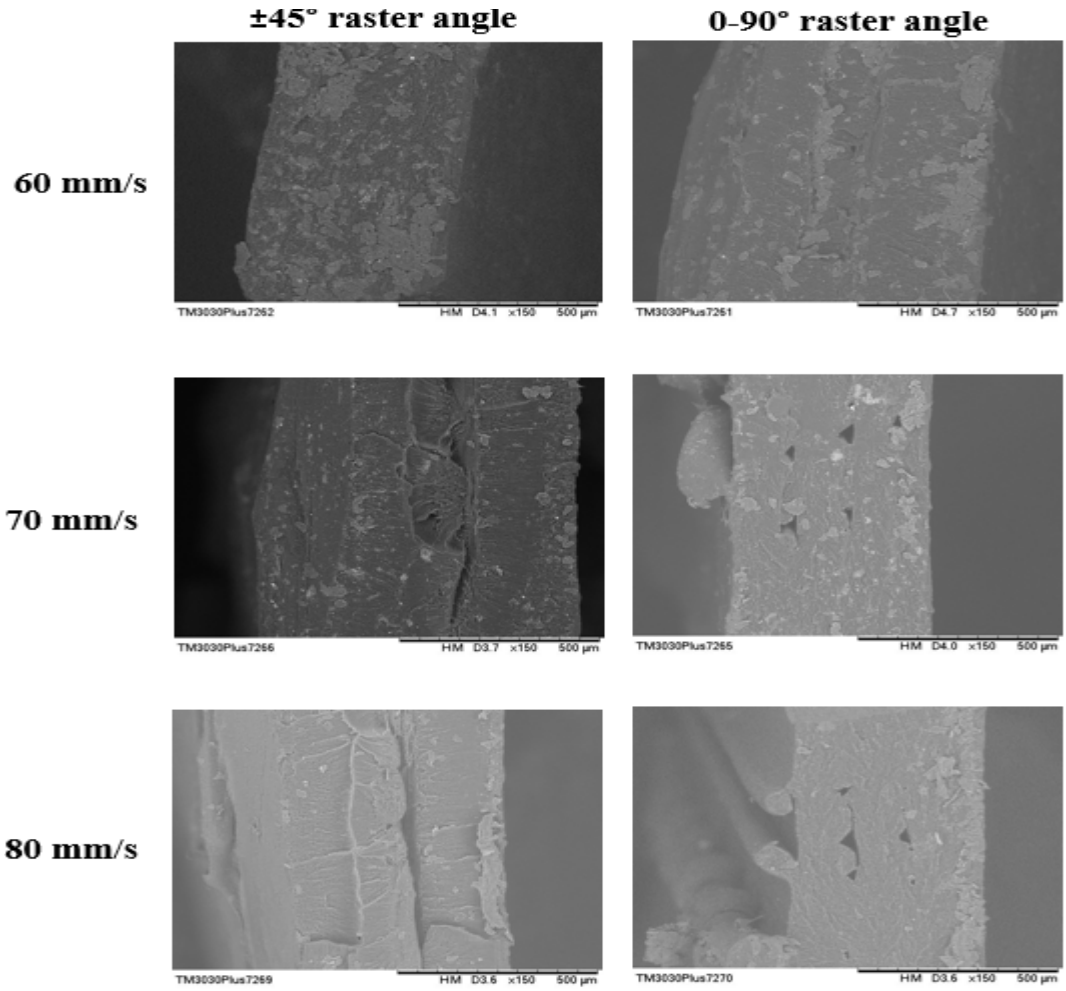


Figure 7. Examination of SEM images.

4. Discussion

The findings of this study reveal that the mechanical properties of FFF-manufactured parts are directly influenced by printing parameters. In particular, the raster angle plays a critical role in determining the load transfer direction. Specimens produced with a ±45° raster angle exhibited higher tensile strength and ductility, which can be attributed to the more balanced load distribution enabled by the diagonal filament alignment. In contrast, the 0-90° specimens showed more brittle behavior, likely due to crack propagation occurring parallel to the filament direction. Similarly, in notched impact tests, specimens with a ±45° raster angle were better at absorbing impact energy, whereas 0-90° specimens demonstrated lower impact resistance.

An increase in printing speed negatively affected surface roughness and interfacial bonding, leading to a decline in both tensile strength and impact resistance. At higher speeds, insufficient bonding time between filaments caused the formation of voids—also observed in SEM images—which contributed to stress concentration points. This effect was particularly pronounced in specimens printed at 80 mm/s, where a notable drop in mechanical performance was recorded. Therefore, for applications requiring high strength and ductility, medium-range printing speeds and a ±45° raster angle are recommended to optimize interlayer adhesion and ensure structural integrity.

5. Conclusion

As a result of the experimental evaluation conducted on specimens fabricated with ±45° and 0-90° printing angles, it was empirically established that surface roughness measurements exhibited an incremental progression corresponding to elevated printing velocities across both ±45° and 0-90° angular configurations.

- Concerning tensile strength characteristics, experimental determinations confirmed that specimens manufactured with ±45° raster orientations at 60 mm/sec printing velocity demonstrated superior tensile performance metrics.
- When comparatively assessed for ductility attributes after tensile examinations, analytical observations substantiated that ±45° raster specimens manifested significantly greater elongation percentages relative to 0-90° specimens. Consequently, these findings established that raster angular configurations exert a direct governing influence upon material elongation properties.
- Following tensile fracture evaluations, it was conclusively ascertained that specimens produced with ±45° raster angles displayed progressive ductile failure mechanisms, whereas specimens fabricated with 0-90° raster angles exhibited instantaneous brittle fracture phenomena.
- Pursuant to notched impact experimentation, analytical determinations verified that ±45° raster specimens absorbed substantially heightened impact energy magnitudes, with impact resistance demonstrating a positive correlation with incremental printing velocity augmentation.
- After notched impact assessments, it was methodologically confirmed that 0-90° raster specimens exhibited diminished impact resilience compared to ±45° specimens, with discernible degradation in impact performance corresponding to accelerated printing velocities.
- Through SEM fractographic examination, microscopic observations documented progressive enlargement of interfacial discontinuities during layer coalescence processes at heightened printing velocities, with empirical evidence indicating these interfacial defects detrimentally influence tensile integrity.

This study was carried out to investigate the effects on the mechanical properties of samples produced with different raster angles and printing speeds using the FFF method. In particular, the role of printing parameters on the tensile strength, ductility, impact resistance and surface quality of the materials was investigated in detail. The findings showed that raster angles and printing speeds are determinants of mechanical performance. Our recommendation for future studies is to comprehensively examine the effects of different filament materials, layer thicknesses and infill densities in addition to these parameters. In addition, investigating the potential improving effects of post-printing heat treatments or surface treatment techniques on mechanical properties will contribute to the optimization of production processes. Thus, the production of more durable and application-friendly parts will become possible.

6. Acknowledgements

We would like to express our sincere gratitude to the Bursa Technology Coordination and R&D Centre (BUTEKOM) for their infrastructure, technical support, and valuable contributions during the execution of the experimental processes in this study.

References

[1] Szymczyk-Ziółkowska P, Łabowska MB, Detyna J, Michalak I, Gruber P. A review of fabrication polymer scaffolds for biomedical applications using additive manufacturing techniques. Biocybern Biomed Eng 2020; 40(2): 624-638.
[2] Turner BN, Strong R, Gold SA. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. Rapid Prototyp J 2014; 20(3): 192-204.
[3] Mohamed OA, Masood SH, Bhowmik JL. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. Adv Manuf 2015; 3(1): 42-53.
[4] Dizon JRC, Espera AH, Chen Q, Advincula RC. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. Addit Manuf 2018; 20: 44-67.
[5] Gibson I, Rosen D, Stucker B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2015.
[6] Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Compos Part B Eng 2018; 143: 172-196.
[7] Bourell D, Leu M, Rosen D. Materials for additive manufacturing. CIRP Ann 2017; 66(2): 659-681.
[8] Singh R, Singh S, Kumar R, Ahuja IPS, Penna R, Feo L. Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview. Mater Today Proc 2020; 26: 3058-3070.
[9] Li G, Zhao Y, Gao S, Ding S, Guo Y. Effect of ultrasonic vibration on mechanical properties of 3D printing non-crystalline and semi-crystalline polymers. Materials 2018; 11(5): 826.
[10] Pragana JPM, Sampaio RFV, Bragança IMF, Silva CMA, Martins PAF. Hybrid metal additive manufacturing: A state–of–the-art review. Adv Ind Manuf Eng 2021; 2: 100032.
[11] Hasanov S, Kantaros A, Piromalis D, Foteinopoulos P. Review on additive manufacturing of multi-material parts: Progress and challenges. Preprints 2021.
[12] Weiss KP, Bagrets N, Lange C, Goldacker W, Wohlgemuth J. Thermal and mechanical properties of selected 3D printed thermoplastics in the cryogenic temperature regime. IOP Conf Ser Mater Sci Eng 2015; 102: 012022.
[13] Ziemian C, Sharma M, Ziemian S. Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling. In: Mechanical Engineering. London, UK: IntechOpen, 2012.
[14] Lanzotti A, Grasso M, Staiano G, Martorelli M. The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. Rapid Prototyp J 2015; 21(5): 604-617.
[15] Durgun I, Ertan R. Experimental investigation of FFF process for improvement of mechanical properties and production cost. Rapid Prototyp J 2014; 20(3): 228-235.
[16] Gao W, Zhang Y, Ramanujan D, Ramani K, Chen Y, Williams CB, et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. Comput Aided Des 2015; 69: 65-89.
[17] Akçay Ö, Arı A. Effect of infill density and infill pattern on mechanical properties of 3D-printed PLA produced by FFF. Firat Univ J Eng Sci 2025; 37(1): 1.
[18] Güneş M, Çayıroğlu İ. Mechanical behaviour of 3D printed parts with continuous steel wire reinforcement. El-Cezeri 2022; 9(1): 1.
[19] Tlegenov Y, Hong GS, Lu WF. Nozzle condition monitoring in 3D printing. Robot Comput Integr Manuf 2018; 54: 45-55.
[20] Dudescu C, Racz L. Effects of raster orientation, infill rate and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed materials. Acta Univ Cibiniensis Tech Ser 2018; 69(1): 23-30.
[21] Bolat Ç, Ergene B, Ispartalı H. A comparative analysis of the effect of post production treatments and layer thickness on tensile and impact properties of additively manufactured polymers. Int Polym Process 2023; 38(1).
[22] Bolat Ç, Ergene B. An experimental effort on impact properties of polylactic acid samples manufactured by additive manufacturing. Duzce Univ J Sci Technol 2023; 11(2).
[23] Bolat Ç, Ergene B. An investigation on dimensional accuracy of 3D printed PLA, PET-G and ABS samples with different layer heights. Cukurova Univ J Fac Eng 2022; 37: 449-458.
[24] Ergene B, Ispartalı H, Karakılınç U. Impact behavior of PET-G parts produced by fused deposition modelling depending on layer height and test temperature. J Fac Eng Archit Gazi Univ 2023; 38: 1345-1359.
[25] Sezer HK, Eren O, Börklü HR, Özdemir V. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites by fused deposition modelling: effect of fiber content and process parameters on mechanical properties. J Fac Eng Archit Gazi Univ 2019; 34(2).

[26] Bacak S, Özkavak HV, Sofu MM. Comparison of mechanical properties of 3D-printed specimens manufactured via FFF with various inner geometries. J Inst Sci Technol 2021; 11(2).
[27] Karaman E, Çolak O. Effect of Different Process Parameters on Mechanical Properties in Fused Deposition Modeling. ALKU Fen Bilim Derg 2019; 1(2).
[28] Solmaz MY, Çelik E. Investigation of Compression Test Performances of Honeycomb Sandwich Composites Produced by 3D Printing Method. Firat Univ J Eng Sci 2018; 30(1).
[29] Hanon MM, Marczis R, Zsidai L. Influence of the 3D printing process settings on tensile strength of PLA and HT-PLA. Period Polytech Mech Eng 2021; 65(1).
[30] Sammaiah P, Rushmamanisha K, Praveenadevi N, Reddy IR. The influence of process parameters on the surface roughness of the 3D printed part in FFF process. IOP Conf Ser Mater Sci Eng 2020; 981: 042021.
[31] Kuruoğlu Y, Akgün M, Demir H. Modelling and Optimization of Surface Roughness and Tensile Strength of ABS, PLA and PETG Samples Produced by FDM Method. Int J 3D Print Technol Digit Ind 2022; 6(3).
[32] Kopar M, Yildiz AR. Experimental investigation of mechanical properties of PLA, ABS, and PETG 3-d printing materials using fused deposition modeling technique. Mater Test 2023; 65(12): 1795-1804.
[33] Ansari AA, Kamil M. Effect of print speed and extrusion temperature on properties of 3D printed PLA using fused deposition modeling process. Mater Today Proc 2021; 45: 5462-5468.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 747-761, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1705620

Vakum Karbürlenmiş Toz Metalurjisi Çelik Parçalara Uygulanan Çift Faz Isıl işleminin Mekanik Özelliklere Etkisi

Özer PAMUK[1*]
[1] Nanoteknoloji Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Uşak Üniversitesi, Uşak, Türkiye
*[1]ozer.pamuk@usak.edu.tr

(Geliş/Received: 25/05/2025; Kabul/Accepted: 01/07/2025)

Öz: Bu çalışmada, vakum karbürlenmiş Toz Metalurjisi (T/M) çelik parçalara uygulanan Çift Faz (ÇF) ısıl işleminin mekanik özelliklere etkileri araştırılmıştır. Üretilen T/M parçalara Sinterleme (S), Normalizasyon (N), Vakum Karbürleme (VK), ÇF ve Temperleme (T) ısıl işlemlerinden oluşan farklı ısıl işlemler uygulanmıştır. Devamında mekanik testler ve karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sadece S ısıl işlemi uygulanan N1 numunesi 103,3 $HV_{1,0}$ sertlik, 189 MPa üç nokta eğme dayanımı ve %3 üniform uzama sergilemiştir. VK ısıl işlemi parçaların mekanik özelliklerini geliştirmiştir. S+N+VK ısıl işlemleri uygulanan N2 numunesi 537,31 $HV_{1,0}$ yüzey, 182,13 $HV_{1,0}$ merkez sertlikleri ve 243 MPa üç nokta eğme dayanımı sergilemiş ancak süneklik göstermemiştir. Vakum karbürlenmiş numunelerin yüzey bölgelerinde martenzit, merkez bölgelerinde ise ferrit + martenzit fazlarından oluşan çift faz mikroyapısı ÇF ısıl işlemi ile başarılı bir şekilde üretilmiştir. Martenzit fazının mikroyapıda homojen bir dağılım sergilediği tespit edilmiştir. ÇF ısıl işlemi numunelerin mekanik özelliklerini arttırmış ancak sünekliklerini azaltmıştır. ÇF ısıl işlemi sonrası en yüksek mekanik özellikler, S+N+VK+ÇF750 ısıl işlemleri uygulanan N6 numunesinde gerçekleşmiştir. Bu numune, 572,28 $HV_{1,0}$ yüzey sertliği, 196,90 $HV_{1,0}$ merkez sertliği ve 319 MPa üç nokta eğme dayanımı sergilemiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen veriler neticesinde yüzey karbürlenmiş T/M çelik parçalara uygulanan ÇF ısıl işlemi ile mekanik özelliklerin geliştirildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Vakum karbürleme, toz metalurjisi, sinterleme, çift faz, mekanik özellikler.

Effect of Dual Phase Heat Treatment on Mechanical Properties of Vacuum Carburized Powder Metallurgy Steel Parts

Abstract: In this study, the effects of Dual Phase (DP) heat treatment applied to vacuum carburized Powder Metallurgy (PM) steel parts on mechanical properties were investigated. Different heat treatments consisting of Sintering (S), Normalization (N), Vacuum Carburizing (VC), DP and Tempering (T) heat treatments were applied to the produced PM parts. Subsequently, mechanical tests and characterization studies were carried out. N1 sample, which was applied only S heat treatment, exhibited 103.3 $HV_{1.0}$ hardness, 189 MPa three-point bending strength and 3% uniform elongation. VC heat treatments improved the mechanical properties of the parts. N2 sample, which was applied to S+N+VC heat treatment, exhibited surface hardness of 537.31 $HV_{1.0}$, center hardness of 182.13 $HV_{1.0}$ and three-point bending strength of 243 MPa, but did not show ductility. A dual phase microstructure consisting of martensite in the surface regions and ferrite + martensite phases in the central regions of vacuum carbide-treated samples was successfully produced with DP heat treatment. It was determined that the martensite phase exhibited a homogeneous distribution in the microstructure. DP heat treatment increased the mechanical properties of the samples but decreased their ductility. The highest mechanical properties after the DP heat treatment were obtained in the N6 sample, which was applied to the S+N+VC+DP750 heat treatment process. This sample exhibited a surface hardness of 572.28 $HV_{1.0}$, center hardness of 196.90 $HV_{1.0}$ and three-point bending strength of 319 MPa. As a result of the data obtained within the scope of this study, it was concluded that the mechanical properties were improved with the DP heat treatment applied to the surface carburized PM steel parts.

Key words: Vacuum carburizing, powder metallurgy, sintering, dual phase, mechanical properties.

1. Giriş

Fe-C alaşımı olan çelikler mühendislik malzemeleri içerisinde oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle yüksek aşınma direncinin yanında yüksek tokluğun istendiği parçaların imalatında sementasyon çelikleri önemli yer tutmaktadır. Çelikler, içerdikleri alaşım elementlerin yanı sıra uygulanan ısıl işlemlerle farklı özellik kombinasyonlarının elde edilmesine olanak tanımaktadırlar [1]. Sert yüzey ve tok çekirdek bölgesi elde etmede çeşitli yüzey sertleştirme yöntemleri kullanılmaktadır. Düşük karbon içeriğine sahip (<%0,2C) çeliklerin yüzey sertleştirme işlemlerinde kullanılan yöntemlerden birisi de sementasyon işlemidir. Endüstriyel uygulamalarda

* Sorumlu yazar: ozer.pamuk@usak.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: *[1] 0000-0001-6810-8526

genel olarak bu işlem karbon atomlarının karbürleme atmosferinden parçaya doğru difüzyonunun daha kolay gerçekleşebildiği 850-950°C sıcaklık aralığında katı, sıvı ve gaz ortamlarında gerçekleştirilmektedir. Son dönemlerde, sementasyon işleminde Düşük Basınç Vakum Karbürleme (DBVK) olarak bilinen ve 1050ºC sıcaklığa kadar karbürleme işlemine olanak tanıyan yeni tekniklerin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bu yöntem yüksek karbürleme sıcaklığı sayesinde kısa işlem süreleri, oksijensiz karbürleme ortamı, homojen karbürleme derinliği, üretilen parçalarda düşük çarpılma oranı ile yüksek mekanik ve aşınma özelliklerin elde edilmesi gibi avantajlar sunmaktadır [2-4]. Yüksek çekme dayanımı ve süneklik özelliklerin karşılanmasında çift-fazlı çelikler önemli bir alternatiftir. Çift-faz (ÇF) terimi bu çeliklerin mikroyapılarında bulunan ferrit ve martenzit fazlarından kaynaklanmakta, yumuşak ferrit fazı malzemeye süneklik, sert martenzit fazı ise mukavemet kazandırmaktadır [5]. ÇF ısıl işlemi kritik tavlama bölgesi olan ferrit + östenit ($\alpha+\gamma$) bölgesinde ısıtma sonrası hızlı soğutma ile yapıda bulunan östenitin martenzite dönüşmesi şeklinde gerçekleşmektedir.

Toz metalurjisi (T/M) yöntemi, küçük ve karmaşık şekilli parçaların seri üretim imkânı, hassas boyut toleransı ve yüksek yüzey kalitesi, bütün malzeme kombinasyonları için uygulanabilirlik, minimum malzeme kayıpları, düşük üretim maliyetleri gibi bir dizi avantajları sunmaktadır [6-10]. T/M yöntemi ile parça üretimi, tozların üretimi, karıştırma, presleme, Sinterleme (S) ve S sonrası ısıl işlemler ile varsa ürün şekillendirme işlemlerinden oluşan bir dizi üretim süreçlerini içermektedir [11,12]. Parça imalatında T/M tekniklerinin kullanımı doğal kaynakların verimli kullanımına ve ekolojik dengenin korunmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Bu yöntem, son dönemlerde konvansiyonel üretim yöntemlerinin yerini alan bir teknik haline gelmektedir [13]. Otomotiv sektörü T/M yöntemi ile parça üretiminde %60'lık bir orana sahiptir [14]. Özellikle otomobil sektöründe yüksek performans gerektiren dişli, piston kolu, yatak, transmisyon mili gibi parçaların üretimi için tercih edilmektedir [15]. Bu yöntem, havacılık, inşaat, denizcilik, enerji sektörleri, spor malzemeleri ile köprülerden mobilyalara kadar değişik mühendislik uygulamaları için parça imalatında kullanılmaktadır [16,17]. Son yıllarda Fe esaslı parçaların üretiminde geleneksel yöntemlere alternatif olarak T/M yöntemi ile üretim büyük bir gelişim göstermiştir. Ancak sinterlenmiş T/M çelik parçalar sahip oldukları gözenekli yapıları ve yumuşak matris fazı nedeniyle düşük mekanik özelliklere sahiptirler [18]. Ayrıca heterojen mikroyapı dağılımı da T/M çeliklerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir [19]. T/M çelik parçaların üretiminde ön-alaşımlı çelik tozların kullanımı ile homojen mikroyapı dağılımı elde edilmekte ve mekanik özellikler geliştirilebilmektedir. Diğer taraftan T/M çelik parçalara uygulanan ilave ısıl işlemlerle mekanik özellikler geliştirilebilmektedir [20]. Yüksek aşınma direncinin istendiği uygulamalar için yüksek yüzey sertliğine sahip T/M parçaların üretiminde yüzey karbürleme ısıl işlemi son dönemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [21]. Bu yöntem, parçaların yüzey karbon konsantrasyonu arttırarak su verme sonrası yüzeyde sert martenzit fazının elde edilmesi prensibine dayanmaktadır. Martenzitin sertliği karbon içeriği arttıkça artmaktadır. Mikroyapıda sert martenzitin varlığı parçalarda yüksek sertlik avantajları sağlarken düşük süneklik dezavantajlarını da beraberinde getirmektedir. Özellikle yüksek poroziteye sahip T/M parçaların mikro gözeneklerinde teşekkül eden çatlakların sert martenzit fazında hızla ilerlemeleri nedeniyle bu parçaların mekanik özellikleri olumsuz etkilenmektedir. Literatürde, çatlakların sert martenzit fazında hızla ilerlediği ve kırılganlığı arttırdığı belirtilmektedir [22, 23]. Yüzey karbürlenmiş T/M çeliklere ÇF ısıl işlemi uygulayarak mekanik özellikleri geliştirilebilir. Literatürde çift-fazlı T/M çeliklerin yüksek mukavemet-tokluk kombinasyonlarına sahip olduğu ve ferrit + perlit mikroyapısına sahip T/M çeliklerden daha üstün özellikler sergilediği belirtilmektedir [19].

Literatürde, yüzeyi karbürlenmiş AISI 8620 çeliğine ÇF ısıl işlemi uygulanmış ve yüksek yüzey sertliğinin yanında yüksek mukavemet-süneklik değerlerinin elde edildiği rapor edilmiştir [24]. Yine literatürde, ön-alaşımlı T/M parçalara uygulanan S + vakum karbürleme (VK) ve doğrudan VK'nin karbürlenebilirlik ve mekanik özellikler üzerine etkileri araştırılmıştır [25]. Ancak, yüzey karbürlenmiş T/M çeliklere uygulanan ÇF ısıl işleminin parçaların yüzey sertliği ve mekanik özelliklere etkilerini gösteren çalışmalara literatürde rastlanmamıştır. Diğer taraftan literatürde çift-fazlı T/M çelik üretimine yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Mahesh vd. saf demir, karbon, manganez, silisyum ve vanadyum içeren elementel tozlardan çift-fazlı çelik üretilebilirliği ile mikroyapısal ve mekanik özellikleri incelemişlerdir [26]. Güral ve Tekeli, atomize demir tozu + grafit tozu (ağırlıkça %0,3-%0,5) kompozisyonuna sahip parçalara ÇF ısıl işlemi uygulayarak mikroyapısal karakterizasyonlarını incelemişlerdir [27]. Güral vd. atomize demir tozu + grafit tozu (ağırlıkça %0,3) karışımına sahip parçalara farklı kritik tavlama sıcaklıklarda uygulanan ÇF ısıl işlemlerinin çekme özelliklerine etkilerini incelemişlerdir [19]. Yapılan bu çalışmalarda, çift-fazlı T/M çelik parçaların üretiminde element tozlar kullanılmış ve difüzyon bağlama alaşımlama yöntemi (karışık alaşımlı tozlar) tercih edilmiştir. Dolayısıyla, literatürde çift-fazlı T/M çelik parçalarının üretiminde ön-alaşımlı tozların kullanımına ilişkin çalışma eksikliği de bulunmaktadır.

Bu çalışmada, vakum karbürlenmiş ön-alaşımlı T/M çelik parçalar farklı kritik tavlama sıcaklıklarında uygulanan ÇF ısıl işleminin sertlik ve mekanik özelliklere etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda, DIN 21NiCrMo2

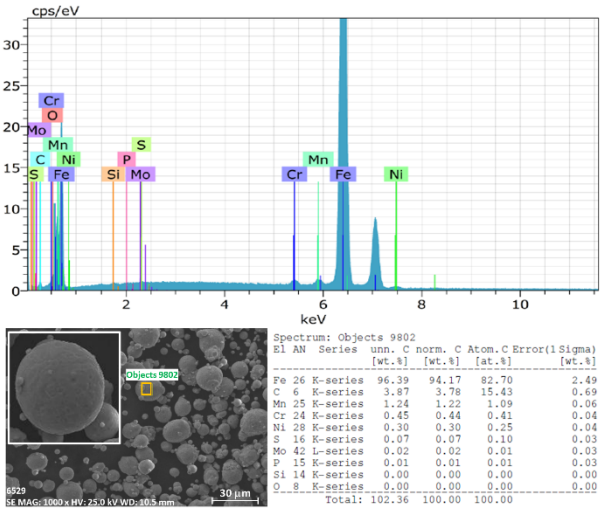
sementasyon çeliği ile benzer kompozisyona sahip ön-alaşımlı çelik tozlardan üretilen parçalara S, Normalizasyon (N), VK, ÇF, Temperleme (T) ısıl işlemlerinden oluşan farklı ısıl işlem süreçleri uygulanmıştır. Böylelikle, vakum karbürlenmiş ön-alaşımlı T/M çelik parçalara uygulanan ÇF ısıl işlemi ile yüksek yüzey sertliğin yanında mekanik özelliklerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede, yüzey karbürlenmiş T/M çeliklere ÇF ısıl işleminin uygulanabilirliğinin yanında T/M parça üretiminde ön-alaşımlı çelik tozların kullanımına ilişkin literatürdeki araştırma eksikliğin giderilmesi ve bundan sonra yapılacak benzer araştırmalar için referans teşkil etmesi amaçlanmıştır. Diğer taraftan, endüstride geniş bir kullanım alanına sahip DIN 21NiCrMo2 çeliği ile benzer kompozisyona sahip ön-alaşımlı çelik tozlar kullanılarak DIN 21NiCrMo2 çeliğine alternatif bir T/M üretim yöntemi sunulması hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışma kapsamında Otai Special Steel (OTAI) firması tarafında gaz atomizasyon tekniği ile üretilmiş ön-alaşımlı çelik tozları kullanılmıştır. Tozlara ait üretici firma tarafından gerçekleştirilen kimyasal analiz, parçacık boyutu ve yoğunluk bilgileri Tablo 1'de yer almaktadır. Tozlara ait Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) görüntüsü ile Element Dağılım Spektrometresi (EDS) analiz sonuçlar Şekil 1'de verilmiştir. Yapılan FESEM görüntü analizlerinden tozların küresel forma sahip oldukları ve gaz atomizasyon tekniği ile üretildiklerini, EDS analizleri sonuçlarından ise ön-alaşımlı çelik tozların kimyasal içeriğinin üretici firmaya ait kimyasal içerik ve DIN 21NiCrMo2 sementasyon çeliğinin kimyasal içeriği ile benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır.

Tablo 1. Ön-alaşımlı çelik tozlara ait analiz sonuçları.

Üretici firma kimyasal kompozisyon değerleri (% Ağırlık)									
C	P	S	O	Ni	Cr	Si	Mn	Mo	Fe
0,184	0,01	0,003	0,097	0,55	0,52	0,16	0,74	0,19	97,546
Ortalama parçacık boyutu (µm)									
45									
Görünür yoğunluk (g/cm^3)									
4,24									



Şekil 1. Ön-alaşımlı çelik tozlara ait FESEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları.

Ön-alaşımlı çelik tozlara ait kritik tavlama sıcaklıkları (Ac_1 - Ac_3) Eşitlik 1 ve 2'ye göre hesaplanmıştır [28]. OES analiz sonuçlarına göre hesaplanan kritik tavlama sıcaklıkları Ac_1 için 720°C ve Ac_3 için ise 888°C olarak belirlenmiştir.

$$A_{c1} = 723 - 10{,}7\ (\%Mn) - 16{,}9(\%Ni) + 29{,}1(\%Si) + 16{,}9(\%Cr) + 290(\%As) + 6{,}39(\%W) \quad (1)$$
$$A_{c1} = 723 - 10{,}7\ (0{,}808) - 16{,}9(0{,}570) + 29{,}1(0{,}187) + 16{,}9(0{,}562) + 290(0) + 6{,}39(0)$$

$$A_{c1} = 720°C$$
$$A_{c3} = 910 - 203(\%C)^{\frac{1}{2}} - 15{,}2(\%Ni) + 44{,}7(\%Si) + 104(\%V) + 31{,}5(\%Mo) + 13{,}1(\%W) \quad (2)$$
$$A_{c3} = 910 - 203(0{,}147)^{\frac{1}{2}} - 15{,}2(0{,}570) + 44{,}7(0{,}187) + 104(0{,}017) + 31{,}5(0{,}215) + 13{,}1(0)$$
$$A_{c3} = 888°C$$

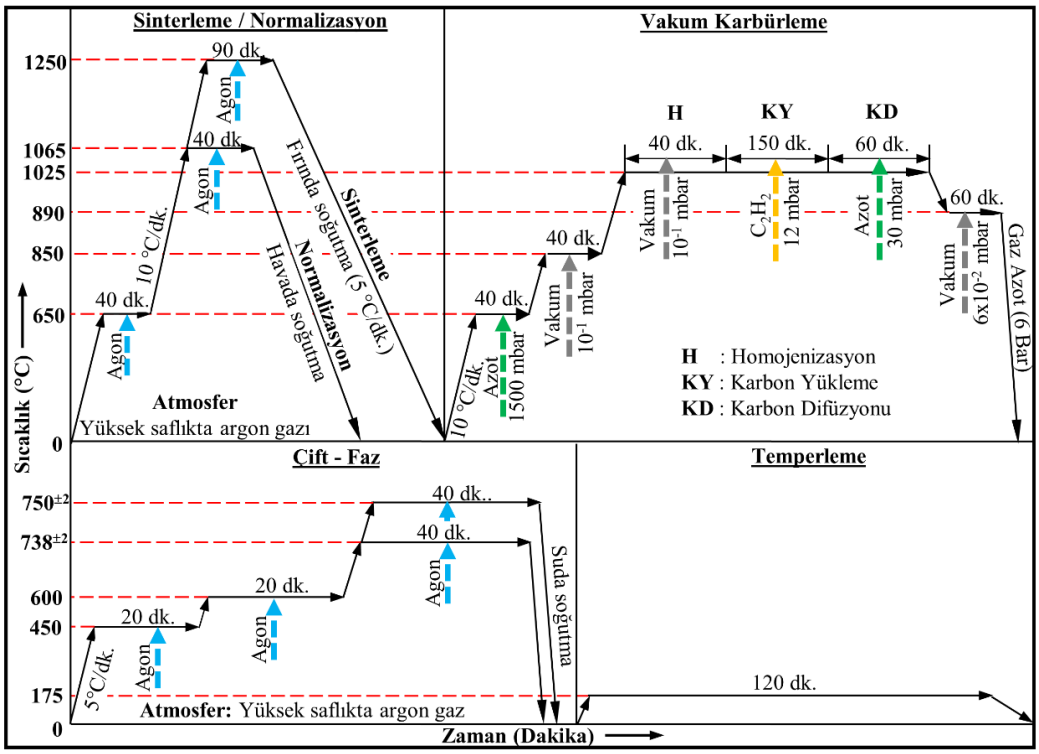
Numune üretimleri için, ağırlıkça %99,2 ön-alaşımlı çelik tozu ile %0,8 Çinko Sterat tozu 0,0001 ölçme hassasiyetine sahip hassas terazide tartılmış ve üç boyutlu karıştırıcıda 46 d/d karıştırma hızında 90 dk. süre ile karıştırılmıştır. Hazırlanan toz karışımları M2 yüksek hız çeliğinden (HSS) yapılan demonte kalıp içerisinde 200 MPa basınç altında soğuk olarak ön presleme işlemine tabi tutulmuştur. Ön presleme sonrası tozlar kalıp içerisinde yüksek saflıkta argon gazı atmosferinde 600°C'de 30 dakika tavlanmış ve akabinde 300 MPa basınç altında Ilık Presleme (IP) işlemine tabi tutulmuştur. IP sırasında ön-alaşımlı tozların tavlama işleminde sıcaklık kontrolü kalıp merkezine yerleştirilen termokupl vasıtasıyla takip edilmiştir. IP sonrası her seriden iki adet olacak şekilde ASTM/B528-16 standardına uygun üç nokta eğme test numune üretimleri geçekleştirilmiştir. Üretilen numuneler Sinterleme (S), Normalizasyon (N), Vakum Karbürleme (VK), Çift Faz (ÇF) ve Temperleme (T) ısıl işlemlerinden oluşan farklı ısıl işlem süreçlerinin uygulanması için yedi ayrı gruba ayrılmıştır. Tablo 2 numunelere uygulanan ısıl işlem bilgileri ve numune kodlama biçimleri göstermektedir.

Tablo 2. Uygulanan ısıl işlemler ve kodlama biçimleri.

Numune no	**Uygulanan ısıl işlemler**	**Numune kodu**
1	Sinterleme	**N1**
2	Sinterleme + Normalizasyon + Vakum Karbürleme	**N2**
3	Sinterleme + Normalizasyon + Vakum Karbürleme + Temperleme	**N3**
4	Sinterleme + Normalizasyon + Vakum Karbürleme + Çift Faz ($738^{\pm2}$)	**N4**
5	Sinterleme + Normalizasyon + Vakum Karbürleme + Çift Faz ($738^{\pm2}$) + Temperleme	**N5**
6	Sinterleme + Normalizasyon + Vakum Karbürleme + Çift faz ($750^{\pm2}$)	**N6**
7	Sinterleme + Normalizasyon + Vakum Karbürleme + Çift Faz ($750^{\pm2}$) + Temperleme	**N7**
Isıl işlem proses bilgileri		
Isıl işlem	**Sıcaklık (°C)**	**Süre (Dakika)**
Sinterleme	1250	90
Normalizasyon	1065	40
Vakum Karbürleme	1025	250
Çift Faz	$738^{\pm2}/750^{\pm2}$	40
Temperleme	175	120

S ısıl işlemi yüksek saflıktaki argon gazı atmosferinde 1250°C sıcaklık ve 90 dk. Süre de gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sırasında 10°C/dk. fırın ısıtma hızı belirlenmiş, fırın içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımı elde etmek ve ani sıcaklık değişimlerinin özellikle düşük ham mukavemete sahip numunelerde oluşturabileceği çarpılmaların ve buna bağlı oluşabilecek çatlakların önüne geçmek için 650°C sıcaklıkta 40 dk. bekletilmiştir. S ısıl işlemi sonrası numunelere N ısıl işlemi uygulanmıştır. N ısıl işlemi 10°C/dk. fırın ısıtma hızında, 650°C'de 40 dk. bekleme, 1065°C'de 40 dk. tavlam ve akabinde havada soğutma şeklinde gerçekleştirilmiştir. VK ısıl işlemi, 10^{-1} mbar. vakum altında 1025°C'de 40 dk. homojenleştirme, 12 mbar. basınca sahip asetilen (C_2H_2) ortamında 150 dk. karbon yükleme ve 30 mbar. basınca sahip azot ortamında 60 dk. karbon difüzyonu proseslerinden oluşan toplam 250 dk. sürede gerçekleştirilmiştir. Devamında numuneler $6x10^{-2}$ mbar vakum altında 890°C'de 60 dk. bekletilmiş ve 6 bar basınca sahip gaz azot ile soğutulmuştur. VK ısıl işlemi sırasında fırın ısıtma hızı 10°C/dk. olarak belirlenmiş ve 650°C'de 40 dk., 850°C'de 40 dk. beklendikten sonra karbürleme sıcaklığına ulaşılmıştır. ÇF ısıl işlemleri farklı martenzit hacim oranlarının (MHO) elde edilmesi için 738°C ve 750°C kritik tavlama sıcaklıklarda 40 dk. tavlama ve devamında suda soğutma şeklinde gerçekleştirilmiştir. ÇF ısıl işlemleri sırasında fırın ısıtma hızı 5°C/dk. olarak belirlenmiş ve sıcaklık değişimlerinin numunelerin kesitleri boyunca neden olabileceği gerilim farklılaşmalarını azaltmak ve fırın içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımı elde etmek için 450°C ve 600°C sıcaklıklarda 20 dk. bekletme uygulanmıştır. N ve ÇF ısıl işlemleri yüksek saflıktaki argon gazı atmosferinde gerçekleştirilmiş ve fırın içi sıcaklık kontrolü referans numunesine bağlanan termokupl vasıtasıyla takip edilmiştir. Temperleme (T) işlemleri 175°C sıcak ve 120 dk. Süre de gerçekleştirilmiştir. Numunelere uygulanan ısıl işlemlere ait proses bilgileri Şekil 2'de grafik olarak verilmektedir.

IP, S ve VK ısıl işlemleri sonrası numunelerin yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. S ve VK ısıl işlemleri sonrası Optik Emisyon Spektrometresi (OES) analizleri uygulanarak numunelerin kimyasal içerikleri belirlenmiştir. Farklı ısıl işlem proseslerinin numunelerin mekanik özelliklerine etkilerini belirlenmek için 100 kN kapasiteli çekme-basma test cihazında 1 mm/dk. ilerleme hızında ASTM B528-16 standardına uygun olarak üç nokta eğme testleri uygulanmıştır. Mikroyapı incelemeleri için numuneler enine kesitlerinde tel erozyon yöntemiyle kesilerek kalıplama, zımparalama, parlatma ve dağlama aşamalarından oluşan metalografi işlemleri uygulanmıştır. Zımparalama işlemleri 240, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2500 numara zımparalar kabadan inceye doğru kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Parlatma işlemleri ise sırasıyla 6 ve 3 µm keçe ve elmas süspansiyon kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemleri %97 Etil alkol + %3 Nitrik asit konsantrasyonuna sahip dağlama solüsyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi tamamlanan numunelerin mikroyapı incelemeleri için Optik Mikroskop (OM) ile 10x, 20x, 50x, 100x büyütmelerde mikroyapı görüntüleri alınmıştır. OM görüntüleri üzerinde çizgisel kesişme metodu kullanılarak faz hacim oranları ve fazların parçacık boyutları belirlenmiştir. Uygulana ısıl işlemlere bağlı olarak mikroyapıda oluşan fazların belirlenmesi için numunelere X-ray diffraction (XRD) analizleri uygulanmıştır. XRD analizleri oda sıcaklığında Cu Ka radyasyonu (λ:1,054059 A°) ile 0,01 adım, 5/dk. hız ve 20°-120° arasında gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme testi uygulanan numunelerinin kırık yüzey incelemeleri, EDS ile donatılmış FESEM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygulanan ısıl işlemlerin numunelerin sertlik profilleri üzerine etkilerinin belirlemek amacıyla numunelerin yüzeyinden başlayarak kesitleri boyunca mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri Vickers mikrosertlik ölçüm cihazında her ölçü mesafesinde beş farklı noktadan olacak şekilde 0, 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1400, 2000, 3000, 4500 µm mesafelerde 1000 g yük 10 saniye süre ile uygulanarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Isıl işlem grafikleri.

3. Bulgular ve tartışma

3.1. Kimyasal analiz ve yoğunluk incelemeleri

Ön-alaşımlı çelik tozlarından üretilen numunelere uygulanan S ve VK ısıl işlemleri sonrasında kimyasal içeriklerini belirlemek için uygulanan OES analiz sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. S ve VK ısıl işlemleri sonrası numune kimyasal analiz sonuçları.

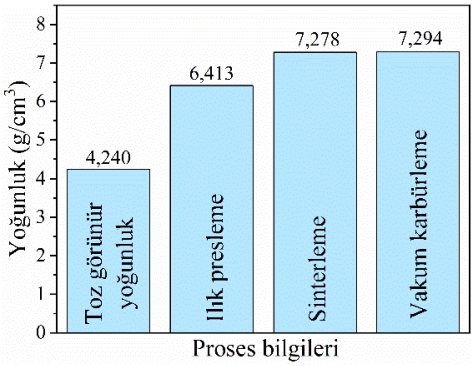
S ısıl işlemi sonrası OES analiz sonuçları (% Ağr.)												
C	P	S	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Nb	N	Fe
0,147	0,013	0,003	0,187	0,808	0,562	0,215	0,570	0,031	0,017	0,011	0,101	97,335
VK ısıl işlemi sonrası OES analiz sonuçları (% Ağr.)												
C	P	S	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Nb	N	Fe
1,174	0,015	0,02	0,191	0,790	0,549	0,210	0,578	0,035	0,017	0,011	0,153	96,257

OES analizleri sonrası N1 numunesinin kimyasal içeriği ön-alaşımlı toz üretici firmanın analiz sonuçları ile benzerlik göstermektedir. Karbon oranı %0,147 ile toz üretici firma kimyasal analiz sonuçlarının bir miktar altında kalmakla beraber aralarındaki fark çok azdır. Ayrıca eser miktarda Cu, V ve Nb elementleri ile bir miktar N varlığı tespit edilmiştir. VK ısıl işlemi sonrası yüzey karbon konsantrasyonu %1,174 C olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca VK ısıl işlem ile azot içeriğinde bir miktar artış meydana geldiği görülmüştür.

Ön-alaşımlı çelik tozların görünür yoğunluk değerleri ve bu tozlardan üretilen parçaların uygulana proseslere bağlı olarak elde edilen yoğunluk değerleri Tablo 4'te grafikleri ise Şekil 3'te verilmiştir. DIN 21NiCrMo2 sementasyon çeliği ile benzer kompozisyona sahip ön-alaşımlı çelik tozlar 4,24 g/cm^3 görünür yoğunluk değerine sahiptir. Ön-alaşımlı çelik tozlardan parça üretimleri IP yöntemi ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. IP işlemi sonrası numunelerde 6,413 g/cm^3 yoğunluk, %82,16 bağıl yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Yoğunluktaki bu artış, IP sırasında 600°C sıcaklıkta 30 dk. tavlanan ön-alaşımlı tozların sertliklerini kaybederek şekillendirilebilirliklerinin artmasına ve toz temas yüzey alanı artışına atfedilmektedir. Ön-alaşımlı tozlar sahip oldukları yüksek sertlikleri nedeniyle zayıf sıkıştırılabilirlik sergilemektedirler [29]. S ısıl işlemi sonrası yoğunluk 7,278 g/cm^3, bağıl yoğunluk ise %93,24 seviyesine yükselmiştir. Yoğunluktaki bu artış, 1250°C sinterleme sıcaklığının neden olduğu yüksek difüzyon hızın ve 90 dk. uzun sinterleme süresinin neden olduğu difüzyon miktarındaki artış neticesinde toz taneleri arasındaki yüksek boyunlaşma miktarına atfedilmektedir. Ayrıca IP sırasında elde edilen yüksek toz temas yüzey alanı difüzyon hızını arttırarak toz taneleri arasında boyunlaşma miktarına katkı sağladığı düşünülmektedir. Literatürde, S sıcaklığı ve süresindeki artışın toz taneleri arasındaki boyunlaşma miktarının ve bağıl yoğunluğu arttırdığı belirtilmektedir [16,30,31]. Diğer taraftan, toz komponentlerin sinterlenme düzeyleri toz taneleri arsındaki boyunlaşma miktarının büyüklüğü ve yoğunluk artışına bağlıdır [32]. N + VK ısıl işlemleri sonrasında numunelerde 7,294 g/cm^3 yoğunluk ve %93,49 bağıl yoğunluk değeri elde edilmiştir. 1065°C sıcaklıkta uygulanan N ısıl işlemi ve 1025°C sıcaklıkta uygulanan VK ısıl işlemleri sonrası toz taneleri arasındaki bağ oluşumunda bir miktar artış meydana geldiği düşünülmektedir. Ancak toz taneleri arasındaki bağ oluşumundaki bu artışın VK ısıl işlemi sonrası numunelerde meydana gelen yüksek karbon içeriği nedeniyle yoğunluk artışına çok az yansıdığı düşünülmektedir.

Tablo 4. Uygulanan proseslere bağlı olarak numune yoğunluk değerleri.

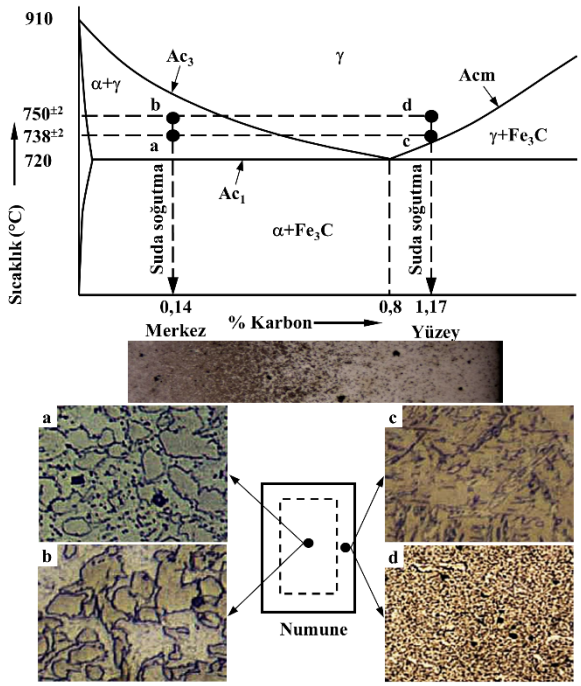
Proses	**Yoğunluk (g/cm^3)**	**Bağıl yoğunluk (%)**
Teorik yoğunluk	7,805	-
Görünür yoğunluk	4,24	-
Ilık Presleme	6,413	82,16
Sinterleme	7,278	93,24
Vakum karbürleme	7,294	93,49



Şekil 3. Toz ve numune yoğunlukları.

3.2. Mikroyapı incelemeleri

Şekil 4'te ön-alaşımlı çelik tozlardan üretilen ve vakum karbürleme işlemi gerçekleştirilen numunelere uygulanan ÇF ısıl işlemi sırasında numunelerin yüzey ve merkez bölgelerindeki mikroyapı oluşumlarının Fe-Fe_3C denge diyagramı üzerinde gösterimi verilmektedir. ÇF ısıl işlemi sırasında numunelerin yüksek karbon içeriğine sahip karbürlenmiş yüzey bölgeleri tamamen östenit (γ) faz bölgesinde bulunurken (Şekil 4 c-d), düşük karbon içeriğine sahip merkez bölgeleri ise kritik tavlama bölgesi olan ferrit + östenit (α+γ) faz bölgesinde bulunmaktadır (Şekil 4 a-b). ÇF ısıl işlem sonrası yapılan su verme işlemi ile östenitin martenzite dönüşümü neticesinde karbürlenmiş yüzey bölgelerinde martenzit ve merkez bölgelerinde ise ferrit + martenzit fazlarından oluşan ÇF mikroyapısı elde edilmektedir.



Şekil 4. Yüzey karbürlenmiş numunelere uygulana çift faz ısıl işlemi ile yüzey ve merkez bölgelerinde mikroyapı oluşumu.

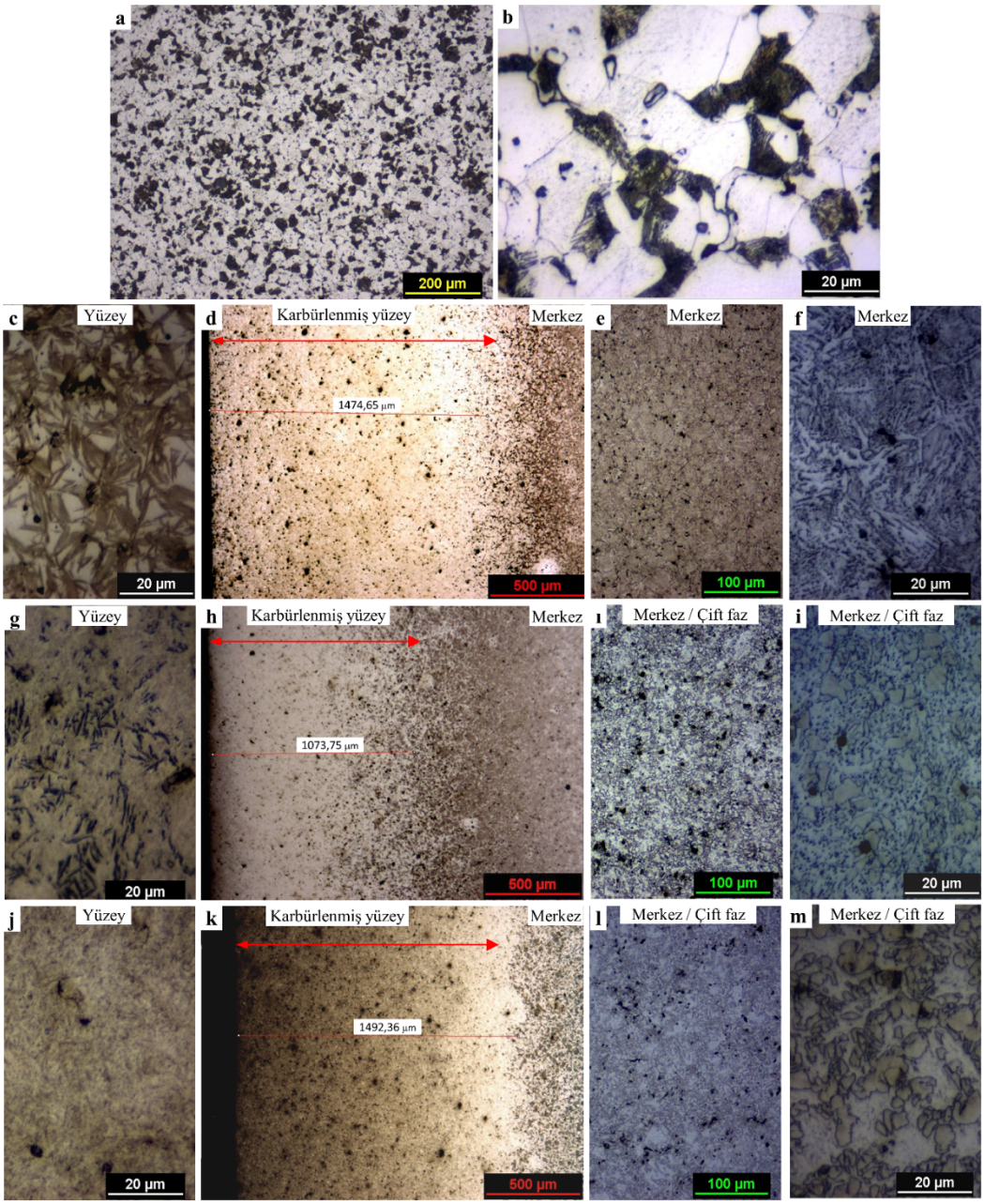
Tablo 5 ön-alaşımlı çelik tozlardan üretilen ve farklı ısıl işlem proseslerine tabi tutulan numunelere ait faz hacim oranı ile parçacık boyutu bilgilerini, Şekil 5 ise mikroyapı görüntülerini göstermektedir. Şekil 6'da ise XRD analiz sonuçları yer almaktadır.

Tablo 5. Faz hacim oranı ve tane boyutu bilgileri.

Numune	Martenzit hacim oranı (%)	Martenzit parçacık boyutu (μm)
N1	28,11*	18,07*
N2	73,11 (Yüzey)/87,76 (Merkez)	-
N4	28,37	6,35
N6	49,31	7,28
* Perlit		

Şekil 5 (a-b)'de S ısıl işlemi uygulanan N1 numunesine ait mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. N1 numune mikroyapısı birincil ferrit ve perlit (ikincil ferrit + sementit) fazlarından meydana gelmektedir. Mikroyapıda perlit hacim oranı %28,11, tane boyutu ise 18,07 μm olarak gerçekleşmiş ve perlitin ferrit matris içerisinde homojen bir dağılım sergilediği görülmektedir. Ayrıca S ısıl işlemi ile sinterleme tam olarak gerçekleşmiş, toz taneleri asasında bağ oluşumu büyük oranda tamamlanmış ve toz temas noktalarında çok az gözenek içermektedir.

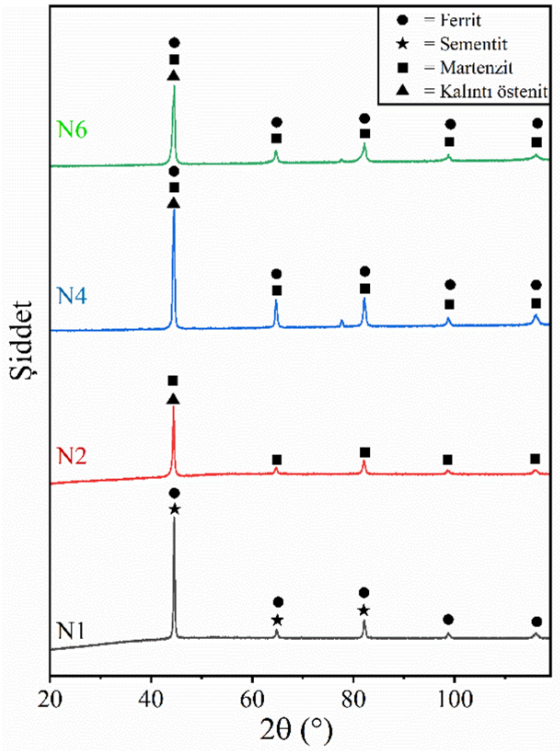
Şekil 5 (c-d-e-f)'de S+N+VK ısıl işlemleri uygulanan N2 numunesine ait mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. N2 numunesine ait mikroyapı görüntüleri incelendiğinde karbürleme işlemi düşük basınç vakum karbürleme fırınlarında başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu numunenin (N2) karbürlenmiş yüzey bölgelerinde plaka tipi martenzitin varlığı hakimdir. Mikroyapı %73,11 MHO ve yüksek oranda kalıntı östenit içermektedir (Şekil 5 c). Literatürde; çeliklerdeki yüksek karbon içeriğinin ve karbürlenmiş yüzey bölgelerinin plaka martenzit oluşumuna neden olduğu belirtilmektedir [33, 34]. Yine literatürde, numunelerin karbürlenmiş yüzey bölgelerinde yüksek oranlı kalıntı östenit varlığından bahsedilmektedir [35]. N2 numunesi merkez bölgelerinde ise MHO %87,76 olarak gerçekleşmiş ve çıta tipi martenzit içermektedir (Şekil 5 f).



Şekil 5. Isıl işlem proseslerine göre optik mikroskop mikroyapı görüntüleri (N1: a-b, N2: c-f, N4: g-i, N6: j-m)

S+N+VK+ÇF ısıl işlemleri uygulanan numunelerden; Şekil 5 (g-h-ı-i)'de 738°C sıcaklıkta ÇF ısıl işlemi uygulanan N4 numunesine ait mikroyapı görüntüleri, Şekil 5 (j-k-l-m)'de 750°C sıcaklıkta ÇF ısıl işlemi

uygulanan N6 numunesine ait mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. ÇF ısıl işlemi sonrası N4 ve N6 numunelerinin yüksek karbon içeriğine sahip karbürlenmiş yüzey bölgelerinde tamamen martenzit mikroyapısı ve düşük karbon içeriğine sahip merkez bölgelerinde ise ferrit + martenzit fazlarından oluşan çift faz mikroyapı üretimleri başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu sonuç ÇF ısıl işlemi sırasında numunelerin yüzey bölgelerinin tamamen östenit faz bölgesinde, merkez bölgelerinin ise ferrit + östenit faz bölgesinde bulunmalarına ve su verme neticesinde östenitin martenzite dönüşümüne atfedilmektedir. Artan kritik tavlama sıcaklığı (KTS) ile beraber numunelerin MHO ve Martenzit Parçacık Boyutu (MPB) artmaktadır. Düşük KTS uygulanan (738°C) N4 numunesi merkez bölgeleri %28,37 MHO içerirken, 6,35 µm MPB'na sahiptir ve martenzit taneleri arasındaki mesafe artmıştır. Yüksek KTS uygulanan (750°C) N6 numunesinde ise MHO %49,31, MPB 7,28 µm olarak gerçekleşmiş, martenzit taneleri arasındaki mesafe kısalmış ve bazı noktalarda taneler arasında bağ oluşumu gerçekleşmiştir. Literatürde, ÇF ısıl işlemi sırasında artan KTS ile beraber MHO ve MPB artışı meydana geldiği belirtilmektedir [20, 36, 37]. Martenzit taneleri ferrit matris içerisinde homojen bir dağılım sergilemektedirler. Bu sonuç ön-alaşımlı tozların sahip oldukları homojen element dağılımına atfedilmektedir. Literatürde, ön-alaşımlı tozların homojen mikroyapı dağılımına neden olduğu belirtilmektedir [38, 39].



Şekil 6. XRD analiz sonuçları.

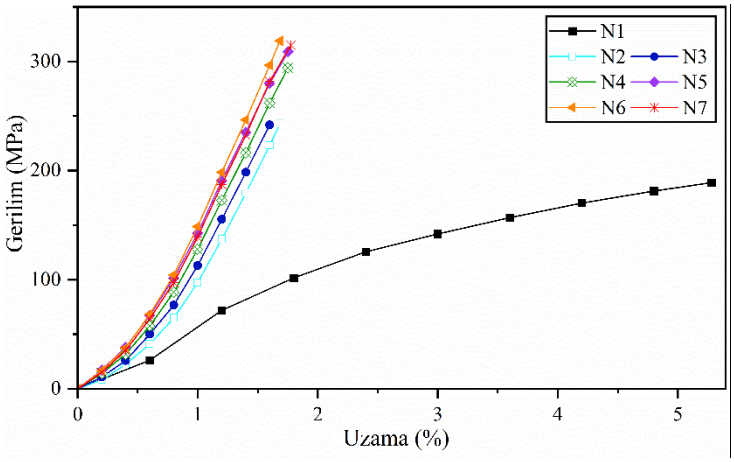
Şekil 6'daki XRD analiz sonuçları incelendiğinde, N1 numunesi XRD grafiklerinin ferrit ve sementit piklerini içerdiği görülmektedir. N1 numunesi IP sonrası sadece S ısıl işlemine tabi tutulmuş ve parçalar fırın içerisinde 5°C/dk. soğutma hızında yavaş soğutulmuştur. Bu numune mikroyapısı birincil ferrit + perlit (ikincil ferrit + sementit) fazlarını içermektedir (Şekil 5 a-b). N2 numunesi XRD grafiklerinin martenzit ve kalıntı östenit piklerini içerdiği görülmektedir. N2 numunesi IP sonrasında S+N+VK ısıl işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu numune mikroyapısı martenzit ve kalıntı östenit içermektedir (Şekil 5 c-f). N4 ve N6 numunelerine ait XRD grafikleri ise ferrit, martenzit ve kalıntı östenit piklerini içermektedir. Bu numuneler (N4 – N6) IP sonrasında sırasıyla S+N+VK+ÇF ısıl işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu numunelerin karbürlenmiş yüzey bölgeleri martenzit ve kalıntı östenit (Şekil 5 g-j), merkez bölgeleri ise ferrit + martenzit ÇF mikroyapısını içermektedir (Şekil 5 i-m). Şekil 6'daki XRD sonuçları ile Şekil 5'deki mikroyapı sonuçları birbirleri ile paralellik göstermektedir.

3.3. Üç nokta eğme test sonuçları ve kırılma yüzeyi incelemeleri

Ön-alaşımlı çelik tozlarından üretilen ve farklı ısıl işlem proseslerine tabi tutulan numunelere ait üç nokta eğme test sonuçları Tablo 6'da grafikleri ise Şekil 7'de verilmektedir. Üç nokta eğme testi sonrası numunelerin kırılma yüzeylerine ait FESEM görüntüleri ise Şekil 8'de verilmektedir.

Tablo 6. Üç nokta eğme test sonuçları.

Numune	Üç nokta eğme dayanımı (MPa)	Üniform uzama (%)
N1	189	3
N2	243	-
N3	242	-
N4	294	-
N5	309	-
N6	319	-
N7	315	-

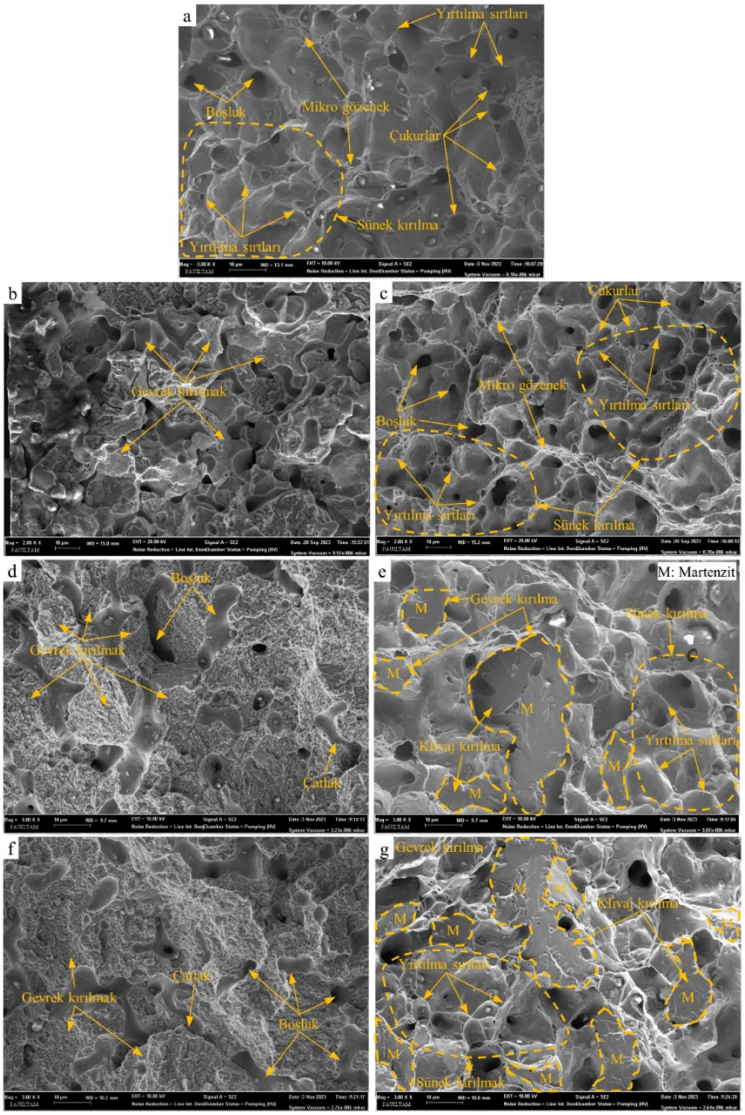


Şekil 7. Numunelere ait üç nokta eğme testi grafikleri.

S ısıl işlemi uygulanan N1 numunesi 189 MPa üç nokta eğme dayanımı ve %3 üniform uzama sergilemiştir. VK ve ÇF ısıl işlemleri numunelerin üç nokta eğme dayanımlarını arttırmış ancak sünekliklerini azaltmıştır. Sırasıyla S+N+VK ısıl işlemleri uygulanan N2 numunesi 243 MPa üç nokta eğme dayanımı sergilemiştir. En yüksek üç nokta eğme dayanımı S+N+VK+ÇF750 ısıl işlemleri uygulanan N6 numunesinde 319 MPa olarak gerçekleşmiştir. S+VK+ÇF738 ısıl işlemleri uygulanan N4 numunesi ise 294 MPa üç nokta eğme dayanımı sergilemiştir. VK ve ÇF ısıl işlem prosesleri sonrası su vermenin neden olduğu mikroyapıdaki martenzitin teşekkülü ve karbürlenmiş yüzey bölgelerinde karbon konsantrasyonunun artışına bağlı olarak martenzitin sertliğindeki artış üç nokta eğme dayanımlarında artışa neden olmuştur [40]. Ayrıca ÇF ısıl işleminin neden olduğu düşük östenitleştirme sıcaklığı, özellikle yüksek karbon içeriğine sahip karbürlenmiş yüzey bölgelerindeki kalıntı östenit miktarını azaltarak martenzit miktarını arttırdığı ve üç nokta eğme dayanımında artışa neden olduğu düşünülmektedir. Literatürde, düşük östenitleştirme sıcaklığının kalıntı östenit miktarını azalttığı belirtilmektedir [41]. Diğer taraftan ÇF ısıl işlemi sonrası mikroyapıdaki yumuşak ferrit fazının varlığı T/M çelik parçaların boşluklarında ve toz birleşim noktalarındaki mikro gözeneklerde teşekkül eden çatlakların ilerleyişini yavaşlatarak üç nokta eğme dayanımında artışa neden olduğu düşünülmektedir. Literatürde, çatlakların sert martenzit fazında hızla ilerlediği belirtilmektedir [22,23]. ÇF ısıl işlemi sırasındaki artan KTS üç nokta eğme dayanımını arttırmaktadır. Bu sonuç artan KTS ile beraber mikroyapıdaki MHO artışına atfedilmektedir. Temperleme ısıl işleminin S+VK ve S+VK+ÇF750 ısıl işlem prosesleri uygulanan N3 ve N7 numunelerin üç nokta eğme dayanımları üzerine kayda değer bir etkisi olmamıştır. Ancak S+VK+ÇF738 ısıl işlem prosesi uygulanan N5 numunesinin üç nokta dayanımında bir miktar artışa neden olmuştur. Bu sonuç S+VK+ÇF738 ısıl işlem prosesi sonrası elde edilen düşük MHO martenzitin karbon içeriğini arttırarak sertliğini arttırmıştır. Temperleme ısıl işlemi sonrası yüksek sertliğe sahip martenzitin sertliğinde azalma meydana geldiği ve martenzit tanelerindeki

boşluklarda teşekkül eden çatlakların ilerleme hızının yavaşlayarak üç nokta eğme dayanımında artış meydana geldiği düşünülmektedir.

Numunelere ait kırık yüzey FESEM görüntüleri incelendiğinde; S ısıl işlemi uygulanan N1 numunesinin sünek kırılma davranışı sergilediği görülmektedir (Şekil 8 a). Bu sonuç S ısıl işlemi sonrası mikroyapıdaki yüksek orandaki yumuşak ferrit fazının varlığına atfedilmektedir. S+N+VK (N2), S+N+VK+ÇF738 (N4), S+N+VK+ÇF750 (N6) ısıl işlemleri uygulanan numunelerinin karbürlenmiş yüzey bölgelerinde gevrek kırılma izleri görülmektedir (Şekil 8 b-d-f). Karbürleme işlemi sonrası yüzey karbon konsantrasyonundaki artışın yanı sıra VK ve ÇF ısıl işlemleri sırasında östenit faz bölgesinde bulunan bu bölgelerde su verme sonrası sert martenzit fazının teşekkülünün gevrek kırılmaya neden olduğu düşünülmektedir. Literatürde, T/M çelik parçaların karbürlenmiş yüzey bölgelerinde gevrek kırılmanın meydana geldiği ve bunun yüksek karbon içeriğine sahip sert martenzit fazının varlığından kaynaklandığı rapor edilmiştir [25]. N2 numunesi merkez bölgelerinde sünek kırılma izleri içermektedir (Şekil 8 c). Bu sonuç, N2 numunesinin merkez bölgesindeki %0,147 C içeriği nedeniyle martenzitin sertliğinin düşük olması ile açıklanmaktadır. N4 ve N6 numunelerinin merkez bölgelerinde sünek ve gerek kırılma bölgeleri aynı anda görülmektedir (Şekil 8 e-g). Bu sonuç mikroyapıdaki ferrit + martenzit (α + M) fazlarının varlığı ile açıklanmaktadır. Yumuşak ferrit fazı sünek kırılmaya neden olurken sert martenzit fazı ise gevrek kırılmaya neden olmaktadır. Daha yüksek MHO'na sahip N6 numunesinde gevrek kırılma alanlarında artış meydana geldiği görülmektedir (Şekil 8 g).



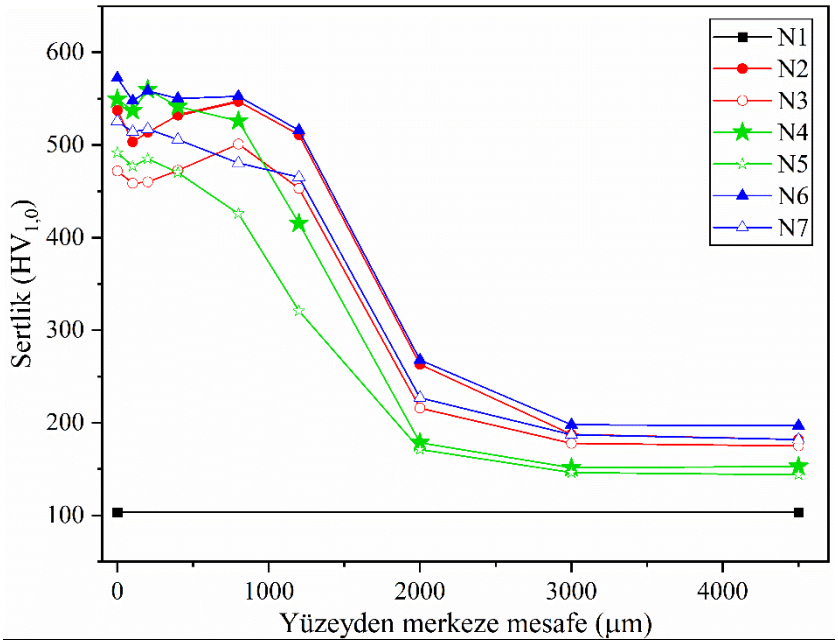
Şekil 8. Üç nokta eğme testi sonrası numunelere ait kırık yüzey FESEM görüntüleri (a: N1, b-c: N2, d-e: N4, f-g: N6).

3.4. Sertlik incelemeleri

Ön-alaşımlı çelik tozlardan üretilen numunelere uygulanan farklı ısıl işlemlerin sertlik profilleri üzerine etkileri belirlenmiş ve sonuçları Tablo 7'de, grafikleri ise Şekil 9'da verilmiştir.

Tablo 7. Numunelerin yüzeyden merkeze sertlik sonuçları.

Numune no	Yüzeyden merkeze mesafe (µm)								
	0	100	200	400	800	1200	2000	3000	4500
	Sertlik ($HV_{1,0}$)								
N1	103,3								
N2	537,31	503,58	513,95	532,38	547,25	511,12	263,13	187,65	182,13
N3	471,80	458,80	460,20	472,46	501,07	453,14	215,90	177,86	175,08
N4	549,45	537,23	559,90	541,73	526,10	415,58	178,52	151,64	152,86
N5	491,62	477,10	485,05	470,15	425,74	320,96	171,28	146,28	143,88
N6	572,28	547,86	558,43	550,26	552,80	515,94	268,06	197,96	196,90
N7	525,50	514,32	517,30	506,04	480,64	465,34	227,18	187,12	181,84



Şekil 9. Numunelerin yüzeyden merkeze sertlik profilleri.

Tablo 7 ve Şekil 9 incelendiğinde, N1 numunesinin 103,3 $HV_{1,0}$ sertliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Bu numunenin içerdiği yüksek orandaki ferrit fazı düşük sertliğe neden olmuştur. VK ve ÇF ısıl işlemleri sonrasında numunelerde yüksek yüzey sertlik değerleri elde edilmiştir. En yüksek yüzey sertliği N6 numunesinde 572,28 $HV_{1,0}$ olarak gerçekleşmiştir. ÇF ısıl işlemi VK ısıl işlemine göre numunelerin yüzey bölgelerindeki sertliklerinde bir miktar artış meydana getirmiştir. Bu sonuç, ÇF ısıl işlemi sırasındaki düşük KTS nedeni ile düşük sertleştirme sıcaklığının neden olduğu mikroyapıdaki kalıntı östenit miktarındaki azalmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Numunelerin sertlik profilleri incelendiğinde 100 µm mesafeye kadar azaldıktan sonra bir miktar artış meydana gelmiş ve tekrar azalma eğilimi sergilemişlerdir. Bu sonuç mikroyapıdaki kalıntı östenitin varlığı ile açıklanmaktadır. Karbürlenmiş numunelerin yüzey bölgelerindeki kalıntı östenitin varlığı düşük sertliğe neden olmaktadır [42, 43]. Sertlikteki düşüş 1200 µm mesafeye kadar yavaş, bu mesafeden sonra hızlı bir şekilde gerçekleşmiş ve 2000 µm mesafede tekrar yavaşlamıştır. Merkeze gidildikçe sertlik profilindeki azalmanın nedeni karbürlenmiş numunelerdeki karbon içeriğinin merkeze gidildikçe azalması ve martenzitin sertliğindeki düşüşten kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde, Yüzey karbürlenmiş T/M çelik parçalarda karbon konsantrasyonu ve sertlik profillerinin merkeze doğru azalma eğilim sergilediği belirtilmiştir [24,25,44]. 3000 µm mesafeden sonra numunelerin sertlik profilleri yatay bir seyir izlemiştir. Bu sonuç karbürleme işleminin bu bölgelerde etkili

olmamasından kaynaklanmaktadır. En yüksek merkez sertliği N6 numunesinde 196,90 $HV_{1,0}$ olarak gerçekleşmiştir. Bu numunenin içerdi yüksek MHO miktarının sertliğini arttırdığı düşünülmektedir. Temperleme ısıl işlemi numunelerin sertliklerinde düşüşe neden olmuştur. Sertlikteki bu düşüş yüzey bölgelerinde daha yüksek olurken merkez bölgelerinde düşük seviyelerde kalmıştır.

4. Sonuçlar

Ön-alaşımlı çelik tozlardan üretilen T/M parçalara uygulanan S, VK, ÇF ve T ısıl işlemlerinin numunelerin kimyasal içerik, yoğunluk, mikroyapı, üç nokta eğme dayanımı ve sertlik profilleri üzerine etkileri belirlenmiş ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- VK ısıl işlemi numunelerin yüzey karbon konsantrasyonunu arttırmış ve yüzeyde %1,174 C elde edilmiştir.
- S ısıl işlemi sonrası numunelerde 7,278 g/cm^3 yoğunluk ve %93,24 bağıl yoğunluk elde edilmiştir. VK ısıl işlemi ile yoğunluk 7,294 g/cm^3 bağıl yoğunluk ise % 93,49 seviyesine yükselmiş ancak artış sınırlı seviyede kalmıştır.
- VK sonrası uygulanan ÇF ısıl işlemi ile numunelerin yüzey bölgelerinde tamamen martenzit merkez bölgelerinde ise ferrit + martenzitten oluşan çift faz mikroyapısı başarılı bir şekilde üretilmiştir. KTS artışı ile beraber numunelerin merkez bölgelerindeki MHO ve MPB artmıştır. 738°C KTS ile %28,37 MHO ve 6,35 µm MPB, 750°C KTS ile ise %49,31 MHO ve 7,28 µm MPB elde edilmiştir.
- S ısıl işlemi uygulanan N1 numunesi 189 MPa üç nokta eğme dayanımı ve %3 üniform uzama sergilemiştir. VK ve ÇF ısıl işlemleri sonrası numunelerin üç nokta eğme dayanımında artış meydana gelmiş ancak sünek bir davranış sergilememişlerdir. S+N+VK ısıl işlemleri uygulanan N2 numunesi 243 MPa üç nokta eğme dayanımı sergilemiştir. En yüksek üç nokta eğme dayanımı S+N+VK+ÇF750 ısıl işlemleri uygulanan N6 numunesinde 319 MPa olarak gerçekleşmiştir.
- S ısıl işlemi uygulanan N1 numunesi 103,3 $HV_{1,0}$ sertliğe sahiptir. VK ve ÇF ısıl işlemleri sonrası numunelerin sertliklerinde artış meydana gelmiştir. S+N+VK ısıl işlemleri uygulanan N2 numunesi 537,31 $HV_{1,0}$ yüzey, 182,13 $HV_{1,0}$ merkez sertliğine sahiptir. En yüksek sertlik değeri S+N+VK+ÇF750 ısıl işlemleri uygulanan N6 numunesinde 572,28 $HV_{1,0}$ yüzey ve 196,90 $HV_{1,0}$ merkez sertliği olarak gerçekleşmiştir.
- VK ve ÇF ısıl işlemleri uygulanan numunelerin sertlik profilleri, yüzeyden merkeze 100 µm mesafeye kadar azalan, 800 µm mesafeye kadar artan, bu mesafeden yaklaşık 3000 µm mesafeye kadar tekrar azalan ve devamında yatay seyreden bir sertlik profili sergilemişlerdir.
- Numunelerin karbürlenmiş yüzey bölgelerinde kırılmalar gevrek kırılma şeklinde gerçekleşmiştir. Merkez bölgelerinde ise ÇF numunelerinde sünek ve gevrek kırılmanın bir arda gerçekleştiği görülmüştür. MHO artışına bağlı olarak gevrek kırılma alanlarında artış meydana gelmiştir.

Kaynaklar

[1] Türkmen M, Karabulut H, Erden MA, Gündüz S. Effect of TiN addition on the microstructure and mechanical properties of PM steels. Technological Applied Sciences 2017;12(4): 178-184.

[2] Nikolaou J, Bourithis L, Papadimitriou G. Selective case hardening of plain steel by carbon alloying with a plasma transferred arc (PTA) technique. J Mater Sci 2003; 38: 2883-2891.

[3] Sawicki J, Dybowski K, Zgórniak P. Effect of stages of vacuum carburizing on deformations in splines of steels 16MnCr5, AMS6265 and 17CrNiMo7-6. Met Sci Heat Treat 2021; 62: 572-576.

[4] Özdeşlik M, Sindel L, Keskin S. Düşük basınç sementasyon ve yüksek basınç gaz ile sertleştirme, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası 2016; 180: 31-36.

[5] Çavuşoğlu O, Gürün H. Investigation of the effects of deformation speed on the mechanical properties and deep drawing process of DP600 and DP780 sheet metal. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 2014; 29(4): 777-784.

[6] Dwivedi SP, Sharma S, Srivastava AP, Sethi VA, Mohammed KA, Kumar A, Khan MI, Abbas M, Tag-Eldin EM. Homogeneity, metallurgical, mechanical, wear, and corrosion behavior of Ni and B4C coatings deposited on 304 stainless steels developed by microwave cladding technique. J Mater Res Technol 2023; 27: 5854-5867

[7] Ali M, Ahmad F, Melor PS, Yahya N, Aslam M. Investigation of boron effect on the densification of Fe-50% Ni soft magnetic alloys produced by powder metallurgy route. Mater Today Proc 2019; 16: 2210-2218.

[8] Neystani R, Beidokhti B, Amelzadeh M. Fabrication of dissimilar Fe-Cu-C powder metallurgy compact/steel joint using the optimized resistance spot welding. J Manuf Processes 2019; 43: 200-206.
[9] Azevedo JMC, CabreraSerrenho A, Allwood JM. Energy and material efficiency of steel powder metallurgy. Powder Technol 2018; 328: 329-336.
[10] Somunkıran İ, Çelik E, Tunç B, Güneş Ç. Sıcak presleme yöntemi ile üretilen Fe esaslı matriste Ni esaslı süper alaşımların katkı oranlarının etkisi. Fırat Üniversitesi Müh Bil Dergisi 2022; 34(2): 817-827.
[11] Kulkarni H, Dabhade VV. Green machining of powder-metallurgy-steels (PMS): An overview. J Manuf Processes 2019; 44: 1-18.
[12] ASM Handbook, Powder Metallurgy, ASM International, USA, 1998.
[13] Erdogan A, Kursuncu B, Günen A, Kalkandelen M, Gok MS. A new approach to sintering and boriding of steels "Boro-Sintering": Formation, microstructure and wear behaviors. Surf Coat Technol 2020; 386: 125482.
[14] Özer EK. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen sade karbonlu çeliklerin statik deformasyon yaşlanması davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2019.
[15] Aksöz S, Kaplan Y, Tan E. Boro-sinterleme işleminin ham T/M parçaların mikroyapı ve sertlik özelliklerine etkilerinin incelenmesi, Journal of Boron 2019; 4(2): 77-84.
[16] German RM. Giriş, Toz Metallurjisi ve Parçacık Malzeme İşlemleri, Editörler: Sarıtaş S, Türker M, Duru N. Ankara, Türkiye Toz Metalurjisi Derneği 2007; 1-11.
[17] Dere MA. Toz metalurjisi ile demir bazlı matrisli TiB2 takviyeli kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 2019.
[18] Tosangthum N, Morakotjinda M, Krataitong R, Wila P, Yodkaew T, Vetayanugul B, Boontetim W, Tongsri R. Promoting of bainitic transformation in pre-alloyed Fe-Cr-Mo steels with different compositions by nickel additions. Mater Today Proc 2018; 5(3): 9351-9358.
[19] Güral A, Tekeli S, Ando T. Tensile properties of iron-based P/M steels with ferrite+ martensite microstructure. J Mater Sci 2006; 41: 7894-7901.
[20] Tekeli S, Güral A. Microstructural characterisation of intercritically annealed 0,5 wt-%Ni and Mn added steels prepared by powder metallurgy method. Mater Sci Technol 2007; 23(1): 72-78.
[21] Candela N, Plaza R, Rosso M, Velasco F, Torralba JM. Radial crushing strength and microstructure of molybdenum alloyed sintered steels. J Mater Process Technol 2001; 119(1-3): 7-13.
[22] Wang CL, Wang P, Shi ZM. Fatigue properties for sinter-hardened Fe-Ni-Mo-Cu materials. Mater Sci Forum 2007; 534: 677-680.
[23] Mousavinasab S, Blais C. Study of the effect of microstructure heterogeneity on fatigue crack propagation of low-alloyed PM steels. Mater Sci Eng A 2016; 667: 444-453.
[24] Erdogan M, Tekeli S, Pamuk Ö, Erkan A. Surface carburised AISI 8620 steel with dual phase core microstructure. Mater Sci Technol 2002; 18(8): 840-844.
[25] Pamuk Ö, Kaplan Y, Aksöz S. The effect of vacuum-carbosintering on the microstructure and mechanical properties of pre-alloyed powder metallurgy steel parts. J Mater Eng Perform 2025; 1-13.
[26] Mahesh K, Sankaran S, Venugopal P. Microstructural characterization and mechanical properties of powder metallurgy dual phase steel preforms. J Mater Sci Technol 2012; 28(12): 1085-1094.
[27] Güral A., Tekeli S. Microstructural characterization of intercritically annealed low alloy PM steels. Mater Des 2007; 28(4): 1224-1230.
[28] Khamedi R, Fallahi A, Oskouei AR. Effect of martensite phase volume fraction on acoustic emission signals using wavelet packet analysis during tensile loading of dual phase steels. Mater Des 2010; 31(6): 2752-2759.
[29] Höganäs AB. Material and pwder properties, Höganäs Handbook 1 for Sintered Components; Sweden, Höganäs AB: 2013; 7-108.
[30] Kremel S, Danninger H, Yu Y. Effect of sintering conditions on particle contacts and mechanical properties of P/M steels prepared from 3% Cr prealloyed powder. Powder Metallurgy Progress 2002; 2(4): 211-221.
[31] Hu HX, Chen W, Deng C, Yang J. Effect of Fe prealloyed powder and the sintering process on the matrix properties of impregnated diamond bits. J Mater Res Technol 2021; 12: 150-158.
[32] de Oro Calderon R, Gierl-Mayer C, Danninger H. Thermoanalytical techniques for characterizing sintering processes in ferrous powder metallurgy. J Therm Anal Calorim 2023; 148(4): 1309-1320.
[33] Altuntaş O, Güral A. Yüksek karbonlu sinterlenmiş çeliklerin darbe tokluklarına küreselleştirme ısıl işlemlerinin etkisinin incelenmesi. Politeknik Dergisi 2015; 18(3): 107-112.
[34] Karagöz Ş, Birbaşar O, Kaya A. Sıcak şerit haddelemede iş merdane malzemeleri ve hadde merdanesi döküm yöntemleri. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2009; 15(3): 433-439.
[35] Roy S, Gould B, Zhou Y, Demas NG, Greco AC, Sundararajan S. Effect of retained austenite on white etching crack behavior of carburized AISI 8620 steel under boundary lubrication. Tribol Lett 2019; 67: 1-9.
[36] Aycan MF. Farklı martenzit hacim oranlarında kırılma tokluğu değerlerinin incelenmesi. Politeknik dergisi 2020; 23(2): 277-282.
[37] Demir B. Investıgatıon of producabıl of dual-phase steel from SAE4140 steel, Teknoloji 2004; 7(1): 121-127.

[38] Tan Z, Liu Y, Huang X, Li S. Fatigue behavior of alloy steels sintered from pre-alloyed and diffusion-bonding alloyed powders. Metals 2022; 12(4): 659.
[39] Kulkarnı H, Dabhade VV. Machinability of a sinter-hardened powder metallurgy steel: combined analysis of cutting force and chip characteristics. Powder Metall Met Ceram 2023; 62(7): 445-458.
[40] Dong X, Hu J, Wang H, Liu S, Gou Z. A study on carbon concentration distribution and microstructure of P/M materials prepared by carbusintering. J Mater Process Technol 2009; 209(8): 3776-3782.
[41] Thelning KE. Kalıntı östenit, Çelik ve Isıl İşlemi Bofors Elkitabı, Çeviren: Tekin A. Türkiye, Hakan ofset, 1984; 19.
[42] Pöhl F. Local deformation and transformation behavior of retained austenite in 18CrNiMo7-6 after high-carbon carburizing treatment. Mater Charact 2020; 167: 110446.
[43] Guo Q, Liu H, Sun C, Liu H, Cao Y, Wang L, Cai X, Fu P, Wang P, Li D. Effectively improving the hardness-strength-toughness of carburized bearing steel via nanoprecipitates and fine grain structure. Mater Sci Eng A 2023; 872: 144961.
[44] Asi O, Can AÇ, Pineault J, Belassel M. The effect of high temperature gas carburizing on bending fatigue strength of SAE 8620 steel. Mater Des 2009; 30(5): 1792-1797.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 763-780, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1706496

Application of Watershed Segmentation on Biomedical Images as an Educational Tool

Şefika ÇAĞLAN[1], Ali DEĞİRMENCİ[2*], İlyas ÇANKAYA[3], Ömer Faruk GÖKTAŞ[4]
[1,2,3,4] Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Ankara, Türkiye
[1] 225105121@aybu.edu.tr, [*2] alidegirmenci@aybu.edu.tr, [3] ilyas.cankaya@aybu.edu.tr, [4] ofgoktas@aybu.edu.tr

(Geliş/Received: 27/05/2025; Kabul/Accepted: 10/07/2025)

Abstract: Image segmentation is the operation of dividing an image into multiple segments. Watershed segmentation is a widely used region-based segmentation method because of basic and fast features. This segmentation method that is based on morphological operations is used for several areas especially in medical image applications such as magnetic resonance imaging (MRI), computed tomography (CT) and histopathological images. In general, the segmentation problems with these types of images are originated from noise, nonhomogeneity and touching objects. For solving such problems, watershed segmentation is a powerful tool. In addition to all these advantages, if watershed segmentation is applied to image without any additional process, generally it gives an oversegmentation problem. Marker controlled watershed segmentation is improved to overcome this problem. In this article, five different algorithms about marker-controlled watershed segmentation, which each one is modified from five different articles, are applied on a grayscale bone plasmacytoma image and results are compared. An educational platform related with these algorithms is presented by using MATLAB App Designer. Designed graphical user interface (GUI) using App Designer is helpful tool for comparing different algorithms of marker-controlled watershed segmentation. Moreover, image processing learners can use it easily and can observe effectiveness of algorithms. So, the created educational platform has academic and educational characteristics. The advantage of this application is not only comparing different algorithms but also learning different marker-controlled watershed segmentation methods.

Key words: Image processing, mathematical morphology, segmentation, watershed transform, MATLAB GUI.

Havza Bölütlemesinin Biyomedikal Görüntüler Üzerinde Bir Eğitim Aracı Olarak Uygulanması

Öz: Görüntü bölütleme, bir görüntüyü birden fazla bölüme ayırma işlemidir. Havza bölütlemesi, temel ve hızlı özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılan bölge tabanlı bir bölütleme yöntemidir. Morfolojik işlemlere dayanan bu bölütleme yöntemi, özellikle manyetik rezonans görüntüleme (MRI), bilgisayarlı tomografi (CT) ve histopatolojik görüntüler gibi tıbbi görüntü uygulamalarında birçok alanda kullanılmaktadır. Genel olarak bu tür görüntülerde bölütleme problemleri gürültü, homojen olmama ve dokunan nesnelerden kaynaklanmaktadır. Bu tür problemleri çözmek için havza bölütlemesi güçlü bir araçtır. Tüm bu avantajlarının yanı sıra, havza bölütlemesi herhangi bir ek işlem yapılmadan görüntüye uygulanırsa, genellikle aşırı bölütleme problemi verir. Bu problemin üstesinden gelmek için işaretleyici kontrollü havza bölütlemesi geliştirilmiştir. Bu makalede, işaretleyici kontrollü havza bölütlemesi ile ilgili her biri beş farklı makaleden modifiye edilmiş beş farklı algoritma, gri tonlamalı bir kemik plazmasitom görüntüsü üzerinde uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. MATLAB App Designer kullanılarak bu algoritmalarla ilgili bir eğitim platformu sunulmuştur. App Designer kullanılarak tasarlanan grafiksel kullanıcı arayüzü (GUI), işaretleyici kontrollü havza segmentasyonunun farklı algoritmalarını karşılaştırmak için yararlı bir araçtır. Ayrıca görüntü işleme öğrenenler bunu kolaylıkla kullanabilir ve algoritmaların etkinliğini gözlemleyebilirler. Dolayısıyla, oluşturulan eğitim platformu akademik ve eğitsel özelliklere sahiptir. Bu uygulamanın avantajı sadece farklı algoritmaları karşılaştırmak değil, aynı zamanda farklı işaretleyici kontrollü havza bölütlemesi yöntemlerini öğrenmektir.

Anahtar kelimeler: Görüntü işleme, matematiksel morfoloji, segmentasyon, havza dönüşümü, MATLAB GUI.

1. Introduction

Image segmentation operation separates all objects from each other and the background. This is used in many image processing fields as pre or main processing stage [1,2]. The main aim of the segmentation is making easier to analyze image for any process. One of the widely used segmentation method is watershed segmentation. The watershed segmentation is a region-based method and derived from mathematical morphology [3]. Watershed segmentation is applied on a gradient form of the image. When the gradient of the image is thought like a topography, dark areas correspond to low altitudes and light areas correspond to high altitudes. For this type of image, there are three meaningful terms; watershed lines (or dams), catchment basins and regional minimums

* Corresponding author: alidegirmenci@aybu.edu.tr. ORCID Information: [1] 0000-0001-9406-4109, [2] 0000-0001-9727-8559, [3] 0000-0002-6072-3097, [4] 0000-0002-2021-4052

(minima) [4]. Watershed lines are created in the image to prevent merging of two or more adjacent catchment basins. Catchment basins are referred to regions of the image and each catchment basin has one regional minimum [5]. Finding watershed lines (watershed ridge lines) is the main aim of the watershed transform. In previous works on watershed segmentation, it is shown that classical watershed segmentation did not segment images correctly because of the over segmentation. The oversegmentation is caused from non-homogeneity or noise in the images [5]. A new watershed segmentation method is improved to overcome this problem and it is called as marker-controlled watershed segmentation [6]. In this way, the markers are calculated and they imposed to the gradient image. Then, the watershed segmentation is applied to the resulted gradient image.

There are different ways to find the image markers based on mathematical morphology in the literature. The watershed algorithm on the basis of mathematical morphology was initially proposed by Digabel and Lantuèjoul [4]. After that, this algorithm was improved by Beucher and Lantuèjoul, and this approach for watershed segmentation is called as flooding process [7]. After several years, Vincent and Soille suggested a watershed algorithm based on immersion, but it had very high complexity because of the sorting step [4]. Bieniek and Moga suggested a watershed algorithm based on connected components, but this algorithm implemented by simulating a raining process also called rainfalling as a new watershed approach [8]. After from these dates, a lot of different works had been performed on classical watershed segmentation. However, the classical watershed segmentation has an oversegmentation problem and to solve this problem a strategy of marker-controlled watershed segmentation had been proposed by Meyer and Beucher [6] taking reference the proposed algorithm by Beucher and Lantuèjoul [7]. Parvati et al. suggested an algorithm for marker-controlled watershed segmentation [9]. They applied this algorithm to MR image, aerial image and high resolution satellite image. Kaur and Jindal used a different marker-controlled watershed algorithm to segment a lung image [10]. Reza et al. used another algorithm and this was applied on an original fundus image [11]. Allaoui and Nasri proposed a marker-controlled watershed algorithm to segment cell, muscle, brain, foot and dental medical images [12]. Kalapala et al. used a different algorithm to segment a satellite image which includes trees [13]. Kaleem et al. applied marker-controlled watershed segmentation on MRI image for tumor segmentation [14]. Koyuncu et al. introduced smart markers for cell segmentation and they were compared this method with some other marker identification algorithms on KATO-3 gastric cancer cells [15]. Yahya et al. get good results by applying watershed segmentation in five stages to accomplish the oversegmentation problem on four different images; rice, fingerprint, cells and grass [16]. Sivagami et al. also studied to overcome the oversegmentation problem by using bit-plane slicing and watershed segmentation together and the advantage of this method was low memory consumption and low computational complexity compared to other methods [17]. Beare at al. proposed a method that is the marker-based watershed scalper (MBWSS) and the method that has no expensive preprocessing steps was applied on T1-weighted MR images to isolate brain [18]. Another study that was introduced by Napoleon et al. was comparison of directly applied watershed segmentation and marker-controlled watershed segmentation on brain images [19]. A technique was proposed by Ravi et al. and the technique solve the oversegmentation problem by applying markers on the gradient image for MRI of brain and mammogram images [20]. Another study on oversegmentation problem was introduced by Bandara et al. and they assumed that the different adjacent segments of an object have similar color distribution [21]. Lahitha et al. studied on different image segmentation methods and the results showed that marker-controlled watershed segmentation is the best and the best solution of oversegmentation problem was bilateral filter [22]. They used Lena image and mentioned that bilateral filter did not reduce the salt and pepper noise. Lu et al. studied on a medical image segmentation algorithm based on gradient edge detection and control marked watershed and they used breast MRI image [23]. They mentioned that in the extraction and segmentation accuracy of breast tumor regions there were some problems and the problem can be solved in the further studies. Sarma et al. focused on a comparison of existing segmentation techniques and new segmentation techniques [24]. The discussed basic techniques are thresholding, edge detection, region-based segmentation, hard and soft type clustering, watershed, partial differential equations, artificial neural network and new techniques are marker-controlled watershed and deep learning techniques. They mentioned that the hybrid combination of existing algorithms gave more accurate results than the single algorithm approaches. In recent years, new approaches of watershed segmentation were proposed. Dai et al. applied their approach on jujubes and trees images [25], and Guo et al. applied their approach on blasted rock images [26]. A marker-controlled watershed algorithm which was proposed by Ghader et al. was used for the detection of Baker"s cyst in the knee"s joint MRI and axial T2-weighted images first time [27]. Also, Gonzalez and Woods had been given place to watershed segmentation in their famous book named as Digital Image Processing [5].

Marker controlled watershed segmentation is widely used in MRI, CT and histopathological images [28,29]. In this article, five different marker-controlled watershed algorithms were applied on a grayscale bone plasmacytoma image and comparison of algorithm performances is observed. Visuality and application are more

important for image processing training and quick understanding. In this work, MATLAB App Designer is used to improve the quality of understanding. An educational MATLAB App Design is created to make easier the comparison of segmentation results. This educational design is very useful tool for image processing learners because learning algorithms of marker-controlled watershed segmentation takes long time. This tool saves time by visuality and step by step structure of it. MATLAB App Design educational tool provides ease of use by assigning complex and long codes as a single button function. With this property, the GUI becomes a user-friendly tool by establishing direct communication between the student and the computer. It also allows them to improve or reformation the software code by providing easy access to callback files. Additionally, an application on an image makes the subject more understandable by increasing visuality in image processing courses.

The constitution of the other sections of this study is explained as follows. In Section 2, morphological operations for preprocessing and finding image markers are described. In Section 3, the concepts of watershed and marker-controlled watershed segmentations are explained briefly. In Section 4, the details of five marker-controlled watershed segmentation algorithms are given. In Section 5, the results of all algorithms and designed educational MATLAB App Design tool is described in detail and in Section 6, conclusion and future work of this study is explained.

2. Morphological Operations

Morphology is generally defined as a study about shapes and structures. Morphological operators are nonlinear transformations to modify geometric shapes of images [12]. Modification of shapes or structures is made by using structuring element which can be in different shapes and sizes. The shape and size selections of the structuring element affect the result of the desired operation. This effect changes according to requested result and size of the objects in the image. As a general description, morphological operations give a processed image by applying some morphological operations to an image with a suitable structuring element. There are several morphological operations in image segmentation and some of these are explained in the following.

2.1. Grayscale dilation and erosion

Grayscale dilation makes the process of replacing the gray level value at any pixel by the maximum intensity value covered by a flat structuring element. The main purpose is to expand the bright areas in the image and emphasize certain structures. This process thickens the object edges and makes them more prominent. This process is applied on all pixels of the image. The dilation of the grayscale image I(x,y) by a flat structuring element $b(i,j)$ is mathematically defined as (where x, y and i, j are the coordinates (column and row positions) of the image pixels and structuring element, respectively) in Equation 1.

$$(I \oplus b)(x,y) = \max_{(i,j)\in b} \{I(x-i, y-j)\} \tag{1}$$

In contrast to the grayscale dilation, grayscale erosion operation is that the gray level value at any pixel is replaced by the minimum intensity value covered by a flat structuring element. Its purpose is to expand dark (low intensity) regions in the image, narrow the bright areas, and suppress certain structures. This operation can bring details to the fore by thinning the object edges. The erosion of the grayscale image $I(x,y)$ by a flat structuring element $b(i,j)$ is mathematically given as (where x, y and i, j are the coordinates (column and row positions) of the image pixels and structuring element, respectively) in Equation 2.

$$(I \ominus b)(x,y) = \min_{(i,j)\in b} \{I(x+i, y+j)\} \tag{2}$$

In these operations, the structuring element can be different shapes and sizes such that any size is defined as radius for disk and diamond, and any size is defined as width for square and cube. The shape and size of the structuring element is changing according to the image and the desired result from the image.

2.2. Morphological gradient

Gradient form of the image can be obtained by gradient filter and morphological gradient. Morphological gradient of the image is obtained by subtraction of its grayscale erosion result from its grayscale dilation result

[30]. In this process, the same structuring element is used for erosion and dilation operations. Morphological gradient can be described as in Equation 3.

$$grad(I) = (I \oplus b) - (I \ominus b) \tag{3}$$

2.3. Dilation based morphological reconstruction

The process that repeated dilations of the marker image I with respect to the mask image J is performed until stability is reached and it is called as dilation based morphological reconstruction [31].

The elementary geodesic dilation $\delta_I^{(1)}(J)$ of grayscale image $J \leq$ I "under" I is determined according to Equation 4.

$$\delta_I^{(I)}(J) = (J \oplus b) \wedge I \tag{1}$$

In this equation, $\wedge$ stands for the pointwise minimum and $(J \oplus b)$ is the dilation of J by flat structuring element b [31]. The grayscale geodesic dilation of size $n \geq 0$ is then given as in Equation 5.

$$\delta_I^{(n)}(J) = \delta_I^{(I)} \circ \delta_I^{(I)} \circ \ldots \circ \delta_I^{(I)}(J) \tag{2}$$

The grayscale reconstruction $\rho_I(J)$ of I from J is obtained by iterating grayscale geodesic dilation of J "under" I until stability is reached (Equation 6). This operation reconstructs bright regions in grayscale images. In this equation, V refers to the process of taking the supremum, that is, the maximum.

$$\rho_I(J) = V_{n \geq 1} \delta_I^{(n)}(J) \tag{6}$$

2.4. Erosion Based Morphological Reconstruction

The process that repeated erosions of the marker image I with respect to the mask image J is performed until stability is reached is called as erosion based morphological reconstruction [31].

The elementary geodesic erosion $\varepsilon_I^{(1)}(J)$ of grayscale image $J \geq I$ "above" I is given as in Equation 7.

$$\varepsilon_I^{(n)}(J) = (J \ominus b) \vee I \tag{3}$$

where $\vee$ stands for the pointwise maximum and $(J \ominus b)$ is the erosion of J by flat structuring element b [31]. The grayscale geodesic erosion of size $n \geq 0$ is then given as (where n indicates geodesic dilation is repeating n times) in Equation 8.

$$\varepsilon_I^{(n)} = \varepsilon_I^{(1)} \circ \varepsilon_I^{(1)} \circ \ldots \varepsilon_I^{(1)}(J) \tag{4}$$

This operation gives opposite results according to dilation based morphological reconstruction. It reconstructs dark regions in grayscale images.

2.5. Opening and opening by reconstruction

When erosion is applied on the image and then dilation is applied on the resulted image, this procedure is called opening operation. Grayscale opening suppresses bright regions smaller than the structuring element in the image while leaving the rest of the image unchanged. The mathematical description of opening is given as in Equation 9 [5].

$$I \circ b = (I \ominus b) \oplus b \tag{5}$$

The opening by reconstruction of size n of the image I is defined as the reconstruction by dilation of I from the erosion of size n of I [5]. The opening by reconstruction of image I can be defined as in Equation 10.

$$O_R^{(n)} = R_I^D[(I \ominus nb)] \tag{6}$$

In this equation, $(I \ominus nb)$ stands for n erosions of I by b, D is given to emphasize dilation operation, n is the size of iamge I.

2.6. Closing and closing by reconstruction

Closing is described as erosion of the dilation applied image. Grayscale closing operation removes the dark features smaller than the structuring element as an inverse function of grayscale opening. The mathematical definition of closing is given as in Equation 11 [5].

$$I \cdot b = (I \oplus b) \ominus b \tag{7}$$

The closing by reconstruction of size n of the image I is defined as the reconstruction by erosion of I from the dilation of size n of I and it can be defined as in Equation 12 [5].

$$C_R^{(n)}(I) = R_I^E[(I \oplus nb)] \tag{8}$$

In this equation, $(I \oplus nb)$stands for n dilations of I by b, D is given to emphasize dilation operation, n is the size of image I.

2.7. Multiscale edge detection

The multiscale edge detector is firstly introduced by [4]. Multiscale gradient algorithm is used for greater robustness to noise [9]. The smaller the size of structuring element can increase the ability to detect fine edges while it can decrease the noise removing capacity. The large size of structuring element can remove the noise more effectively but it decreases the ability of detection fine edges [32]. According to these observations, multiscale sizes of structuring element are used for effective results. Analysis of the image with different size of structuring elements supports the meaning of multiscale. The mathematical representation of the multiscale edge detector that gives gradient image is given as in Equation 13.

$$MG(f) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[\left((f \oplus b_i) - (f \ominus b_i)\right) \oplus b_{i-1}\right] \tag{9}$$

where n is scale and b_i denotes the group of square structuring elements where sizes are $(2i+1) \times (2i-1)$ pixels, $\oplus$ stands for dilation operation, $\ominus$ stands for erosion operation.

2.8. Contrast Stretching

Contrast stretching transformation only slightly enhances the darker regions while the brighter regions of the image remain more or less unchanged [33].

3. Watershed and Marker Controlled Watershed Segmentation

Watershed transformation is a region-based segmentation method. Watershed segmentation is generally applied on a gradient image. Gradient of an image refers to measuring how the image"s intensity value is changing. Gradient image has two information which are magnitude and direction. The gradient magnitude explains how quickly the intensity value is changing and the gradient direction means the direction in which the information is changing [34]. For watershed transformation, gradient magnitude is needed. Because, gradient form of any image can be thought as a topographic relief. From this point of view, each pixel value of the gradient image corresponds

to the height of this point. In other words, dark pixels indicate low altitudes and light pixels indicate high altitudes [35]. Using the topographical meaning of the gradient image, watershed transform can be explained easily. Watershed transformation can be modeled as flooding (immersed) based or rainfalling based expression.

The valleys, high ridges and hillsides are important descriptions for flooding or immersion-based approach of the watershed segmentation. The valleys, high ridges and hillsides correspond to regional minimas, watershed ridge lines and catchment basins, respectively [36]. This topographical area is slowly immersed into water or in other words, the flooding process is started. Then, from the minimum levels of the valleys (or lowest altitudes) the surface is started to fill. The water will fill up different catchment basins gradually. The watershed (or dam) is created to avoiding mixing of waters in neighboring catchment basins [7]. This watershed ridge lines are created as one pixel width [4]. So, the regions which are separated from each other"s by watershed ridge lines are the segmented regions of the image.

The other approach for the watershed segmentation is rainfalling. Raindrops fall on the mountain of the topographical surface and it moves towards to lowest altitude (regional minimum) because of the gravity. For each point, algorithm tracks the path that a droplet of water would follow if it fell at that point [37]. A segment is constituted from all waters that flow to the same regional minimum. When a point has more than one path towards the different steepest surfaces then it can be allocated to any one of the local minimum [38].

One of the drawbacks of watershed algorithm is oversegmentation. Oversegmentation problem is caused by small variations of the gradient image. Markers are used to overcome the oversegmentation problem [4]. Markers are founded by a set of morphological operations [39]. The gradient image is computed by using different ways such as gradient filter or morphological gradient operator. Then, image markers are detected after some operations and the gradient image is modified by superimposing these founded markers into it. After that, watershed segmentation is applied to modified gradient image and correctly segmented image is obtained. Markers are the connected components in an image [3,6].

4. Algorithms

Five different current articles about marker-controlled watershed segmentation are examined. All of them are proposed for different type of images, so different steps are followed for all algorithms. In this study, a grayscale bone plasmacytoma image is used in the comparison of the algorithms. A bone plasmacytoma image is cropped from an image which is downloaded from "www.webpathology.com" [40]. Usage of this data which are obtained from this website, do not require ethics committee approval to the academic researchers. Thus, all of the algorithms are modified for segmenting this image correctly. All steps in the each of the modified algorithms are explained in detail.

4.1. Parvati & Rao & Das algorithm

A study on marker-controlled watershed segmentation is created by Parvatiet al. [9]. In their article, the proposed work is applied on four different images which are two MR medical images, an aerial image and a high-resolution satellite image. The results of standard watershed segmentation and proposed work about marker-controlled watershed segmentation are given in their article.

Firstly, images in color form are converted into grayscale form. Then, multiscale edge detector operation is applied on the grayscale form of the image to obtain the gradient image.

Secondly, morphological image reconstruction is used to create foreground and background markers. Erosion-based grayscale reconstruction and followed by dilation-based grayscale reconstruction are applied on the gradient image. The regional maximas of the reconstructed image are found to get smooth edges for foreground markers. After that, foreground markers are obtained by superimposition of regional maximas into the original image. The superimposed image is converted to binary form and the Euclidean distance of it is calculated to create background markers.

Finally, the morphological reconstruction of the gradient image is created by using foreground and background markers. Then, the watershed transform is applied on the reconstructed gradient image and the segmented image is obtained.

Algorithm 1:

1. Compute the multiscale gradient of the grayscale input image
2. Find erosion-based morphological reconstruction form of the gradient image
3. Calculate the dilation-based morphological reconstruction form of erosion-based reconstructed image
4. Get regional maximas of the dilation-based reconstructed image
5. Compute foreground markers by superimposing the regional maximas into input image
6. Obtain background markers by taking the Euclidean distance of superimposed image
7. Acquire the morphological reconstruction of the gradient image using foreground and background markers
8. Take the watershed transform of the reconstructed gradient image
9. Obtain the RGB labeled form of the watershed segmentation result

4.2. Reza & Eswaran & Dimyati algorithm

The article of proposed method for marker-controlled watershed segmentation is studied by Wasif Reza et al. [11]. The proposed method can be categorized into three main stages. Initial stage includes preprocessing algorithms to make the bright object features more distinguishable from the background. The subsequent stage is used for detection of image markers to modify the gradient image to control oversegmentation. The last stage includes the watershed segmentation to trace the boundary from the marker modified gradient. All of these stages were applied on an original fundus image in their article. However, some parts are changed for grayscale bone plasmacytoma image and the modified algorithm is described as follows.

In the first stage, averaging filter is applied on the grayscale image to mix the small objects with low intensity variations to the background, while leaving the objects of interest relatively unchanged. The average filter is applied to the image using the Equation 14 [9].

$$f(x,y) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^{M \times N} R_i(x,y) \tag{14}$$

where R is original image, f is filtered image and (x, y) corresponds to pixel location. In this equation, $M \times N$ corresponds to the mask size and the filter is taking the average of all values within the mask. After that, contrast stretching transformation is applied on the filtered image to make the bright object features more distinguishable from the background. Next, negative transformation is applied on the contrast enhanced image and gradient magnitude is obtained by linear filtering (Sobel filter) of negative transformed image. Negative transformation converts dark pixels into light and light pixels into dark by subtracting the pixel values from 255 for an 8-bit grayscale image.

In the second stage, extended minima transformation is applied on the negative transformed image and internal markers are obtained. Internal markers can be associated with objects of interest. Extended minima transform is the regional minima of the H-minima transform. H-minima transform suppresses all minima whose depth is lower than or equal to the given depth, h [41]. While extended minima transform is applied, the given depth is important and it is specified by the user as an input. Then, Euclidean distance of the inverse of internal markers is calculated and watershed segmentation is applied on this distance map image to obtain the external markers. External markers can be associated with background. Euclidean distance transform assigns a number that is the distance between that pixel and the nearest nonzero pixel [5]. The external markers partition the image into regions, and each region contains a single internal marker and part of the background.

The modification of the gradient magnitude using internal and external markers is performed by using the minima imposition. This technique imposes the regional minimas at the marker locations. The modified gradient magnitude only has regional minima where superimposition of internal and external markers is nonzero.

In the last stage, watershed transform of the modified gradient image is created and red green blue (RGB) labeling is applied on the segmentation result.

Algorithm 2:

1. Apply average filter to the grayscale image
2. Find contrast stretching transformation of filtered image
3. Calculate negative transformation of enhanced image
4. Compute gradient magnitude of the negative transformed image using Sobel operator
5. Obtain internal markers using extended minima transformation of the negative transformed image
6. Take the inverse of internal markers
7. Take Euclidean distance transform of the inverse of internal markers
8. Get external markers using the watershed transform of distance transformed image
9. Gain the modified gradient using minima imposition of gradient image with internal and external markers
10. Take the watershed transform of modified gradient and label it by RGB conversion

4.3. Kaur & Jindal algorithm

Kaur and Jindal are proposed a work about marker-controlled watershed segmentation and this proposed work is applied on a Digital Imaging and Communication in Medicine (DICOM) lung image [10]. In their article, firstly, a filter is applied on the grayscale image to reduce the noise. For the grayscale bone plasmacytoma image, median filter is preferred. Morphological gradient operation is applied on the filtered image to obtain the gradient image. After the gradient form is calculated, opening by reconstruction is implemented on gradient image and then closing by reconstruction is implemented on reconstructed image. A flat maxima inside of the each object is created through these two operations and these regional maximas are calculated. Foreground markers are obtained by calculating regional maximas of resulted reconstructed image. After that, thresholding is applied on the resulted reconstructed image and background markers are computed. Using background markers, watershed ridge lines are created by applying firstly distance function on background markers and after that inverse of the watershed segmentation of this distance function is calculated. Then, minimums of foreground markers and watershed ridge lines are imposed to gradient image and modified gradient image is formed. Lastly, watershed segmentation is applied on the modified gradient image and is labeled to RGB. For a better visual, labeled image is superimposed to grayscale image.

The proposed work of M. Kaur and G. Jindal article is modified for segmentation of a grayscale bone plasmacytoma image and steps are given as follows.

Algorithm 3:

1. Compute the noise reduced or filtered form of the input grayscale image
2. Calculate the gradient image by using morphological gradient
3. Find the opening by reconstruction of the gradient image
4. Obtain the closing by reconstruction of the previous reconstructed image
5. Get the foreground markers by finding regional maximas of the resulted reconstructed image
6. Get the background markers by thresholding the resulted reconstructed image (or input image)
7. Achieve the distance form image of the background markers and then apply watershed on distance form image
8. Obtain the watershed ridge lines by taking inverse of the watershed applied image
9. Gain the modified gradient by imposing minimums of foreground markers and watershed ridge lines
10. Apply the watershed segmentation on modified gradient image and then obtain RGB labeled form of it
11. Show the RGB labeled segmentation result on grayscale input image by using superimposition

4.4. Allaoui & Nasri algorithm

El Allaoui and Nasri are studied a work on marker-controlled watershed segmentation [12]. In their article, the proposed work is applied on six different medical images such as cell, muscle, brain, foot and dental image. Two different results, which are obtained only watershed and marker-controlled watershed, are given in their article. This algorithm is applied on grayscale bone plasmacytoma image in this study and stages are given in detailed as follows.

Mainly, this proposed work can be categorized as morphological reconstruction, markers extraction of the regions and watershed segmentation. All operations from morphological reconstruction to the markers extraction can be thought like preprocessing stage. In this stage, firstly dilation based morphological reconstruction is applied on the grayscale image and the complement of the result is obtained. In case of dilation based morphological reconstruction, shape and size of structuring element are important inputs for dilation and correct segmentation. After that, difference image obtained by subtraction of the complement image from the grayscale image. This difference image can be seen as gradient form in other proposed works.

In markers extraction stage, firstly extended minima transform is applied on difference image and the transformed image is eliminated from the noise. Extended minima and related H-transform are explained in part 4.2. Foreground markers are obtained from resulted image. To obtain background markers, Euclidean distance function is applied on the foreground markers. Euclidean distance gives a number for each pixel which corresponds to the distance from that pixel to the nearest nonzero pixel. The watershed segmentation is applied on background markers. Watershed ridge lines are achieved by applying the superimposition of the resulted image to the background markers.

In the final section, minimums of foreground markers image and watershed ridge lines image are imposed to difference image. After that, watershed segmentation is applied on the modified difference image and correct segmentation result is obtained.

Algorithm 4:

1. Compute the dilation-based morphological reconstruction of the grayscale input image
2. Take the complement of the reconstructed image
3. Calculate gradient image by subtracting the complement image from the grayscale image
4. Obtain the markers by detecting the regional minimums of the difference image
5. Get the cleared markers by using erosion followed by dilation
6. Find modified gradient by imposing the minimums to the difference image using markers
7. Take the watershed transform of the modified gradient image
8. Achieve the RGB labeled form of the watershed segmentation result

4.5. Kalapala & Rao & Srinivas algorithm

A study about marker-controlled watershed segmentation is performed by Kalapala et al. [13]. The proposed method is applied on a satellite image which includes trees. Their algorithm can be categorized into three main steps. First step includes the operations to obtain the gradient image. The second step is performed to find the foreground and background markers. The last step includes the watershed transform. The algorithm is modified for the grayscale bone plasmacytoma image and all steps are given below.

The histogram equalization operation is firstly applied to grayscale image. This method enhances the contrast of the image. After that, Laplacian of Gaussian (LoG) edge detector operation is applied to the histogram equalized image. LoG edge detector operation gives the same effect with gradient operation.

The opening by reconstruction and followed by closing by reconstruction are applied to the edge detected image. Then, regional maximas of the resulted reconstructed image are found and foreground markers are obtained. The background markers are detected by taking the Euclidean distance transform of the foreground markers. Using the foreground and background markers, edge detected image is modified. Modified image only has minima at the foreground and background marker locations.

The watershed transformation is applied on the modified edge detected image. Subsequently, RGB labeling is performed to the segmented image.

Algorithm 5:

1. Compute the histogram equalization of the grayscale input image
2. Apply the LoG edge detector operation to equalized image for obtaining the image that is similar to gradient form
3. Get the opening by reconstruction of edge detected image
4. Calculate the closing by reconstruction from opening by reconstructed image
5. Obtain the foreground markers by finding the regional maximas of the resulted image
6. Find the background markers by taking the Euclidean distance transform of the foreground markers
7. Acquire the modified edge detected image by using the foreground and background markers
8. Apply the watershed transform to the modified edge detected image
9. Achieve the RGB labeled form of the watershed segmented image

5. MATLAB Educational Application Design and Results

MATLAB is a commonly used program for both education and image processing applications [42]. Because, in addition to the many toolboxes, it contains image processing toolbox and App Designer. Image processing toolbox provides functions to analyze the images. App Designer enables the creation of professional applications without requiring advanced software development expertise. Additionally, it allows learners to access the underlying code for all buttons and functions [43]. Through App Designer, learners can not only examine application design elements—such as buttons and functionalities—but also observe the visual effects of the implemented algorithms. It is a user-friendly tool, it creates the contact between user and program by just mouse clicks. MATLAB is both easy to use and easy to teach. Anyone with basic knowledge of programming or coding can learn it easily. MATLAB has also easy accessible design tool; it can be widely used in university labs. Because, it is easy to learn and toolboxes helps to analyze the data and teach the subjects more effectively in many areas, especially in engineering. It will be easier and permanent for the students to comprehend the subject if the lecturers/teachers explain any subject through a sample related App Design.

In this study, A MATLAB App Design is designed as an effective tool for exploring different marker-controlled watershed segmentation techniques. The most important benefit of this design is that the user does not need complex mathematical calculations to use it. The design consists of two stages; entrance screen and application screen. A general flow diagram for the MATLAB App Design is given in Figure 1.

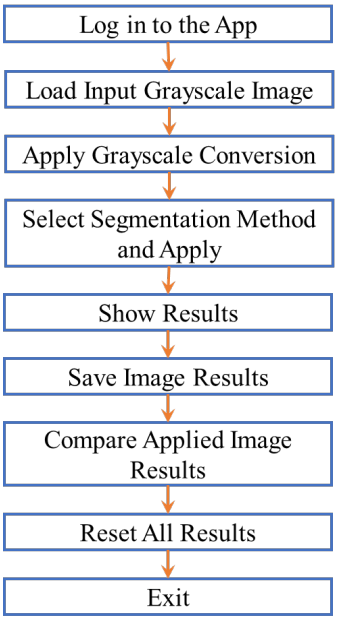


Figure 1. An overview flowchart of the MATLAB App Design process.

The entrance screen is firstly opened and prevents the unauthorized access. After name and password are correctly entered, the application screen is opened. The entrance screen of the design is shown in Figure 2.

The application screen consists of three main stages; initial process stage, methods for segmentation application and options after a method is applied. The opening form of application screen is shown in Figure 3. In the initial process stage, there are two buttons. These are “Load Image” and “Grayscale Conversion”. When “Load Image” button is pressed, a new window will be opened to select and image from the memory and initial directory is set to the current directory of the MATLAB. After an image is selected, the name of the image with its extension is located in a edit field, that is in the near of “Load Image” button. The selected image displayed in axes1 as an “Input Image”. These operations are shown in Figure 4.



Figure 2. Entrance window.

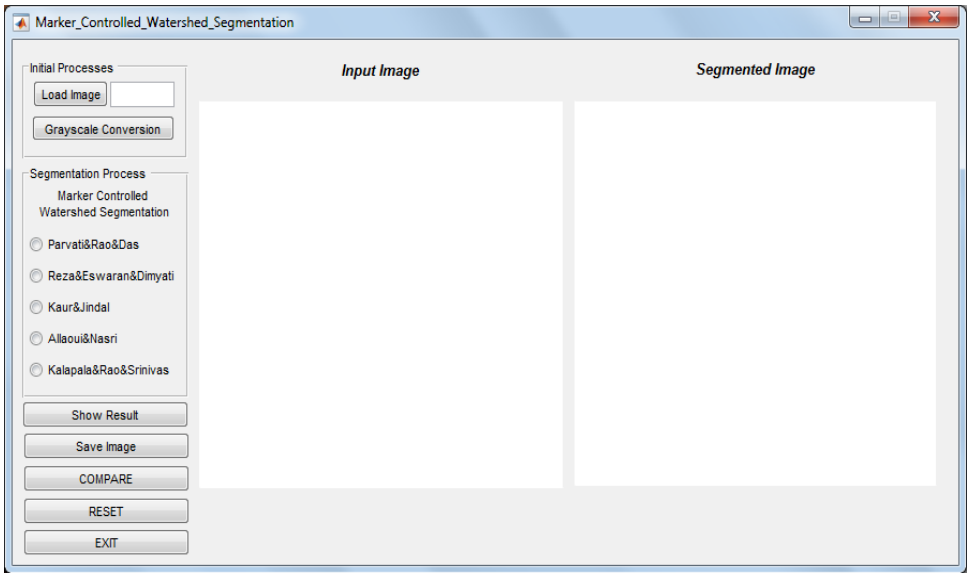


Figure 3. Application window.

If the loaded image is in colored form (RGB), the second button in the initial process stage is pressed to convert it into grayscale form. After pressing this button, color image is changed with the gray scale image and displayed in the axes1. The resulted form of the application screen is shown in Figure 5. As shown in this figure, at the below of the grayscale image two image information is presented. First one specifies the size of the image and other specifies the maximum and minimum grayscale values in the image. This information makes the image more meaningful to the user.

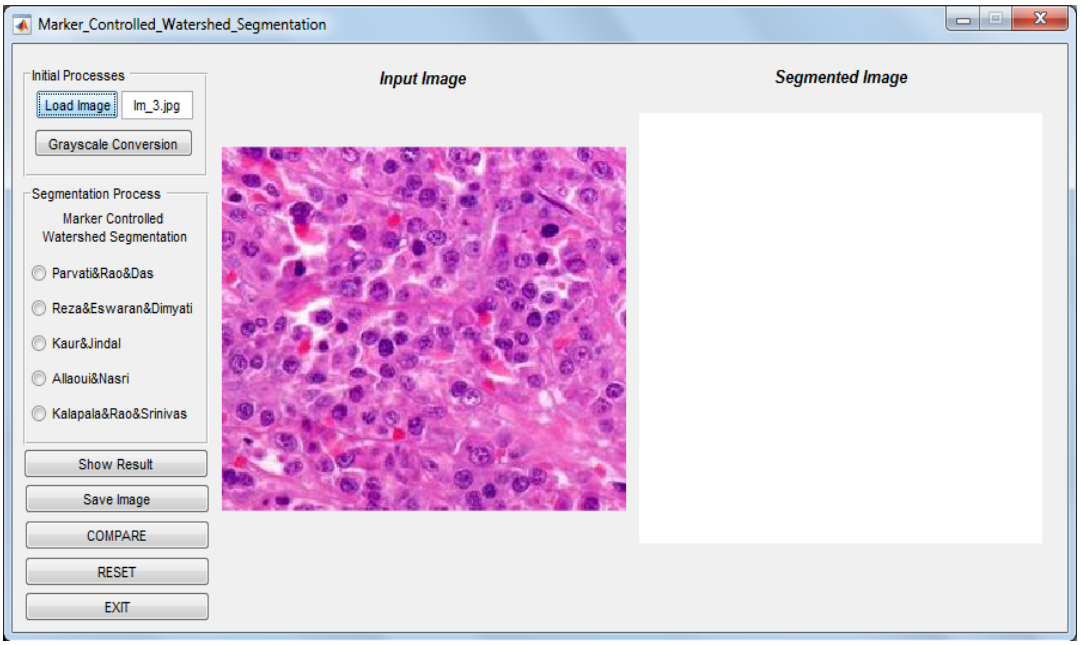


Figure 4. Result of "Load Image".

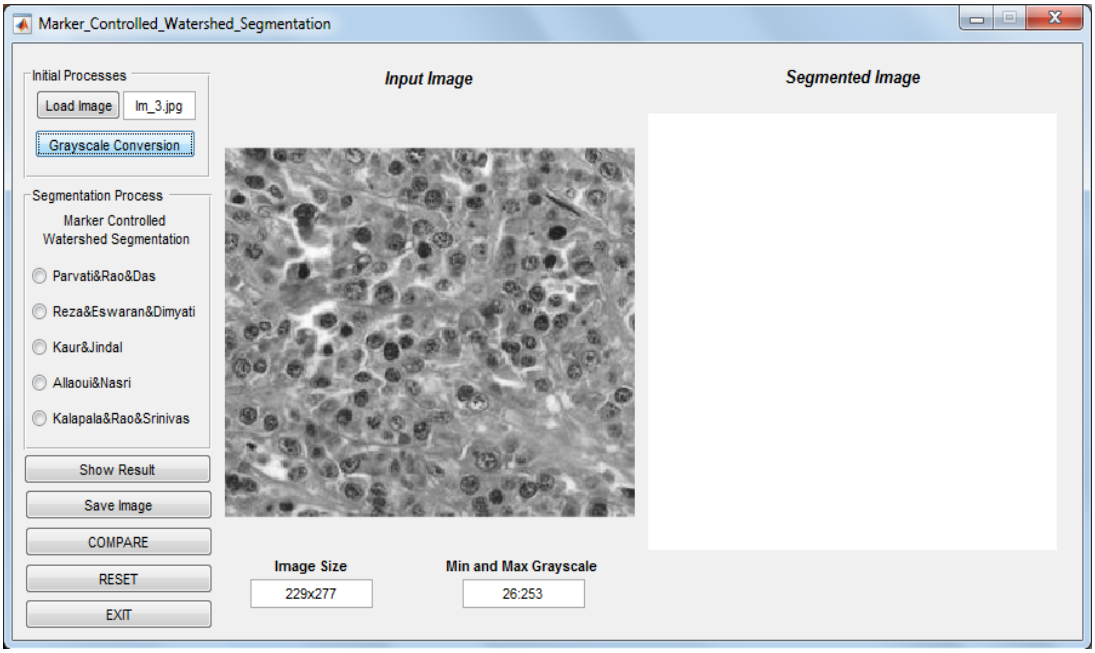


Figure 5. Result of "Grayscale Conversion".

The other stage is the "Segmentation Process". There exist five different radio buttons to apply five different algorithms. When one of the algorithms is selected, a new window is opened. If "Algorithm 2" is selected, an opened screen is given in Figure 6.

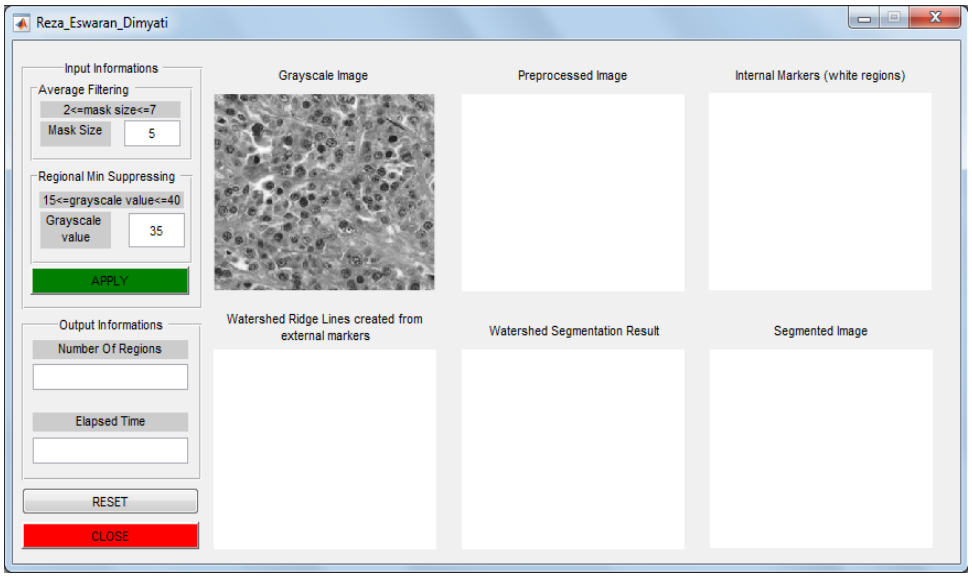


Figure 6. Result of "Reza&Eswaran&Dimyati".

In this screen, mainly there are three stages; input information, output information and options. There are two input values for Algorithm 1 which should be entered by user. One of them is a mask size value of the average filter and another is a grayscale value for regional minimum suppressing operation. There is information at the above of inputs. This information show valid range of input values. The default values of the mask size value and grayscale value are given as 5 and 35, respectively. After the input values are entered, "APPLY" button is pressed and the images which are computed as a result of Algorithm 1 are shown. All the images are shown in the axes which are related with the names. They show important intermediate stages of segmentation and they make the process easier to understand for education. In addition to the segmented images, the number of segmented regions and elapsed time are presented below of these. After pressing the "APPLY" button, created images and results with respect to the given input values are presented in Figure 7.

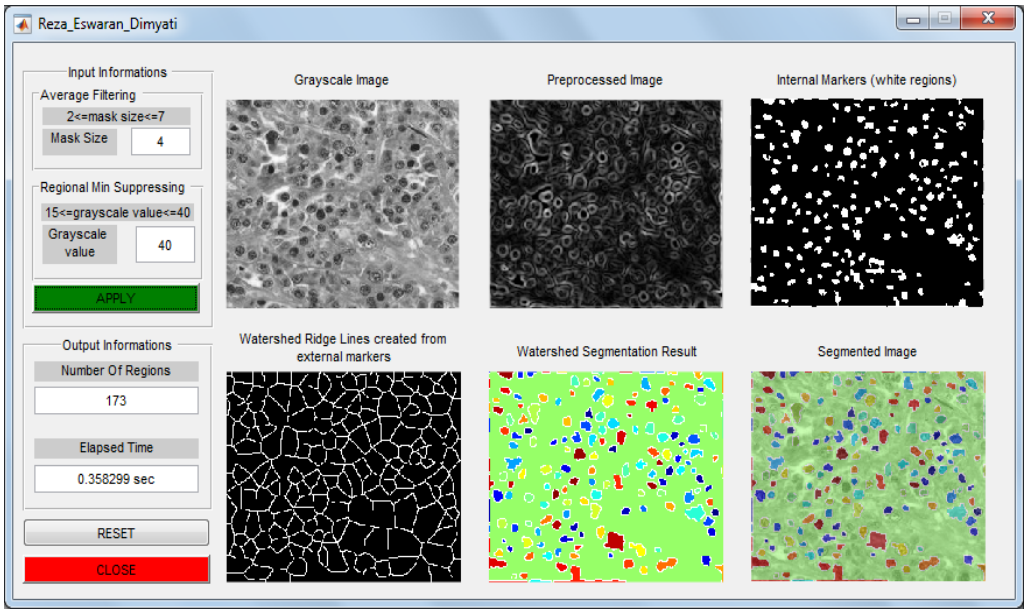


Figure 7. Result of "Apply" Button.

To perform a new test with different parameters, “RESET” button is pressed and all results (images and output information) are cleared and input values are replaced with default ones. For closing this screen and returning the application screen, “CLOSE” button is pressed. After the “CLOSE” button is pressed in the application screen, the last selected algorithm with the results can be seen on the application screen.

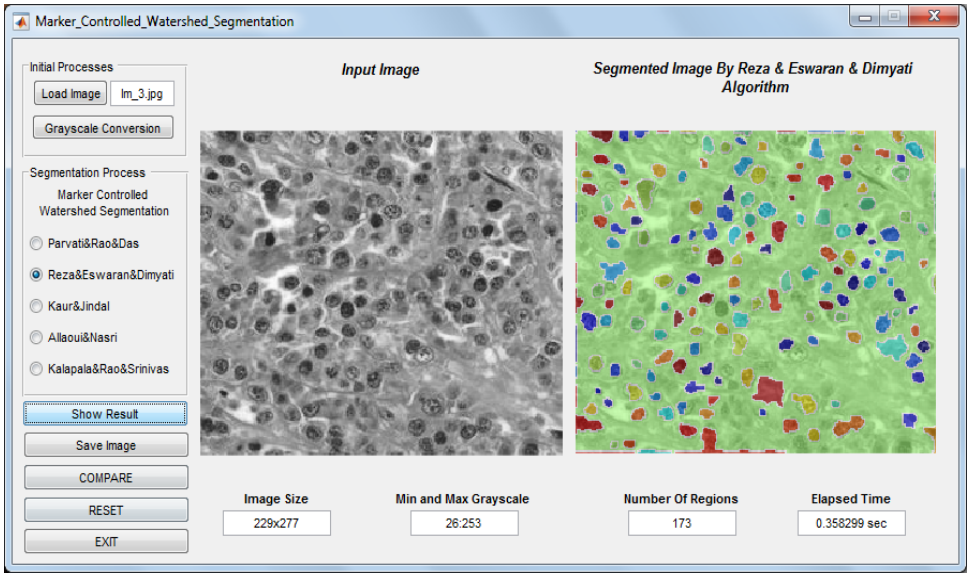


Figure 8. Result of “Show Result” Button.

Options stage is created to make the design more convenient. Since, it enables to operations in the resulted image. “Show Result” button is pressed for comparing input image and the segmented image. The result of this button is presented in Figure 8. The output information in the screen of Algorithm 1 come at the below of the segmented image. This option helps to improve the visual appearance and the quality of education.

For saving the segmented image, “Save Image” button is pressed and a new window is opened. In this new window, name of the image and directory for saving can be changed by the user. Then, format type of the segmented image is selected. After that, “Save” button is pressed and the window is closed.

After each algorithm is applied, “Show Result” and “Save Image” buttons should be pressed, respectively, to observe the result of the “COMPARE” button. If two or more algorithms have been applied by following the sequence described up to now, the “COMPARE” button can be used. For comparing two saved segmented images, “COMPARE” button is pressed and a new window is opened as presented in Figure 9.

“Select First Image” button is pressed for selecting a segmented image. Then, the selected image, its name and output information are placed to the axes1 as shown in Figure 10(a). All steps for the “Selected First Image” button are valid for “Select Second Image” button. The results of this button is placed to the window as given in Figure 10(b). After the comparison is completed, “EXIT” button is pressed. This window is closed and the application window appears.

The remaining two buttons in the application window are “RESET” and “EXIT”. If “RESET” button is pressed, the window is cleared and it returns the initial form as shown in Figure 3. For closing the application window, “EXIT” button is pressed.

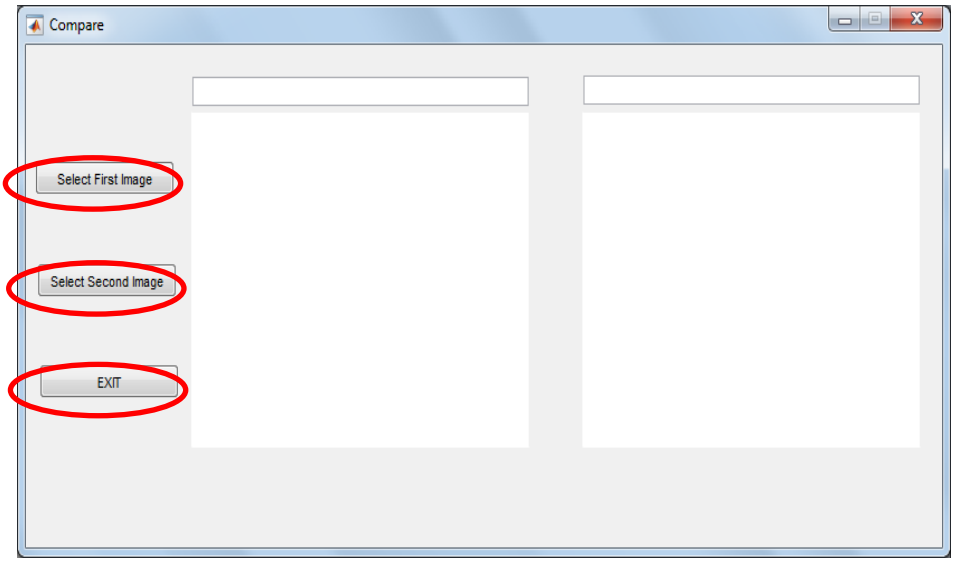
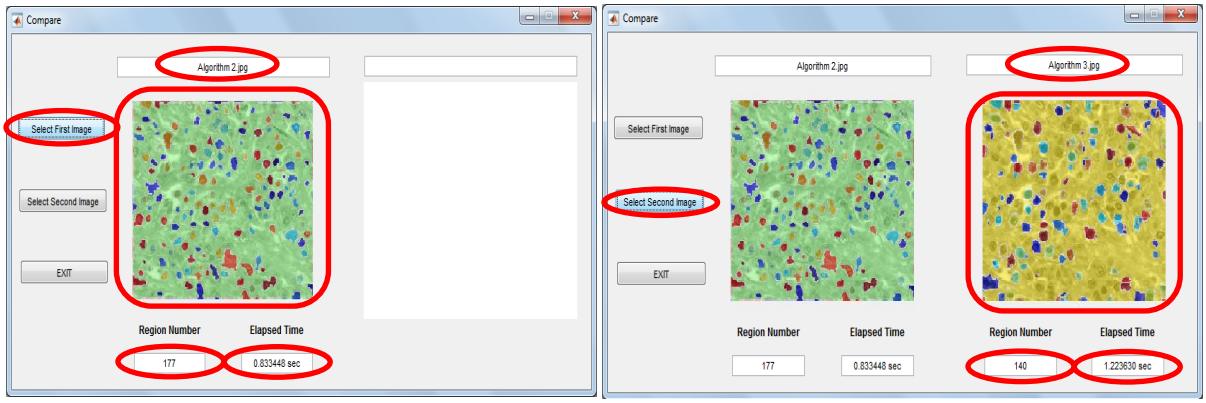


Figure 9. New Window After "COMPARE" Button.



(a) (b)

Figure 10. (a) Result of "Select First Image" (b) Result of "Select Second Image".

Segmentation results of the different methods, which are applied to the grayscale bone plasmacytoma image, are shown in Figure 11. The results of all algorithms with their output data information are shown in Table 1. The best segmented result was obtained from Reza & Eswaran & Dimyati algorithm and the fastest segmentation was computed by Allaoui & Nasri algorithm according to Table 1. The differences between the results of the all algorithms can be defined as preprocessing stages and how to obtain gradient form of the image. The preprocessing stage is important for correct segmentation because gradient of the enhanced input image gives better results than gradient of the unenhanced image. Also, the way how to obtain the gradient form is important because it affects the image markers and image markers also affect the segmentation performance.

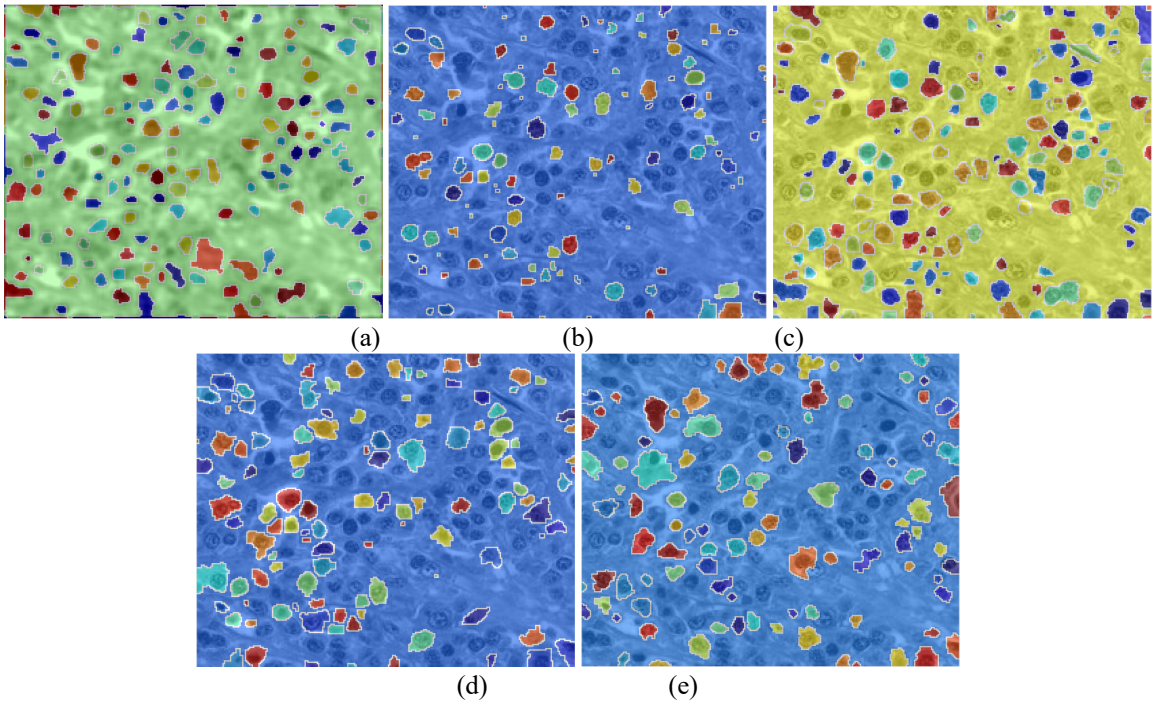


Figure 11. Segmentation results of (a) Reza&Eswaran&Dimyati, (b) Parvati&Rao&Das, (c) Kaur&Jindal, (d) Kalapala&Rao&Srinivas, (e) Allaoui&Nasri algorithms.

Table 1. Output data information of all algorithms.

Property / Algorithm	Region Number	Elapsed Time (sec)
Reza & Eswaran & Dimyati	177	1.083245
Parvati & Rao & Das	116	3.473332
Kaur & Jindal	151	1.393245
Kalapala & Rao & Srinivas	112	0.577348
Allaoui & Nasri	99	0.250725

6. Conclusion

In this study, some preprocessing morphological operations and five different published marker-controlled watershed algorithms were expressed clearly. An effective and educational GUI tool was designed using MATLAB App Designer for making comparison easier and quick understanding. This tool is very instructional for both pathology and image processing students. This was obtained by means of easy usability and extensive functionality of MATLAB App Designer. MATLAB is also a widely used and highly functional tool for many educational and scientific subjects based on mathematical calculations. By using functionality of MATLAB, a grayscale bone plasmacytoma image was segmented by applying all algorithms and the results were compared. In comparison of five different algorithms, the most effective and accurate segmentation was obtained by applying

Reza & Eswaran & Dimyati algorithm for this image. This study also shows that marker-controlled watershed segmentation can be applied in different ways according to the way of marker determination, preprocessing stage and the way of the gradient image determination.

This study can be improved by adding more published algorithms about marker-controlled watershed segmentation to compare more effectively. Also, a new and more appropriate algorithm can be created to increase the accuracy of the watershed method. In addition to all improvements, these published algorithms can be applied to different images and the best one can be observed as more accurately. Consequently, designed GUI using MATLAB App Designer can be used as an educational tool in lessons to teach and to make comparison of the different watershed algorithms.

References

[1] Yumuş M, Apaydın M, Değirmenci A, Kaplanoğlu H, Kesikburun S, Karal Ö. Deep Convolutional Neural Networks Using SegNet for Automatic Spinal Canal Segmentation in Axial MRI. In: 2023 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU); 11-13 October 2023; Sivas, Türkiye: IEEE. pp. 1-6.

[2] Kilic C, Degirmenci A, Karal O. Segmentation of the Area Between Anterior and Posterior Vertebral Elements in Axial MR Images Using U-Net. In: 2024 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU); 16-18 October 2024; Ankara, Türkiye: IEEE. pp. 1-6.

[3] Beucher S, Meyer F. The morphological approach to segmentation: the watershed transformation. In: Mathematical Morphology in Image Processing. 1st ed. Boca Raton, FLA, USA: CRC Press, 1993.

[4] Vincent L, Soille P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell 1991; 13(06): 583-598.

[5] Gozalez RC, Woods RE. Digital Image Processing, 3rd ed. NY, USA: Pearson, 2009.

[6] Meyer F, Beucher S. Morphological segmentation. J Visual Commun Image Represent 1990; 1(1): 21-46

[7] Beucher S. Use of watersheds in contour detection. In: Proc. Int. Workshop on Image Processing; 17-21 September 1979; Rennes, France. pp. 17-21.

[8] Bieniek A, Moga A. An efficient watershed algorithm based on connected components. Pattern Recognit 2000; 33(6): 907-916.

[9] Parvati K, Prakasa Rao BS, Mariya Das M. Image Segmentation Using Gray-Scale Morphology and Marker-Controlled Watershed Transformation. Discrete Dyn Nat Soc 2008; 2008(1): 384346.

[10] Kaur M, Jindal G. Medical image segmentation using marker controlled watershed transformation. IJCST 2011; 2(4): 548-551.

[11] Reza AW, Eswaran C, Dimyati K. Diagnosis of diabetic retinopathy: automatic extraction of optic disc and exudates from retinal images using marker-controlled watershed transformation. J Med Syst 2011; 35(6): 1491-1501.

[12] El Allaoui A. Medical image segmentation by marker-controlled watershed and mathematical morphology. IJMA 2012; 4(3): 1-9.

[13] Kalapala M, Rao VS, Srinivas K. Robust Tree Crown Delineation using Novel Marker Controlled Watershed Segmentation Algorithm. Int J Eng Res Technol 2012; 1(7):1-11.

[14] Kaleem M, Sanaullah M, Hussain MA, Jaffar MA, Choi TS. Segmentation of brain tumor tissue using marker controlled watershed transform method. In: International Multi Topic Conference; 28-30 March 2012; Berlin, Heidelberg: Springer. pp. 222-227.

[15] Koyuncu CF, Arslan S, Durmaz I, Cetin-Atalay R, Gunduz-Demir C. Smart markers for watershed-based cell segmentation. PloS one 2012; 7(11): e48664.

[16] Yahya AA, Tan J, Hu M. A novel model of image segmentation based on watershed algorithm. Adv Multimedia 2013; 2013(1): 120798.

[17] Beare R, Chen J, Adamson CL, Silk T, Thompson DK, Yang JYM, Andersan VA, Seal ML, Wood AG. Brain Extraction Using the Watershed Transform From Markers. Front Neuroinf 2013; 7(32): 1-15.

[18] Sivagami M, Revathi T. Marker Controlled Watershed Segmentation Using Bit-Plane Slicing. IJIPVS 2013; 1(3):179-183.

[19] Napoleon D, Santhoshi R, Shameena A. Verdict of Objects in Medical Images Using Marker-Controlled Watershed Image Segmentation. Int J Comput Appl Technol 2013; 975: 8887.

[20] Ravi S, Khan AM. Bio-medical Image Segmentation Using Marker Controlled Watershed Algorithm: A Case Study. IJRET 2014; 3: 26-30.

[21] Bandara, R. Image segmentation using unsupervised watershed algorithm with an over-segmentation reduction technique. arXiv preprint arXiv:1810.03908 2018.

[22] Lahitha K, Amrytha R, Stafford M, Shivakumar DrM. Implementation of Watershed Segmentation. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering 2016; 5(12): 196-199.

[23] Lu Y, Jiang Z, Zhou T, Fu S. An Improved Watershed Segmentation Algorithm of Medical Tumor Image. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; December 2019; 677 (4): IOP Publishing. pp. 042028.

[24] Sarma R, Gupta YK. A comparative study of new and existing segmentation techniques. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; January 2021; 1022(1): IOP Publishing. pp. 012027.
[25] Dai Y, Meng L, Wang S, Sun F. A marker-controlled watershed algorithm for the intelligent picking of long jujubes in trees. Forests 2022; 13(7): 1063.
[26] Guo Q, Wang Y, Yang S, Xiang Z. A method of blasted rock image segmentation based on improved watershed algorithm. Sci Rep 2022; 12(1): 7143.
[27] Ghaderi S, Ghaderi K, Ghaznavi H. Using marker-controlled watershed transform to detect baker's cyst in magnetic resonance imaging images: A pilot study. J MED SIGNALS SENS 2022; 12(1): 84-89.
[28] Salman SD, Bahrani AA. Segmentation of tumor tissue in gray medical images using watershed transformation method. Int J Adv Comp Techn 2010; 2(4): 123-127.
[29] Goshal D, Acharjya PP. MRI image segmentation using watershed transform. Int J of Emerging Technology and Advanced Engineering 2012; 2(4): 373-376.
[30] Solomon C, Breckon T. Fundamentals of Digital Image Processing: A practical approach with examples in Matlab. 1st ed., NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011.
[31] Vincent L. Morphological grayscale reconstruction in image analysis: applications and efficient algorithms. IEEE Trans Image Process 1993; 2(2): 176-201.
[32] Chanda B, Kundu MK, Padmaja YV. A multi-scale morphologic edge detector. Pattern Recognition 1998; 31(10): 1469-1478.
[33] Abdul-Nasir AS, Mashor MY, Mohamed Z. Modified global and modified linear contrast stretching algorithms: new colour contrast enhancement techniques for microscopic analysis of malaria slide images. Comput Math Methods Med 2012; 2012(1): 637360.
[34] Jacobs D. Image Gradients. www.cs.umd.edu/~djacobs/CMSC426/ImageGradients.pdf Published 2005. Accessed 05 June 2023.
[35] Beucher S. The watershed transformation applied to image segmentation. Scanning microscopy 1992; 1992(6): 299-314.
[36] Sun H, Yang J, Ren M. A fast watershed algorithm based on chain code and its application in image segmentation. Pattern Recognit Lett 2005; 26(9): 1266-1274.
[37] De Bock J, Philips W. Line segment based watershed segmentation. In: International Conference on Computer Vision/Computer Graphics Collaboration Techniques and Applications; March 2007; Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. pp. 579-586.
[38] Ruparelia S. Implementation of Watershed Based Image Segmentation Algorithm in FPGA. 2012. Master's Thesis.
[39] Maheshwari D, Shah AA, Shaikh MZ, Chowdhry BS, Memon SR. Extraction of Brain Tumour in MRI Images Using Marker Controlled Watershed Transform Technique in MATLAB. J Biomed Eng Med Imaging 2015; 2(4): 9-16.
[40] www.webpathology.com/ Accessed 13 May 2023.
[41] Jung C, Kim C. Segmenting clustered nuclei using H-minima transform-based marker extraction and contour parameterization. IEEE Trans Biomed Eng 2010; 57(10): 2600-2604.
[42] Chowdary PRV, Babu MN, Subbareddy TV, Reddy BM, Elamaran V. Image processing algorithms for gesture recognition using MATLAB. In: Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Advanced Communication, Control and Computing Technologies; 08-10May 2014; ICACCCT 2014: IEEE. pp. 1511-1514.
[43] Çankaya İ. MATLAB App Designer ile GUI Tasarımı ve Uygulamaları. Ankara, Türkiye: Seçkin Yayıncılık, 2024.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 781-790, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1710943

Kemerli Yapıyla Güçlendirilmiş Sandviç Plakaların Eğme Davranışlarının İncelenmesi

Serdar KAVELOĞLU[1*]
[1] Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye
[*1] serdar.kaveloglu@istiklal.edu.tr

(Geliş/Received: 31/05/2025; Kabul/Accepted: 17/07/2025)

Öz: Sandviç kompozit yapılar otomotiv, uçak, tren, yatçılık, inşaat ve güneş panelleri gibi birçok endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Geçmişten günümüze kadar taş, ağaç, metal ve beton gibi malzemelerden farklı amaçlarla yaya, taşıt ya da demir yolu olarak kullanılan köprülerde yük taşıma kapasitesini artırmak amacıyla kemerli (iki ucu açık yay geometrisinde) yapılar kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı, kemerli yapıların üstün yük taşıma özelliğini sandviç kompozit plakalara uygulamak ve bu sayede yapının eğilme altındaki dayanımını artırmaktır. 3 boyutlu yazıcı ile üretilen ve birbirini tamamlayan kemer geometrisine sahip iki parça arasına, kemer işlevi görecek şekilde karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitler yerleştirilerek oluşturulan sandviç kompozit yapıların eğme dayanımları incelenmiştir. Sandviç kompozitlerin iç kısımları üç boyutlu yazıcıda akrilonitril bütadien stiren (ABS) filamentten bir yüzü düz, diğer yüzü farklı genişliklerde kemer geometrisinde üretilmiştir. Sandviç yapılarda alt ve üst yüzeyler CFRP kompozit plakalar kullanılmıştır. Çalışmada 50 mm, 100 mm, 150 mm kemer genişliğinde 0,5 mm ve 1 mm kemer kalınlığındaki kemerlerle güçlendirilmiş sandviç yapıların eğme dayanımları incelenmiştir. Sonuç olarak, kemerli yapılar sandviç plakaların eğme dayanımlarını artırdığı tespit edilmiştir. 150 mm kemer genişliğindeki 0,5 mm ve 1 mm kemer kalınlığına sahip numunelerde kemersiz yapılara göre maksimum eğme kuvvetinde sırasıyla %34 ve %67 oranında önemli bir artış elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sandviç kompozit, kemerli yapı, ABS, 3 boyutlu yazıcı, CFRP, eğme dayanımı.

Investigation of Bending Behavior of Sandwich Plates Reinforced with Arched Structure

Abstract: Sandwich composite structures are used in many industrial fields, including automotive, aircraft, train, yachting, construction, and solar panels. Historically, arched structures (with an open-ended arch geometry) have been used to increase load-carrying capacity in bridges constructed from materials such as stone, wood, metal, and concrete, used for various purposes such as pedestrian, vehicle, or railway bridges. The aim of this study is to apply the superior load-carrying properties of arched structures to sandwich composite plates, thereby increasing the structure's resistance under bending. The bending strength of sandwich composite structures, created by placing carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composites between two complementary arch-shaped parts produced with a 3D printer, was investigated. The interiors of the sandwich composites were fabricated using a 3D printer using acrylonitrile butadiene styrene (ABS) filament, with one side flat and the other side in an arch geometry of varying widths. CFRP composite plates were used for the upper and lower surfaces of the sandwich structures. The study investigated the flexural strength of sandwich structures reinforced with arches of 0.5 mm and 1 mm thicknesses, with arch widths of 50 mm, 100 mm, and 150 mm. The results showed that the arched structures increased the flexural strength of the sandwich plates. A significant increase of 34% and 67% in maximum bending force was obtained in samples with 0.5 mm and 1 mm arch thickness and 150 mm arch width, respectively, compared to structures without arches.

Key words: Sandwich composite, arched structure, ABS, 3D printer, CFRP, flexural strength.

1. Giriş

Gelişen mühendislik ihtiyaçları doğrultusunda, hafiflik, yüksek dayanım ve enerji soğurma kabiliyeti gibi özelliklere sahip yeni malzemelere otomotiv, havacılık ve denizcilik endüstrileri de dâhil olmak üzere teknik sektörlerde talep artmaya devam etmektedir [1]. Teknik uygulamalarda kullanılan en yaygın yapısal kompozitler arasında sandviç kompozit paneller, lamine kompozitler ve tekstil yapısal kompozitler bulunur [2]. Sandviç yapılar, iki rijit yüzey tabakasının arasında yer alan hafif ve düşük yoğunluklu bir çekirdekten oluşarak, hem eğilme hem de burulma dayanımı açısından verimli bir yapı sunar [3, 4]. Bu yapılar aynı zamanda darbe dayanımı, termal ve akustik yalıtkan gibi avantajlar da sağlar [5]. Özellikle enerji tasarrufu ve yapısal optimizasyonun ön planda olduğu sektörlerde, sandviç panellerin sunduğu performans mühendisler açısından kritik öneme sahiptir [6].

* Sorumlu yazar: serdar.kaveloglu@istiklal.edu.tr Yazarın ORCID Numarası: [1]0000-0003-0157-7314

Son yıllarda üretim teknolojilerindeki gelişmeler, sandviç kompozitlerin üretiminde de devrim yaratmıştır. Bu bağlamda eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemlerine alternatif olarak öne çıkmaktadır [7]. Katmanlı üretim olarak da bilinen bu yöntem, karmaşık geometrilere sahip yapıların daha az malzeme israfı ile daha hızlı ve özelleştirilebilir biçimde üretilmesini mümkün kılmaktadır [8]. Eklemeli imalat, sadece üretim esnekliği sunmakla kalmayıp aynı zamanda yeni malzeme kombinasyonları ve fonksiyonel yapılarla mühendislik tasarımlarında önemli yeniliklerin önünü açmaktadır [9-10]. 3D yazıcıda üretilen malzemeler ve yazıcı parametreleri ile ilgili araştırmalara devam edilmektedir. Gyroid kafes yapıdaki PLA (Polylactic Acid), ABS ve PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) polimer tabanlı malzemelerde en yüksek çekme dayanımı PLA malzemede elde edilmiştir [11]. 3D yazıcıda üretilmiş raf destek profilleri, topoloji optimizasyonuyla aynı taşıma kapasitesinde %70 malzeme tasarruf edilmiştir [12]. Cam elyaf takviyeli polyamide 6 kompozit çekme yükü altında ABS'ye göre %59 daha iyi performans elde edilmiştir [13].

Yapısal sistemlerin tasarımında yalnızca malzeme seçimi değil, form ve geometri de büyük rol oynamaktadır [14]. Bu kapsamda kemerli yapılar, hem tarihî hem de modern inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır [15, 16]. Kemerli formlar, üzerlerine gelen yükleri yanlara ileterek taşıyıcı ayaklara aktarma prensibiyle çalıştıkları için, basınca dayanıklı malzemelerle yüksek taşıma kapasitesi sunarlar. Roma döneminden bu yana kullanılan kemerli köprüler ve tünel açıklıkları, bu yapıların dayanım ve estetik açısından ne denli etkili olduğunu göstermektedir [17]. Modern mühendislikte ise, kemerli yapıların dinamik yükler altında gösterdiği performans da önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir [18]. Metal ve taş malzemedeki kemerli yapıların dayanımlarının deneysel ve analitik çalışmaları yapılmıştır [19, 20].

Sandviç yapılarda son yıllarda tek katlı yerine iki veya çok katlı sandviç plakalarla ile ilgili çalışmalarda hız kazanmıştır. Sandviç yapılarda çok katmanlı çekirdek kullanımı, olası bir kırılmanın yapı içinde kademeli olarak iletilmesini ve böylece kırılmanın geciktirilmesini sağlar. Bu nedenle, havacılık ve uzay mühendisliğinde kullanılmaktadır [21]. Tek ve çok katmanlı sandviç yapıların eğilme [22] ve basma testlerinde [23], çok katmanlı yapıların mekanik özelliklerinin üstün olduğu gözlemlenmiştir.

Çekirdek kısımları üç boyutlu yazıcıda üçgen, kare, trapez, sinüzoidal ve yay gibi farklı geometrilerde üretilen oluklu sandviç kompozit yapıların mekanik özellikleri araştırılmıştır [24-25]. Üçgen ve dikdörtgen oluklu sandviç panellerle yapılan araştırmada üçgen oluklu sandviç panellerin eğme dayanımının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [26]. Yay şeklinde farklı doluluk oranlarındaki oluklu sandviç kompozitlerin yay genişliği ile doluluk oranının mekanik özellikleri üzerine etkili olduğu gözlemlenmiştir [27].

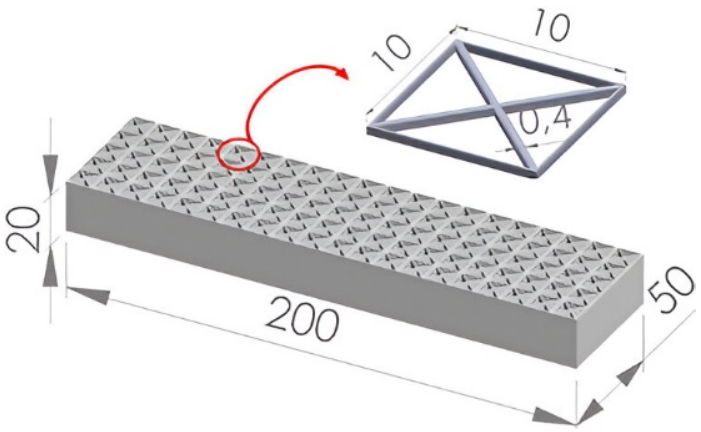
Yukarıda sunulan araştırmalar incelendiğinde, sandviç yapılarla ilgili çalışmaların çoğunda çekirdek kısmı farklı malzemelerle ya da farklı geometrilere sahip sandviç plakaların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmanın literatüre katkısı, ilk defa kemerli yapılar kompozit sandviç plakalara model olarak uygulanmıştır. Böylelikle kemersiz sandviç yapıların kemerle güçlendirilmiş sandviç yapılara göre eğme dayanımlarının ne ölçüde etkilendiği araştırılmıştır. Bu çalışmada üç boyutlu yazıcıda bir yüzü düz, diğer yüzü kemer formunda üretilen ve birbirini tamamlayan iki parça çekirdek arasına, farklı genişlik ve kalınlıktaki CFRP kompozit yerleştirilerek üretilen sandviç kompozitlere 3 nokta eğme testleri uygulanmış, sonuçlar karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Sandviç kompozitlerin üretimi

Sandviç yapıların boyutları ASTM 393-16 [28] standardına göre boyu 200 mm, eni 50 mm olarak belirlenmiştir. Çekirdek kısmı SOLIDWORKS® 2024 3D Tasarım (CAD) yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Bu çalışmada Quadri-Grid geometrisi, 3D baskı ile üretilmiş polimer kompozitlerin mekanik performansını artırmak amacıyla tercih edilmiştir. Quadri-Grid geometrisi, düzenli dörtgen hücrelerin tekrar eden diziliminden oluşan yük taşıma ve deformasyon kontrolü açısından avantaj sağlamaktadır [29]. Numunelerin hem hafif hem de kuvvet dağılımının çok iyi [30] olması amacıyla Şekil 1'de görülen kenar uzunlukları 10 mm, duvar kalınlığı 0,4 mm olan Quadri-Grid geometrisi kullanılmıştır.

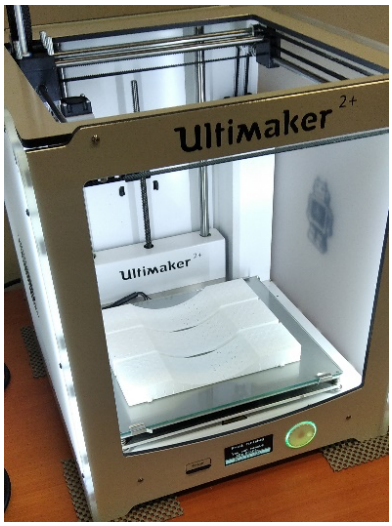
3 boyutlu yazıcıda üretimin yapılabilmesi için Solidworks programında ".stl" uzantılı olarak kaydedilen dosyalar Tablo 1'de gösterilen parametrelerde G-kodu üretilmiştir. Bu parametreler, önceki çalışmalar [31] ve Ultimaker firmasının önerileri dikkate alınarak belirlenmiştir. Ultimaker Cura 5.7.2 [32] CAM yazılımı kullanılarak G-kodları üretilmiştir. Bu kodlarla Şekil 2'de görülen tabla ısıtmalı Ultimaker 2+ [33] marka 3 boyutlu yazıcıda beyaz renkli ABS filamentten çekirdekler üretilmiştir. ABS filament, Ultimaker 2+ yazıcıda kullanımı uygun olduğu için tercih edilmiştir.



Şekil 1. Quadri-Grid geometrisindeki eğme numunesinin ölçülerinin gösterimi.

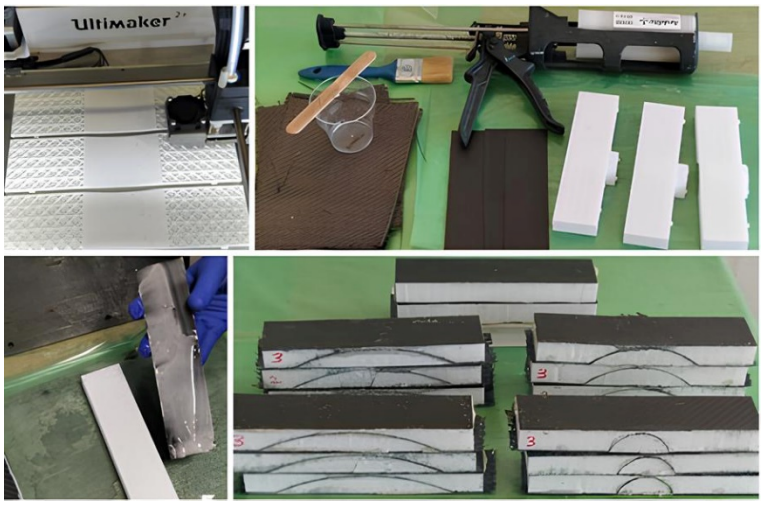
Tablo 1. Ultimaker Cura 5.7.2 CAM yazılımında seçilen parametreler.

Yazıcı:	Ultimaker 2+
Malzeme:	ABS (Ultimaker)
Filament çapı:	2,85 mm
Katman kalınlığı:	0,2 mm
Duvar kalınlığı:	0,4 mm
Üst / Alt kalınlık:	0,4 mm
Yazdırma hızı:	60 mm/s
Boşta gezme hızı:	120 mm/s
Nozul çapı:	0,4 mm
Nozul sıcaklığı:	250 ^{0}C
Tabla sıcaklığı:	80 ^{0}C
Dolgu deseni:	Lines
Dolgu yoğunluğu:	%100



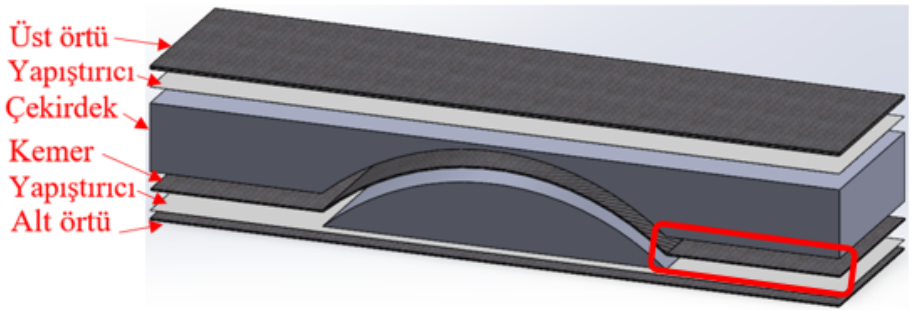
Şekil 2. Numunelerin üretiminde kullanılan Ultimaker 2+ marka üç boyutlu yazıcı.

Eğme numunelerinin üretim aşamaları Şekil 3'te gösterilmiştir. CFRP kompozit plakalar, karbon elyaf kumaş, yapıştırıcı ve epoksi reçine sistemi Dost kimya firmasından tedarik edilmiştir. Sandviç kompozit numunelerin örtü tabakalarında, hacimce %50 karbon fiber kumaş içeren 0,5 mm ve 1 mm kalınlığındaki CFRP plakalar kullanılmıştır. CFRP plakalar, karbon fiber epoksi prepreg yüksek sıcaklık ve basınç altında preslenerek üretilmiştir. Alt ve üst örtülere iki bileşenli epoksi esaslı Araldite® 2015 yapıştırıcı [34] sürülerek çekirdek ile birleştirilmiştir. Numunelerde kemerler 3 boyutlu yazıcıda üretilen iki parça çekirdek arasına twill tipi (200 gr/m^2) dokuma karbon fiber kumaş serilerek üzerine fırça yardımıyla epoksi reçine sürülmüştür. Epoksi reçinenin karışımında kütlece %80 LR160 reçine %20 LH160 sertleştirici kullanılmıştır. Sandviç kompozit yapılar, çelik levhalar arasına yerleştirilen numunelerin 0,5 MPa basınç altında, ağırlık kullanılarak 24 saat süreyle kürlenmesiyle elde edilmiştir. Numunelerde alt örtü 0,5 mm, üst örtü 1 mm kalınlığındaki CFRP kompozit plakalar kullanılmıştır.

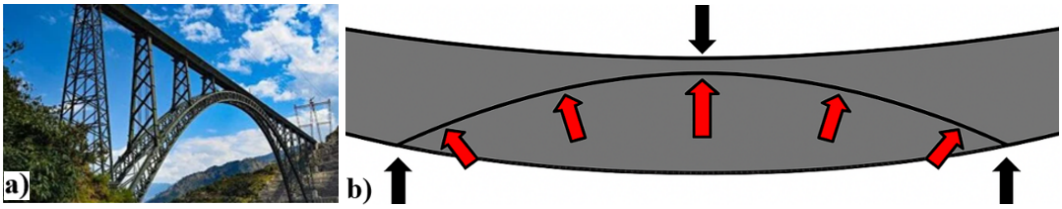


Şekil 3. Sandviç kompozit numunelerin üretim aşamalarının görüntüsü.

Üretilen sandviç kompozit numunelerin katmanlarıyla birlikte şematik olarak Şekil 4'te gösterilmiştir. Kemerli yapılar özellikle inşaat alanında kemerlerin iki ucu zemine sabitlenir, böylelikle kemerli yapı zeminden destek alarak güçlenmiş olur. Fakat sandviç yapıda bu mümkün olmadığı için bu problemi aşmak için Şekil 4'te kırmızı dikdörtgen bölgede gösterildiği gibi karbon fiber kumaş uzatılmıştır. Bu şekilde kumaş, çekirdek ve alt örtü arasında kaldığı için yapıdan daha iyi mekanik performans elde edilmiştir.

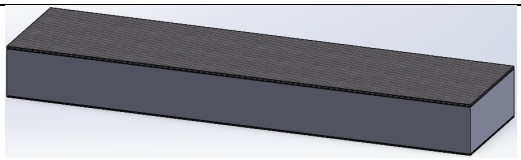
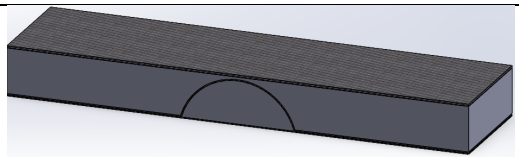
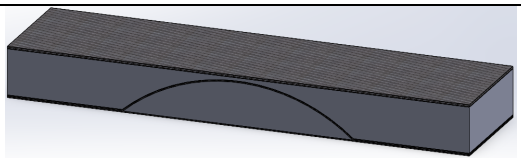
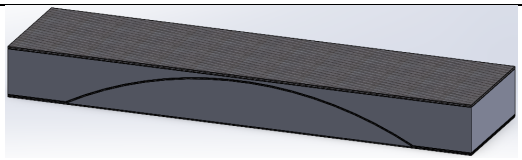
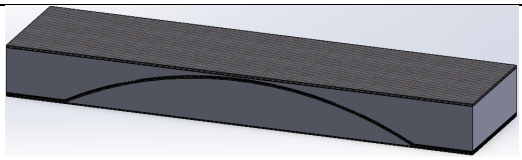


Şekil 4. Kemerle güçlendirilmiş sandviç kompozit yapının katmanlarının şematik gösterimi.



Şekil 5. Kemerli yapılara ait görüntüler a) Metal demiryolu köprüsü, Keşmir, Hindistan b) Kemerle güçlendirilmiş sandviç yapının üç nokta eğme testi yük altındaki şematik görüntüsü.

Tablo 2. Numune tiplerine göre şekil ve sandviç ölçüleri.

Numune tipi	Şekli	Kemer genişliği (mm)	Kemer kalınlığı (mm)	Sandviç Boyu (mm)	Sandviç Genişliği (mm)	Sandviç yüksekliği (mm)
Kemersiz		–	–	200	50	21,5
50K_05		50	0,5	200	50	22
100K_05		100	0,5	200	50	22
150K_05		150	0,5	200	50	22
150K_1		150	1	200	50	22,5

Çalışmada, kemersiz ve üç farklı (50 mm, 100 mm, 150 mm) kemer genişliğine sahip numunelerle birlikte 0,5 mm ve 1 mm iki farklı kalınlıkta kemer kullanılarak beş farklı parametrede sandviç kompozit üretilmiştir. ASTM 393-16 standardına göre üç nokta eğme testinde sabit alt iki destek mesafesi 150 mm'dir. Bu yüzden çalışmada kemer genişliklerini 50 mm'den 150 mm'ye kadar eşit aralıklarda artırarak 50 mm, 100 mm ve 150 mm üç farklı kemer genişliği ölçüsü tercih edilmiştir. Böylelikle farklı kemer genişliklerinin sandviç plakaların eğme dayanımlarına etkisi incelenmiştir. Kemer kalınlığının eğme dayanımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, sandviç plakanın toplam kütlesini önemli ölçüde artırmadan karşılaştırma yapılabilmesi için 0,5 mm (2 kat kumaş)

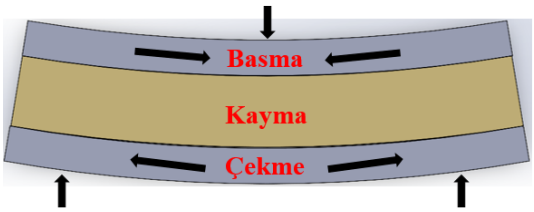
ve 1 mm (4 kat kumaş) kalınlığında kemerlere sahip numuneler üretilmiştir. Her parametre için 3'er adet numuneler üretilmiştir.

Şekil 5 a'da kemerli yapıya sahip demiryolu köprüsü görülmektedir. Kemerli yapı sayesinde köprünün taşıma kapasitesi artırılmıştır. Buradan hareketle bu çalışmada sandviç plakalar kemerle güçlendirilmiştir. Kemerle güçlendirilmiş sandviç kompozit yapının üç nokta eğme deneyi sırasında mekanik davranışı Şekil 5 b'de şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde içten dışa doğru kırmızı renkli oklarla gösterilen ön gerilmelere sahip kemerden faydalanılarak sandviç kompozit plakaların eğme dayanımlarına etkisi araştırılmıştır.

Üretilen numunelerin şekil ve özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Üretilen numune tipleri, kullanılan kemer genişliği ile kemer kalınlığına göre adlandırılmıştır. Örneğin kemer genişliği 150 mm ve kemer kalınlığı 0,5 mm olan numuneler 150K_05 olarak adlandırıldı.

2.2. Üç nokta eğme deneyleri ve sonuçları

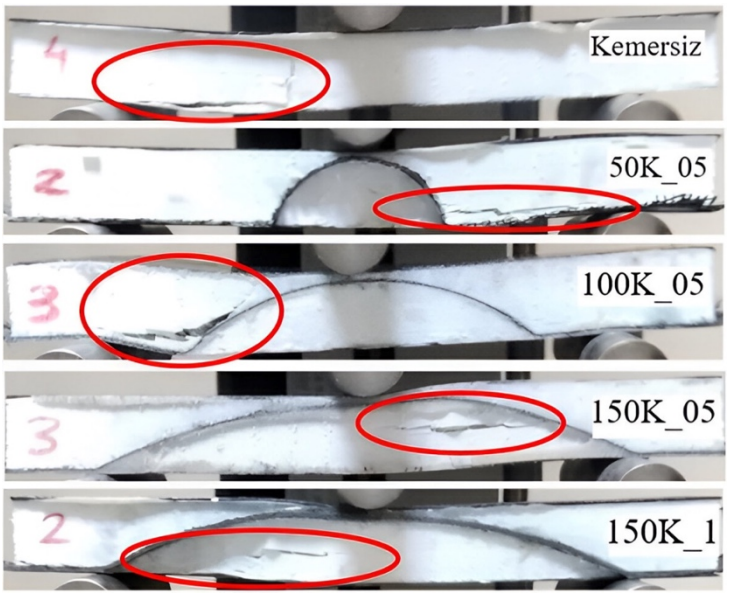
Üç nokta eğme testleri Zwick/Roell marka 100 kN kapasiteli Z100 tip test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ASTM C393-16 standart test yöntemine göre test hızı 6 mm/dk, iki destek arası mesafe 150 mm olarak seçilmiştir. Üç nokta eğme testleri belirlenmiş standarda göre hareketsiz iki destek noktası üzerine bırakılan malzemenin üst orta noktasından kuvvet uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Sandviç yapılarda, üç nokta eğme testinde Şekil 6'da görüldüğü üzere yapının üç farklı bölgesi farklı kuvvetlere maruz kalırlar. Kuvvetin uygulandığı yapının üst kısmı basma kuvvetine, orta kısmı kayma kuvvetine ve alt destek noktalarına yakın kısım ise çekme kuvvetine maruz kalırlar [2].



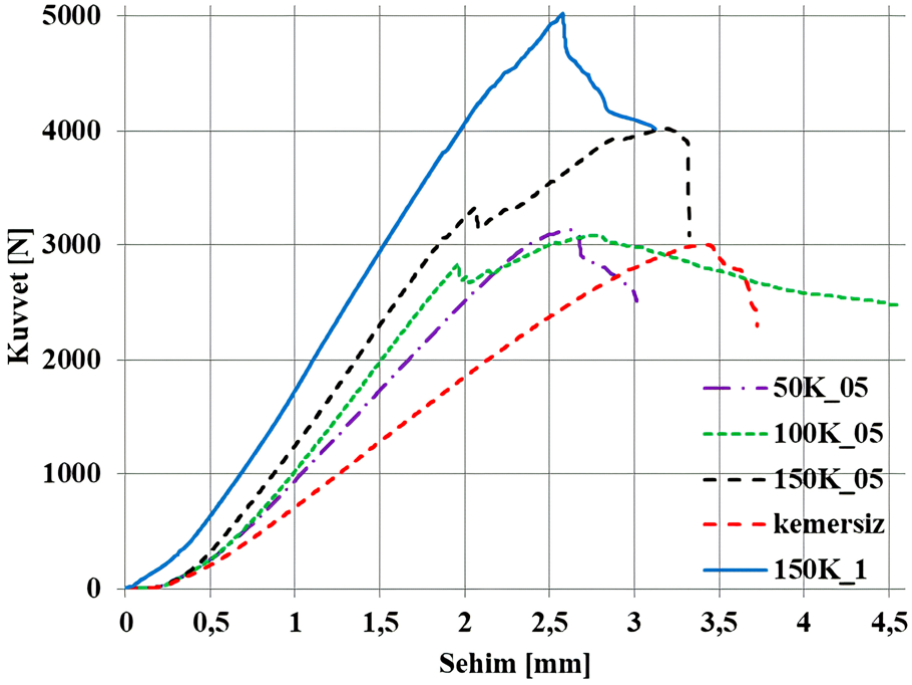
Şekil 6. Sandviç yapının üç nokta eğme testi yük altındaki mekanizması.

Şekil 7'de testin bitiminde cihaz üzerinde numunelerin görüntüleri gösterilmektedir. Kırmızı elips içine alınan kısımlar kompozit sandviç yapıların uğradığı hasar tipleri hakkında bilgi vermektedir. Numunelerin yüzeylerinde kırılma, delaminasyon veya yapıştırma kaynaklı herhangi bir sorun meydana gelmemiştir. Yapıştırıcı ve birleştirme yönteminin ABS çekirdek ile CFRP kompozit yüzeyler için uygun olduğu belirlenmiştir. Hasarlar genellikle CFRP kompozit örtülere göre daha kırılgan olan ABS çekirdekte kırılma şeklinde oluşmuştur. Kemersiz kompozit sandviçlerde, kuvvet orta noktadan tatbik edildiğinden üst mile yakın kısımdan dikey kırılarak yatay yönde sabit alt destek miline kadar delaminasyon devam ettiği tespit edilmiştir. 50 mm ve 100 mm kemerle güçlendirilmiş kompozit sandviçlerde hasar kemerlerin dışında kırılma tespit edildiğinden dolayı kemerlerin yapıyı eğmeye karşı iyileştirdiği görülmektedir. Kemer genişlikleri alt iki destek mesafesinden küçük olduğundan kırılma kemer ile alt destek mili arasındaki bölgede kırılma meydana gelmiştir. 150 mm kemer genişliğindeki sandviç kompozitlerde kemer genişliği alt destek milleri arası mesafeye eşit olduğundan kemer uçlarından desteklenmiştir. Bu durum yapıyı daha da güçlendirmiştir, kemer içerisinde yatay olarak kırılma gözlemlenmiştir.

Numunelere yapılan testlerden kuvvet-sehim grafikleri elde edilmiştir. Kemersiz, kemer kalınlığı 0,5 mm ve 1 mm olan farklı kemer genişliğine sahip numunelerin kuvvet-sehim grafiği Şekil 8'de görülmektedir. Beklenildiği üzere maksimum eğme kuvvetinin kemerli numunelerde kemersiz numunelere göre daha yüksek olduğu grafikte görülmektedir [35-36]. Grafikte kemerli sandviç kompozit numunelerin eğimi kemersiz numunelerin eğiminden fazla olduğu yani kemerle güçlendirmek yapıyı daha rijit hale getirdiği görülmektedir. Maksimum eğme kuvveti 150 mm kemer genişliğine sahip numunelerde elde edilmiştir. Yapılan testlerde 150 mm kemer genişliğine sahip 1 mm kemer kalınlığındaki numunelerin eğme kuvvetinin, 0,5 mm kemer kalınlığındaki numunelerin eğme kuvvetine göre daha yüksek çıktığı kuvvet-sehim grafiğinde görülmektedir.



Şekil 7. Numunelerin eğme testlerindeki hasar görüntüleri.



Şekil 8. Farklı kemer genişliği ve kalınlığındaki numunelerin kuvvet-sehim grafiği.

Sandviç kompozitlerin üretiminde çekirdekler, alt ve üst örtüler, karbon fiber kumaşlar, reçine ve yapıştırıcı miktarları üretim sırasına göre sırayla kütleleri ölçüldü. Tasarım programından elde ettiğimiz hacim değerleri kullanılarak sandviç kompozitlerin yoğunlukları hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler Tablo 3'te numune tiplerine göre gösterilmektedir. Tabloya göre kemerli numunelerin kemer genişliği arttıkça yoğunlukları da artmıştır. 150K_1 adlı numunenin yoğunluğu, 150K_05 adlı numunenin yoğunluğundan %11,4 daha yüksek olmasına rağmen maksimum eğme kuvvetindeki artış %33,3 olarak gerçekleşmiştir. Bu durum kemer genişliği ile

birlikte kemer kalınlığının da anlamlı olduğunu göstermiştir. Birim yoğunluktaki maksimum eğme kuvveti 150K_1 tipindeki numunelerde elde edilmiştir.

Tablo 3. Numune tiplerine göre yoğunluk ve eğme kuvvet değerleri tablosu.

Numune tipi	Sandviç kompozitin yoğunluğu (gr/cm^3)	Yoğunluktaki artış (%)	Maksimum eğme kuvveti (N)	Maksimum eğme kuvvetindeki artış oranı (%)	Maksimum eğme kuvveti / yoğunluk ($N/(gr/cm^3)$)
Kemersiz	1,359	-	3000	-	2207,5
50K_05	1,433	5,4	3160	5,3	2205,2
100K_05	1,485	9,3	3090	3,0	2080,8
150K_05	1,513	11,3	4030	34,3	2663,6
150K_1	1,667	22,7	5030	67,6	3017,4

3. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, 3 boyutlu yazıcıda ABS filamenti ile CFRP kompozit kullanılarak sandviç kompozit plakalar elde edilmiştir. Üç farklı kemer genişliği ile kemer kalınlığının sandviç kompozit plakanın eğme dayanımına etkisi deneysel olarak incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Kemersiz yapı, tüm numuneler arasında en düşük eğme dayanımını göstermiştir. Ancak sehim davranışı değerlendirildiğinde, diğer numunelere kıyasla daha sünek bir deformasyon sergilediği belirlenmiştir.
- Kemerli yapılarla desteklenen sandviç kompozitlerin, kemersiz sandviç kompozitlere göre eğme dayanımları ve rijitlikleri artmıştır.
- Kemerli sandviç kompozit yapılarda, kemer genişliğinin alt destek noktalarına doğru artmasıyla birlikte eğme dayanımında da artış gözlemlenmiştir.
- Kemer genişliğinin 150 mm alt destek mesafesine eşit ve kemer kalınlığının 1 mm olmasından dolayı maksimum eğme kuvveti 150K_1 numunelerde elde edilmiştir.
- 150K_05 ve 150K_1 tipindeki numunelerde sırasıyla kemersiz yapılara göre maksimum eğme kuvvetinde %34 ve %67 oranında artış elde edilmiştir. Ancak kırılma sonrası kuvvette ani bir düşüş tespit edilmiş, bu durum yapıların gevrek bir deformasyon davranışı gösterdiği tespit edilmiştir.
- Kemerle güçlendirilen sandviç kompozit yapılarda kemer kalınlığının artması eğme dayanımını artırmıştır.
- Birçok yapı elemanının güçlendirilmesinde kullanılan kemerli yapılar, sandviç kompozitlerde de eğme dayanımını artırdığı tespit edilmiştir.
- Gelecekte yapılacak çalışmalar kapsamında, kemer yerleşim konumunun (alt, orta ve üst yüzeylerde) yapısal performansa etkisi detaylı olarak araştırılabilir. Ayrıca, farklı çekirdek malzemelerinin kullanımıyla yapıların enerji sönümleme kapasitesi ve darbe dayanımı değerlendirilebilir. Otomotiv ve havacılık gibi endüstriyel alanlarda kullanım potansiyelini belirlemek için uygulamaya yönelik mekanik testlerin gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (KSÜ BAP) tarafından 2024/8-23 M nolu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı KSÜ BAP birimine teşekkür ederim.

Kaynaklar

[1] Li T, Zhu M, Yang Z, Song J, Dai J, Yao Y, Hu L. Wood composite as an energy efficient building material: guided sunlight transmittance and effective thermal insulation. Adv Energy Mater 2016; 6(22): 1601122.

[2] Singh P, Sheikh J, Behera B. K. Metal-faced sandwich composite panels: a review. Thin-Walled Struct 2024; 195: 111376.

[3] Geren N, Uzay Ç, Boztepe MH, Bayramoğlu M. Sandviç Malzeme Geliştirmede Polimer Köpük Çekirdek Kalınlığının Eğilme Dayanımına Etkisinin Deneysel olarak Araştırılması. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 2017; 32(2): 13-22.

[4] Kaveloğlu S, Temiz Ş, Doğan O, Kamer MS. 3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Farklı Hücre Çaplarındaki Bal Peteği Sandviç Yapıların Eğme Dayanımlarının İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi 2022; 37(2): 459-470.

[5] Davies JM. (Ed.). Lightweight sandwich construction. UK: John Wiley & Sons, 2008.

[6] Ferri R, Sankar BV. A comparative study on the impact resistance of composite laminates and sandwich panels. J Thermoplast Compos Mater 1997; 10(4): 304-315.

[7] Murdy P, Dolson J, Miller D, Hughes S, Beach R. Leveraging the advantages of additive manufacturing to produce advanced hybrid composite structures for marine energy systems. Appl Sci 2021; 11(3): 1336.

[8] Camacho DD, Clayton P, O'Brien WJ, Seepersad C, Juenger M, Ferron R, Salamone S. Applications of additive manufacturing in the construction industry–A forward-looking review. Autom Constr 2018; 89: 110-119.

[9] Singh N. Additive manufacturing for functionalized nanomaterials breaks limits. In Additive Manufacturing with Functionalized Nanomaterials 2021; (pp. 1-34). Elsevier.

[10] Yanen C, Çelik E, Solmaz MY. Çekirdek Malzemesi Ergiyik Biriktirme Yöntemi İle Üretilen Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Eğilme Dayanımlarının İncelenmesi. Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2021; 10(2): 147-162.

[11] Güdür C, Türkoğlu T, Eren İ. Effect of lattice design and process parameters on the properties of PLA, ABS AND PETG polymers produced by fused deposition modelling. J Mater Mechat A 2023; 4(2): 561-570.

[12] Fenni BÖ, Eken E, Kaygısız H. Application of topology optimization on a 3D-printed shelf bracket. Int J Print Technol Digit Ind 2024; 8(1): 32-45.

[13] Tanabi H. Investigation of the temperature effect on the mechanical properties of 3D printed composites. Int Adv Res Eng J 2021; 5(2): 188-193.

[14] Pottmann H, Eigensatz M, Vaxman A, & Wallner J. Architectural geometry. Comput Graph 2015; 47: 145-164.

[15] Valluzzi MR, Modena C, de Felice G. Current practice and open issues in strengthening historical buildings with composites. Mater Struct 2014; 47: 1971-1985.

[16] Conde B, Ramos LF, Oliveira DV, Riveiro B, Solla M. Structural assessment of masonry arch bridges by combination of non-destructive testing techniques and three-dimensional numerical modelling: Application to Vilanova bridge. Eng Struct 2017; 148: 621-638.

[17] Almssad A, Almusaed A, Homod RZ. Masonry in the context of sustainable buildings: A review of the brick role in architecture. Sustainability 2022; 14(22): 14734.

[18] Hurdoganoglu D, Safaei B, Sahmani S, Onyibo EC, Qin Z. State-of-the-art review of computational static and dynamic behaviors of small-scaled functionally graded multilayer shallow arch structures from design to analysis. Arch Comput Methods Eng 2024; 31(1): 389-453.

[19] Emami E, Kheyroddin A, Rezaifar O. Experimental and analytical investigation of arched steel haunches under cyclic loading. Eng Struct 2021; 246: 113041.

[20] Rafiee A, Vinches M, Bohatier C. Application of the NSCD method to analyse the dynamic behaviour of stone arched structures. Int J Solids Struct 2008; 45(25-26): 6269-6283.

[21] Gorgeri A, Vescovini R, Dozio L. Analysis of multiple-core sandwich cylindrical shells using a sublaminate formulation. Compos Struct 2019; 225: 111067.

[22] Arbaoui J, Moustabchir H, Pruncu CI, Schmitt Y. Modeling and experimental analysis of polypropylene honeycomb multi-layer sandwich composites under four-point bending. J Sandw Struct Mater 2018; 20(4): 493-511.

[23] Naresh K, Cantwell WJ, Khan KA, Umer R. Single and multi-layer core designs for Pseudo-Ductile failure in honeycomb sandwich structures. Compos Struct 2021; 256: 113059.

[24] Dang W, Liu XT, Sun BH. Bending response of integrated multilayer corrugated sandwich panels. Appl Compos Mater 2023; 30(5): 1493-1512.

[25] Xia F, Pang T, Sun G, Ruan D. Longitudinal bending of corrugated sandwich panels with cores of various shapes. Thin-Walled Struct 2022; 173: 109001.

[26] Abedzade Atar H, Zarrebini M, Hasani H, Rezaeepazhand J. The effect of core geometry on flexural stiffness and transverse shear rigidity of weight-wise identical corrugated core sandwich panels reinforced with 3D flat spacer knitted fabric. Polym Compos 2020; 41(9): 3638-3648.

[27] Shahkarami M, Zeinedini A. Flexural Properties of 3D-printed hierarchical-sinusoidal corrugated core sandwich panels with natural fiber reinforced skins. Polym Polym Compos 2022; 30: 09673911221101299.

[28] ASTM-C393/C393M-16, Standard Test Method For Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, 2016.

[29] Atahan MG, Erikli M, Ozipek E, Ozgun F. Comparative study on bending behavior and damage analysis of 3D-printed sandwich core designs with bio-inspired reinforcements. Eng Fail Anal 2024; 163: 108439.

[30] Lu C, Qi M, Islam S, Chen P, Gao S, Xu Y, Yang X. Mechanical performance of 3D-printing plastic honeycomb sandwich structure. Int J Precis Eng Manuf-Green Technol 2018; 5: 47-54.
[31] Kaveloglu S, Temiz S. An experimental and finite element analysis of 3D printed honeycomb structures under axial compression. Polym Polym Compos 2022, 30: 09673911221122333.
[32] Ultimaker Cura 5.7.2 sofware, 2024, https://github.com/Ultimaker/Cura/releases/tag/5.7.2-RC2 (Erişim 03.05.2025).
[33] The Ultimaker 2+ specifications, 2020, https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011915779-The-Ultimaker-2-specifications (Accessed 03.05.2025).
[34] Araldite® 2015 Adhesive Technical Datasheet, 2015, https://docs.rs-online.com/47fc/A700000006492752.pdf (Accessed 03.05.2025).
[35] Altemimi JE, Said AI, Al-Mahaidi R. Experimental Investigation of Masonry Arches Strengthened with Carbon Fiber Composites CFRP. In Geotechnical Engineering and Sustainable Construction: Sustain Geotech Eng 2022; (pp. 627-639). Singapore: Springer Singapore.
[36] Rovero L, Focacci F, Stipo G. Structural behavior of arch models strengthened using fiber-reinforced polymer strips of different lengths. J Compos Constr 2013; 17(2): 249-258.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 791-805, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1716641

Rejeneratif Tasarım ve Sürdürülebilirlik Üzerine Bibliyometrik Analiz

Pınar KISA OVALI[1*], Güzide GİDER[2]
[1] Mimarlık Bölümü, Mimarlık Fakültesi, Trakya Üniversite, Edirne, Türkiye
[2] Mimarlık Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü Trakya Üniversite, Edirne, Türkiye
[*1] pinarkisaovali@trakya.edu.tr, [2] guzidegider88@gmail.com

(Geliş/Received: 10/06/2025; Kabul/Accepted: 13/09/2025)

Öz: 21.Yüzyılın yapılaşma anlayışı sürdürülebilirlik çerçevesinde gelişmektedir. Sürdürülebilir mimari anlayışının alt yaklaşımlarından biri olan rejeneratif tasarım, yalnızca çevresel etkileri azaltmakla kalmayıp aynı zamanda ekosistemde pozitif etki yaratmayı amaçlamaktadır. Çalışmada, rejeneratif tasarım ve sürdürülebilirlik alanlarında yapılan bilimsel yayınlar bibliyometrik analiz yöntemiyle değerlendirilmiştir. Web of Science veri tabanında 1993-2025 yılları arasında yayımlanan 363 adet makale analiz edilerek etkili yazarlar, üniversiteler, önde gelen ülkeler, dergiler ve anahtar kelimeler belirlenmiştir. Bulgular, yapılan yayınların zamanla arttığını, sustainability ve design anahtar kelimelerinin en sık bahsedilenler içinde olduğunu, en ilgili yazarlar olarak Naboni E., Zari M. P., Cole R. J. ve Pedersen Zari M.' nin öne çıktığını, dergiler içinde Sustainability dergisinin lider konumda olduğunu, üniversiteler içinde ise Toronto Üniversitesi'nin öne çıktığını göstermektedir. En fazla bilimsel çalışma Amerika Birleşik Devletleri ve İngiltere'de yürütülmüş olup, Türkiye'den herhangi bir makaleye rastlanmamıştır. Bu durum, rejeneratif tasarımın ülkemizde yeni yeni incelenmeye başlanması ve çalışmaların büyük çoğunluğunu tezlerin oluşturmasıyla açıklanabilir.

Anahtar kelimeler: Rejeneratif tasarım, sürdürülebilirlik, bibliyometrik analiz.

Bibliometric Analysis on Regenerative Design and Sustainability

Abstract: The building approach of the 21st century is developing within the framework of sustainability. Regenerative design, one of the sub-approaches of sustainable architectural understanding, aims not only to reduce environmental impacts but also to create a positive effect on the ecosystem. In this study, scientific publications in the fields of regenerative design and sustainability were evaluated using bibliometric analysis. A total of 363 articles published between 1993 and 2025 in the Web of Science database were analyzed to identify influential authors, universities, leading countries, journals, and keywords. The findings show that the number of publications has increased over time, with the keywords "sustainability" and "design" among the most frequently mentioned. The most relevant authors were Naboni E., Zari M. P., Cole R. J., and Pedersen Zari M., while the journal Sustainability held a leading position among journals. The University of Toronto stood out among universities. The majority of scientific studies were conducted in the United States and the United Kingdom, and no articles from Turkey were found. This situation can be explained by the fact that regenerative design has only recently begun to be studied in our country, and that the majority of the studies consist of theses.

Key words: Regenerative design, sustainability, bibliometric analysis.

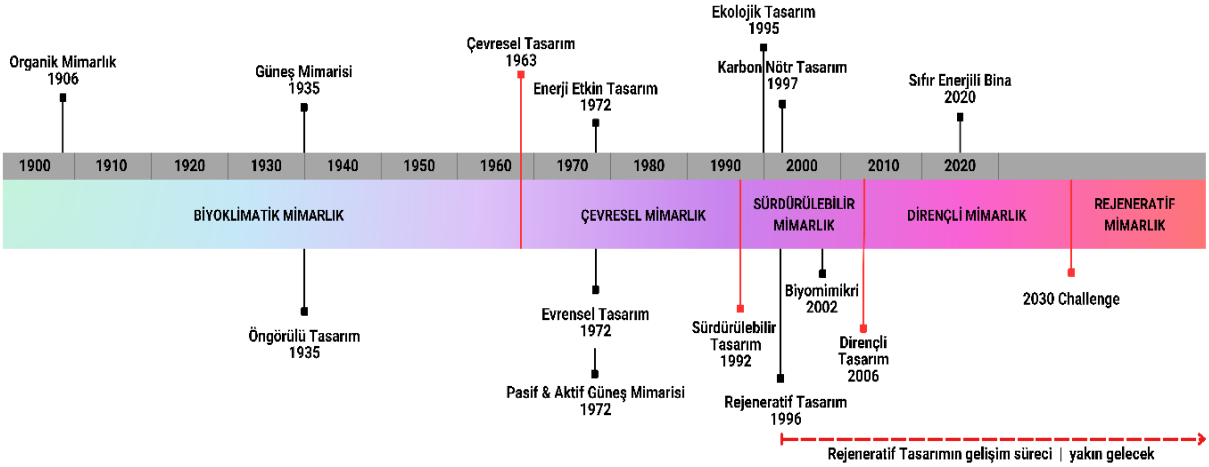
1. Giriş

20. yüzyılın başından itibaren, endüstrileşme ile ilişkili olarak ortaya çıkan ekolojik ve ekonomik sorunlar mimariyi önemli ölçüde etkilemiştir. Ne yazık ki bu süreçte tasarlanan yapıların büyük çoğunluğu, üretimden yıkıma kadar olan aşamalarda çevre üzerinde genellikle olumsuz etkiler oluşturmuştur. Bu sebeple, meydana gelen çevresel bozulmaları azaltmak veya yok etmek amacıyla; yeşil tasarım, çevresel tasarım, enerji etkin tasarım, ekolojik tasarım ve rejeneratif tasarım gibi sürdürülebilirlikle ilişkili çeşitli yaklaşımlar ortaya çıkmıştır (Şekil 1). Mimarlık ve yapılı çevrede sürdürülebilirlik anlayışı ile şekillenen bu yaklaşımlar kesin sınırları olan katı bir sınıflandırmayı içermemekle birlikte; çevresel, ekolojik ve toplumsal boyutlarıyla sürdürülebilirliğin mimarlık ile ilişkisini ortaya koymaktadır [1, 2].

Literatürde *yenileyici tasarım* olarak da adlandırılan rejeneratif tasarım kavramının ilk tanımı, 1996 yılında John Tillman Lyle'in *Sürdürülebilir Gelişim için Rejeneratif Tasarım* adlı eserini yayımlaması ile yapılmıştır. Çevresel zararları tersine çevirmeyi amaçlayan tasarım yaklaşımı olarak ifade edilen rejeneratif kavramı, birçok mimar ve peyzaj mimarı tarafından basitçe kendi kendini yenileyen olarak tanımlanmıştır [3]. Rejeneratif kavramı biyoloji disiplininde organizma ve ekosistemleri doğal süreçleri içerisindeki gelişimlerine göre yenileme, onarma

[*] Sorumlu yazar: pinarkisaovali@trakya.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-6230-219X, [2] 0009-0007-0525-7066

veya büyütme yeteneğini ifade ederken [4, 5] mimarlık açısından kavramın doğanın onarıcı yönünü binaya adapte edebilecek sistemlerin bina bütününe ve genel tasarım anlayışına yansıtılmasını ifade etmektedir [6, 7].



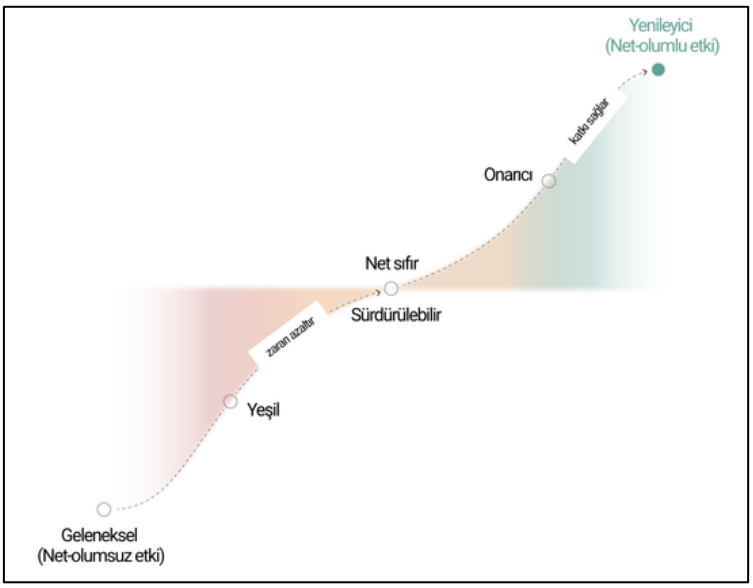
Şekil 1. Sürdürülebilir mimarinin modern tarihine ilişkin zaman çizelgesi [3].

Mang ve Reed rejeneratif tasarımı, doğanın işleyişini temel alarak kaynakları tüketmek yerine onları yenileyen stratejiler geliştiren, insanı ve doğayı bir bütün olarak ele alan bir sistem olarak tanımlamıştır [3]. Aktürk ise rejeneratif tasarımı, çevresel zararları azaltmanın yanında pozitif etkiler yaratarak olumsuz etkileri tersine çevirmeyi amaçlayan; insanların, canlıların ve doğanın sağlıklı ve uyumlu şekilde geliştiği bir yaklaşım olarak ifade etmiştir [8]. ARUP [9] (Mühendis ve filozof Ove Arup tarafından 1946'da kurulmuş, günümüzün pek çok sürdürülebilir bina inşasını gerçekleştirmiş bir mühendislik danışmanlık şirketi) rejeneratif tasarımı, insana ilişkin sistemlerin doğal sistemlerle birlikte var olmak ve evrimleşmek üzere tasarlandığı bütüncül bir yaklaşım olarak tanımlarken, Mott MacDonald [10] rejeneratif tasarımın sürdürülebilirliğin ötesinde bir vizyon olduğunu belirtmektedir.

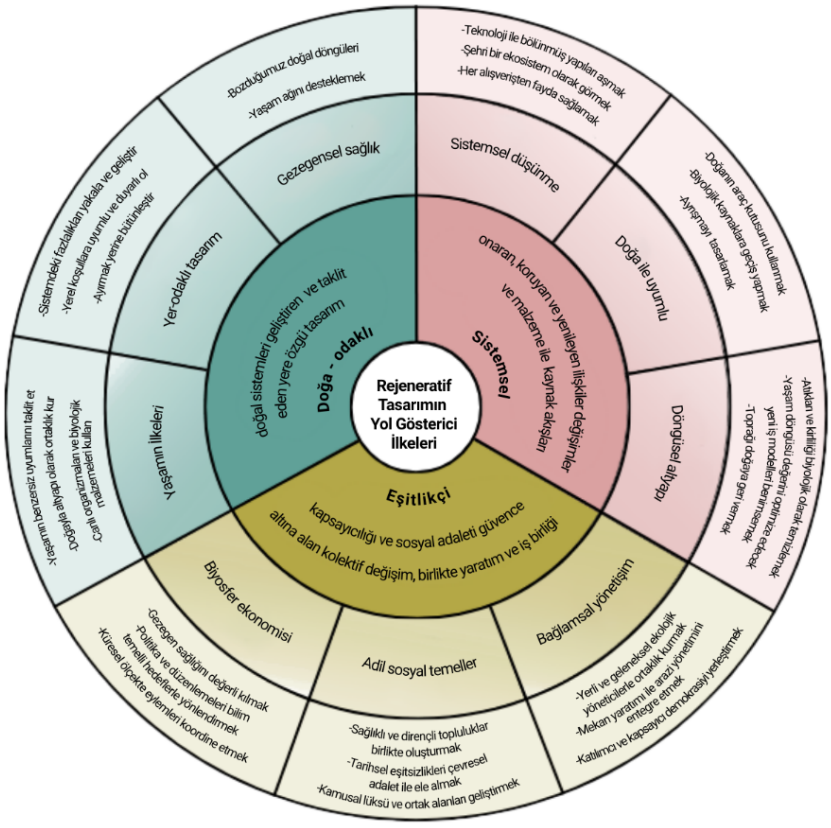
Şekil 1'de ifade edilen ve sürdürülebilir mimarlığın öncü yaklaşımlarını da kapsayan tasarım anlayışları geliştirdikleri yüksek çevre duyarlılığı [11], enerjinin akılcı kullanımı [12], yer bağlamıyla ilişkili iklimsel duyarlılık [13], karbon salınımı azaltılmış sıfır enerjili [14] ve dirençli binalar [15] kapsamında çevresel sorunları en aza indirmeyi ve kaynak kullanımını sınırlayarak çevreyi korumayı amaçlamaktadır. Bu çerçevede sürdürülebilir tasarımların hedefi gezegen kaynaklarının aşılmadığı bir denge yaratmak olmaktadır. Rejeneratif tasarım ise dünyaya bakış ve çevreyle etkileşim biçimleri açısından sürdürülebilirlik yaklaşımlarından kısmen ayrışmakta; özellikle, mevcut çevreye olası bir üretim ile bütünleşerek olumlu katkı sağlama bakımından yakın ve uzak geleceğe yönelik bir bakış açısı geliştirmektedir [16]. Bu yaklaşım sürdürülebilirlik hedeflerini bir adım öte taşıyarak insan yaşamını ve bozulan çevresel dengeleri iyileştirerek düzeltmeyi, dolayısıyla ekolojik hasarı tersine çevirmeyi hedefleyen; insan ve doğa arasında ortak yüksek yararı gözetmeyi temsil etmektedir [17].

Sürdürülebilirliğin hedeflediği dengenin sürekliliği için sürdürülebilirliği aşarak net pozitif etki oluşturacak (Şekil 2) ve gezegenin sağlığını sonsuza değin garanti altına alacak rejeneratif tasarım süreçlerine geçilmesi son derece önemlidir. Bu kapsamda, çevresel sorunlara yönelik sürdürülebilir çözümlerin tek başına yeterli olmadığı; rejeneratif tasarımın, insan ve doğa arasında kurduğu uyumlu bağ ile geliştirdiği iyileştirici ve onarıcı çözümler sayesinde geleceğin yaklaşımı olmaya aday olduğundan bahsedilebilir [6, 18].

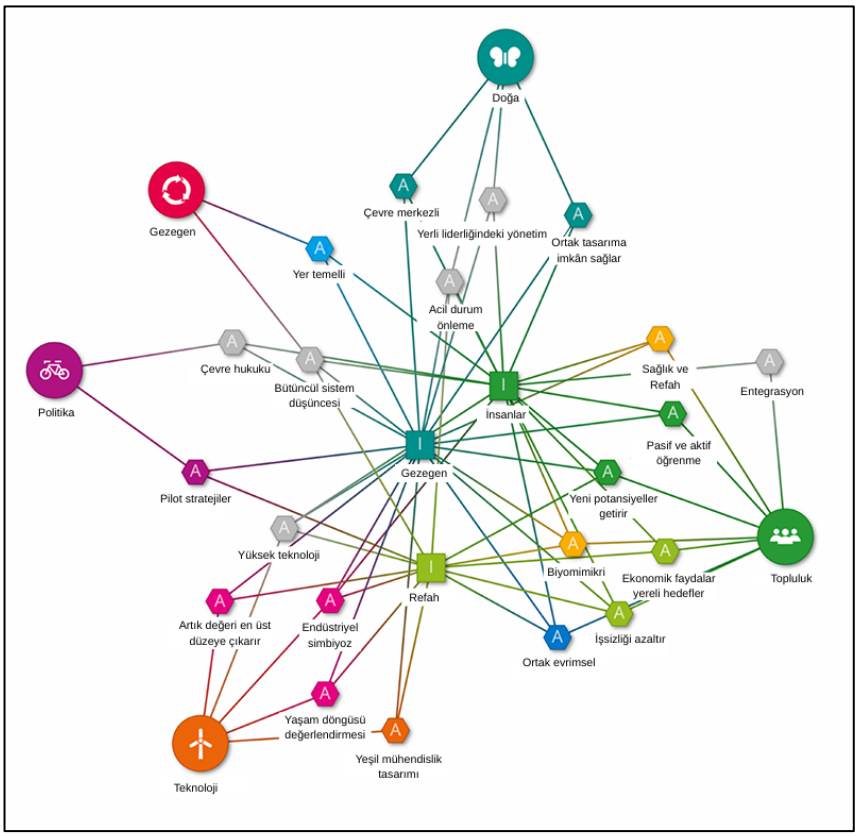
21. yüzyılın ilk çeyreğine ulaştığımız günümüzde rejeneratif tasarım kavramı mimarlık disiplini kapsamlı detaylı açılımlara kavuşturulmuştur. Rejeneratif tasarımın amaç, hedef ve içeriğinin anlaşılması, özellikle mimarlar tarafından tasarımlara aktarılabilmesi için uygulamaya yönelik süreç adımları, ilkeler ve hedefler bütünü öneren rehberlerin geliştirildiği görülmektedir. Bu kapsamda ARUP grubu rejeneratif tasarım için tamamlayıcı üç ilke (doğa odaklı, sistemsel ve eşitlikçi) ve dokuz hedef önerirken (Şekil 3); MacDonald rejeneratif tasarım çerçevesini beş ilke (ekosistem merkezli, sosyal iyileşme yönlü, refah odaklı, döngüsel ekonomi hedefli ve sökülebilme odaklı) (Şekil 4b) ve 21 hedefle organize etmiştir (Şekil 4a). Her iki rehber de net sıfırın ötesine ulaşmayı; sürdürülebilir ve dirençli bina ve altyapı ihtiyacını karşılarken sürdürülebilirliğin üç temel unsuruna olumlu katkı sağlayacak bütünleşik tasarımı ön görmektedir.



Şekil 2. Geleneksel tasarımdan rejeneratif/yenileyici tasarıma, net-olumsuz etkiden net-olumlu etkiye [9].



Şekil 3. Rejeneratif tasarımın yol gösterici ilkeleri [9].



(a)



(b)

Şekil 4. Mott MacDonald'ın **a)** rejeneratif tasarım çerçevesi ve **b)** ilke açılımları [10].

Mott MacDonald ve Debbie Flevotomou Architects'in tasarladığı "Great Reef / Büyük Resif" projesi; yapının kullanacağından daha fazla enerji ve temiz su üretme yöntemleri de dahil olmak üzere MacDonald'ın önerdiği rejeneratif tasarım ilkelerinin ele alındığı ilk projelerden birisidir. Tasarımın genelinde, iç ve dış mekân kurgusunda biyomimetik yaklaşımın (doğayı taklit eden) ele alındığı projede, kinetik (hareket eden mekân ve bina

parçaları) ve parametrik çözümler (parametrelere bağlı geometrik modelleme) bir aradadır. Günümüz yapay zeka olanaklarının da kullanıldığı büyük resif projesi; iklim değişikliğine karşı dirençli bina ve alt yapı tasarımı anlayışını da kapsayan [19] öncü örneklerdendir (Şekil 5).



Şekil 5. "Büyük Resif" projesine ilişkin görsel [10].

Görüldüğü üzere rejeneratif tasarım örnekleri sürdürülebilirliğin tüm boyutlarını ve sürdürülebilir mimarlığın kapsadığı tüm tasarım yaklaşımlarını, ileri teknoloji ve bilişim olanaklarıyla bütünleşik kullanmaktadır. Bu noktada sürdürülebilir mimarlığın rejeneratif tasarım için ön koşul oluşturduğu söylenebilir. Bu nedenle çalışmada, iç içe bir yapı sergileyen ve birbirini besleyen rejeneratif tasarım ve sürdürülebilirlik kavramlarını birlikte ele alan çalışmalar dikkate alınmaktadır.

2. Araştırmanın Problemi, Hipotezleri ve Amacı

Sürdürülebilirlik, uzun yıllardır üzerine çalışılan, tüm sektörleri etkileyen ve gelecek nesilleri kapsayan bir kavram olmakla birlikte, rejeneratif tasarım sürdürülebilirlik anlayışını; binaları tüm ekosistemin yaşayan bir uzantısı olarak görme eğilimi ile ileri taşıması ön görülen yeni bir tasarım yaklaşımıdır. Dünya genelinde öncü tanımlamaları 1996 yıllarında yapılan rejeneratif tasarım [2], ülkemizde henüz sadece akademik ortamda gelişmekte olan bir alandır. Bu nedenle, ülkemizde konu hakkındaki çalışmaların azlığı, "yeni gelişmekte olan rejeneratif tasarımın araştırılması gelecek çalışmalara yön verme potansiyeli ile sürdürülebilirliğin etkinliğini artırabilir" hipotezinin üretilmesine gerekçe oluşturmuştur.

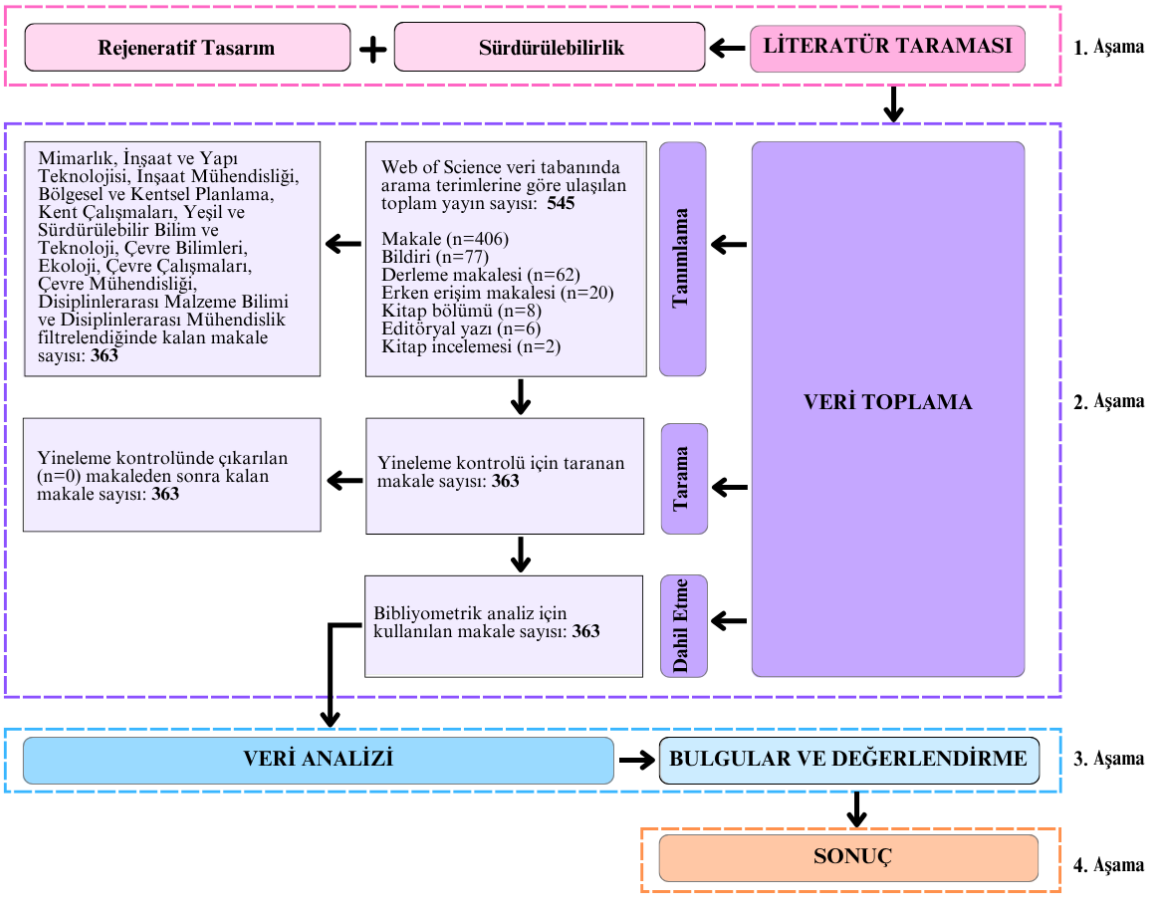
Aynı zamanda sürdürülebilirlik ve rejeneratif tasarım kavramlarının birbirleriyle olan ilişkisinin ve literatürde nasıl ele alındıklarının belirlenebilmesi önemlidir. Bu nedenle çalışma, bu iki kavram setini birlikte ele alarak gelecekte yapılacak araştırmalar için bir kaynak oluşturmayı amaçlamaktadır. Konunun anahtar kelimeler, yazarlar, ülkeler, dergiler ve üniversiteler kapsamında ortaya koyulması rejeneratif tasarım üzerine çalışacak araştırmacılara gelecek süreçlerde zamansal karşılaştırma olanağı yaratacak veri sunacaktır. Mevcut durum için matematiksel verilerle şekillenen ve betimleyici analiz ile ortaya koyulan sonuçların başka çalışmaları da yönlendirme potansiyeli bulunmaktadır. Mimarlık disiplini içinde sürdürülebilirlik anlayışı ile gelişen diğer tasarım yaklaşımları için farklı bibliyometrik başlıkların incelenerek araştırmacılara veri oluşturulması ayrıca önemsenmektedir.

3. Yöntem

Günümüzde bilimsel araştırma ve yayınların incelenerek, bilimsel gelişmelerin takip edilmesi, araştırma alanlarına yönelik boşluklarının saptanması ve bilimsel bilginin yayılmasını desteklemek amacıyla bibliyometrik analiz yöntemi kullanılmaktadır. Bibliyometrik analizler, bir alandaki araştırmaların nicelik ve nitelik açısından değerlendirilmesine yarayan araçlardır [20, 21]. Bibliyometri; bilimsel dergilerde yer alan makaleler, kitaplar,

konferans bildirileri ve diğer araştırma verilerinin kullanılarak; literatürdeki bir konuya ait bilgilerin sayısal analizini içermektedir. Yayınları sayısal olarak inceleyip analiz eden bibliyometri, bilimsel bir konudaki gelişmeleri anlamaya yardımcı olur [22, 23]. Bu çalışma Bibliyometrik Analiz yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bibliyometrik analizlerde sıkça tercih edilen Web of Science, uzun yıllar boyunca tüm bilim alanlarını kapsayan tek atıf ve yayın veritabanı olmasının yanı sıra; 1990 yılına kadar uzanan güçlü bir kapsama sahiptir. Kullanıcıların konu, yazar, kaynak, yıl, belge türü, kurum ve ülke gibi ölçütlerle aramalarını kolayca daraltmasına olanak sağlamaktadır [24]. Bu nedenle çalışmada veri tabanı olarak Web of Science (WoS) seçilmiştir.

7 Haziran 2025 tarihinde Web of Science veri tabanında *regenerative design* ve *sustainability* anahtar kelimeleri *all fields* kategorisinde taranmıştır. *Regenerative ve sustainability* terimleri tıp, diş hekimliği, mimarlık ve benzeri pek çok farklı disiplin tarafından da sıklıkla kullanıldığından, bu çalışmada mimarlıkla yakından ilişkili 12 kategori filtrelenmiştir. Söz konusu kategoriler: Mimarlık, İnşaat ve Yapı Teknolojisi, İnşaat Mühendisliği, Bölgesel ve Kentsel Planlama, Kent Çalışmaları, Yeşil ve Sürdürülebilir Bilim ve Teknoloji, Çevre Bilimleri, Ekoloji, Çevre Çalışmaları, Çevre Mühendisliği, Disiplinler arası Malzeme Bilimi ve Disiplinler arası Mühendislik olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında makaleler, bildiriler, derlemeler, kitap bölümleri ve benzeri tüm yayın türleri (tezler hariç) değerlendirilmiş; hiçbir yayın türü kapsam dışı bırakılmamıştır. Araştırma konusuna ilişkin ilk yayının 1993'te yapılması nedeniyle 1993-2025 yılları arasındaki dönem değerlendirmeye alınmış ve filtreleme sonucunda toplam 363 adet çalışmaya ulaşılmıştır (Şekil 6).

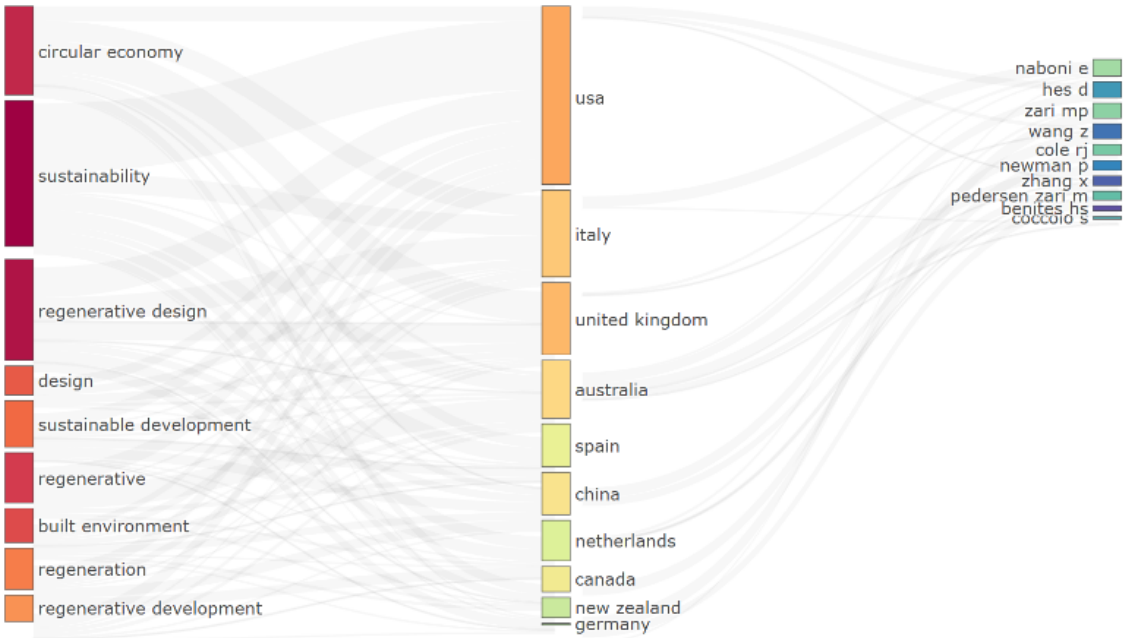


Şekil 6. Yöntem akış diyagramı.

4. Bulgular ve Değerlendirme

Çalışmada kullanılan tüm veriler, araştırmalar için en yaygın veri tabanlarından biri olan Web of Science' tan elde edilip, Bibliometrix yazılımına aktarılmış ve görselleştirilmiştir. Çalışmada önde gelen ülkeler, üniversiteler, dergiler, en ilgili yazarlar, yayın sayıları ve anahtar kelimeler ile ilgili analizler sunulmaktadır. Rejeneratif tasarım

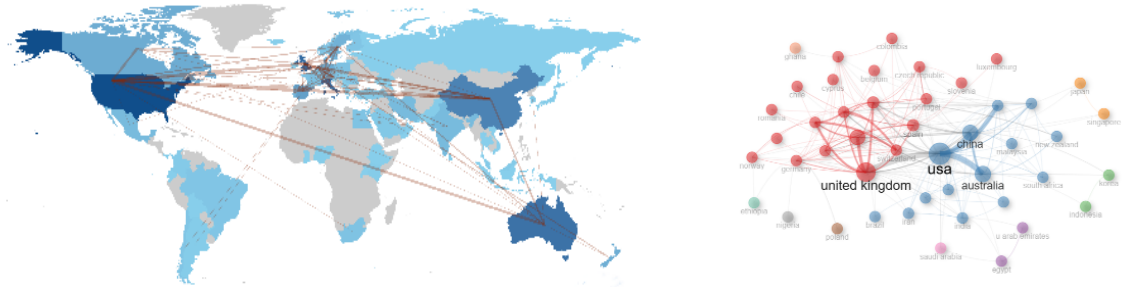
konusunu bibliyometrik analiz ile ele alan bu çalışmada makro ölçekli ilişki kapsamında anahtar kelime, ülke ve yazarlar arasındaki üçlü ilişki ağına bakıldığında (Şekil 7); sürdürülebilirlik ve rejeneratif tasarım anahtar kelimeleri dışında döngüsel ekonomi kavramının da konuyla ilişkili olduğu görülmektedir. Bunun nedenleri içinde döngüsel ekonominin rejeneratif tasarım ilkelerinden biri olarak kabul edilmesi yanı sıra malzeme döngülerinin; geri dönüşüm, biyo malzemeler ve karbon salınımı konularını içermesi olarak gösterilebilir (Mac Donald, 2025). Ülkeler kapsamında ABD ve İtalya en fazla çalışma yapan ülkeler olarak literatüre katkı sağlarken, Birleşik Krallık ve Avustralya'nın da bu sıralamada yer aldığı görülmektedir. Aynı zamanda, Naboni E., Hes D. Ve Zari M. P. gibi yazarların literatüre aktif katkı sağladığı belirlenmiştir.



Şekil 7. Anahtar kelime, ülke ve yazar üçlü ilişki ağı [25].

4.1. Ülke yayın sayısı analizi

Rejeneratif tasarım ve sürdürülebilirlik konularında ülkeler arası iş birliği ağına bakıldığında (Şekil 8), en belirgin etkileşimin ABD ve Birleşik Krallık arasında olduğu, ayrıca Avustralya ve Çin'in de birçok ülke ile kurduğu iş birliği ağları sayesinde öne çıkan ülkeler arasında yer aldığı görülmektedir.

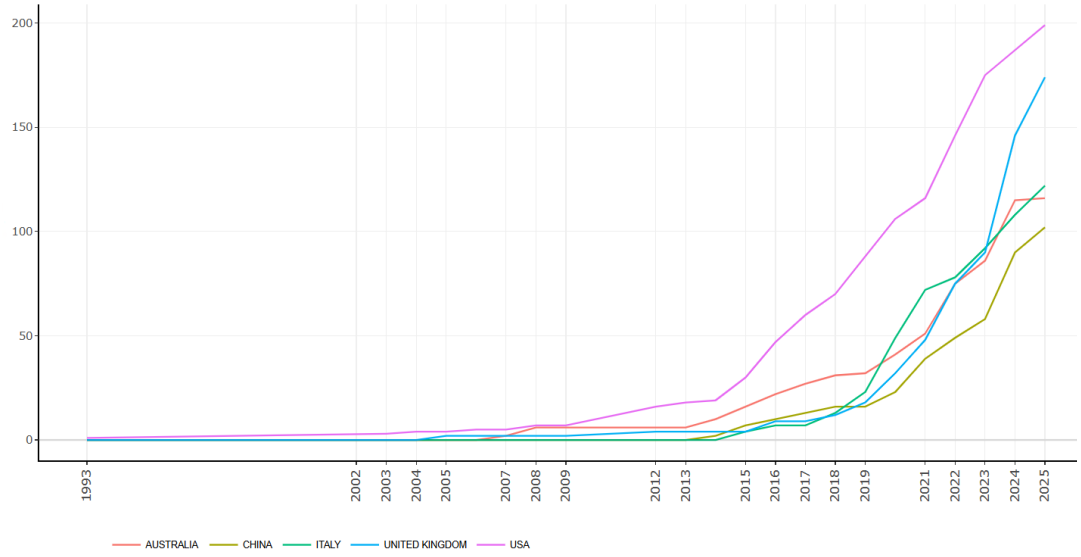


Şekil 8. Ülkeler arası iş birliği ağı[25].

Şekil 9'da rejeneratif tasarım ve sürdürülebilirlik konusunda en fazla çalışma yapan on ülke, makale sayıları ve zaman içindeki değişimleri yer almaktadır. Bibliyometrik analizde bu alanda en fazla yayın yapan ülkenin 199 makale ile ABD olduğu görülmektedir. Birleşik Krallık 174 yayın ile ikinci sırada yer alırken, İtalya 122 yayın ile üçüncü sıradadır. 1993 yılından itibaren, ABD öncülüğünde rejeneratif tasarım alanında yapılan çalışmaların arttığı ve bu süreçte yayın sayısındaki yükselişle birlikte ABD'nin listede ilk sırada yer aldığı belirlenmiştir.

Amerika	199
İngiltere	174
İTALYA	122
AVUSTRALYA	116
ÇİN	102
KANADA	52
İSPANYA	50
HOLLANDA	45
YENİ ZELANDA	33
ALMANYA	31

(a)

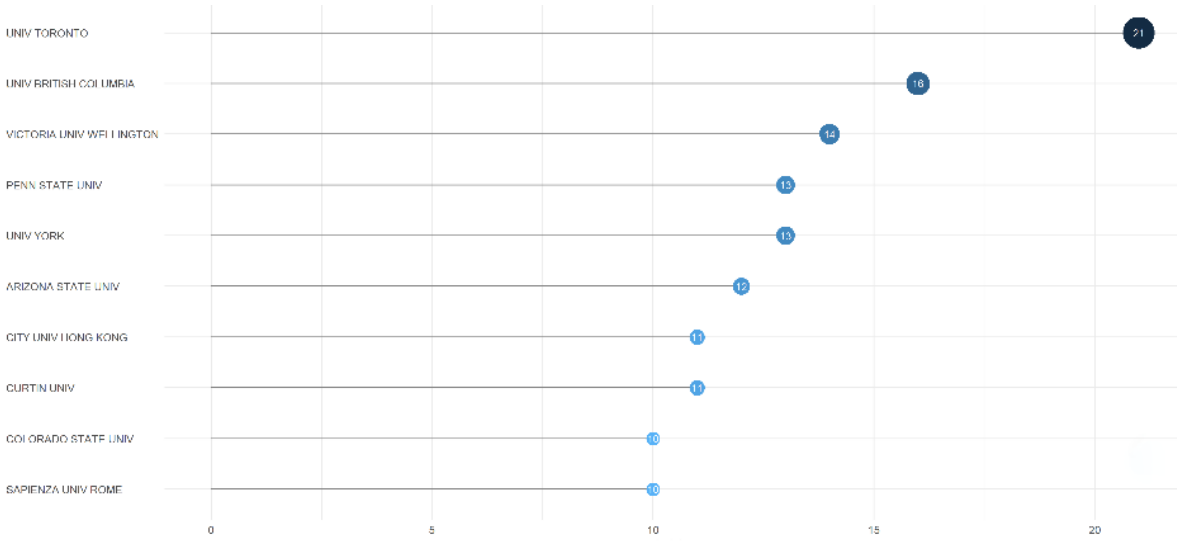


(b)

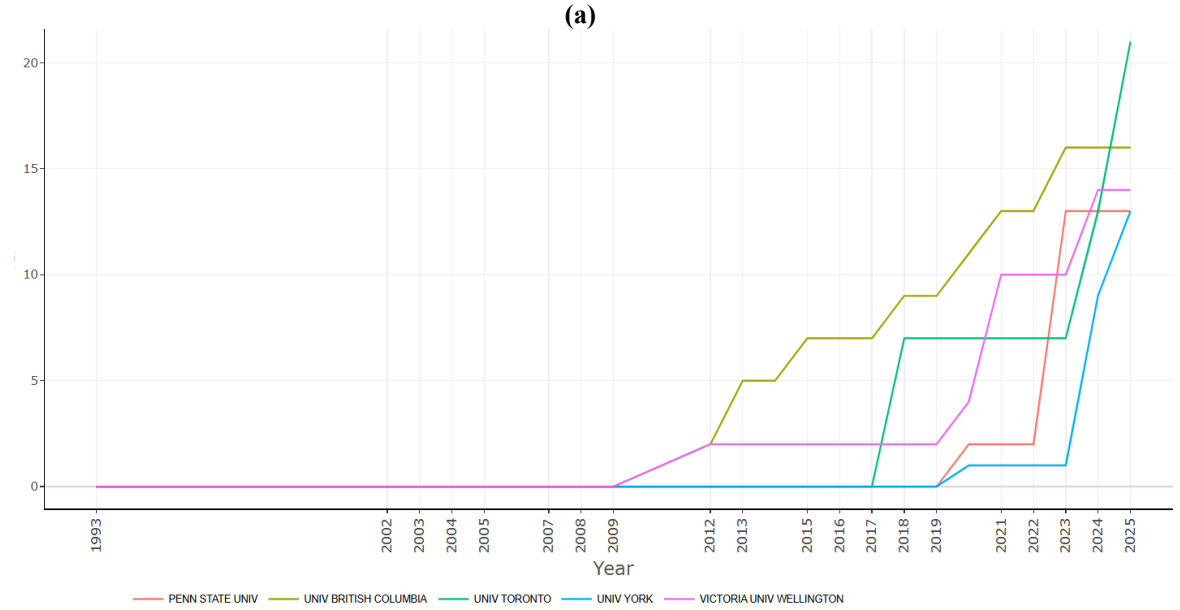
Şekil 9. a) Ülkelerin yayın sayıları ve **b)** zaman içindeki gelişimi [25].

4.2. Üniversite yayın analizi

En fazla yayın yapan ilk on üniversite ve zaman içindeki değişimlerine bakıldığında (Şekil 10); Toronto Üniversitesi (ABD) 21 yayın ile ilk sırada, British Columbia Üniversitesi (Kanada) 16 yayın ile ikinci sırada yer almaktadır. Victoria Üniversitesi (Yeni Zelanda) ise 16 yayın ile üçüncü sıradadır. Rejeneratif tasarım ve sürdürülebilirlik anahtar kelimelerini bir arada ele alan çalışmalar, 2009 yılından itibaren Victoria Üniversitesi ve British Columbia Üniversitesi öncülüğünde başlamış olup; 2017 yılından itibaren Toronto Üniversitesi'nin de bu listeye dahil olmasıyla devam etmiştir. 2019 yılından sonra ise York Üniversitesi (İngiltere) ve Pensilvanya Eyalet Üniversitesi (ABD) de bu alandaki çalışmalara katkı sağlamışlardır.



(a)

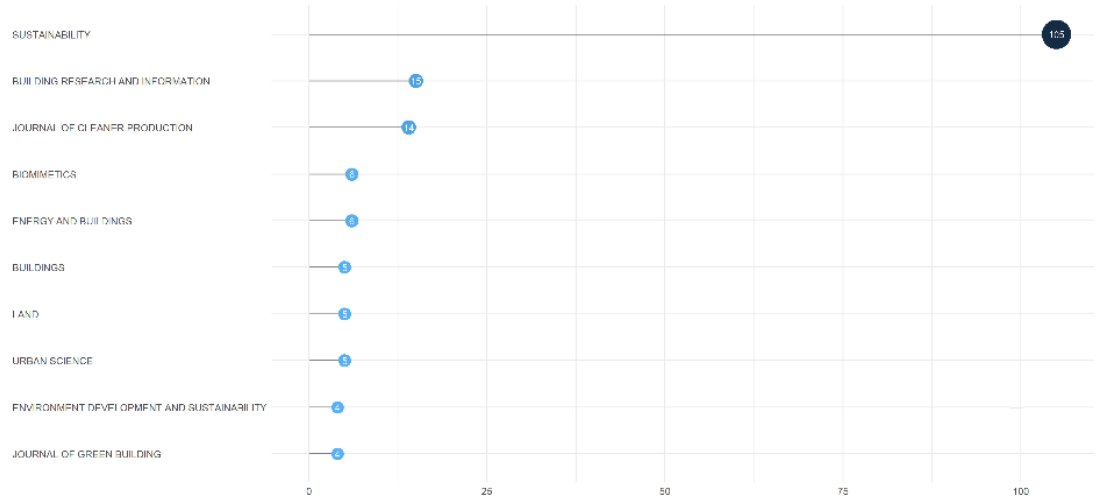


(b)

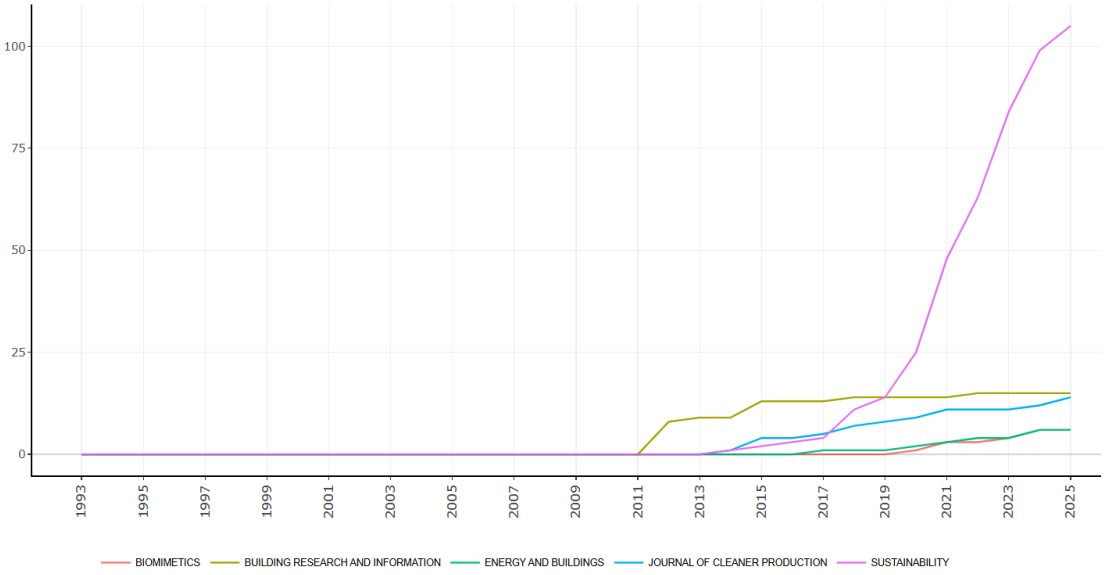
Şekil 10. a) Üniversitelerin yayın sayıları ve **b)** zaman içindeki gelişim [25].

4.3. Dergi yayın sayıları

Bilimsel dergiler nitelikleri ve yayınladıkları çalışmalar ile bilimsel bilginin gelişmesi ve yayınların paylaşılması adına önemli katkılar sağlamaktadırlar. Bu noktada çalışmaya konu edilen kavramlar olarak rejeneratif tasarım ve sürdürülebilirliği ele alan çalışmaları yayınlayan dergi olarak *Sustainability*' nin öne çıktığı belirlenmiştir. En fazla çalışma yayınlayan kaynaklar ve bu kaynakların zaman içindeki değişimleri Şekil 11'de gösterilmektedir. *Sustainability* dergisi, 105 adet yayın ile bu alanda en fazla çalışma yapan kaynak olarak ilk sırada yer almaktadır. Çalışmalar, 2011 yılında *Building Research and Information* dergisi öncülüğünde başlamış olup; 2014 yılından itibaren de *Sustainability* ve *Journal of Cleaner Production* dergilerinin yayınladığı çalışmalar ile alana katkı sağladığı görülmektedir. 2019 yılından günümüze kadar olan süreçte ise *Sustainability* dergisi, yayınladığı çalışma sayısı ile listede ilk sıradaki yerini korumaktadır.



(a)

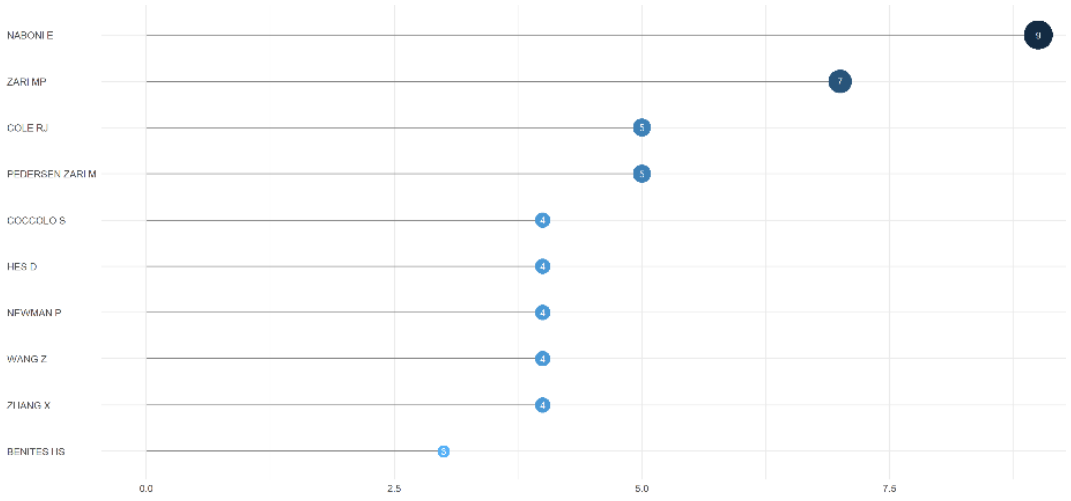


(b)

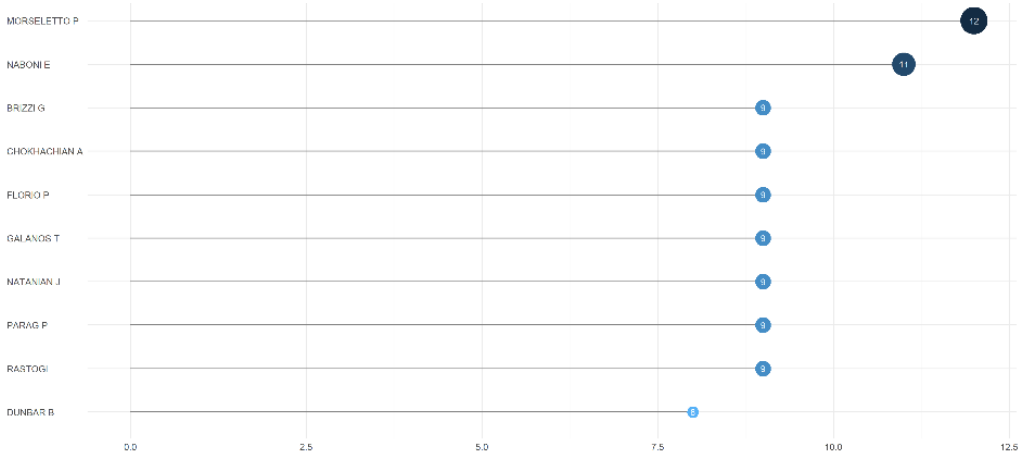
Şekil 11. a) Dergilerin makale sayıları ve **b)** zaman içindeki çalışmalar [25].

4.4. Yazar atıf analizi

Çalışmada rejeneratif tasarım ve sürdürülebilirlik anahtar kelimeleri ile ilişkili en alakalı on yazar, en çok atıf alan on yazar ve yayın sayıları Şekil 12'de gösterilmektedir. Naboni E. en ilgili yazar olarak 9 yayın ile listede birinci sırada yer alırken; Morseletto P. en çok atıf alan yazar olarak listede ilk sırada yer almaktadır. Her iki liste incelendiğinde, konuyla en ilgili olan yazarlar ile en çok atıf alan yazarların farklı kişiler olduğu dikkat çekmektedir. Bu durumun sebebi, bazı yazarların bu alanda daha fazla çalışma yayınlarken, bazı yazarların ise yaptığı çalışmaların etki alanının daha yaygın olması olarak yorumlanabilir.



(a)



(b)

Şekil 12. a) Yazar yayın sayıları ve **b)** en çok atıf alan yazarlar [25].

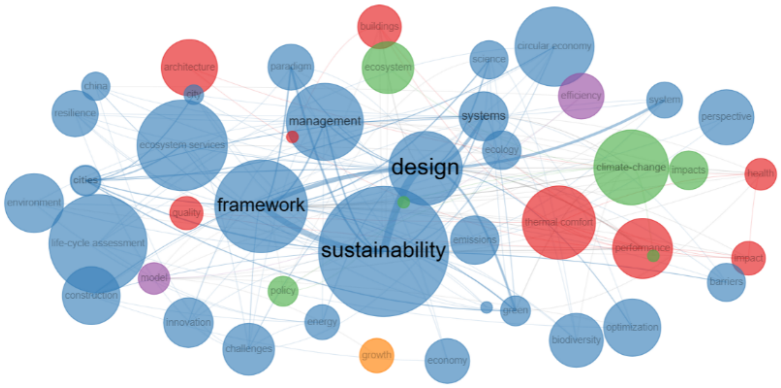
4.5. Anahtar kelime analizi

Çalışma kapsamında en sık kullanılan on anahtar kelime ve kullanım sıklıkları, Birlikte Oluşum Ağı ve Kelime Ağacı yardımıyla Şekil 13'de gösterilmektedir. Analizler sonucunda, en sık kullanılan kelime *design* olurken (62 kullanım sıklığı ile ilk sıra), *sustainability* ikinci sırada yer almıştır (57 kullanım sıklığı). Bunu *framework* kelimesi (44 kullanım sıklığı) üçüncü sırada yer alarak takip etmiştir (Şekil 13a). Anahtar kelimelerin Birlikte Oluşum Ağında da (Şekil 13b) *sustainability ve design* kelimelerinin öne çıktığı; bunları *framework* ve *management* kavramlarının takip ettiği belirlenmiştir. Benzer sonuç kelime ağacında da (Şekil 13c) görülmekle birlikte *systems, climate-change, performance* kavramlarının da anahtar kelimeler olarak çalışmalara eklendiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar design/tasarım kelimesinin doğrudan ilişkili olduğu mimarlık disiplini ve bu disiplinle ilişkili diğer disiplinlerde sürdürülebilirlik çatı kavramı içinde çevre ve iklim sorunlarına ilişkin çalışmaların güncelliğini koruduğunu ve rejeneratif tasarım gibi yeni yaklaşım ve kavramlarla sürekli geliştiğini de göstermektedir.

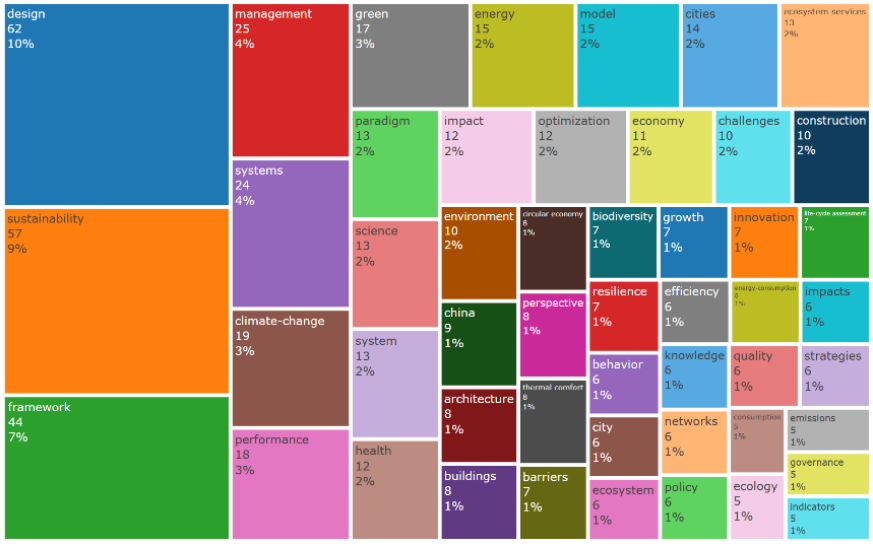
design	62
sustainability	57
framework	44
management	25
systems	24
climate-change	19
performance	18
green	17
energy	15
model	15



(a)



(b)



(c)

Şekil 13. a) En sık kullanılan kelimeler ile kelime bulutu, **b)** birlikte oluşum ağı ve **c)** kelime ağacı [25].

5. Sonuç ve Öneriler

Küresel sorunlar karşısında geliştirilen sürdürülebilir çözümleri, özellikle mimarlık disiplini ve ilişkili alanlarda daha ileriye taşıma amacı rejeneratif tasarım kavramının ortaya çıkışında etkili olmuştur. Rejeneratif

tasarım, çevreyi korumakla birlikte onu yenileyen, iyileştiren ve artı katkılar oluşturan çözümler sunmayı hedeflemektedir. Bu nedenle her geçen gün bu konuya olan ilginin arttığı, bununla birlikte bu alanda yapılan yayınların zamanla çoğaldığı ve gelecekte daha da artacağı gözlemlenmektedir. Bu çalışmada, 1993-2025 yılları arasında rejeneratif tasarım ve sürdürülebilirlik konularında yapılan ve Web of Science veri tabanında yer alan 363 adet yayın; dergi, üniversite, anahtar kelime, yazar ve ülkeler arası düzeyde bibliyometrik analiz yöntemiyle incelenmiş olup aşağıda belirtilen şu değerlendirmelere ulaşılmıştır.

En fazla çalışma yapan ülke 199 yayın sayısı ile birinci sırada yer alan Amerika Birleşik Devletleridir. Birleşik Krallık ikinci (174 yayın), İtalya üçüncü (122 yayın), Avustralya dördüncü (116 yayın) ve Çin beşinci sırada (102 yayın) yer almışlardır. Sıralamanın devamında yayın sayıları arasındaki farkın arttığı (52 makale); Kanada, İspanya, Hollanda, Yeni Zelanda ve Almanya olarak sıralamanın devam ettiği belirlenmiştir. Çalışmaların başlama yılı temelinde bir değerlendirme yapıldığında; 1993 yılından itibaren ABD öncülüğünde başlanıldığı; ilerleyen yıllarda Birleşik Krallık, Avustralya, Çin ve İtalya'nın da çalışmalara katkı sağladığı görülmektedir. Listede yer alan tüm ülkelerde yapılan çalışmalar zamana bağlı olarak artış göstermiştir. Bu noktada ABD, 1993 yılından bu yana yayınladığı çalışma sayısındaki büyük artış ile listedeki yerini halen korumaktadır.

Üniversiteler kapsamında bir değerlendirme yapıldığında; Toronto Üniversitesi'nin 21 yayın ile öncü olduğu, bunu 16 yayın ile British Columbia Üniversitesi'nin takip ettiği belirlenmiştir. Victoria Üniversitesi 14 yayın ile üçüncü sırada yer alırken; Pensilvanya Eyalet Üniversitesi ve York Üniversitesi 13'er yayın ile dördüncülüğü paylaşmışlardır. Sıralamada yer alan diğer üniversiteler; Arizona Eyalet Üniversitesi (ABD) 12 yayın, Hong Kong Şehir Üniversitesi (Çin) ve Curtin Üniversitesi (Avustralya) 11'er yayınla yer alırken; Colorado Eyalet Üniversitesi (ABD) ve Roma Sapienza Üniversitesi (İtalya) 10'ar yayınla listede bulunmaktadır. Bunlara ek olarak, 2009 yılından itibaren Victoria Üniversitesi ve British Columbia Üniversitesi öncülüğünde başlayan çalışmaların, 2017 yılından itibaren Toronto Üniversitesi, 2019 yılında York Üniversitesi ve Pensilvanya Eyalet Üniversitesinin yaptığı katkılarla devam ettiği saptanmıştır.

Yayın yapan kaynaklara bakıldığında *Sustainability* dergisinin (105 yayın) sıralamada lider konumda olduğu görülmektedir. *Building* Research and Information dergisi ikinci sırada (15 yayın) ve *Journal of Cleaner Production* dergisi üçüncü sırada (14 yayın) yer almaktadır. Rejeneratif tasarım ve sürdürülebilirlik anahtar kelimelerinin birlikte kullanımını ele alan bu çalışma özelinde yapılan dergi listelemesinde Web of Science veri tabanında SCI-Exp. kapsamında yer alan *Sustainability* dergisinin yaygın etkisinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Dergi adının araştırılan ana konuya doğrudan yönelik olmasının bu sonuç üzerinde güçlü etkisi olduğu düşünülmektedir.

Konuyla en ilgili yazarlar olarak Naboni E. (9 yayın), Zari M. P. (7 yayın), Cole R. J., ve Pedersen Zari M. (5'er yayın) olarak belirlenmiştir. Sıralama Coccolo S., Hes D., Newman P., Wang Z., Zhang X. (4'er yayın) ve Bentes H. S. (3 yayın) olarak devam etmektedir. En çok atıf alan yazar analizinde Morseletto P. ilk sırada ve Naboni E. ikinci sırada yer almaktadır. Üçüncülüğü diğer yedi yazar paylaşmaktadır. Sıralama Brizzi G., Chokhachian A., Florio P., Galanos T., Natanian J., Parag P., Rastogi ve Dunbar B olarak devam etmektedir. En ilgili yazarlar ve en çok atıf alan yazalar listesi karşılaştırıldığında her iki listede farklı yazarların olduğu dikkat çekmektedir. Buna ilişkin net bir sebep saptanamamakla birlikte; çalışmaların yayınlandığı dergilerin etkisi, yazarların alanlarındaki tanınırlıkları ve benzeri pek çok faktör bu duruma neden olmuş olabilir.

Anahtar kelimeler kapsamında yapılacak değerlendirmede; kullanım sıklığı açısından *design* (62 kullanım sıklığı) kelimesinin öne çıktığı belirlenmiştir. Bunu *sustainability* (57 kullanım sıklığı) kelimesi takip etmektedir. Yayınlar genelinde anahtar kelimeler olarak *framework, management, systems, climate- change, performance, green, energy* kelimelerinin de yer aldığı görülmektedir. Bu kelime çeşitliliğinin mimarlık disiplini içinde yer alan temel kavram olarak *tasarım/design* kökenli olduğu düşünülmektedir. Ayrıca 21. yüzyılın yapılaşma kültürünün sürdürülebilirlik çerçevesinde gelişmesi de doğal olarak anahtar kelimelerin sürdürülebilirlik ile ilişkili bağlamları sağlayan kavramlar ve temalar etrafında (gaz emisyonu, yaşam döngüsü, yenilenebilir enerji, ekolojik ve yenileyici) gelişmesine neden olmaktadır.

Doğrudan anahtar kelime taramasında yer almamasına rağmen, anahtar kelime, ülke ve yazar üçlü ilişki ağı taramasında (Şekil 7) *döngüsel ekonomi* kelimesinin yer aldığı saptanmıştır. Bunun nedenlerinden biri döngüsel ekonominin rejeneratif tasarım ilkeleri içinde yer almasıdır. Diğeri ise malzeme biliminin ve malzeme döngülerinin (geri dönüşüm, biyo malzeme ve karbon seviyesi vb.) doğrudan mimarlıkla ve daha da önemlisi sürdürülebilir mimari ile ilişkili olmasıdır. Bu noktada, yakın gelecekte rejeneratif tasarım ve malzeme döngülerini disiplinlerarası bakışla merkezine alan çalışmaların artacağı ön görülmektedir.

Oluşturulan tasarım rehberleri ve simülasyon destekli tasarım örnekleri aracılığıyla kavramın yaygın etkisi ve ulaştığı kitle çoğalmaktadır. Güncel konumda rejeneratif tasarım için başlangıç aşamasında öncü rehber sistemler oluşturulmuş olsa da; bu tasarım anlayışının yükselen bilişim ve teknolojik gelişmelere entegre olma potansiyeli sayesinde çok daha geniş çalışma alanına sahip olacağı ön görülmektedir. Bu noktada rejeneratif

tasarımı konu edinecek araştırmalarda *yapay zeka/AI, parametri* ve benzeri anahtar kelimelerin öne çıkması olası görünmektedir.

Web of Science verilerinin analiz sonuçlarına göre, Türkiye özelinde çalışmaya dahil olan bir yazar, atıf, dergi veya üniversite ne yazık ki saptanamamıştır. Bu durumun nedeni, araştırmanın sınırlılıklarıyla (tezler konu dışı tutulmuştur) açıklanabileceği gibi rejeneratif tasarım yaklaşımının ülkemiz akademik ortamında da yeni gelişmekte olmasıyla veya yapılan yayınların büyük çoğunluğunu lisansüstü tezlerin oluşturmasıyla ilişkilendirilebilir. Çalışmanın sonucuna göre Türkiye'de rejeneratif tasarım üzerine yapılan yayınların azlığı, bu alanda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu gerçeğini göstermektedir. Bu bağlamda bu çalışma ülkemiz alan yazını için nitelikli katkı sağlama potansiyeline sahiptir.

Rejeneratif tasarım sürdürülebilir tasarımları da aşmak üzere yakın gelecekte daha önemli bir konuma taşınacaktır. Oluşturulan rejenatif tasarım rehberlerinin yapay zeka desteği ile daha da geliştirilmesi olasıdır. Bu nedenle araştırmacılara yeni bir çalışma alanı olarak önerilebilir. Ayrıca aynı içerik bir binanın yaşam döngüsü içinde tüm yapım aşamalarına uygulanabilir. Özellikle yapay zeka ve simülasyon programları ile desteklenmiş araştırmalar, tasarımlar veya çığır açıcı ütopyaların geliştirilebileceği ön görülmektedir. Bibliyometrik analiz çerçevesinde ele alınan bu çalışma ile araştırmacılara rejeneratif tasarımın günümüz alan yazını içindeki nitelik ve nicelikleri ortaya konarken; gelecek araştırmalarda öne çıkabilecek temel yönelimler de saptanmaya çalışılmıştır.

Yazar Katkıları

P. K. O. çalışmayı tasarladı, makaleyi yazdı ve kritik revizyon yaptı; G. G. verileri topladı, analiz yaptı ve makaleyi yazdı.

Kaynaklar

[1] Apak H, Tuna Taygun GA. Conceptual Approach to Abandoned Industrial Sites within the Scope of Brownfield in the Context of Regenerative Design. ICONARP International Journal of Architecture and Planning, 2024; 12(1): 234-254.

[2] Attia S. Regenerative and Positive Impact Architecture Learning from Case Studies. Gewerbestrasse, Switzerland: Springer International Publishing, 2018.

[3] Mang P, Reed B. Regenerative Development and Design. In: Sustainable Built Environments. Editors: Loftness, D. Haase. New York, USA: Springer, 2013; pp.478-501.

[4] Camuşoğlu N. Rejeneratif Mimari Nedir? Sürdürülebilir Tasarımın Sınırları.https://www.ekoyapidergisi.org/rejeneratif-mimari-nedir-surdurulebilir-tasarimin-sinirlari, Erişim: 25 Aralık 2024.

[5] Elcaruşe A. Beyond Sustainability: Design Strategies for Regenerative Architecture Based On Biomimicry. Master Thesis, Graduate School of Bahçeşehir University. İstanbul, 2022.

[6] Harmankaya HH, Tokman LY. Rejeneratif Tasarıma Akademik Bir Yaklaşım. 7. Uluslararası Akademik Araştırmalar Kongresi (ICAR), 24-26 Ocak 2022, İstanbul, Türkiye, pp. 2-10

[7] Harmankaya HH. Doğadan İlham Alan Mimari: Rejeneratif (Yenileyici) Tasarım Potansiyeli. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir, 2022.

[8] Aktürk A. Regenerative design and development for a sustainable future: Definitions and tool evaluation. Master's Thesis. University of Minnesota, Minnesota, 2016.

[9] ARUP, Arup explores: Regenerative design/Towards living in harmony with nature, https://indd.adobe.com/view/058d0389-e0a8-4462-8f8e-d49532d68181, Erişim: 5 Eylül 2025.

[10] Santosa E. Five key principles in designing regenerative buildings (U.S. Green Building Council), https://www.usgbc.org/articles/five-key-principles-designing-regenerative-buildings, Erişim: 5 Eylül 2025

[11] Van der Ryn S. Design for Life. Layton, Utah. USA: Gibbs Smith Publisher, 2005.

[12] Gonzola R, Haberman KJ. Energy- Efficient Architecture: Basic for Planning and Constructions, Berlin, Germany: Birkhauser–Publishers for Architecture, 2006.

[13] Lloyd Johns, D. Architecture and the Environment: Bioclimatic Building Design, London, England: Laurance King Publishing, 1998.

[14] Guzowski M. Sıfır Enerji Mimarlığına Doğru: Yeni Güneş Enerjili Tasarım, İstanbul, Türkiye: YEM Yayınevi,2017.

[15] Dipasquale L, Kısa Ovalı P, Mecca S, Özel B. Resilience of Vernacular Architecture, In: Versus Herıtage for Tomorrow: Vernacular Knowledge for Sustainable Architecture. Editors: M. Correria, S. Mecca, L. Dipasquale., Firenze, Italy: Firenze University Press, 2014; pp. 65-73.

[16] Mang P, Reed B. Designing from place: A regenerative framework and methodology. Building Research & Information 2012, 40(1): 23-38.

[17] Javanmard Z, Nava C. Regenerative architecture in Practice: A multifaceted exploration of cladding systems to meet LEED standards. Energy & Buildings. 2024; 323, 114810.

[18] Acar M. Rejeneratif Tasarım Yaklaşımı Açısından Lbc 4.0 ve Leed V4.1 Sistemlerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Kültür Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2023.

[19] Debbie Flevotomou Architects, Great Reef Project, https://www.debbieflevotomou.com/the-great-reef, Erişim: 6 Eylül 2025.

[20] Andrade A, Dominski FH, Coimbra DR. Scientific Production on indoor air quality of environments used for physical exercise and sports practice: Bibliometric analysis. Journal of Environmental Management. 2017; (196):188–200.
[21] Bramness JG, Henriksen B, Person O, Mann KA. Bibliometric analysis of european versus usa research in the field of addiction. Research on alcohol, narcotics, prescription drug abuse, tobacco and steroids 2001–2011. European Addiction Research. 2013; 20 (1): 16-22.
[22] Özğan AO, Aluçlu İ. Doğayla Uyumlu Mekânlar: Biyofilik Tasarımın Bibliyometrik Değerlendirmesi. İdealkent Kent Araştırmaları Dergisi, 2023; 15(41):483-505.
[23] Pierpaoli M, Ruello ML. Indoor Air Quality: A Bibliometric Study. Sustainability 2018; 10(11): 3830. 2018.
[24] Chadegani AA, Salehi H, Yunus M, Farhadi H, Fooladi M, Farhadi M, Ebrahim NA. A Comparison Between Two Main Academic Literature Collections: Web Of Science And Scopus Databases. Asian Social Science, 2013; 9(5):18–26.
[25] Bibliometriks, https://www.bibliometrix.org/home/, Erişim: 3 Haziran 2025.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 807-812, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1728607

Akin (Sandıklı/Afyonkarahisar) Bazaltlarının Demiryolu Balastı Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi

Mehmet KOZAK[1*]
[1] TCDD 7. Bölge Demiryolu Bakım Servis Müdürlüğü, Afyonkarahisar, Türkiye
[*1] mkozak6484@hotmail.com

(Geliş/Received: 27/06/2025; Kabul/Accepted: 09/09/2025)

Öz: Bu çalışma ile Akin (Sandıklı/Afyonkarahisar) bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanımının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bazalt ocağında incelemeler yapılarak çalışmada yapılacak deneyler için örnekler alınmıştır. Balast Teknik Şartnamesine göre kayacın fiziksel özelliklerin belirlenmesi için Mikro – Deval ile aşınma direnci tayini, Los Angeles deneyi ile parçalanmaya karşı direnç tayini, Magnezyum Sülfat deneyi, su emme ve tane yoğunluğu deneyleri yapılmıştır. Kayacın isim ve kökenini belirlemek için petrografik analiz yapılmıştır. Kayacın aşınmaya karşı direnci % 6, parçalanmaya karşı direnci % 9, dona dayanıklılık değeri % 1, tane yoğunluğu ise 2,90 Mg/m^3, su emme oranı ise % 0,3 olarak tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar konvansiyonel demiryolu, hızlı tren ve yüksek hızlı tren hatlarında Akin (Sandıklı/Afyonkarahisar) bazaltlarının demiryolu balastı olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir. Akin (Sandıklı/Afyonkarahisar) bazalt ocağının, yapımı devam eden Ankara-İzmir, proje çalışmaları devam eden Eskişehir-Antalya yüksek hızlı tren hatların balast ihtiyacının karşılanmasında kullanılabilirliği hakkında fikir verecektir.

Anahtar kelimeler: Balast, bazalt, demiryolu balastı, Akin Sandıklı, Los Angeles, yüksek hızlı tren.

Evaluation of the Use of Akin (Sandıklı/Afyonkarahisar) Basalts as Railway Ballast

Abstract: The aim of this study is to evaluate the use of Akin (Sandıklı/Afyonkarahisar) basalts as railway ballast. Investigations were carried out in the basalt quarry and samples were taken for the experiments to be carried out in the study. According to the Ballast Technical Specification, abrasion resistance determination with Micro-Deval, resistance to fragmentation with Los Angeles test, Magnesium Sulphate test, water absorption and grain density tests were carried out to determine the physical properties of the rock. Petrographic analysis was carried out to determine the name and origin of the rock. The rock's resistance to abrasion was determined as 6%, resistance to fragmentation as 9%, frost resistance value as 1%, grain density as 2.90 Mg/m^3 and water absorption rate as 0.3%. The experimental studies have shown that Akin (Sandıklı/Afyonkarahisar) basalts can be used as railway ballast in conventional railway, speed train and high-speed train lines. It will provide an idea about the usability of Akin (Sandıklı/Afyonkarahisar) basalt quarry in meeting the ballast needs of Ankara-İzmir high-speed train lines, which are currently under construction, and Eskişehir-Antalya high-speed train lines, which are currently under project studies.

Key words: Ballast, basalt, railway ballast, Akin Sandıklı, Los Angeles, high speed train.

1. Giriş

Demiryolu platformu üzerine döşenmiş olan traverslerin altında, arasında bulunan ve traverslere elastik bir yatak oluşturan, raylar vasıtasıyla traverslere gelen yükleri taneleri arasındaki sürtünme ile yayarak kalıcı çökmelere uğramadan platforma ileten bir demiryolu üst yapı elemanıdır. Ayrıca demiryolu balastı yola düşen suyun ve eriyen karların drenajını sağlamaya yardımcı olmaktadır. Demiryolu balastı, % 100'ü kare gözlü 63 mm açıklıklı elekten geçerek en az % 97'si kare gözlü 22,4 mm elek üzerinde kalan ve istenilen gradasyonu sağlayacak şekilde keskin köşeli ve kenarlı olarak kırılmış, sert ve sağlam kayaçlardan üretilmelidir [1-4].

Bazalt, granodiyorit, siyenit, granit, gabro, riyolit, andezit, diyabaz, diyorit, kuvarsit, gnays, kumtaşı, porfir, kireçtaşı (kalker), silttaşı ve dolomit gibi kayaçlar demiryolu balastı olarak kullanılmıştır [4-9].

İyi bir demiryolu balastının sahip olması gereken birçok önemli özellik vardır. Bu özelliklerin başında, balastın sağlam ve dayanıklı olması gelir. Bu nedenle dere çakılları, pürüzsüz ve yuvarlak yapıları ile tek bir kayaç türünden oluşmamaları sebebiyle kesinlikle balast olarak kullanılmamalıdır. Bunun yerine, damarsız ve çatlak içermeyen, homojen ve masif yapılı kayaçlardan üretilmiş balastlar tercih edilmelidir. Bu kayaçlar, darbe, aşınma ve noktasal statik/dinamik basınçlara karşı yüksek direnç göstermelidir. Ayrıca, atmosferik etkilere, özellikle de donma-çözünme döngülerine karşı yüksek dirençli olmaları gerekmektedir. Balastın şekli de büyük önem taşır.

[*] Sorumlu yazar: mkozak6484@hotmail.com. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0001-5306-3089

Üretim sürecinde çok yüzeyli, çok köşeli, kübik ve keskin kenarlı bir yapıya sahip olmalı, yassı kırılmış olmamalıdır. Bu şekil, ray yatağında yüksek sürtünme direnci ve içsel sürtünme açısı sağlayarak yanal ve boyuna stabilitenin korunmasına yardımcı olur. Son olarak, balastın temiz olması şarttır. İçerisinde toz, toprak, kil, ot, kök gibi yabancı maddeler bulunmamalıdır. Ayrıca, balastın drenaj kabiliyetinin yüksek olması ve düşük su emme oranına sahip olması, hat altyapısının korunması açısından kritik öneme sahiptir. Tüm bu özellikler, balastın belirlenen teknik şartnamedeki alt ve üst gradasyon sınırları içerisinde üretilmesiyle sağlanabilir [4, 10-12].

Demiryolu balastı olarak kullanılmaya uygun kayaçlar üzerine yapılan çalışmalar, farklı bölgelerdeki potansiyel kaynakları ortaya koymuş olup aşağıda bu çalışmalar özetlenmiştir.

Kurtpınar (Ceyhan) Bazaltları: Konvansiyonel demiryolu hatları için balast olarak kullanılabileceği belirlenmiştir [13].

Pazarcık (Kahramanmaraş) ve Solhan (Bingöl) Magmatik Kayaçları: Bu bölgelerdeki magmatik kayaçların da demiryolu balastı olarak kullanılabileceği değerlendirilmiştir [14].

Evciler Bazaltı: Petrokimyasal ve petrografik özellikleri incelenerek yapılan çalışmada, B ve C zonlarının konvansiyonel demiryolu hatlarında hem balast hem de balast altı malzemesi olarak kullanıma uygun olduğu değerlendirilmiştir [15].

Yenikaracaören ve Işıkkara (Kütahya) Bazaltları: Bu bazaltların, hızlı, yüksek hızlı ve konvansiyonel demiryolu hatlarında balast olarak kullanılabileceği belirtilmiştir [16-17].

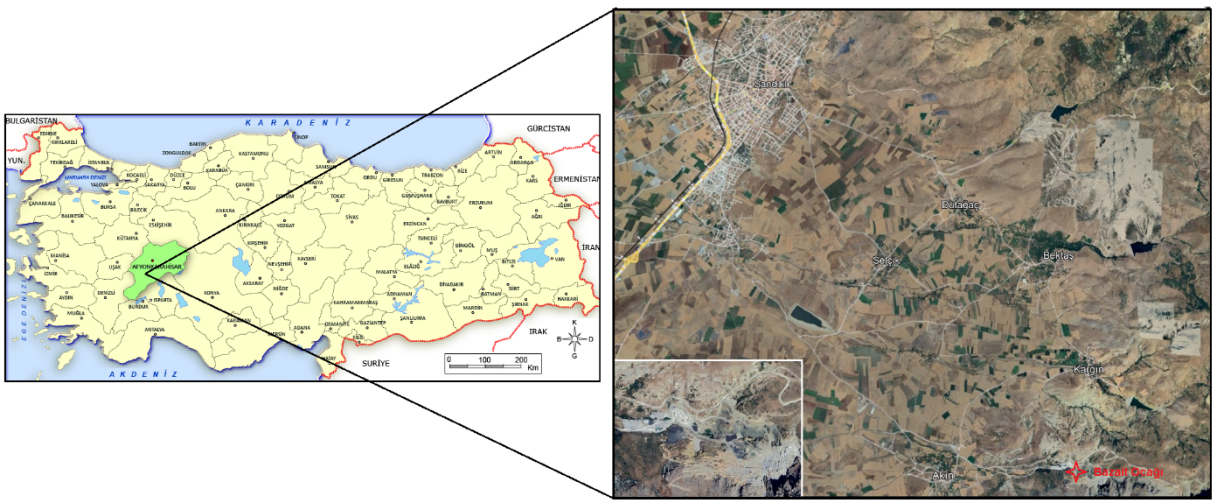
Doğanşehir (Malatya) Granitleri: Bu bölgede bulunan granitlerin, konvansiyonel, hızlı ve yüksek hızlı tren hatları için balast malzemesi olarak değerlendirilebileceği belirlenmiştir [18].

Kolankaya (Uşak) Andezitik Bazaltları: Bu kayaçların konvansiyonel demiryolu hatlarında balast olarak kullanılabileceği değerlendirilmiştir [19].

Demiryolu projelerinde, balast olarak kullanılacak kayaçların fiziksel özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi ve bu özelliklere en uygun ocakların seçimi, projenin başarısı için hayati bir rol oynamaktadır. Türkiye'de bu konudaki çalışmaların yetersizliği, yerel kaynakların potansiyelini ortaya koymak ve demiryolu altyapısının kalitesini artırmak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, Akin (Sandıklı/Afyonkarahisar) bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanım potansiyelinin araştırılması, ülkemizdeki mevcut kaynakların değerlendirilmesi adına önemli bir adım teşkil etmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışma alanı Afyonkarahisar ili, Sandıklı ilçesi, Akin Köyü sınırları içerisinde bulunmaktadır. Sandıklı iline 11,5 km uzaklıkta olup ulaşım Sandıklı ilçesinden Akin köy yolu ile sağlanmaktadır. Şekil 1'de Akin (Sandıklı/Afyonkarahisar) bazalt ocağının yer buldur haritası verilmiştir.



Şekil 1. Akin (Sandıklı/Afyonkarahisar) bazalt ocağının yer buldur haritası.

Sandıklı ilçesindeki jeolojik birimler, yaşlıdan gence doğru Kestel, Hüdai, Çaltepe, Seydişehir, Karatepe, Derealanı, Akdağ ve Bozoğlan formasyonları ile Oligosen konglomera, Sandıklı lavları, Soğucak piroklastikleri, traverten ve alüvyondan oluşur. Bu bölgedeki bazaltlar, trakit, trakiandezit ve andezit gibi kayaçlarla birlikte

Sandıklı lavları birimi içinde bulunur [20-23]. Volkanik faaliyetler, Orta Miyosen'in sonlarında başlamış ve Üst Miyosen boyunca sürmüştür. Becker-Platen (1977) de bu birimin yaşını Üst Miyosen olarak teyit etmiştir [23-25].

Bazalt ocağının homojen bir yapı sergilediği ve balast üretimi için uygun olduğu, bazalt oluşumlarının siyahımsı, koyu gri, kızıl-kahverengi ve kahve tonlarında renkte olduğu görülmüştür. Ayrıca ocaktaki bazalt oluşumları sütun yapıya (Şekil 2) sahiptir.



Şekil 2. Akin (Sandıklı/Afyonkarahisar) bazalt ocağından sütün bazalt görünümü.

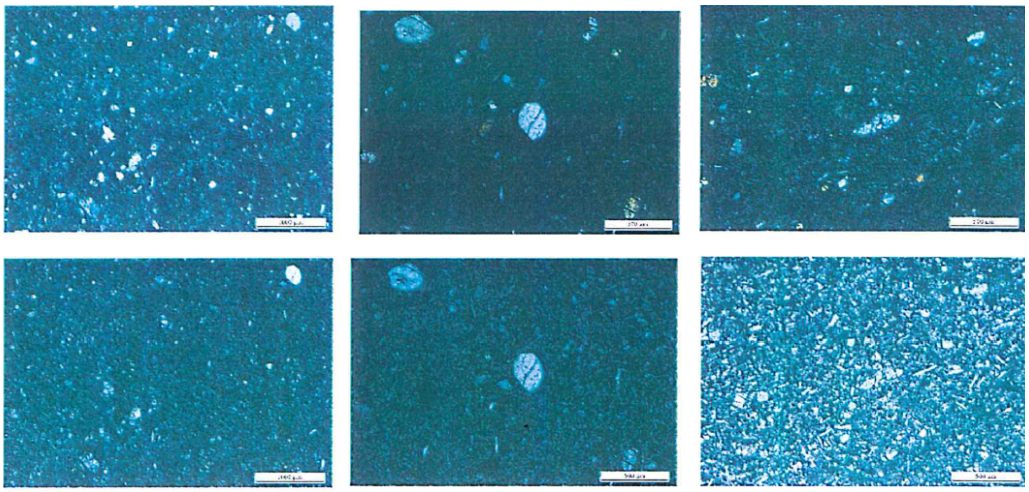
Çalışmada kullanılan kayacın isim ve kökenin belirlenebilmesi için petrografik analiz yapılmıştır. Balastın şartnamedeki geometrik özellikleri kullanılacak olan üretim prosedürleri sayesinde sağlanabilmektedir. Fiziksel özelliklerinin tespiti için ise tane yoğunluğu, su emme, Mikro – Deval, Los Angeles, termal ve bozunma özelliği için $MgSO_4$ (dona dayanıklılık) deneyleri yapılmış olup Tablo 1'de deneylerde kullanılan standartlar verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada yapılan deneyler ve deneylerde kullanılan standartlar [12].

Deney	Standart
Los Angeles	TS EN 1097-2 [26]
Su Emme Oranı	TS EN 1097-6 [27]
Tane Yoğunluğu	TS EN 1097-6 [27]
Dona Dayanıklılık	TS EN 1367-2 [28]
Mikro - Deval	TS EN 1097-1 [29]

3. Bulgular ve Tartışma

Kayacın mineralojik ve petrografik özellikleri Polarizan mikroskop ile incelenmiştir. Kayacın mikrolit ve volkan camı (% 50), plajiyoklaz (% 25), piroksen (% 20), olivin (%5), opak ve tali minerallerden (% 1'den az) oluşan magmatik kökenli yarı kristalli porfirik dokuya sahip olduğu yüzey kayacı olduğu belirlenmiştir. Kayaç Modal Minerolojik Sınıflamaya göre bazalt olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3. Akin (Sandıklı/Afyonkarahisar) bazaltına ait örneklerin ince kesit polarizan mikroskop görüntüleri.

Los Angeles aşınma deneyi balastın parçalanmaya karşı direncini belirlemek için bir etkili deneyidir. Bu deney sayesinde pratik ve etkili bir şekilde demiryolu balastının servis ömrü boyunca tren yüklerinden nasıl etkilendiği hakkında fikir elde edilebilir [30]. Çalışmada kullanılan Akin (Sandıklı) bazaltın parçalanma direnci (Los Angeles) % 9 olarak tespit edilmiştir.

Demiryolu balastı olarak seçilen kayacın içerisindeki gözenek ya da boşlukların varlığı, balastın fiziksel ve mekanik özelliklerin olumsuz etkilemektedir. Kayaç içerisinde yer alan gözenek ve boşluklar küçük bir miktarın varlığı bile balastın deformasyonu üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır [31]. Kayaçta bulunan boşluk ya da gözeneklerde biriken suyun donma- çözünmesi ile balastın direnci düşer, bu olay da balastta zamanla çatlaklara ve ayrışmalara neden olur [32]. Bu nedenle demiryolu balastı olarak seçilecek kayacın su emme oranı büyük önem arz etmektedir. Akin (Sandıklı) bazaltın su emme oranı % 0,3 olarak tespit edilmiştir.

Demiryolu balastı olarak seçilen kayacın tane yoğunluğu, demiryolu balastının dayanımı ve fiziksel özellikleri hakkında fikir sağlamaktadır. Yüksek tane yoğunluğuna sahip olan demiryolu balastları, genellikle düşük su emme oranına ve düşük poroziteye sahip dayanımlı kayaçlardan üretilir [33]. Bu nedenle demiryolu balastı olarak seçilecek kayacın tane yoğunluğu tespitinin yapılması gerekmektedir. Yapılan deney ile Akin (Sandıklı) bazaltın tane yoğunluğu 2,90 Mg/m^3 belirlenmiştir.

Demiryolu balastı olarak seçilen kayaçta ısı farkları nedeniyle fiziksel ayrışmalar meydana gelmektedir. Atmosferik şartlara direk maruz kalan demiryolu balastında donma-çözülme meydana gelmekte bu olayda sonucunda mekaniksel olarak deformasyona uğrayan balastın stabilitesi olumsuz yönde etkilemektedir [15]. Bu nedenle demiryolu balastı olarak seçilecek kayacın don kaybının tespitinin yapılması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan Akin (Sandıklı) bazaltın dona dayanıklılık değeri % 1 olarak belirlenmiştir.

Mikro-Deval, iri agregaların aşınmaya karşı direncini belirlemek için kullanılan yaygın bir deneydir [34]. Mikro-Deval deneyi sayesinde pratik ve etkili bir şekilde demiryolu balastının servis ömrü boyunca tren yüklerinden nasıl etkilendiği hakkında fikir elde edilebilir. Çalışmada kullanılan Akin (Sandıklı) bazaltın Mikro - Deval ile aşınmaya karşı direnci % 6 olarak belirlenmiştir. Demiryolu balastı olarak, Akin (Sandıklı/Afyonkarahisar) bazaltlarının kullanılabilirliğinin tespiti için yapılan fiziksel deney sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Fiziksel özelliklerinin sınır değerleri ve Akin (Sandıklı/Afyonkarahisar) bazaltının deney sonuçları.

Deney	Akin (Sandıklı) Bazaltı Deney Sonuçları	Konvansiyonel Demiryolu Hattı Sınır Değerleri [12]	Hızlı Tren - Yüksek Hızlı Tren Hatları Sınır Değerleri [12]
Los Angeles	% 9	≤ % 20	≤ % 14
Su Emme Oranı	% 0,3	≤ % 2	≤ % 1,5
Tane Yoğunluğu	2,90 Mg/m^3	≥ 2,50 Mg/m^3	≥ 2,60 Mg/m^3
Dona Dayanıklılık	% 1	≤ % 5	≤ % 3
Mikro - Deval	% 6	≤ % 14	≤ % 12

4. Sonuç

TCDD Balast Teknik Şartnamesine göre Akin (Sandıklı) bazaltlarının demiryolu hatlarında demiryolu balastı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda;

- Kayacın yarı kristalli porfirik dokuya sahip magmatik kökenli yüzey kayacıdır. Modal Minerolojik Sınıflamasına göre bazalt olarak tanımlanmıştır.
- Akin (Sandıklı) bazaltın parçalanma direnci (Los Angeles) % 9 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuca göre Akin (Sandıklı) bazaltının Los Angeles değeri konvansiyonel (≤ %20) ve hızlı tren - yüksek hızlı tren (≤ %14) demiryolu hatları için uygundur.
- Akin (Sandıklı) bazaltın su emme oranı % 0,3 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuca göre Akin (Sandıklı) bazaltının su emme oranı konvansiyonel (≤ %2) ve hızlı tren - yüksek hızlı tren (≤ %1,5) demiryolu hatları için uygundur.
- Akin (Sandıklı) bazaltın tane yoğunluğu 2,90 Mg/m^3 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuca göre Akin (Sandıklı) bazaltının tane yoğunluğu konvansiyonel (≥ 2,50 Mg/m^3) ve hızlı tren - yüksek hızlı tren (≥ 2,60 Mg/m^3) demiryolu hatları için uygundur.
- Akin (Sandıklı) bazaltın dona dayanıklılık (termal ve bozunma özelliği için $MgSO_4$ deneyi) değeri % 1 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuca göre Akin (Sandıklı) bazaltının dona dayanıklılığı konvansiyonel (≤ %5) ve hızlı tren - yüksek hızlı tren (≤ %3) demiryolu hatları için uygundur.
- Akin (Sandıklı) bazaltın Mikro – Deval (aşınmaya karşı direnci) değeri % 6 olarak belirlenmiştir. Bu sonuca göre Akin (Sandıklı) bazaltının aşınmaya karşı direnci (Mikro - Deval) konvansiyonel (≤ %14) ve yüksek hızlı tren - hızlı tren (≤ %12) demiryolu hatları için uygundur.

Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda, Afyonkarahisar'ın Sandıklı ilçesindeki Akin bazaltlarının konvansiyonel, hızlı ve yüksek hızlı tren hatlarında demiryolu balastı olarak kullanıma uygun olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, yapımı devam eden Ankara-İzmir ve proje aşamasındaki Eskişehir-Antalya yüksek hızlı tren hatlarının balast ihtiyacının karşılanması noktasında Akin bazalt ocağının büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, gelecekteki demiryolu projeleri için uygun kayaç kaynaklarının tespiti amacıyla farklı ocaklarda yeni araştırmaların yapılması faydalı olacaktır.

Teşekkür

Çalışmaya destekleri için TCDD 7. Bölge Müdürlüğü ve Nice Hazır Beton Mad. İth. İhr. San. ve Tic. A. Ş. yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

Kaynaklar

[1] Oğul K, Topal İ, Poşluk E. Ankara - İstanbul yüksek hızlı tren demiryolunda balast hammaddesi olarak granit ve bazaltın birlikte kullanılabilirliğinin araştırılması ve aşınma dayanımlarına etkisi, MT Bilimsel 2012; 1, 81-89.
[2] Kozak M. Hemzemin geçitlerdeki kaplama çeşitleri ve güvenliğe etkisinin araştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2012; 2(1), 1-11.
[3] Nålsund R. Railway ballast characteristics, selection criteria and performance, Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering, 2014.
[4] Kozak M. Demiryolu balastının ve özelliklerinin araştırılması, Demiryolu Mühendisliği 2021; 13, 86-96.
[5] Rağmındı GP. Research on railroad ballast specification and evaluation, Transportation Research Record 1985; 1006, 1-8, 1985.
[6] Okonta FN, Magagula SG. Railway foundation properties of some South African quarry stones, Electronic Journal of Geotechnical Engineering EJGE 201; 179-197.
[7] Yılmaz A. Demiryolu üstyapısında balast kirliliği, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2015; 6(1), 11-17.
[8] Bayrak MÇ. Altyapı özelliklerinin demiryolu üstyapısının performansına etkisi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2018.
[9] Bassey D, Ngene B, Akinwumi I, Akpan V, Bamigboye G. Ballast contamination mechanisms: a criterial review of characterisation and performance ındicators. Infrastructures 2020; 5(11), 94.
[10] Anonim, Yol mühendisleri kursu yol üstyapı ders notları, TCDD Eğitim ve Öğretim Dairesi Başkanlığı Yayınları, Ankara, 2016.
[11] Yüzbaşı İB. Göksun ofiyoliti kabuksal kayaçlarının demiryolu balast malzemesi olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 2019.
[12] Anonim, TCDD balast teknik şartnamesi. TCDD Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2020.

[13] Kahraman E, Yapıcı N. Kurtpınar (Ceyhan) bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanımının değerlendirilmesi, Demiryolu Mühendisliği 2022; 16, 14–22.
[14] Sabancı A. Pazarcık (Kahramanmaraş) ve Solhan (Bingöl) magmatiklerinin demiryolu balastı olarak kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, T.C. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, (2018).
[15] Işlak H. Evciler (Gölbaşı/Ankara) bazaltının petrografik ve petrokimyasal özelliklerinin demiryolu balast ve balastaltı malzemesi olarak kullanılabilirliği üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya, 2019.
[16] Kozak M. Yenikaracaören (Kütahya) bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanılabilirliği, Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi 2024; 14(2), 944-952.
[17] Kozak M. Işıkkara (Kütahya) bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanılabilirliği, Demiryolu Mühendisliği 2024; 20, 25–30.
[18] Kahraman E, Özdemir AC. Çavuşlu (Malatya) granitlerinin demiryolu balastı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi 2024; 39(3), 813-820.
[19] Kozak M. Kolankaya (Eşme/Uşak) andezitik bazaltlarının konvansiyonel demiryolu hatlarında demiryolu balastı olarak kullanılabilirliği, Muş Alparslan University Journal of Science 2024; 12(2), 169-173.
[20] Öngür T. Sandıklı (Afyon) jeotermal araştırma bölgesine ilişkin jeolojik durum ve jeotermal enerji olanakları, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No;5520, Ankara, 1973.
[21] Tuzcu G. Küçük Sincanlı Ovası hidrojeolojik etüt raporu, TC, Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara, 1974.
[22] Afşin M. Afyon Sandıklı Kuruçay ovası ve Hüdai kaplıcasının hidrojeoloji incelemesi, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1991.
[23] Aksever F. Afyon-Sandıklı havzası hidrojeoloji incelemesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2011.
[24] Ercan T. Orta Anadolu'daki Senozoyik volkanizması, MTA Dergisi, 107, 119-141, 1986.
[25] Becker-Platen JD, Benda L, Steffens F. Litho- und biostratigraphische Deutung radiometrischer Altersbestimmungen aus dem Jungtertiär der Turkei, Geologisches Jahrbuch 1977; B25, 139-167.
[26] TS EN 1097-2. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2: parçalanma direncinin tayini için metotlar. Türk Standartları Enstitüsü, 2020.
[27] TS EN 1097-6. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-bölüm 6: tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, 2013.
[28] TS EN 1367-2. Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler-bölüm 2: magnezyum sülfat deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, 2011.
[29] TS EN 1097-1. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-bölüm 1: aşınmaya karşı direncin tayini (Mikro-Deval). Türk Standartları Enstitüsü, 2011.
[30] Apaydın ÖF, Yılmaz M. Bazaltik kayaçların balast kirlenmesi yönünden karşılaştırılması, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2019; 8(1), 296-311.
[31] Teymen A. Bazı kayaçların petrografik, fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2005.
[32] Güleç K. Kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin su muhtevası ile değişimi, Bilimsel Madencilik Dergisi 1974; 13(3), 13-16, 1974.
[33] Kozak M. İscehisar (Afyonkarahisar) mermerlerinin jeolojik ve jeomekanik özelliklerinin araştırılması, Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Afyonkarahisar, 2016.
[34] Arsoy Z, Çiftçi H, Ersoy B, Uygunoğlu T, Arslan B. Afyonkarahisar bölgesi mermer parça atıklarının beton agregası olarak değerlendirilebilirliğinin araştırılması. El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2019; 6(3), 503-516.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 813-822, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1764545

Araç Takip Modellerinin Karma Otoyol Trafik Akım Başarımlarına Olan Etkisinin Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi: İstanbul E-80 Otoyolu Örneği

Mehmet Ali SİLGU[1,2*]
[1] İnşaat Mühendisliği, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bartın Üniversitesi, Bartın, Türkiye
[2] Endüstri Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Koç Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
[*1] masilgu@bartin.edu.tr; msilgu@ku.edu.tr

(Geliş/Received:13/08/2025; Kabul/Accepted: 07/09/2025)

Öz: Bu çalışma, farklı oranlarda işbirlikçi seyir uyarlamalı denetime sahip (Cooperative Adaptive Cruise Control- CACC) araçları içeren karma trafik akımlarında, otoyol trafik akımı denetim stratejilerinin performansını incelemektedir. Çalışmada, insan sürücülerin temsil edildiği araç takip modelleri değiştirilerek, CACC penetrasyon oranı ve iki temel yol tabanlı trafik yönetim yaklaşımı—katılım denetimi ve değişken hız kısıtı—benzetim tabanlı bir çerçevede değerlendirilmiştir. Çerçeve, gerçek bir otoyol ağ parçası için kalibrasyonu yapılmış model üzerinde uygulanmış ve farklı denetim algoritmalarının etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bulgular, araç takip modelinin, CACC penetrasyon oranının ve uygulanan denetim stratejisinin trafik akımı performansı üzerindeki etkileşimlerini ortaya koymakta; model seçiminin sonuçların güvenilirliğinde kritik rol oynadığını göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Trafik yönetimi, işbirlikçi seyir uyarlamalı denetim, karma trafik, simülasyon.

A Comparative Analysis of the Effects of Car-Following Models on Mixed Freeway Traffic Flow Performance: The Case of Istanbul E-80 Freeway

Abstract: This study investigates the performance of freeway traffic flow control strategies in mixed traffic streams with varying proportions of Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) vehicles. By varying the car-following models representing human drivers, the effects of CACC penetration rates and two main roadway-based traffic management approaches—ramp metering and variable speed limits—are evaluated within a simulation-based framework. The proposed framework is implemented on a calibrated model of a real freeway segment, enabling a comparative analysis of different control algorithms. The findings reveal the interactions among car-following model selection, CACC penetration rate, and applied control strategies, highlighting the critical role of model choice in ensuring the reliability of results.

Key words: Traffic management, cooperative adaptive cruise control, mixed traffic, simulation.

1. Giriş

Otoyol trafik akım dinamikleri, bağlantılı ve sürücüsüz araç (Connected and Automated Vehicles – CAV) teknolojilerinin gelişimiyle birlikte, geleneksel modellerin ötesine geçerek daha karmaşık ve çok katmanlı bir yapıya evrilmiştir. Günümüzde trafik akışı yalnızca bireysel araçların hız–yoğunluk ilişkileriyle değil; araçlar arası iletişim, uyarlanabilir denetim stratejileri, altyapı ile etkileşim ve çevresel belirsizliklere verilen tepkiler gibi unsurlarla tanımlanmaktadır. Bu dönüşüm, sistem başarımını artırmayı hedefleyen yenilikçi denetim yaklaşımlarını da beraberinde getirmiştir.

Bu bağlamda, son yıllarda işbirlikçi ve seyir uyarlamalı araç (Cooperative Adaptive Cruise Control -CACC) sistemleri ön plana çıkmaktadır. CACC, geleneksel uyarlanabilir hız sabitleyiciye (Adaptive Cruise Control-ACC) ek olarak, araçlar arası kablosuz iletişim sayesinde öndeki araç veya araç grubunun hız, ivme ve konum bilgilerini anlık olarak paylaşabilmektedir. Böylece araçlar daha kısa takip aralıklarıyla güvenli seyredebilmekte ve konvoy kararlılığı korunabilmektedir. Literatürde CACC'nin başlıca faydaları arasında kapasite artışı, araçlar arası çarpışma riskinin azalması ve yakıt tüketimi ile emisyonların düşmesi yer almaktadır. Bu özellikler, CACC'yi yalnızca trafik mühendisliği bağlamında değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da kritik bir teknoloji haline getirmektedir.

Özellikle CACC araçların, trafik akım kompozisyonuna girmesiyle birlikte, akım dinamiklerinde önemli değişimler meydana gelmektedir [1]. Bu değişimin temelinde, CACC araçlarının daha düşük takip aralıkları ile seyir edebilmesi, altyapı ile sürekli iletişim ve etkileşim halinde olması ve çevresel farkındalıkla yörünge

* Sorumlu yazar: masilgu@bartin.edu.tr. Yazarın ORCID Numarası: [1] 0000-0002-7667-8796

planlaması yapabilmesi yatmaktadır. Bu sistemlerde iletişim topolojisi, denetleyici tasarımı, ileri–geri beslemeli stratejiler ve bozucu gözlemciler; ardışık kararlılığın korunması ve dışsal bozuculara karşı dayanıklılığın artırılmasında kritik rol oynamaktadır. Dolayısıyla, insan sürücülü araçlar ile CACC araçlarının birlikte yer aldığı karma trafik akımlarının nasıl performans gösterdiğini anlamak hem akademik hem de uygulamalı açıdan büyük önem taşımaktadır. Gerçek dünya koşullarında, iletişim kesintileri, sensör arızaları veya parametre belirsizlikleri gibi durumlar karşısında geliştirilen dayanıklı denetim mimarileri, sistemin sürekliliğini güvence altına almaktadır [2] – [4]. CACC araçlarının belirli koşullarda sürücü müdahalesi olmadan kısmi sürüş gerçekleştirebilmesi ve Uluslararası Otomotiv Mühendisleri Birliği'nin sınıflandırmasına göre Seviye 3 sürücüsüz araç olarak nitelendirilmesi, bu araçların trafik akımı ve kapasite üzerindeki etkilerinin son yıllarda literatürde yoğun olarak incelenmesine yol açmıştır [5].

Karma trafik akım kompozisyonları; bağlantılı ve sürücüsüz araçlar ile insan sürücülü araçların aynı ağda birlikte çalışmasını ifade eder. Bu durumda, insan sürücülü araçların değişken sürüş davranışları ile otonom araçların tahmin ve öngörü tabanlı sürüş algoritmaları etkileşim halindedir. Bağlantılı ve sürücüsüz araç oranının artması, bu etkileşimi kısmen değiştirerek trafik akım başarımını etkilemektedir. Yol tabanlı trafik denetim uygulamaları da bu kompozisyon üzerinde farklı etkileşimler oluşturabilmektedir. Bu etkileşimlerin incelenmesi, güncel literatürde genellikle benzetim tabanlı yaklaşımlarla yapılmaktadır. Ancak bu çalışmaların çoğunda, insan sürücülerin temsil edildiği araç takip modellerinin sonuçlar üzerindeki etkisi ihmal edilmektedir. Genel yaklaşım, her araç takip modelinin her tür sürücü davranışını temsil edebildiği varsayımına dayanmaktadır. Bu varsayım, yol tabanlı trafik akım denetimlerinin sonuçlarına olan etkilerin de göz ardı edilmesine neden olmaktadır.

Yol tabanlı denetim yaklaşımları, otoyol trafik yönetimi kapsamında değişken hız sınırları, katılım denetimi, şerit yönetimi ve kavşak geçiş optimizasyonu gibi uygulamaları kapsamaktadır. Geleneksel sabit kurallara dayalı sistemler, yüksek yoğunlukta verim kaybına yol açarken; merkezi veya dağıtık işbirlikçi karar mekanizmaları, araçların geçiş sırası ile hız ve ivme profillerini eşzamanlı optimize ederek kapasite artışı ve güvenlik kazanımı sağlamaktadır. Bu yöntemler, özellikle darboğaz bölgelerinde stokastik kırılma modelleriyle desteklenerek kırılma olasılığını önemli ölçüde azaltmaktadır.

Bu bağlamda sunulan çalışmada; otoyol trafik denetiminde sık kullanılan katılım denetimi ve değişken hız kısıtı uygulamalarının, farklı oranlarda CACC aracı içeren trafik akımlarında, insan sürücülerin temsil edildiği araç takip modelleri değiştirilerek otoyol trafik akım başarımına etkileri benzetim tabanlı olarak karşılaştırmalı biçimde incelenmiştir. Çalışmanın literatüre katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- İnsan sürücülerin temsil edildiği araç takip modellerinin, otoyol trafik akımı denetim yaklaşımları ve CACC araçları ile olan etkileşimlerinin benzetim tabanlı incelenmesine yönelik bir çerçeve sunulmuştur.
- Sunulan çerçeve, gerçek bir otoyol ağ parçası için kalibrasyonu yapılmış bir model üzerinde sınanmıştır.
- Farklı denetim algoritmaları karşılaştırmalı analiz ile değerlendirilmiştir.

Çalışmanın devamında sırasıyla ilgili literatür derlemesi sunulmuş, deneysel tasarım detaylandırılmış ve vaka analizi sonuçları karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Çalışma, sonuç bölümünde elde edilen bulguların genel değerlendirmesiyle tamamlanmıştır.

2. Literatür

Araç takip davranışı, mikroskobik trafik modellemesinin en kritik unsurlarından biri olarak hem bireysel araç hem trafik akım dinamiklerini hem de sistem düzeyinde trafik akışını belirleyen temel bir faktördür [2], [6]. Bu davranış yalnızca araçların birbirleriyle olan uzunlamasına mesafe ve hız ilişkilerini değil, aynı zamanda sürücülerin algısal, bilişsel ve davranışsal özelliklerini de kapsamaktadır. Klasik araç takip modelleri, trafik akışını belirli varsayımlar altında temsil eden matematiksel yapılara dayanır. Örneğin, Gazis–Herman–Rothery (GHR) modeli [7] sürücü tepkilerini uyarı–tepki ilişkisi çerçevesinde açıklarken; Gipps modeli güvenlik mesafesi varsayımını kullanır [8]. Akıllı Sürücü Modeli (Intelligent Driver Model) [9], sürücünün hedeflediği hız ve mesafeye göre ivmelenme kararlarını tanımlarken; Wiedemann modeli [10] ise sürücünün algısal eşikleri üzerinden psikofiziksel bir yaklaşım sunar [11].

Bu modeller, sabit parametre kullanımı sayesinde benzetimlerde uygulanabilirliği kolaylaştırsa da sürücüler arası farklılıklar ve değişken trafik koşulları karşısında yetersiz kalabilmektedir [12], [13]. Özellikle agresif ve temkinli sürücüler arasındaki davranış farkları, model doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu sınırlılıklar, insan faktörlerini ve gelişen araç teknolojilerini dikkate alan yeni nesil modellerin gelişmesine zemin hazırlamıştır. Modern modeller; tepki süresi gecikmeleri, dikkat dağınıklığı, risk algısı, öngörü hataları ve ani manevralara verilen tepkiler gibi unsurları dikkate alarak daha gerçekçi sonuçlar sunmaktadır [14] – [16]. Bu bağlamda, sürücülerin farklı modlarda (dikkatli, dikkatsiz, hızlı tepki veren, gecikmeli tepki veren vb.) modellenmesi hem bireysel hem de toplu sürüş davranışlarının daha doğru temsil edilmesini sağlamaktadır. Özellikle örülme

bölgelerindeki ani şerit değiştirme durumlarında, üç aşamalı tepki süreçlerine dayalı insan benzeri karar alma mekanizmaları, otonom araç sistemlerinin karma trafik koşullarına uyumunu kolaylaştırmaktadır. Ayrıca derin öğrenme, transfer öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme tabanlı yaklaşımlar, bağlantılı ve otonom araçlar ile insan sürücülü araçlar arasındaki etkileşimleri yüksek doğrulukla tahmin edebilmektedir [17-18].

Bağlantılı ve otonom araçlar, yalnızca bireysel araç davranışlarını optimize etmekle kalmayıp, araçlar arası iletişim ve eşgüdümü de iyileştirerek sistem düzeyinde trafik akışını güçlendirmektedir. Özellikle konvoy (platoon) sistemlerinde iletişim topolojisi, zaman gecikmeleri ve denetim algoritmalarının tasarımı; dizi kararlılığı (string stability) ve güvenlik açısından belirleyici olmaktadır [19]. Sabit ve geçişli iletişim topolojilerinde performans farklılıkları gözlemlenmekte; iki-öncül–lider–takipçi (Two-Predecessor–Leader–Follower; TPLF) topolojisinin dinamik performans açısından daha üstün olduğu belirlenmektedir. TPLF topolojisi, her takipçi aracın yalnızca kendi öncüsünden değil, aynı zamanda onun öncüsünden ve lider araçtan bilgi aldığı bir iletişim yapısıdır. Bu yaklaşım, bilgi yayılım hızını artırarak konvoy kararlılığını ve akış performansını iyileştirmektedir [6], [19]. Karma trafik koşullarında ise işbirlikçi birleşme stratejileri, şerit değiştirme optimizasyonu ve kavşak eşgüdümü; kapasiteyi artırmakta ve gecikme sürelerini azaltmaktadır [20]. Sinyalsiz kavşaklarda derin pekiştirmeli öğrenme ve zaman penceresi optimizasyonu tabanlı yöntemler, çarpışma riskini önemli ölçüde azaltmakta ve trafik akışının sürekliliğini sağlamaktadır [21], [22].

Enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik, bağlantılı ve otonom araç teknolojilerinin temel hedeflerinden biridir. Eko-sürüş stratejileri; dur-kalk davranışını azaltarak, rejeneratif frenleme ile enerji geri kazanımını artırmakta, yakıt tüketimini ve emisyonları düşürmektedir [23] – [25]. Bazı denetim stratejileri ise yalnızca bağlantılı ve otonom araçların değil, onları takip eden geleneksel araçların da enerji tüketimini minimize edecek şekilde tasarlanmaktadır [26]. Bu durum, sistem çapında enerji verimliliği hedeflerinin ulaşım planlamasına entegre edilebileceğini göstermektedir.

Güvenlik açısından, iletişim kesintileri, sensör arızaları, denetim değişkenlerindeki sapmalar ve dışsal bozucular gibi gerçek dünya koşullarında dayanıklı denetim mimarileri geliştirilmiştir [27]. Bozucu gözlemciler, kayma modu tabanlı denetim sistemleri ve H∞ performans ölçütleri hem bireysel araçların hem de konvoy sistemlerinin istikrarını garanti altına almaktadır. Lineer Matris Eşitsizliği (Linear Matrix Inequality, LMI) tabanlı yaklaşımlar, bu stratejilerin teorik temellerini güçlendirmektedir [28] – [30]. LMI, bilinmeyen değişkenler içeren simetrik bir matris ifadesinin pozitif yarı tanımlı olmasını gerektiren matematiksel bir kısıttır. Kontrol teorisi ve optimizasyon problemlerinde, sistem kararlılığı ve performans kriterlerinin çözümünü doğrusal biçimde ifade etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [31].

Otoyol trafik denetimi ve CACC araçlarının trafik akım performansına etkilerine ilişkin mevcut literatür, temel olarak CACC araçlarının olumlu etkilerini ve bunları çeşitli performans göstergeleri üzerinden incelemiştir [32], [33]. Bu göstergeler; sistemden çıkan taşıt sayısı, toplam seyahat süresi, toplam gecikme, katılım kollarındaki kuyruklanma uzunluğu ve emisyon salımlarıdır. Ancak yapılan çalışmalarda, insan sürücülerin temsilinde genellikle tek bir araç takip modeli kullanılmış, farklı modellerle karşılaştırmalı analiz yapılmamıştır. Araç takip modellerinin geliştirilme süreçlerinde, belirli bir bölgedeki sürücü profili ve trafik akım özellikleri esas alındığından, aktarılabilirlik konusu göz ardı edilmiştir [34]. Ayrıca trafik akımındaki iyileşmelerin ne ölçüde CACC araçlardan ne ölçüde otoyol trafik denetim uygulamalarından kaynaklandığı net biçimde ölçülmemiştir.

Bu bağlamda, sunulan çalışma literatürden farklı olarak; insan sürücüler için farklı araç takip modellerini, çeşitli trafik denetim algoritmalarını ve farklı oranlarda CACC araç varlığını dikkate alarak karşılaştırmalı bir analiz çerçevesi sunmaktadır. Literatür, insan benzeri sürüş davranışlarının ve karma trafik uyumunun araç takip modellerinde giderek önem kazandığını ortaya koymaktadır. Gelecekte, geniş ölçekli doğal sürüş verileri ile yapay zekâ tabanlı algoritmaların entegrasyonu sayesinde, daha güvenli, enerji verimli ve sürdürülebilir bağlantılı ve otonom araç sistemlerinin geliştirilmesi beklenmektedir.

3. Metodoloji

Çalışmada trafik akımı performansı, sistemden çıkan taşıt sayısı, toplam seyahat süresi, toplam gecikme, kuyruk uzunluğu ve emisyon göstergeleri üzerinden değerlendirilmiştir. Sistemden çıkan taşıt sayısı, belirli bir süre içerisinde otoyolu terk eden toplam araç sayısını ifade etmekte ve kapasite kullanım etkinliğini göstermektedir. Toplam seyahat süresi, tüm araçların yolculukları boyunca geçirdikleri sürenin toplamını ifade ederken, düşük değerler daha verimli bir trafik akışına işaret etmektedir. Toplam gecikme, serbest akım koşullarına kıyasla yaşanan zaman kaybını yansıtmakta ve darboğaz bölgelerindeki yönetim stratejilerinin etkinliğini ölçmek açısından önem arz etmektedir. Katılım kollarında oluşan ortalama kuyruk uzunluğu ise yoğunluk yönetimi başarısının bir göstergesidir. Ayrıca, yakıt tüketimi ve CO_2 salımları gibi emisyon göstergeleri de enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından ikincil bir performans ölçütü olarak dikkate alınmıştır.

Önerilen yöntem bazı varsayımlar ve kısıtlar altında uygulanmıştır. İnsan sürücüler belirli araç takip modelleriyle temsil edilmekte olup, gerçek sürücü davranışındaki heterojenlikler tam olarak yansıtılamamaktadır. CACC araçlarının iletişim kesintisi, sensör hatası veya donanım arızası gibi durumlarla karşılaşmadığı varsayılmış, bu nedenle elde edilen sonuçlar ideal koşulları yansıtmaktadır. Kalibrasyon sürecinde kullanılan parametreler İstanbul E-80 otoyolunun belirli bir kesimine özgüdür; bu nedenle bulgular farklı yol geometrileri veya trafik kompozisyonlarına doğrudan genellenemeyebilir. Ayrıca, hava koşulları, yol çalışmaları ve beklenmedik olaylar gibi dışsal etkiler modelleme kapsamında ele alınmamıştır. Bu varsayımlar yöntemin sınırlarını belirlemekte ve bulguların hangi koşullar altında geçerli olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu kapsamlı çerçevenin ardından, metodolojinin temel unsurları ve çalışmada uygulanan modelleme yaklaşımları alt başlıklarda ayrıntılı biçimde sunulmaktadır.

3.1 Araç Takip Modelleri

Bu çalışmada, farklı sürücü tepkilerini ve hız–izleme dinamiklerini yansıtmak amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan yedi araç takip modeli değerlendirilmiştir. General Motors (GM) modeli, araç takip teorisinin en erken matematiksel temsil biçimlerinden biri olarak, takip eden aracın hız değişimini, öndeki araç ile arasındaki mesafe ve bağıl hız üzerinden tanımlar [35], [36]. Basit yapısına rağmen, temel akım–hız–mesafe ilişkilerini açıklayabilmesi sayesinde birçok daha karmaşık modelin geliştirilmesine zemin oluşturmuştur. Gazis–Herman–Rothery (GHR) modeli [7], GM modelinin bir genellemesi olarak sürücü tepkisini bağıl hız, takip mesafesi ve ayarlanabilir hassasiyet katsayılarıyla ifade eder; böylece farklı trafik yoğunlukları ve heterojen sürücü profilleri gerçekçi biçimde modellenebilir. Gipps modeli [34], sürücünün güvenli frenleme kabiliyeti ve maksimum hız tercihlerini dikkate alan deterministik bir yaklaşıma sahiptir. Takip mesafesini, öndeki aracın ani frenlemesine güvenli bir şekilde tepki verilebilecek biçimde belirler ve bu yönüyle güvenlik odaklı mikroskopik simülasyonlarda yaygın olarak tercih edilir. Krauss modeli [37] ise güvenli takip mesafesini stokastik bileşenlerle hesaplayarak sürücü davranışındaki rastlantısallığı temsil eder. Parametreleri hem agresif hem de temkinli sürüş tarzlarını yansıtacak biçimde ayarlanabilir, böylece geniş bir sürücü davranış spektrumunu kapsar. Intelligent Driver Model (IDM) [9] sürekli ve diferansiyel bir formülasyona sahip olup, hedef hız, minimum takip mesafesi, ivmelenme ve yavaşlama parametreleri aracılığıyla dengeli ve kararlı bir hız profili üretir. Parametrik esnekliği sayesinde serbest akım koşullarından yoğun sıkışıklığa kadar farklı trafik durumlarını tutarlı biçimde temsil edebilir. Wiedemann modeli [10] ise özellikle VISSIM gibi mikroskopik simülasyon yazılımlarında standart olarak kullanılan, psikofizik temelli bir yaklaşımdır. Sürücülerin algı eşikleri, reaksiyon süreleri, bağıl hız algıları ve bireysel karakteristikleri dikkate alınarak hem takip hem de sollama davranışlarını ayrıntılı biçimde modelleyebilir.

Bunlara ek olarak, ileri seviye otomasyon teknolojilerinin uzunlamasına kontrol mantığını temsil eden Milanes ve Shladover [38] tarafından geliştirilmiş ACC/CACC araç takip modeli de değerlendirmeye alınmıştır. Bu model, hem uyarlanabilir hız sabitleyici (ACC) hem de kooperatif uyarlanabilir hız sabitleyici (CACC) modlarını kapsayan hibrit bir yapıya sahiptir. ACC modunda, araç sensörleri aracılığıyla ölçülen takip mesafesi ve bağıl hız bilgileri kullanılarak sabit zaman aralıklı güvenli takip mesafesi korunur. CACC modunda ise araçlar arası kablosuz iletişim (V2V) ile öndeki araç veya araç grubundan hız, ivme ve konum bilgileri gerçek zamanlı olarak alınır. Böylece, insan sürücülü araçlara kıyasla daha kısa takip aralıklarında dahi güvenli ve kararlı konvoy hareketi sağlanabilir. Model hem insan sürücülü hem de kooperatif kontrollü araçların birlikte yer aldığı karma trafik akımlarında, farklı penetrasyon oranlarının trafik akımı ve kararlılığı üzerindeki etkilerini yüksek doğrulukla simüle edebilme kapasitesine sahiptir.

3.2 İrdeleme Çerçevesi

Bu çalışma, CACC araç teknolojisinin trafik akım dinamikleri üzerindeki etkilerini, insan sürücülerin temsilinde kullanılan araç takip modellerinin çeşitliliğini dikkate alarak incelemeyi amaçlamaktadır. Literatürde, CACC araçlarının karma trafik akımlarındaki etkisi genellikle tek bir araç takip modeli üzerinden değerlendirilmekte; böylece insan sürücü davranışı sabit bir varsayıma indirgenmektedir. Bu yaklaşım, model seçiminden kaynaklanabilecek metodolojik yanlılık riskini artırmakta ve farklı model yapılarının trafik akımı üzerindeki olası etkilerinin göz ardı edilmesine yol açmaktadır.

Bu bağlamda, çalışmamız mevcut araştırma çizgisinden ayrılarak insan sürücü davranışını temsil eden araç takip modelini senaryo değişkeni olarak ele almakta ve her bir modelin CACC penetrasyon oranı ile olan etkileşimini sistematik biçimde irdelemektedir.

İnceleme kapsamında, altısı literatürde yaygın kullanılan ve biri ileri otomasyon teknolojilerini temsil eden toplam yedi araç takip modeli değerlendirilmiştir. CACC araç penetrasyon oranı, %0'dan %100'e kadar %25'lik artışlarla tanımlanmış; böylece beş farklı penetrasyon seviyesi (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) ele alınmıştır. Her penetrasyon seviyesinde, CACC araçlar Milanes ve Shladover tarafından önerilen model ile, insan sürücülü araçlar ise seçilen senaryodaki araç takip modeli ile temsil edilmiştir.

Araştırma tasarımı, yalnızca araç takip modelini ve CACC penetrasyon seviyesini değil, aynı zamanda uygulanan trafik akım denetim yaklaşımını da bağımsız bir değişken olarak ele almaktadır. Bu kapsamda üç farklı denetim stratejisi uygulanmıştır:

(i) Denetimsiz senaryo – herhangi bir katılım denetimi veya değişken hız kısıtı uygulanmadan temel akımın gözlemlenmesi,

(ii) ALINEA katılım denetimi [38] – yalnızca lokal katılım denetimi ile akım yönetimi,

(iii) H∞ bütünleşik katılım denetimi ve değişken hız kısıtı – katılım denetimi ile değişken hız yönetiminin tek bir algoritma bünyesinde uygulanması.

Böylece, araç takip modeli – penetrasyon seviyesi – denetim stratejisi üçlüsünden oluşan deney tasarımı altında sistematik karşılaştırmalar yapılabilmektedir.

Tüm model–senaryo kombinasyonları için, insan sürücüleri temsil eden araç takip modelinin parametreleri, denetimsiz ve %0 CACC penetrasyonuna sahip temel durum kullanılarak kalibre edilmiştir. Kalibrasyon sürecinde, simülasyon çıktıları ile hedef veri seti arasındaki uyumun değerlendirilmesinde GEH istatistiği [39] ve Theil Katsayısı [40] esas alınmıştır.

Bu çerçevede elde edilen deney tasarımı, insan sürücü davranışının modelleme biçiminin, CACC penetrasyon oranının ve trafik denetim stratejisinin birbirleriyle olan etkileşimlerini ayrıntılı olarak ortaya koyma olanağı sağlamaktadır. Böylece, farklı araç takip model yapılarının yalnızca tekil temsil başarım farkları değil, aynı zamanda karma trafik koşullarındaki sistem dinamiklerine etkileri de bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilebilmektedir.

3.3 Çerçevenin Sınandığı Otoyol Trafik Ağ Parçası, Kalibrasyon Sonuçları ve Benzetim Senaryoları

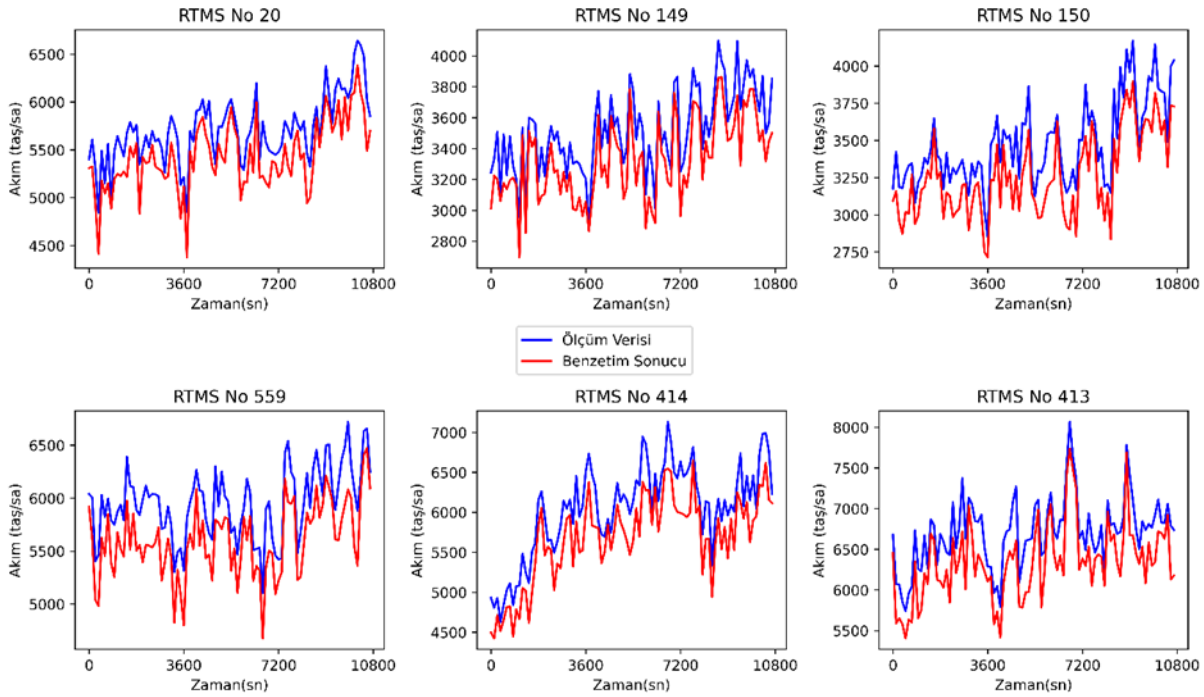
Çalışma kapsamında önerilen çerçeve, benzetim tabanlı bir vaka analizi üzerinden sınanmıştır. Vaka analizi, E80 Otoyolu'nun Edirne istikametinde, Seyrantepe ve Metris kavşakları arasında yer alan 11 km'lik kesim özelinde gerçekleştirilmiştir. Bu alan, SUMO ince boyutlu benzetim yazılımı kullanılarak gerçekçi biçimde modellenmiş ve çalışma kapsamında temin edilen trafik akım ölçümleri aracılığıyla, benzetime girdi teşkil edecek veriler oluşturulmuştur. İlgili çalışma alanına ait uydu görüntüsü Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu alanın temel özelliği, yüksek hacimli bir trafik akışına sahip olmasıdır. Geometrik açıdan ise yol boyunca değişken şerit sayısı, katılım ve ayrılmalar arasında homojen olmayan ara mesafeler öne çıkmaktadır. İncelenen ağ parçasında bir ayrılma ve dört katılım rampası bulunmaktadır. Şerit genişlikleri 3,5 metre olup, yolun en geniş kesimi sekiz şeritli, en dar kesimi ise üç şeritli ana akım platformundan oluşmaktadır.



Şekil 1. E-80 Otoyolunun, Seyrantepe-Metris Kavşakları arasındaki 11 km'lik kesime dair uydu görüntüsü.

Ağ üzerinde bulunan uzaktan mikrodalga algılayıcılar (Remote Traffic Microwave Sensors – RTMS) aracılığıyla yerel idareden temin edilen veri setleri sayesinde, trafik benzetim modeline girdi teşkil eden büyüklükler elde edilmiş ve GEH istatistiği esas alınarak kalibrasyon yapılmıştır. Kalibrasyon sonucunda, benzetimden elde edilen trafik akımları ile ölçülen trafik akımlarının karşılaştırılması Şekil 2'de sunulmaktadır. [39]'a göre, GEH istatistiği değeri toplam tüm ölçüm aralıklarında (örn. 120 saniye) hesaplanmakta ve benzetim süresince elde edilen tüm değerlerin en az %85'inde 5'in altında olması beklenmektedir. Ayrıca, kümülatif akım değerleri (her bir sensör konumu için) bazında da GEH değerlerinin 5'in altında kalması gerekmektedir.

Altı farklı araç takip modeli kullanıldığından, her model için ayrı ayrı görsel sunmak yerine kalibrasyon sürecine ait özet sonuçlar Tablo 1'de derlenmiştir.



Şekil 2. Ölçülen ile benzetilen akımların Gipps araç takip modeli özelinde karşılaştırılması.

Tablo 1. Kalibrasyon sonuçları.

Araç Takip Modeline Göre Derlenen Model İsimleri	GEH İstatistiği	Theil Katsayıları		
		U_m	U_s	U_c
GM	87.66%	0,018	0,019	0,932
GHR	87.78%	0,019	0,017	0,902
Gipps	89.68%	0,014	0,015	0,981
Krauss	93.97%	0,014	0,013	0,977
Wiedemann	87.77%	0,018	0,016	0,931
IDM	92.11%	0,016	0,015	0,968

Çalışma kapsamında geliştirilen benzetim senaryoları, farklı araç takip modelleri, CACC araç penetrasyon seviyeleri ve trafik akım denetim stratejilerinin etkileşimlerini sistematik biçimde inceleyecek şekilde tasarlanmıştır. Yedi farklı araç takip modeli, beş farklı CACC penetrasyon seviyesi (%0, %25, %50, %75, %100) ve üç farklı denetim yaklaşımı (denetimsiz, ALINEA katılım denetimi, H∞ katılım denetimi + değişken hız kısıtı)

kombinasyonları kullanılarak kapsamlı bir senaryo kümesi oluşturulmuştur. Böylece her kombinasyon, karma trafik koşullarında performans karşılaştırmasına olanak verecek biçimde simülasyon ortamında temsil edilmiştir.

Her senaryoda, insan sürücülü araçlar ilgili senaryoda tanımlanan araç takip modeli ile, CACC araçlar ise Milanes ve Shladover tarafından önerilen ACC/CACC modeli ile temsil edilmiştir. CACC araçları, penetrasyon oranına bağlı olarak toplam araç filosu içinde oransal olarak yer almakta; kalan araçlar ise senaryoda belirlenen insan sürücülü model ile çalışmaktadır. Denetim stratejileri, araç takip modeli ve penetrasyon seviyesinden bağımsız olarak uygulanmış; bu sayede değişkenler arası karşılaştırma imkânı korunmuştur.

Tüm benzetim çalışmaları 10800 saniye (3 saat) boyunca yürütülmüş ve zamansal çözünürlük 0,1 saniye olarak belirlenmiştir. Bu yüksek çözünürlük, hız, ivme ve takip mesafesi gibi ince ölçekli değişimlerin hassas biçimde yakalanmasına olanak sağlamıştır. Böylece hem kısa süreli etkileşimler hem de uzun dönemli trafik akım eğilimleri aynı senaryo içinde güvenilir biçimde analiz edilebilmiştir. Benzetimler, rastgelelik kaynaklı hataları azaltmak amacıyla üç kez tekrarlanmış ve sonuçlar bu tekrarların ortalaması üzerinden raporlanmıştır. Toplamda 315 benzetim koşturulmuş ve başarım ölçütlerine ilişkin sonuçlar derlenmiştir.

4. Bulgular ve Sonuçlar

Elde edilen analizler, CACC penetrasyon oranındaki artışın hem sistemden çıkan taşıt sayısını (Şekil 3) hem de toplam seyahat süresini (Şekil 4) belirgin ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Ancak bu etkinin deseni ve büyüklüğü, kullanılan araç takip modelinin yapısal özelliklerine ve bu modelin insan sürücü–CACC araç etkileşimini temsil etme başarısına bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak tüm modellerde, denetimsiz senaryoya kıyasla ALINEA ve özellikle RM+VSL kontrol stratejileri daha yüksek sistemden çıkan taşıt sayısı ve daha düşük toplam seyahat süresi sağlamıştır. Bununla birlikte, kontrol stratejilerinin sağladığı kazanımların büyüklüğü modelden modele anlamlı ölçüde farklılık göstermiştir.

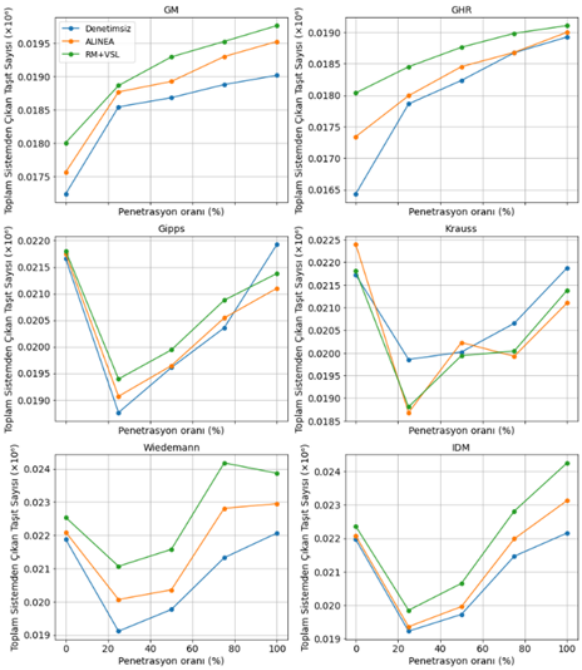
GM ve GHR modelleri, penetrasyon seviyesindeki artışa karşı hem sistemden çıkan taşıt sayısında istikrarlı bir yükseliş hem de toplam seyahat süresinde kademeli bir azalma sergilemiştir. Ancak bu modellerin eğrileri, literatürde sıklıkla raporlanan ve orta penetrasyon seviyelerinde (%40–%60 aralığı) görülebilen kapasite düşüşlerini yansıtmamıştır. Bu durum, GM ve GHR'nin insan sürücüler ile CACC araçlarının karma geçiş dinamiklerini ve özellikle adaptif hız–mesafe değişimlerini gerçekçi biçimde modelleme kapasitesinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

Buna karşılık, Gipps ve Krauss modellerinde düşük ve orta penetrasyon seviyelerinde sistemden çıkan taşıt sayısında belirgin dalgalanmalar ve toplam seyahat süresinde geçici artışlar gözlenmiştir. Bu davranış, literatürde bildirilen kapasite azalması fenomeni ile uyumludur ve bu modellerin insan sürücü–CACC etkileşimlerindeki hassas geçiş bölgelerini daha doğru yansıtabildiğini göstermektedir. Ayrıca bu iki modelin benzerliği tesadüf değildir; her ikisi de çarpışmadan kaçınma çerçevesi içerisinde geliştirilmiş olup, sürücünün güvenli takip mesafesi, maksimum hız ve frenleme kapasitesine dayalı karar mekanizmalarını içerir. Bu ortak çerçeve, belirli penetrasyon seviyelerinde görülen performans dalgalanmalarını açıklayan temel faktörlerden biridir. Bununla birlikte, Gipps modeli bazı penetrasyon seviyelerinde Krauss'a göre daha düşük sistemden çıkan taşıt sayısı üretirken, toplam seyahat süresi açısından benzer iyileşme eğilimleri sergilemiştir. Bu durum, aynı çerçevede yer alan modellerin bile parametre duyarlılığı ve stokastik bileşenler nedeniyle farklı mertebelerde sonuçlar üretebildiğini göstermektedir.

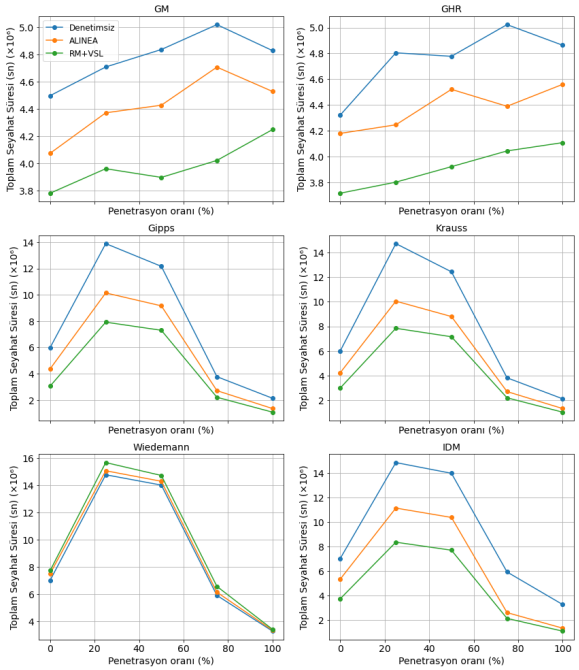
Wiedemann ve IDM modelleri ise genel olarak yüksek sistemden çıkan taşıt sayısı seviyelerini korumuş ve özellikle yüksek penetrasyon oranlarında toplam seyahat süresini keskin biçimde azaltmıştır. Ancak her iki model de düşük ve orta penetrasyon seviyelerinde kapasite düşüşlerini sınırlı ölçüde yansıtmış, dolayısıyla karma trafik koşullarındaki insan sürücü–CACC etkileşimlerini temsil etme açısından eksik kalmıştır. Yapısal olarak Wiedemann modeli, psikofizik temelli sürücü davranışını referans alırken; IDM diferansiyel denklemler ile sürekli hız–mesafe ilişkilerini modellemektedir. Bu yapısal farklılıklar, kontrol stratejilerine verilen tepkinin mertebesinde ve penetrasyon seviyeleri arasındaki geçişlerde gözlenen pürüzsüz eğrilerde kendini göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışma her araç takip modelinin insan sürücü–CACC etkileşimini modelleme başarısının farklı olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Bazı modeller (örneğin Gipps ve Krauss) geçiş bölgelerindeki kritik davranış değişimlerini dinamik desenleriyle doğru yansıtırken; bazıları (örneğin GM ve GHR) bu etkileşimleri basitleştirilmiş biçimde temsil etmekte ve literatürde raporlanan kapasite düşüşlerini yakalayamamaktadır. Ayrıca, aynı çerçeveye ait modeller bile farklı mertebelerde çıktılar üretebilmekte, bu da model seçiminde yalnızca eğilimlerin değil, çıktıların nicel değerlerinin de kritik olduğunu göstermektedir.

Bu bulgular, karma trafik koşullarında CACC etkilerinin incelenmesinde araç takip modeli seçiminin, sonuçların güvenilirliği üzerinde doğrudan belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle model çerçevesinin (örneğin çarpışmadan kaçınma, psikofizik, diferansiyel formülasyon) insan sürücü–CACC etkileşimlerini

yansıtma biçimi hem sistemden çıkan taşıt sayısı hem de toplam seyahat süresi çıktılarının desenini ve mertebesini etkilemektedir. Gelecekte yapılacak çalışmaların, bu çerçeve farklılıklarını dikkate alan model seçim stratejilerini benimsemesi ve parametre duyarlılık analizleri ile modellerin karma trafik dinamiklerini temsil etme başarısını doğrulaması hem akademik hem de uygulamalı trafik yönetimi açısından kritik önem taşımaktadır.



Şekil 3. Sistemden çıkan taşıt sayılarının her bir araç takip modeli, artan penetrasyon oranı ve denetim durumuna göre değişimi.



Şekil 4. Toplam seyahat süresinin her bir araç takip modeli, artan penetrasyon oranı ve denetim durumuna göre değişimi.

Kaynaklar

[1] Van Arem B, Van Driel CJG, Visser R. The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics. IEEE Trans Intell Transp Syst 2006; 7(4): 429-436.

[2] Yu M, Long J. An eco-driving strategy for partially connected automated vehicles at a signalized intersection. IEEE Trans Intell Transp Syst 2022; 23(9): 15780-15793.

[3] Liu H, Zhuang W, Yin G, Li Z, Cao D. Safety-critical and flexible cooperative on-ramp merging control of connected and automated vehicles in mixed traffic. IEEE Trans Intell Transp Syst 2023; 24(3): 2920-2934.

[4] Wang J, Zheng Y, Chen C, Xu Q, Li K. Leading cruise control in mixed traffic flow: System modeling, controllability, and string stability. IEEE Trans Intell Transp Syst 2022; 23(8): 12861-12876.

[5] SAE. Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems. SAE Standard J3016-202104, 2021.

[6] Massera Filho C, Terra MH, Wolf DF. Safe optimization of highway traffic with robust model predictive control-based cooperative adaptive cruise control. IEEE Trans Intell Transp Syst 2017; 18(11): 3193-3203.

[7] Chandler RE, Herman R, Montroll EW. Traffic dynamics: Studies in car following. Oper Res 1958; 6(2): 165-184.

[8] Zhang D, Chen X, Wang J, Wang Y, Sun J. A comprehensive comparison study of four classical car-following models based on the large-scale naturalistic driving experiment. Simul Model Pract Theory 2021; 113: 102383.

[9] Treiber M, Hennecke A, Helbing D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. Phys Rev E 2000; 62(2): 1805-1824.

[10] Wiedemann R, Reiter U. Microscopic traffic simulation, the simulation system—mission, background and actual state. CEC Project ICARUS, Project No V1052, Final Report, 1992.

[11] Hoogendoorn S, Hoogendoorn RG, Daamen W. Wiedemann revisited. Transp Res Rec 2011; 2260(1): 152-162.

[12] Sun Z, Yao X, Qin Z, Zhang P, Yang Z. Modeling car-following heterogeneities by considering leader–follower compositions and driving style differences. Transp Res Rec 2021; 2675(11): 851-864.

[13] Goncu S, Erdagi IG, Silgu MA, Celikoglu HB. Analysis on effects of driving behavior on freeway traffic flow: A comparative evaluation of two driver profiles using two car-following models. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV); 2022 Jun; Aachen, Germany. New York, NY, USA: IEEE. pp. 688-693.

[14] Ro JW, Roop PS, Malik A, Ranjitkar P. A formal approach for modeling and simulation of human car-following behavior. IEEE Trans Intell Transp Syst 2018; 19(2): 639-648.

[15] Zhou A, Peeta S, Wang J. Cooperative control of a platoon of connected autonomous vehicles and unconnected human-driven vehicles. Comput Civ Infrastruct Eng 2023; 38(18): 2513-2536.

[16] Fu R, Li Z, Sun Q, Wang C. Human-like car-following model for autonomous vehicles considering the cut-in behavior of other vehicles in mixed traffic. Accid Anal Prev 2019; 132: 105260.

[17] Zhou J, Wan J, Zhu F. Transfer learning based long short-term memory car-following model for adaptive cruise control. IEEE Trans Intell Transp Syst 2022; 23(11): 21345-21359.

[18] Wang Z, Huang H, Tang J, Meng X, Hu L. Velocity control in car-following behavior with autonomous vehicles using reinforcement learning. Accid Anal Prev 2022; 174: 106729.

[19] Li Y, et al. A car-following model for connected and automated vehicles with heterogeneous time delays under fixed and switching communication topologies. IEEE Trans Intell Transp Syst 2022; 23(9): 14846-14858.

[20] Shi J, Li K, Chen C, Kong W, Luo Y. Cooperative merging strategy in mixed traffic based on optimal final-state phase diagram with flexible highway merging points. IEEE Trans Intell Transp Syst 2023; 24(10): 11185-11197.

[21] Luo J, et al. Real-time cooperative vehicle coordination at unsignalized road intersections. IEEE Trans Intell Transp Syst 2023; 24(5): 5390-5405.

[22] Xu H, Cassandras CG, Li L, Zhang Y. Comparison of cooperative driving strategies for CAVs at signal-free intersections. IEEE Trans Intell Transp Syst 2022; 23(7): 7614-7627.

[23] Bai Z, Hao P, ShangGuan W, Cai B, Barth MJ. Hybrid reinforcement learning-based eco-driving strategy for connected and automated vehicles at signalized intersections. IEEE Trans Intell Transp Syst 2022; 23(9): 15850-15863.

[24] Goulet N, Ayalew B. Distributed maneuver planning with connected and automated vehicles for boosting traffic efficiency. IEEE Trans Intell Transp Syst 2022; 23(8): 10887-10901.

[25] Ma C, Yu C, Zhang C, Yang X. Signal timing at an isolated intersection under mixed traffic environment with self-organizing connected and automated vehicles. Comput Civ Infrastruct Eng 2023; 38(14): 1955-1972.

[26] Wang Q, et al. Adaptive leading cruise control in mixed traffic considering human behavioral diversity. IEEE Trans Intell Transp Syst 2024; 25(6): 5059-5070.

[27] Chong L, Abbas MM, Medina A. Simulation of driver behavior with agent-based back-propagation neural network. Transp Res Rec 2011; 2249(1): 44-51.

[28] Silgu MA, Erdagi IG, Goksu G, Celikoglu HB. H∞ state feedback controller for ODE model of traffic flow. IFAC-PapersOnLine 2021; 54(2): 19-24.

[29] Goksu G, Silgu MA, Erdagi IG, Celikoglu HB. Integral input-to-state stability of traffic flow with variable speed limit. IFAC-PapersOnLine 2021; 54(2): 31-36.

[30] Silgu MA, Erdagi IG, Goksu G, Celikoglu HB. Combined control of freeway traffic involving cooperative adaptive cruise controlled and human driven vehicles using feedback control through SUMO. IEEE Trans Intell Transp Syst 2022; 23(8): 11011-11025.

[31] Dutta RG, Hu Y, Yu F, Zhang T, Jin Y. Design and analysis of secure distributed estimator for vehicular platooning in adversarial environment. IEEE Trans Intell Transp Syst 2022; 23(4): 3418-3429.
[32] Siri S, Pasquale C, Sacone S, Ferrara A. Freeway traffic control: A survey. Automatica 2021; 130: 109655.
[33] Ferrara A, Sacone S, Siri S. Freeway traffic modelling and control. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018.
[34] Gipps PG. A behavioural car-following model for computer simulation. Transp Res Part B Methodol 1981; 15(2): 105-111.
[35] Reuschel A. Fahrzeugbewegungen in der Kolonne. Osterr Ing Arch 1950; 4: 193-215.
[36] Pipes LA. An operational analysis of traffic dynamics. J Appl Phys 1953; 24(3): 274-281.
[37] Krauss S, Wagner P, Gawron C. Metastable states in a microscopic model of traffic flow. Phys Rev E 1997; 55(5): 5597-5602.
[38] Milanés V, Shladover SE. Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data. Transp Res Part C Emerg Technol 2014; 48: 285-300.
[39] Barceló J, editor. Fundamentals of traffic simulation. New York, NY, USA: Springer, 2010.
[40] Van Woensel T, Vandaele N. Empirical validation of a queueing approach to uninterrupted traffic flows. 4OR 2006; 4(1): 59-72.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 823-838, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1660311

Sıcak Dövme Sektöründe Üretim Planlama için Yönetim Bilişim Sistemi Geliştirilmesi

Maide Sina Nur DEMİR[1], Nadide Gizem GÜRSON DOLAR[2*], Hadi GÖKÇEN[3]
[1] Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Bilişim Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye
[2] Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Ankara, Türkiye
[2] Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye
[*1] maidesina@gmail.com, [2] gursongizem@gmail.com, [3] hgokcen@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 18/03/2025; Kabul/Accepted: 02/09/2025)

Öz: Bu çalışmada, üretim planlama süreçlerinin etkinliğini artırmak amacıyla yönetim bilişim sistemleri (YBS) bakış açısıyla bir bilgi sistemi tasarlanmış ve sistemin bir işletmede uygulaması gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen YBS tasarımı kapsamında; işletmenin sipariş takibi, stok yönetimi, tedarikçi entegrasyonu ve makine kapasite planlaması gibi işlevleri, VBA tabanlı Excel araçlarıyla entegre edilmiştir. Veri akış diyagramları ve ilişkisel veri tabanı yapıları kullanılarak sistematik bir çözüm oluşturulmuş ve işletmede uygulanmıştır. Oluşturulan yeni üretim programına ilişkin verilerin sonuçları, işletmenin kullanmakta olduğu Kurumsal Kaynak Planlaması (ERP) üzerindeki veriler aracılığıyla kıyaslanmış ve işletmenin üç ayrı Temel Performans Göstergesi (KPI) kullanılarak karşılaştırılmıştır. Uygulama sonucunda işletmenin üretim planlama süreçlerinde önemli iyileştirmeler sağlanmış ve operasyonel verimlilik artırılmıştır. YBS'nin etkin kullanımı sayesinde süreçler daha sistematik ve kontrollü hale gelmiş, planlama kaynaklı aksaklıklar büyük ölçüde azaltılmıştır. Ayrıca, geliştirilen sistem, değişen üretim koşullarına hızlı uyum sağlayarak süreç yönetimini daha esnek ve etkili bir şekilde desteklemiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, YBS'nin üretim planlamada nasıl bir destek mekanizması olarak kullanılabileceğini göstermiş ve süreçlerin iyileştirilmesine önemli katkılar sunmuştur.

Anahtar kelimeler: Üretim planlama, yönetim bilişim sistemleri (YBS), sıcak dövme, veri akış diyagramları, süreç optimizasyonu.

Development of Management Information System for Production Planning in Hot Forging Industry

Abstract: This study presents the design and implementation of a Management Information System (MIS) tailored to improve production planning efficiency in the hot forging industry. The developed system integrates core operational functions—including order tracking, inventory management, supplier coordination, and machine capacity planning—through a VBA-based Excel interface, supported by relational database structures and data flow diagrams. The system was implemented in a manufacturing company operating in the hot forging and machining sectors. Its performance was evaluated using three key performance indicators (KPIs) and benchmarked against the company's existing Enterprise Resource Planning (ERP) system. The results demonstrate significant improvements, including a reduction in planning time by 60%, a 30% decrease in planning-related production delays, and an increase in scheduling accuracy to 94%. In addition to operational gains, the system provided enhanced flexibility and responsiveness to dynamic production conditions, contributing to process reliability and organizational agility. These findings align with recent literature emphasizing the role of MIS in driving digital transformation and decision support in industrial environments. Overall, the study offers a practical example of how MIS can serve not only as a planning tool but also as a strategic enabler in manufacturing, particularly in sectors with complex and variable production requirements like hot forging.

Key words: Planning, management information systems (MIS), hot forging, data flow diagrams, process optimization.

1. Giriş

Sanayi üretiminde, süreçlerin verimli bir şekilde yönetilmesi ve optimize edilmesi, rekabet avantajını koruyabilmek için kritik bir öneme sahiptir. Özellikle sıcak dövme sektörü gibi yüksek enerji tüketimi ve zaman kısıtlamalarıyla karşı karşıya kalan sektörlerde, etkin üretim planlama süreçleri, operasyonel başarı ve sürdürülebilirlik açısından temel bir rol oynamaktadır. Geleneksel yöntemlerin sınırlamaları, bu alandaki süreçlerin daha esnek, hızlı ve veriye dayalı yönetilmesine olan ihtiyacı artırmaktadır.

[*] Sorumlu yazar: gursongizem@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0009-0008-1399-352X, [2] 0000-0002-2710-4163, [3] 0000-0002-5163-0008

Bu bağlamda, Yönetim Bilişim Sistemleri (YBS), üretim planlama süreçlerini modernize etmek, operasyonel performansı artırmak ve kaynak kullanımını optimize etmek için güçlü bir araç sunmaktadır. YBS'nin sağladığı dijital çözümler, karar alma süreçlerini desteklerken aynı zamanda süreçleri daha kontrollü ve izlenebilir hale getirmektedir.

Bu çalışmada, sıcak dövme sektöründe üretim planlama süreçlerinin YBS perspektifiyle ele alınarak geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu projede öncelikle literatür taraması yoluyla üretim planlama süreçleri ve sıcak dövme sektörü detaylı bir şekilde incelenmiş, ardından faaliyetini 1966 yılından beri sürdürmekte olan, sıcak çelik dövme ve talaşlı imalat alanlarında uzmanlaşmış bir işletmenin üretim planlama sürecinin analiz edilmesiyle darboğazlar tespit edilmiştir.

Bu analizlere dayanarak geliştirilen YBS tabanlı çözüm, sipariş takibi, stok yönetimi, tedarikçi entegrasyonu ve makine kapasite planlaması gibi işletmenin birbirinden ayrı sürdürdüğü kritik işlevleri entegre edecek şekilde tasarlanmıştır. Geliştirilen bilgi sistemi, Sistem Geliştirme Yaşam Döngüsü çerçevesinde (Planlama, analiz, tasarım, yürütme ve kullanım) geliştirilmiş ve canlıya alınmıştır.

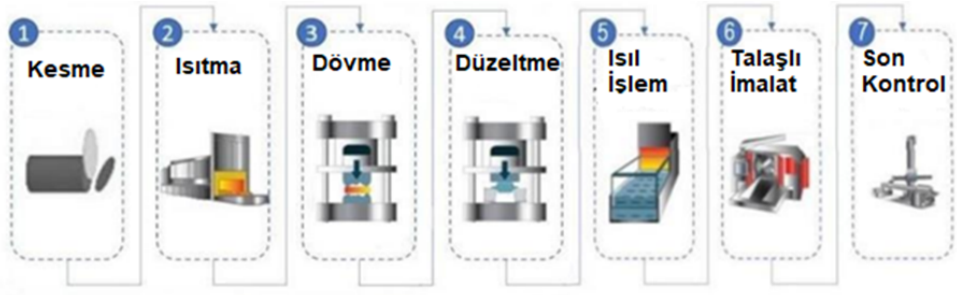
Çalışmanın sonunda, tasarlanan YBS'nin işletmenin üretim planlama süreçlerine etkileri üç ayrı temel performans göstergesine göre değerlendirilmiştir ve bulgular işletmedeki süreçlerin optimize edilmesi ve işletme performansının artırılması konusunda olumlu etkilerinin olduğunu göstermiştir. Çalışma bu yönüyle, Yönetim Bilişim Sistemleri'nin (YBS) işletmelere üretim süreçlerinde sağlayabileceği potansiyel katkıları ortaya koymaktadır. Çalışmanın ilk bölümünde, üretim planlama süreçleri ve sıcak dövme sektörü detaylı olarak incelenmiş, mevcut literatür taranarak bilgi altyapısı oluşturulmuştur. Sıcak dövme işlemlerinin özellikleri, üretim planlamanın gerekliliği ve dijitalleşmenin sektöre katkıları vurgulanmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde öncelikle, sıcak çelik dövme sektöründe 1966 yılından beri faaliyet gösteren bir işletmenin mevcut durum analizi yapılmış, üretim planlama süreçleri ele alınmış ve manuel sistemdeki darboğazlar tespit edilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde ise tespit edilen sorunların çözümü için üretim planlama sürecine yönelik YBS geliştirilmiş ve işletmede uygulanmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise yeni üretim programına ilişkin verilerin sonuçları, işletmenin kullanmakta olduğu Kurumsal Kaynak Planlaması (ERP) üzerindeki veriler aracılığıyla kıyaslanmış ve işletmenin halihazırda kullanmakta olduğu üç ayrı Temel Performans Göstergesi (KPI) kullanılarak karşılaştırılmıştır.

2. İlgili Literatür

Çalışmanın literatür kısmı dört ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, en eski üretim tekniklerinden biri olan sıcak dövme ve bu tekniğin endüstriyel uygulamaları incelenmiştir. İkinci bölümde, sıcak dövme sektöründeki üretim planlama süreçlerine odaklanılmıştır. Üçüncü bölümde, YBS tasarımına ilişkin bilgiler sunulmuş, son bölümde ise YBS perspektifinden üretim planlama süreci ele alınmıştır.

2.1. Sıcak Dövme

Metal üretim ve şekillendirme endüstrisinde en eski üretim tekniklerinden biri olan dövme işlemi günümüzde dünyada ve ülkemizde endüstriyel uygulamalarda çok önemli bir yer tutmaktadır [1]. Dövme işlemi temel olarak, basma kuvvetlerinin etkisi ile malzemenin kalıcı olarak şekil değiştirmesi işlemidir. Dövme işleminde şekillendirilecek parçaya uygulanan baskı kuvveti pres veya şahmerdan çekiç vasıtasıyla elde edilmektedir. Dövme işlemi uygulanan iş parçasının sıcaklık mertebesine göre sıcak, ılık ve soğuk olarak gerçekleştirilmektedir [2].



Şekil 1. Kapalı kalıpta sıcak dövme işlemi [4].

Sıcak dövme yöntemleri arasında serbest dövme, kapalı kalıp dövme (Şekil 1) ve haddeleme gibi teknikler yer almaktadır. Bu yöntemler arasındaki tercih, üretilecek parçanın boyutuna, geometrik karmaşıklığına ve hedeflenen üretim hacmine göre değişmektedir. Özellikle kapalı kalıpta dövme, yüksek hassasiyet gerektiren seri üretimlerde tercih edilmekte ve süreç otomasyonu ile daha izlenebilir bir yapı kazanmaktadır [3].

Dövme işlemi, yüksek mukavemetli ve güvenilir parça üretimini mümkün kıldığı için, üretim planlaması açısından kaynak yönetimi, kalıp hazırlığı ve makine kapasitesinin optimize edilmesini gerektiren bir süreçtir. Bu nedenle, bu çalışmada geliştirilen Yönetim Bilişim Sistemi'nin sıcak dövme sürecine entegrasyonu, yalnızca operasyonel verimliliği değil, aynı zamanda dövme prosesine özgü karmaşıklıkların yönetimini de kolaylaştırmayı amaçlamaktadır.

2.2. Üretim Planlama Süreci

İşletme fonksiyonlarındaki tüm faaliyetler, amaçlarının neler olduğunun ve bunlara nasıl ulaşacağının belirlenmesi ile başlar. Bu ise, planlama sürecinin başlangıcıdır, dolayısıyla üretim bir işletme fonksiyonu olduğu için, üretim faaliyetlerinin ilk adımını üretim planlaması oluşturur. Üretim planlaması, önceden belirlenen üretim gereklerini karşılamak için, kaynakların optimal kullanımını planlama faaliyeti olarak tanımlanabilir. Üretim planları, işletmenin amaçlarına ulaşabilmek için gerek duyulan üretim ihtiyaçlarının belirlenmesini sağlayan planlardır. İşletmede yapılacak olan tüm üretim faaliyetleri üretim planlarına göre gerçekleşmektedir. Üretim planları üretim faaliyetleri ile ilgilenen yöneticilere ve çalışanlara yol gösterirler [5].

Üretim planlama, bir işletmenin mevcut kaynaklarını en verimli şekilde kullanarak üretim süreçlerini düzenleme ve optimize etme sürecidir. Bu süreç, üretim hedeflerine ulaşmak için iş gücü, malzeme ve ekipman kullanımını koordine etmeyi içerir. Aynı zamanda üretim planlama, müşteri taleplerini karşılamak amacıyla zamanında ve kaliteli ürün teslimatını sağlamak için stratejik bir yol haritası oluşturur [6].

Üretim planlamasının temel amacı; kaynakların optimum kullanımı, maliyetlerin minimize edilmesi, stok yönetiminin iyileştirilmesi ve üretim sürelerinin kısaltılmasıdır. Aynı zamanda, üretim sürecinde verimlilik artışı sağlanarak rekabet avantajı elde edilir.

Bir üretim planı; talep tahminleri, üretim kapasitesi, hammadde temini, iş gücü planlaması, üretim zamanlaması gibi unsurları bir araya getirir. Planlama sürecinde karşılaşılan kaynak kısıtları ve kapasite sınırları, üretim hedeflerinin gerçekleştirilmesinde kritik rol oynar. Bu nedenle, işletmelerin üretim planlamasında etkin kararlar alabilmesi, günümüzde rekabet avantajını sürdürebilmeleri için hayati önem taşımaktadır [7].

Sistemin asıl değeri, yöneticilere ihtiyaç duydukları bilgiyi sunabilmesidir. Üretim planlama sistemi, üretimle ilgili kararları doğrudan vermez veya operasyonları uygulamaz; bu sorumluluk yöneticilere aittir. Sistem, karar verme süreçlerinde yöneticilere doğru ve zamanında rehberlik sağlayan bir araç olarak görev yapar [8].

Sıcak dövme sektöründe üretim planlama süreci, hammadde tedariki, kalıp hazırlığı, makine ve ekipman kapasitesinin optimizasyonu gibi kritik adımları kapsar. Sıcak dövme işlemleri, yüksek enerji tüketimi ve zaman kısıtları nedeniyle doğru zamanlama ve kaynak yönetimini zorunlu kılar. Üretim planlama sürecinde, müşteri siparişlerinin teslim tarihlerine uyum sağlamak için üretim döngüsü süreleri ve kalıp değiştirme işlemleri detaylı olarak hesaplanmalıdır. Ayrıca, sektörde sık karşılaşılan makine arızaları ve kalıp yıpranmaları gibi unsurlar, planlamayı dinamik hale getirir ve esnek üretim stratejilerinin uygulanmasını gerektirir. Sonuç olarak, sıcak dövme sektöründe etkili bir üretim planlaması, iş akışının verimli yönetilmesini sağlayarak maliyetleri düşürür, enerji kullanımını optimize eder ve teslimat sürelerini kısaltarak operasyonel performansı artırır [9].

2.3. Yönetim Bilişim Sistemleri Tasarımı

YBS, bir örgütün yönetiminde kullanılan bilgilerin işlenmesini ve iletilmesini sağlayan bir sistemdir [10]. YBS, birçok bilgi teknolojisi formunun toplumsal, kurumsal, grup ve bireysel düzeylerde stratejik, yönetsel ve operasyonel uygulamalarına odaklanan profesyonel ve uygulamalı bir disiplindir. Bilişsel psikoloji, bilgisayar bilimi, ekonomi, operasyon yönetimi, organizasyon felsefesi ve mühendislik kavramlarını içerir ve ilgili disiplinlerle etkileşim halindedir [11].

YBS, insan, teknoloji ve organizasyon arasındaki etkileşimi bütüncül bir perspektifle ele alan, disiplinler arası bir bilim dalıdır. Yönetim Bilişim Sistemleri, bilgi teknolojileri altyapısı ile organizasyonel yapı arasında bir köprü görevi görür. Bu sistemler sayesinde, kurum içi iletişim daha hızlı ve etkili hale gelirken, veri analizleri ve raporlama süreçleri de otomatize edilerek zaman ve maliyet tasarrufu sağlanır [11].

YBS'nin temel amacı, organizasyonların bilgiye dayalı karar alma süreçlerini iyileştirmektir [12]. Bu amaç doğrultusunda YBS;

- Bilgi Akışını Sağlar: Kurum içinde doğru ve güncel bilginin hızlı bir şekilde iletilmesini sağlar.

- Verimlilik Artışı: İş süreçlerinin otomasyonu ve dijitalleştirilmesi sayesinde zaman ve maliyet tasarrufu sağlar.
- Stratejik Karar Destek: Üst düzey yöneticilerin uzun vadeli stratejik planlama yapmalarına yardımcı olur.
- Operasyonel Etkinlik: Günlük operasyonların daha hızlı ve hatasız yürütülmesine olanak tanır.
- Rekabet Avantajı: Rakiplerden farklılaşmak için bilgi teknolojilerinden faydalanmayı sağlar [13].

Bu amaçlar doğrultusunda YBS, organizasyonların mevcut kaynaklarını en iyi şekilde kullanmalarına yardımcı olurken, sürdürülebilir büyüme ve gelişim için kritik bir araçtır.

Günümüzde hızla dijitalleşen sanayi yapısında, YBS, üretim planlama süreçlerini daha etkin, esnek ve veri odaklı hale getiren önemli bir destek mekanizması olarak öne çıkmaktadır. Bu süreçte YBS'nin, veriye dayalı karar alma mekanizmalarının güçlendirilmesi ve süreçlerin daha hızlı ve doğru bir şekilde yönetilmesi açısından önemli bir araç olduğunu ifade etmek mümkünüdür. Ayrıca YBS; bilgi teknolojilerini, süreçleri ve insan faktörünü entegre ederek, üretim planlama süreçlerinin daha etkin, esnek ve dinamik hale gelmesine katkıda bulunur [14].

YBS'nin sunduğu bütünsel bakış açısı, insan, teknoloji ve organizasyon faktörlerini bir araya getirerek üretim süreçlerinin optimize edilmesini sağlar. Bu sistemler sayesinde, talep tahminleri, kapasite planlaması, kaynak yönetimi ve zamanlama gibi üretim planlamanın temel bileşenleri, gerçek zamanlı veri akışı ile daha doğru planlanabilir. Özellikle büyük veri ve yapay zekâ destekli YBS uygulamaları, karmaşık üretim süreçlerini modelleyerek olası darboğazları önceden tespit eder ve operasyonel verimliliği artırır [15].

3. Üretim Planlama Süreci İçin YBS Geliştirilmesi

Çalışmanın mevcut durum ve uygulama kısmı dört ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, uygulamanın yapıldığı işletme ve bu işletmenin sektördeki yeri incelenmiştir. İkinci bölümde, geliştirilen sistem ve veri akış diyagramı sunulmuştur. Üçüncü bölümde, veri tabanı tasarımı ve birim ilişki diyagramları ele alınmış, son bölümde ise mevcut durum analizi ve tasarlanan sistemin işletmeye uyarlanması detaylandırılmıştır.

3.1. Uygulamanın Yapıldığı İşletme ve İşletmenin Sektördeki Yeri

Çalışma kapsamında uygulamanın gerçekleştirildiği işletme, 59 yıldır sıcak çelik dövme ve talaşlı imalat sektörlerinde faaliyet göstermektedir. Üretiminin %80'ini Avrupa ülkelerine ihraç etmekte olup, kalite yönetim sistemini ISO 9001:2015 ve IATF 16949:2016 standartlarına göre şekillendirmiştir. Ayrıca, tarım, makine, otomotiv ve savunma sanayilerine yönelik dövme parçalar üretmektedir. Bu kapsamda öncelikle işletmenin mevcut durumu analiz edilmiş, ardından geliştirilen sistem işletmede uygulanmıştır. Önerilen sistemin sonuçları ve mevcut duruma ilişkin sonuçlar işletmenin üretim planlama sürecinde kullanmakta olduğu üç ayrı KPI değerine göre kıyaslanmış ve çalışmanın sonuç kısmında yer verilmiştir. Uygulama sonunda YBS'nin potansiyel katkıları değerlendirilmiş ve işletmenin üretim planlama sürecine dair önerilerde bulunulmuştur.

3.2. Geliştirilen Sistem ve Veri Akış Diyagramı

Çalışma kapsamında, işletmedeki mevcut üretim planlama süreci bilgi sistemi üzerindeki eksiklikler göz önünde bulundurularak YBS tasarımı oluşturulmuş ve yeni bir veri tabanı tasarımı uygulanmıştır. Bu sistem, üretim süreçlerinin planlanması, takibi ve raporlanması için geliştirilmiştir. Sistemde, farklı departmanlar arasındaki veri akışı düzenlenmekte ve süreç yönetimi optimize edilmektedir. Sistemin, yöneticiler, planlama uzmanları, üretim çalışanları ve depo sorumluları tarafından kullanılması mümkündür.

İletmenin mevcut durumda birbirinden ayrı şekilde sürdürdüğü işlevleri geliştirilen sistemde entegre edilmiştir. Bu bağlamda geliştirilen sistemde bulunan başlıca özellikler aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

- Müşteri Sipariş Takibi: Sisteme yeni siparişlerin girişi yapılır. Siparişe ait müşteri adı, ürün kodu, sipariş adedi ve temin süre bilgisi takip edilmektedir.
- Üretim Planlama: Üretim süreçleri; ürün kodu, malzeme kalitesi, ürün ağırlığı, parti miktarı, alternatif malzeme sırası, saatlik hedef üretim adedi gibi veriler baz alınarak planlanır. Planlama sonucunda üretim plan raporları yönetimle paylaşılır.
- Tedarikçi Yönetimi: Ham malzeme sipariş bilgileri, sipariş miktarları, tedarikçi adı ve sektörü gibi veriler sistem üzerinde takip edilir. Ayrıca ham malzeme termin tarihleri yönetilmektedir.

- Stok Takibi: Ham madde, yarı mamul ve mamul stok bilgileri, depo departmanıyla entegre bir şekilde sistemde izlenir. Stok durumuna göre üretim süreçleri planlanır.
- Makine ve Tezgâh Bilgileri: Üretim için gerekli makinelerin tezgah adı ve üretkenlik bilgileri sisteme kaydedilir. Tezgâh uygunluğu ve iş yükü dikkate alınarak iş emirleri oluşturulur.
- Kalıphane Yönetimi: Üretimde kullanılacak kalıpların hazır olup olmadığı bilgisinin takibi sağlanır ve gerekli durumlarda bilgilendirme yapılır.
- Üretim Gerçekleştirme: İmalat birimi üzerinden ekip sayısı ve planlanan iş emirleri doğrultusunda üretim süreçleri başlatılır. Üretim süreçleri tamamlandıkça raporlama yapılır.
- Yönetim Raporlama: Yönetim departmanı, sistemden üretim planı raporlarını ve performans analizlerini alarak süreçlerin kontrolünü sağlar.
- Veri Entegrasyonu: Departmanlar arasında sürekli ve doğru veri akışı sağlanır. Böylece siparişten üretime, stoktan sevkiyata kadar tüm süreçler sistematik olarak yönetilir.

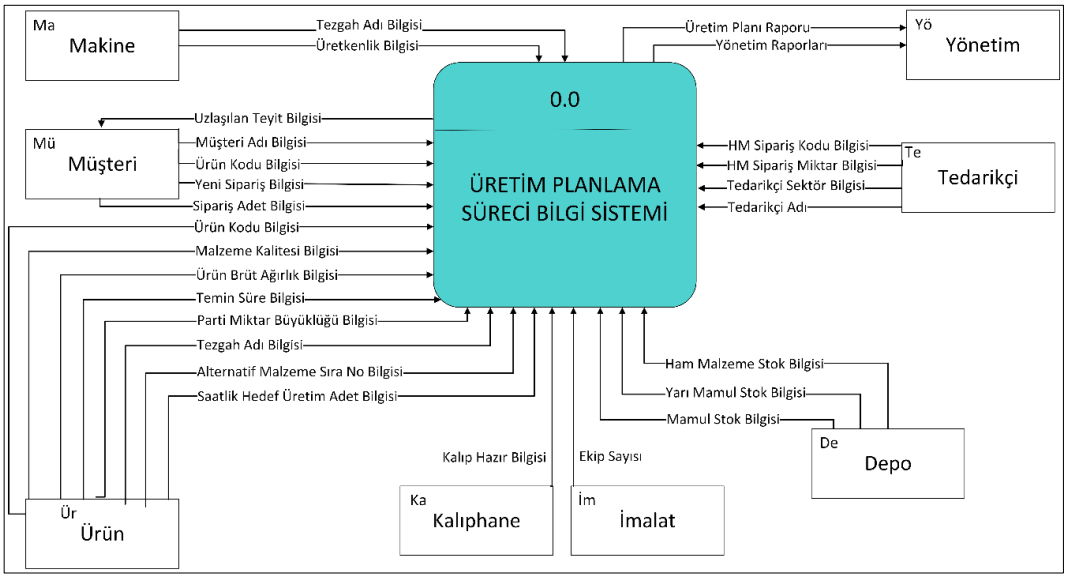
Sistemde her müşteri siparişine bir sipariş numarası atanır. Her sipariş bir ürüne bağlıdır ve her ürünün kendine ait bir kodu, kalite bilgisi ve üretim detayları vardır. Tedarikçilerden ham malzeme siparişleri sistemde takip edilir ve termin tarihlerine göre üretim planlanır. Depo stok seviyeleri sistem tarafından sürekli güncellenir. Yönetim departmanı, üretim süreçlerini kontrol ederek performans verilerini analiz edebilir. Bu yapı, üretim süreçlerinin verimliliğini artırarak zaman ve maliyet tasarrufu sağlar.

Üretim planlama ve yönetim süreçlerini etkileyen sistemin dış varlıkları Makine, Müşteri, Ürün, Kalıphane, İmalat, Depo, Tedarikçi, Yönetim olarak sıralanabilir. Söz konusu varlıklar birbirleri ile ilişki halinde olup işletme içindeki işleyişe katkı sağlamaktadırlar.

Sistem analizi ve tasarımında akış şemaları, veri akış diyagramları, veri sözlüğü, yapısal şemalar, karar ağaçları, HIPO Tekniği, Warnier-Orr diyagramları vb. gibi birçok araç bulunmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanlardan biri Veri Akış Diyagramıdır (VAD). VAD, bir sistemin veri akışını, veri girişlerini, çıkışlarını ve veri işlemlerini görsel olarak gösteren diyagram türüdür. VAD, karmaşık sistemleri anlamak, analiz etmek ve tasarlamak için kullanılan bir araçtır. Sistem içindeki veri hareketlerini ve bileşenler arasındaki ilişkileri sade ve anlaşılır bir şekilde ifade eder. Kaba ilişki diyagramı, sıfır seviye veri akış diyagramı ve alt seviye veri akış diyagramı olmak üzere üç tür veri akış diyagramının varlığından bahsetmek mümkündür [10].

3.2.1. Kaba İlişki Diyagramı

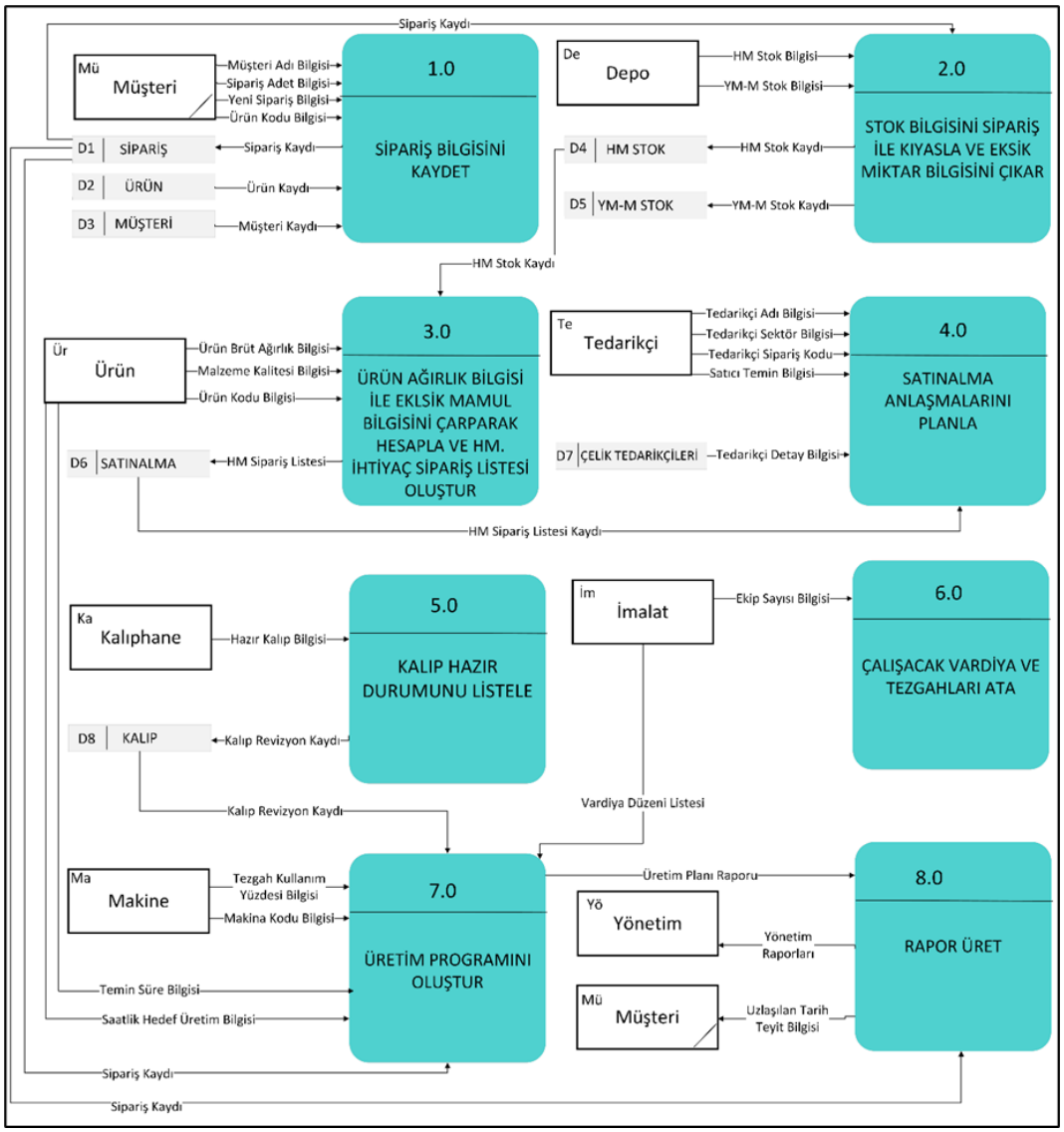
Çalışma kapsamında veri akış diyagramlarından öncelikle kaba ilişki diyagramı oluşturulmuştur. İşletmenin üretim planlama sürecine yönelik önerilen bilgi sisteminin kaba ilişki diyagramı Şekil 2'de gösterilmektedir. Diyagramın dışsal birimlerini; makine, müşteri, ürün, kalıphane, yönetim, tedarikçi, depo, imalat oluşturmaktadır. Sistem ve dışsal birimler arasındaki bilgi akışı görselde yer aldığı şekilde gerçekleşmektedir.



Şekil 2. ÜP süreci bilgi sistemi kaba ilişki diyagramı.

3.2.2. Sıfır Seviye Akış Diyagramı

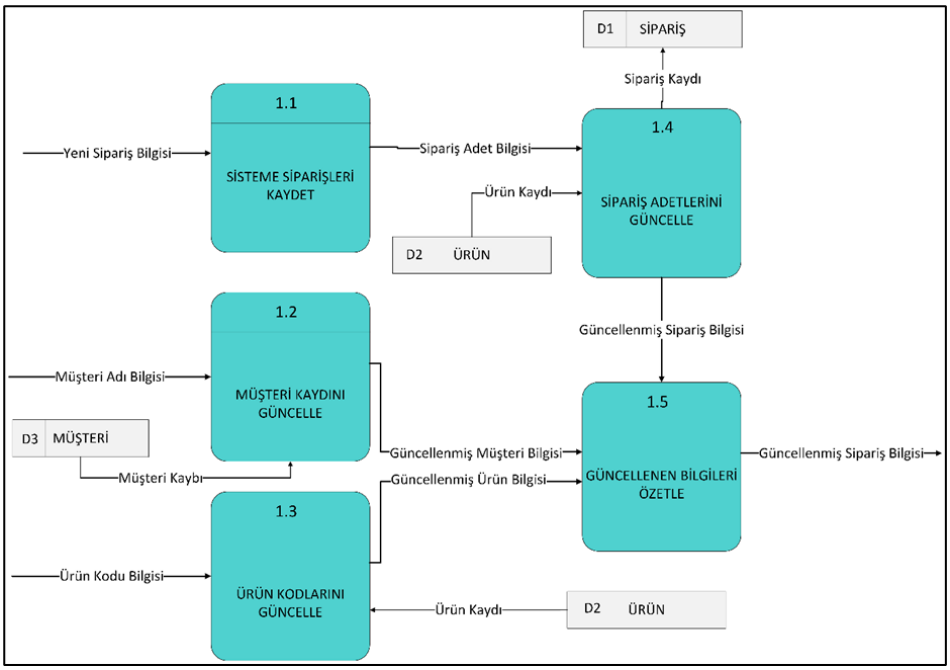
Kaba ilişki diyagramının oluşturulması ardından bilgi sisteminin sıfır seviye veri akış diyagramı oluşturulmuştur. Şekil 3'te ifade edildiği üzere makine, müşteri, ürün, kalıphane, yönetim, tedarikçi, depo, imalat sistemin dışsal birimlerini, sipariş, ürün, müşteri, hammadde stok, yarı mamul stok, satın alma, çelik tedarikçileri ve kalıp ise sistemin veri depolarını oluşturmaktadır. Bilgi sistemine yönelik prosesler ve veri akışları Şekil 3'te sıfır seviye akış diyagramında görüldüğü gibidir.



Şekil 3. Sıfır seviye akış diyagramı.

3.2.3. Proses 1.0 Alt Seviye Veri Akış Diyagramı

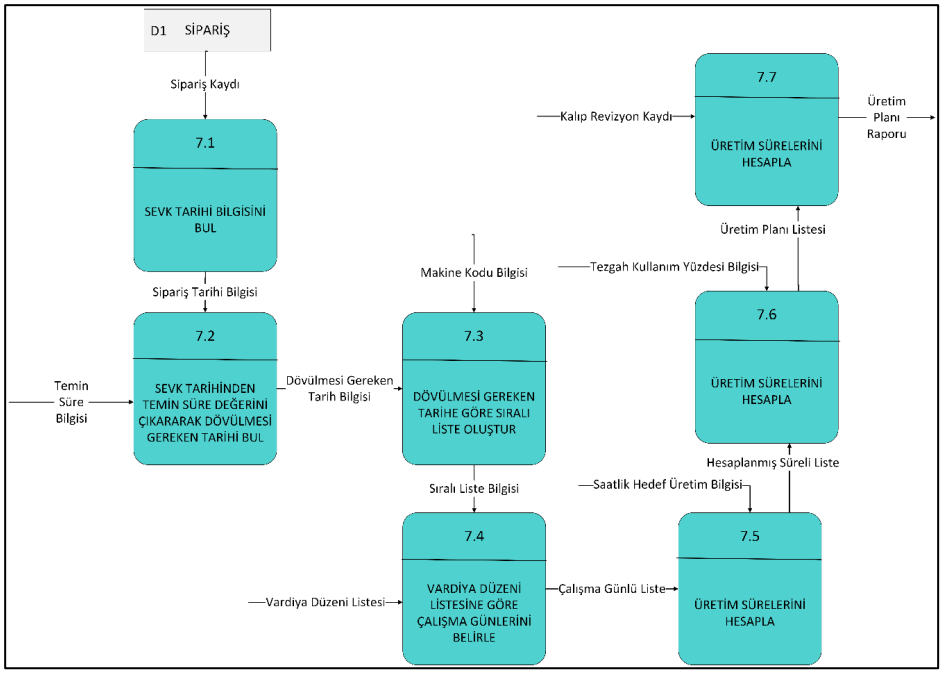
Üretim planlama süreci bilgi sisteminin ilk adımını oluşturan Proses 1.0, sipariş bilgisini kaydetme prosesidir. Sisteme siparişleri kaydetme, müşteri kaydını güncelleme, ürün kodlarını güncelleme, sipariş adetlerini güncelleme, güncellenen bilgileri özetleme alt proseslerinden oluşmaktadır. Proses 1.0'a ilişkin süreç Şekil 4'te görüldüğü gibidir.



Şekil 4. Proses 1.0 alt seviye VAD.

3.2.4 Proses 7.0 Alt Seviye Veri Akış Diyagramı

Üretim planlama sürecine ilişkin oluşturulan bilgi sisteminde Proses 7.0, üretim prosesini oluşturma prosesidir. Sevk tarihi bilgisini bulma, sevk tarihinden temin süre değerini çıkararak dövülmesi gereken tarihi bul, dövülmesi gereken tarihe göre sıralı liste oluştur, vardiya düzeni listesine göre çalışma günlerini belirle, üretim sürelerini hesapla, üretim planının üretkenlik değerleri ile oluştur, kalıp revizyonunu programa ekle alt proseslerinden oluşmaktadır. Proses 7.0'a ilişkin süreç ve bilgi akışı Şekil 5'te görüldüğü gibidir.



Şekil 5. Proses 7.0 alt seviye VAD.

3.3. Veri Tabanı Tasarımı ve Birim İlişki Diyagramları

Birim-İlişki Diyagramı (BİD), sistemdeki varlıkların ne olduğunu, bu varlıkların hangi ilişkilerle birbirine bağlandığını ve hangi niteliklere sahip olduklarını gösteren bir veri tabanı tasarım aracıdır, veri tabanı tasarımında kullanılır ve birimler (entity) arası ilişkileri gösterir. VAD, sistem fonksiyonlarının yerine getirilebilmesi için veri hareketlerini gösterirken, BİD'de VAD'da yer alan veri deposunun içinde bulunan verileri göstermektedir [13].

Çalışma kapsamında birim ilişki diyagramlarının oluşturulması üretim planlama süreci bilgi sistemi geliştirilmesinin üçüncü adımını oluşturmaktadır.

3.3.1. Normalize Edilmemiş Kayıt Tipleri

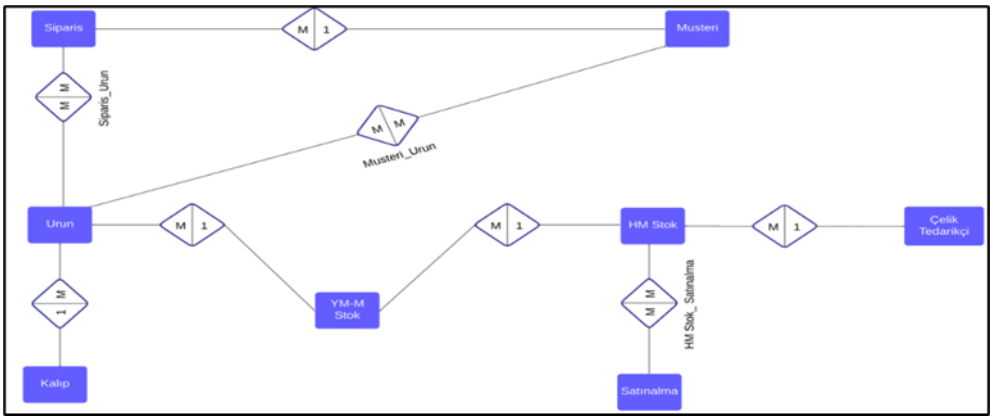
İşletmenin mevcut durumda kullandığı veri kayıt tablosu, başka bir ifade ile normalize edilmemiş kayıt tipleri Şekil 6'da görüldüğü gibidir.

Entity	PK	Attributes													
Sipariş	Sipariş ID	Sipariş Kodu	Sipariş Miktar	Bakiye	Sipariş Birim	Sipariş Tip	Sevk Tarihi	Sipariş Onay Tarihi	Sipariş Durumu	Sipariş Geliş Tarihi					
Ürün	Ürün ID	Ürün Kodu	Ürün Adı	Ürün Fiyat	Ürün Seviyesi	Envanter Tipi	Envanter Takip Birimi	Ürün Brüt Ağırlık	Ürün Net Ağırlık	Ürün Model Resim	Etkinlik Göstergesi	Firma Karşılık Kodu			
Müşteri	MüşteriID	Firma Kodu	Firma Adı	Sektör	Ödeme Tip	Müşteri Adres	Banka Kodları	Teslimat Tipi							
HM Stok	HM Stok Giriş No	Stok Giriş Türü	Giriş Tarihi	Giriş Parti No	İş Emri No	Depo Adı	Stok Birim	İlk Giriş Miktar	Tesellüm Miktar	Eldeki Miktar	Net Miktar	Rezerv Miktar	Red Miktar	Karantina Miktar	Dışardaki Miktar
YM-MM STOK	YM Stok Giriş No	Stok Giriş Türü	Giriş Tarihi	Giriş Parti No	İş Emri No	Depo Adı	Stok Birim	İlk Giriş Miktar	Tesellüm Miktar	Eldeki Miktar	Net Miktar	Rezerv Miktar	Red Miktar	Karantina Miktar	Dışardaki Miktar
Çelik Tedarikçi	TedarikçiID	Tedarikçi Kodu	Tedarikçi Adı	Ödeme Tip	Tedarikçi Adres	Banka Kodları	Teslimat Tipi								
Satınalma	Satıcı Sipariş Kodu	İstek No	Malzeme Hizmet Kodu	İstek Miktar	Ölçü Birim	Satıcı Termin	Sipariş Kalan Miktar	İstek Termin	İstek Durum	İstek Türü	İsteği Yapan	Satıcı Sipariş Termin	Satıcı Sipariş Durum		
Kalıp	KalıpID	Kalıp Kodu	Kalıp Seti Adı	Kalıp Durumu											

Şekil 6. Normalize edilmemiş kayıt tipleri tablosu.

3.3.2. İlişki Diyagramları

Sistemin ihtiyaç duyduğu bilgileri saklayan veri depolarının görevini, veritabanı tasarımında BİD yerine getirecektir. Birimler, birden fazla veri deposunu barındırabilirler, VAD üzerindeki her bir veri deposunun, BİD'deki birim olarak ifade edilmesi tercih edilir bir yol olarak önerilmektedir. Planlama sürecine dair birim ilişki diyagramı Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. ÜP süreci birim ilişki diyagramı.

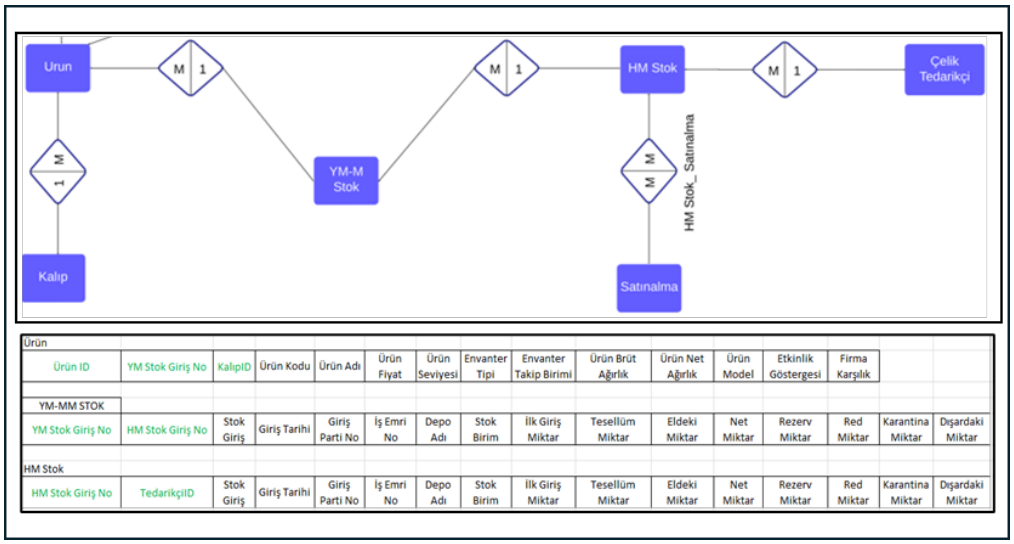
3.3.3. Normalize Edilmiş Kayıt Tipleri

- **1-M İlişkisi:** Sipariş ve Müşteri dış varlıkları arasındaki bire çok ilişki diyagramı ve normalize olmuş kayıt tablosu Şekil 8'de görüldüğü gibidir.



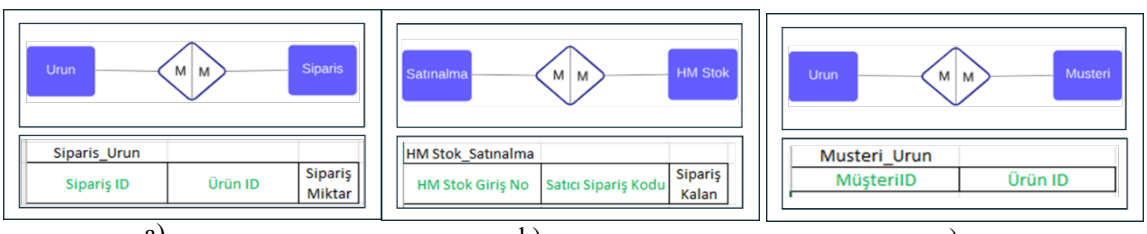
Şekil 8. Bire çok ilişki normalizasyonu- sipariş/müşteri.

Kalıp-ürün, ürün- yarı mamul/mamul, yarı mamul/mamul-ham malzeme stok, ham malzeme stok-çelik tedarikçi dış varlıkları arasındaki bire çok ilişki diyagramı ve normalize olmuş kayıt tablosu Şekil 9'da görüldüğü gibidir.



Şekil 9. Bire çok ilişki normalizasyonu- kalıp/ ürün/YM-M stok/ HM stok / satın alma/çelik tedarikçi.

- **M-M İlişkisi:** Ürün ve Sipariş varlıkları arasındaki çoka çok ilişkiyi temsil eden BİD ve normalize olmuş kayıt tablosu Şekil 10'da verilmiştir. Bir ürünle ilgili birden fazla sipariş sözkonusu olacağı, bir siparişte de birden fazla ürün olabileceğini ifade etmektedir. Satın alma ve Ham malzeme stok varlıkları arasında çoka çok ilişki bulunmaktadır. Burada, bir satıcının birden fazla malzeme temini gerçekleştirmesi ve bir malzemenin de birden fazla satıcıdan temin edildiğini ifade etmektedir. Benzer şekilde, Ürün ve Müşteri stok varlıkları arasında da çoka çok ilişki mevcuttur. Burada da bir müşterinin birden fazla ürün talep etmesi ve bir ürünün de birden fazla müşteri tarafından talep edebileceği durum ifade edilmiştir.



a) b) c)

Şekil 10. Çoka çok ilişki normalizasyonu: a) ürün/sipariş b) satın alma/HM stok c) ürün/müşteri.

3.3.4. Siparişten Üretime: Örnek Süreç Senaryosu

Geliştirilen sistemin işleyişini daha açık hale getirmek amacıyla, siparişten üretim planına kadar olan bilgi akışına ilişkin örnek bir senaryo aşağıda sunulmuştur. Bu senaryo, farklı birimler arasındaki veri hareketlerini ve sistem modüllerinin nasıl etkileşim içinde çalıştığını göstermektedir (Tablo 1).

Örnek Süreç Senaryosu:
Müşteri Siparişi Girişi:
Planlama birimi, yeni bir müşteri siparişini ERP üzerinden girer. Siparişe ait müşteri bilgisi, ürün kodu, adet ve teslim tarihi sisteme kaydedilir.

Stok Durumu ve Tedarik Kontrolü:
Sistem, siparişteki ürün için gerekli olan ham malzemenin stokta olup olmadığını kontrol eder. Eksik malzemeler varsa, tedarik süresi dikkate alınarak malzeme siparişi planlanır.

Ürün ve Kalıp Bilgileri Erişimi:
Ürüne ait teknik bilgiler ve kullanılacak kalıp verileri sistemdeki ilişkisel veri tabanından otomatik olarak alınır.

Üretim Planlama:
Siparişin sevk tarihine göre, sistem dövülmesi gereken tarihi hesaplar ve mevcut makine kapasitesi, vardiya düzeni, kalıp revizyonları gibi parametrelere göre optimal bir üretim planı oluşturur.

Çizelgeleme ve Raporlama:
Üretim sıralaması belirlenir ve sistem tarafından grafiksel raporlar oluşturularak yönetim birimine sunulur. Planlama doğruluk oranı KPI ile izlenebilir hale gelir.

Tablo 1. Süreç Senaryosu.

Aşama No	Süreç Adımı	İlgili Sistem Modülü	Üretilen Veri / İşlem Sonucu
1	Siparişin ERP'ye girişi	Sipariş Yönetimi	Sipariş No, Müşteri, Ürün, Teslim Tarihi
2	Malzeme durumu kontrolü	Stok ve Tedarik Yönetimi	Mevcut Stok, Termin Tarihleri
3	Kalıp ve teknik bilgi alınması	Ürün-Kalıp Yönetimi	Kalıp kodu, Üretim detayı
4	Üretim planının oluşturulması	Üretim Planlama Modülü	Vardiya, Makine Yükü, Zamanlama
5	Planın çizelgelenmesi ve raporu	Yönetim Raporlama Modülü	Günlük plan, grafik rapor, KPI analizi

3.4. Mevcut Durum Analizi ve Tasarlanan Sistemin İşletmeye Uyarlanması

Mevcut durumda, üretim planlama sürecine ilişkin bilgi sistemi oluşturulmadan önce, müşteri siparişleri öncelikle ERP sistemine kaydedilmekte ve ardından Microsoft Excel'e aktarılmaktadır. Kullanılan ham malzemeler Excel üzerinde doldurulmuş olup, ERP ile entegrasyonu yapılmamaktadır. Bu sebeple ERP üzerinde yapılan güncellemeler programa otomatik olarak yansımamaktadır. Bu sebeple bu aşamadan sonra, sıralama işlemleri manuel olarak kopyala-yapıştır yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Geliştirilen YBS tasarımı öncesinde, üretim planlama süreci ERP sistemine girilen siparişlerin manuel olarak Excel'e aktarılmasıyla yürütülmekteydi. Bu süreçte, malzeme ve stok bilgileri arasında entegrasyon bulunmamakta, veri güncellemeleri manuel olarak yapılmakta ve sıralamalar kullanıcı müdahalesine dayalı kopyalama işlemleriyle gerçekleştirildiğinden zaman kayıpları ve hata riski artmaktaydı (Şekil 11). Geliştirilen sistemin Excel-VBA tabanlı olarak tercih edilmesinde, işletmenin mevcut dijital altyapısı, çalışanların bu araca olan aşinalığı ve düşük maliyetli geliştirme imkânı etkili olmuştur. ERP sisteminin özelleştirilmesi yüksek lisans ve teknik destek maliyetleri doğuracağı için kısa vadede tercih edilmemiştir. Web tabanlı sistemler ise güvenlik, barındırma ve entegrasyon gibi teknik zorluklar nedeniyle uygulanabilir bulunmamıştır. Şekil 11, işletmeye yönelik gizli bilgiler içerdiğinden parça kodu, ham malzeme kodu ve müşterilere yönelik bilgiler görselde kapatılmıştır.

Parça Kodu	Miktar	Ağırlık	Hammalzeme	Sevk Tarihi	Saatlik Hedef	Temin Süre	Parti Büyüklüğü	Müşteri Kodu	B.Ağırlık	Tamamlanacak Tarih	Başlangıç Tarihi
		0		28.09.2019	64	0	500		11,2	28.09.19	01.12.21
	400	3796		15.11.2021	85	5	400		9,1	10.11.21	01.12.21
	2000	22963		15.12.2021	70	20	192		11,0	25.11.21	01.12.21
	40	464		30.11.2021	60	3	3000		11,2	27.11.21	04.12.21
	40	395		15.12.2021	95	10	600		9,5	05.12.21	04.12.21
	2600	42101		6.12.2021	92	10	1500		15,6	26.11.21	04.12.21
	2465	12331		10.12.2021	129	10	4000		4,8	30.11.21	06.12.21
	1000	5647		29.12.2021	60	10	500		5,4	19.12.21	08.12.21
	500	7192		30.12.2021	95	30	160		13,8	30.11.21	09.12.21
	900	10998		30.12.2021	82	30	160		11,8	30.11.21	10.12.21
	1000	20800		30.12.2021	80	10	400		20,0	20.12.21	11.12.21
	1750	27838		21.12.2021	110	20	1500		15,3	01.12.21	12.12.21
	700	14196		30.12.2021	86	20	160		19,5	10.12.21	13.12.21
	300	10124		15.01.2022	47	30	1000		32,5	16.12.21	14.12.21
	220	7425		30.01.2022	47	30	1000		32,5	31.12.21	15.12.21
SIRALI PARÇA KODU	2200	56170	HAMMALZEME KODU	19.01.2022	80	3	500	MÜŞTERİ KODU	24,6	16.01.22	21.12.21
	2000	21840		10.12.2021	92	30	250		10,5	10.11.21	15.12.21
	250	6822		15.01.2022	50	20	100		26,2	26.12.21	17.12.21
	1000	16041		15.12.2021	89	30	160		15,4	15.11.21	18.12.21
	1350	27518		28.12.2021	80	30	500		19,6	28.11.21	19.12.21
	500	5356		10.12.2021	105	3	300		10,3	07.12.21	20.12.21
	500	5746		15.12.2021	101	10	300		11,1	05.12.21	21.12.21
	1200	17073		23.12.2021	85	20	500		13,7	03.12.21	21.12.21
	4000	20010		17.12.2021	129	10	4000		4,8	07.12.21	22.12.21
	1050	18619		7.01.2022	30	30	220		17,1	08.12.21	25.12.21
	2000	40766		1.01.2022	92	20	250		19,6	12.12.21	27.12.21
	260	5381		24.12.2021	70	10	500		19,9	14.12.21	29.12.21
	70	825		24.12.2021	60	10	2500		11,3	14.12.21	29.12.21
	3500	30940		30.12.2021	139	10	2500		8,5	20.12.21	29.12.21
	1200	24960		17.01.2022	80	30	400		20,0	18.12.21	01.01.22
	1500	26598		17.01.2022	50	30	220		17,1	18.12.21	02.01.22
	1300	10248		27.01.2022	95	40	105		7,6	18.12.21	05.01.22

Şekil 11. ÜP süreci eski uygulama ekran görüntüsü.

Yeni sistemde, ERP'den alınan veriler normalize edilmiş tablolar aracılığıyla makro destekli bir Excel arayüzüne aktarılmıştır. Kullanıcılar, sistemdeki temel planlama işlemlerini belirli butonlar aracılığıyla gerçekleştirmektedir (Şekil 12).



Şekil 12. ÜP proje butonları.

3.4.1. Sipariş Sıralama Butonu

Bu buton, ERP'den alınan sipariş verilerini sevk tarihlerine göre sıralar. Böylece, üretim öncelikleri sistematik şekilde belirlenir.

3.4.2. Ham Malzeme Planlama Butonu

Bu fonksiyon, sıralı siparişleri değerlendirerek üretim paketleri oluşturur ve ham malzeme gereksinimlerini hesaplar. Malzeme ihtiyaçları, termin süresine göre planlanarak üretim öncesi hazırlık süresi optimize edilir (Şekil 13).

TEZGAH ADI	PARÇA KODU	SİPARİŞ MİKTAR	ÜRETİLECEK MİKTAR (KÜMÜLE)	ÜRETİLECEK MİKTAR TARİH BAZLI	ÜRETİLECEK MİKTAR AĞIRLIK	ÜRETİLECEK MİKTAR FİRELİ AĞIRLIK	HAMMALZEME KODU	SEVK TARİHİ	SAATLİK HEDEF ADET	ÜRETİM SÜRE	MÜŞTERİ KODU	DÖVME AĞIRLIK	ÜRÜN AĞIRLIK	BİRİM	ÜRETİM PARTİ MİKTARI	ÜRETİM PAKET SAYISI
TEZGAH 1	PARÇA 1	5600	76	76	SİPARİŞ* ÜRÜN AĞIRLIK	SİPARİŞ* FİRELİ ÜRÜN AĞIRLIK	HAM MALZEME 1	10.04.2025	92	2	MÜŞTERİ KODU 1	DÖVME AĞIRLIK	ÜRÜN AĞIRLIK	AD	3900	1
			726	650				2.05.2025	92	2				AD	3900	1
			1376	650				22.05.2025	92	2				AD	3900	1
			2026	650				17.07.2025	92	2				AD	3900	1
			2676	650				2.09.2025	92	2				AD	3900	1
			3326	650				25.09.2025	92	2				AD	3900	1
			3976	650				29.11.2025	92	2				AD	3900	1
			4626	650				25.12.2025	92	2				AD	3900	2
			5026	400				7.02.2026	92	2				AD	3900	2
TEZGAH 1	PARÇA 2	1135	500	500	SİPARİŞ* ÜRÜN AĞIRLIK	SİPARİŞ* FİRELİ ÜRÜN AĞIRLIK	HAM MALZEME 2	24.05.2025	176	3	MÜŞTERİ KODU 1	DÖVME AĞIRLIK	ÜRÜN AĞIRLIK	AD	6000	1
TEZGAH 1	PARÇA 3	500	2	2	SİPARİŞ* ÜRÜN AĞIRLIK	SİPARİŞ* FİRELİ ÜRÜN AĞIRLIK	HAM MALZEME 3	24.05.2025	150	7	MÜŞTERİ KODU 1	DÖVME AĞIRLIK	ÜRÜN AĞIRLIK	AD	3500	1
TEZGAH 1		500	502	500				2.08.2025	150	7				AD	3500	1
TEZGAH 1		500	1002	500				30.10.2025	150	7				AD	3500	1
TEZGAH 1		500	1502	500				13.01.2026	150	7				AD	3500	1
TEZGAH 1	PARÇA 4	1340	1340	1340	SİPARİŞ* ÜRÜN AĞIRLIK	SİPARİŞ* FİRELİ ÜRÜN AĞIRLIK	HAM MALZEME 4	19.08.2025	134	2	MÜŞTERİ KODU 2	DÖVME AĞIRLIK	ÜRÜN AĞIRLIK	AD	5400	1
TEZGAH 1	PARÇA 5	2500	400	400	SİPARİŞ* ÜRÜN AĞIRLIK	SİPARİŞ* FİRELİ ÜRÜN AĞIRLIK	HAM MALZEME 5	8.05.2025	127	6	MÜŞTERİ KODU 1	DÖVME AĞIRLIK	ÜRÜN AĞIRLIK	AD	10000	1
TEZGAH 1		2500	2900	2500				24.05.2025	127	6				AD	10000	1
TEZGAH 1		2500	5400	2500				14.06.2025	127	6				AD	10000	1
TEZGAH 1		2500	7900	2500				19.07.2025	127	6				AD	10000	1
TEZGAH 1		2500	10400	2500				6.09.2025	127	6				AD	10000	1
TEZGAH 1		2500	12900	2500				9.10.2025	127	6				AD	10000	2
TEZGAH 1		2500	15400	2500				30.10.2025	127	6				AD	10000	2
TEZGAH 1		5000	20400	5000				22.11.2025	127	6				AD	10000	2
TEZGAH 1		2500	22900	2500				17.01.2026	127	6				AD	10000	3
TEZGAH 1		2500	25400	2500				7.02.2026	127	6				AD	10000	3
TEZGAH 1		158	25558	158				28.02.2026	127	6				AD	10000	3

Şekil 13. Ham malzeme planlama butonu çıktı-1.

Ayrıca, sistem parçaların ham madde durumunu renk kodlarıyla göstererek tedarik risklerini önceden fark etmeyi sağlar. Görsel destek sayesinde malzeme eksiklikleri kolaylıkla izlenebilir (Şekil 14–15).

1	Stok Yeterli
2	Sipariş Var
3	Stok Yok, Sipariş, İstek Yok
4	Yeterli Stok Yok, Sipariş Yok
5	Ürün Bilgileri Hatalı
6	Sipariş Var, Malzeme Siparişi Yetmeyecek
7	Ham malzeme İstek Var

Şekil 14. Ham malzeme stok renk skalası.

Tezgah No	Parça Kodu	MİKTAR Değişiklik	YENİ Kalan Miktar adet	Ham malzeme Kodu	Renk Kodları	İlk Sevk Tarihi	Son Sevk Tarihi	Saatlik Üretim Adedi	Toplam Üretim Süresi (gün)	Parti Büyüklüğü	Müşteri Kodu	Ağırlık/adet	Üretilecek Ağırlık	Üretimin Tamamlanması Gereken Tarih	İmalat Başlama Tarihi	İmalat Bitiş Tarihi	Malzeme Bakiye	Malzeme Stok kg	Çelik Sipariş	Çelik Sipariş Bakiye
Tezgah No	Parça Kodları		3288	Ham Malzeme Kodları	1	7.2.25	13.6.25	60	68	2500	Müşteri Kodları	Parça Ağırlıkları	22.227	1.12.2024	27.02.2025	27.02.2025	17.482	39.709	-	-
		482	3000		2	7.2.25	4.7.25	60	68	2500			7.644	1.12.2024	27.02.2025	27.02.2025	- 7.644	-	25.000	17.356
			500		2	14.3.25	14.3.25	130	67	500			114	6.01.2025	27.02.2025	27.02.2025	- 7.758	-	25.000	17.242
		4800	6688		1	31.3.25	21.4.25	130	75	1500			4.869	15.01.2025	27.02.2025	27.02.2025	2.282	7.151	849	849
			843		1	14.2.25	14.2.25	62	22	1500			5.260	23.01.2025	27.02.2025	27.02.2025	53.443	58.703	40.000	40.000
			5900		1	14.2.25	11.9.25	60	20	5500			19.635	25.01.2025	27.02.2025	27.02.2025	30.585	50.220	55.000	55.000
			2000		1	14.2.25	14.2.25	74	17	3500			5.262	28.01.2025	27.02.2025	27.02.2025	7.146	12.408	-	-
			3441		1	12.3.25	7.1.26	121	39	3500			35.071	1.02.2025	27.02.2025	27.02.2025	65.632	100.703	53.630	53.630
			13004		1	9.5.25	3.10.25	108	90	10000			10.764	8.02.2025	27.02.2025	27.02.2025	25.080	35.844	-	-
			706		1	7.3.25	31.12.25	127	26	1000			389	9.02.2025	27.02.2025	27.02.2025	1.652	2.041	-	-
			3122		1	20.2.25	24.4.25	106	9	3000			18.832	11.02.2025	27.02.2025	27.02.2025	65.160	83.992	100.725	100.725
			5818		1	14.2.25	14.3.25	110	3	5500			16.942	11.02.2025	27.02.2025	27.02.2025	13.643	50.220	55.000	55.000
			6465		1	28.2.25	8.5.25	119	16	6000			30.256	12.02.2025	27.02.2025	27.02.2025	34.904	83.992	100.725	100.725
			1456		1	17.2.25	18.7.25	123	3	2200			4.013	14.02.2025	27.02.2025	27.02.2025	5.890	9.903	-	-
			971		1	17.2.25	27.9.25	122	2	2000			3.534	15.02.2025	27.02.2025	27.02.2025	14.695	18.229	20.000	20.000
			2923		1	17.2.25	23.5.25	86	2	2250			31.700	15.02.2025	27.02.2025	27.02.2025	41.773	73.473	-	-
			1925		1	17.2.25	11.4.25	84	2	1600			10.450	15.02.2025	27.02.2025	27.02.2025	4.244	18.229	20.000	20.000
			1449		2	17.2.25	3.5.25	95	2	1400			22.454	15.02.2025	27.02.2025	27.02.2025	- 21.590	864	30.000	8.410
			300		3	17.2.25	17.2.25	56	1	600			7.815	16.02.2025	27.02.2025	27.02.2025	- 7.815	-	-	-
			4697		1	21.4.25	12.5.25	138	63	4500			3.419	17.02.2025	27.02.2025	27.02.2025	11.916	15.335	-	-
		-1200	1355		1	5.3.25	10.9.25	132	16	2500			1.733	17.02.2025	27.02.2025	27.02.2025	12.649	14.382	10.000	10.000
			829		3	21.2.25	23.10.25	142	4	750			4.196	17.02.2025	27.02.2025	27.02.2025	- 4.196	-	-	-
		-820	1730		1	10.4.25	14.8.25	93	51	2300			8.672	18.02.2025	27.02.2025	27.02.2025	37	8.709	20.000	20.000
			4000		1	21.2.25	21.2.25	129	2	2500			12.646	19.02.2025	27.02.2025	27.02.2025	5.569	18.215	-	-

Şekil 15. Ham malzeme planlama butonu çıktı-2.

3.4.3. Üretim Planı Hazırlama Butonu

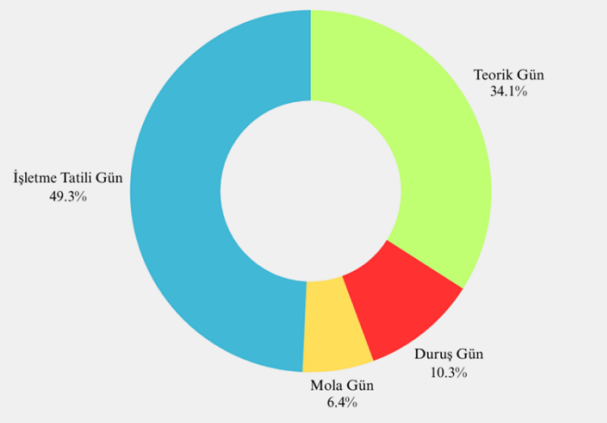
Üretim planı, makine kodu, vardiya yapısı, saatlik üretim hedefi ve kalıp revizyonu gibi veriler dikkate alınarak oluşturulur. Sistem, kullanıcı müdahalesine açık yapısıyla manuel sıralamaları da destekler. Planlama süreci dinamik biçimde güncellenebilir.

3.4.4. Planı Çizelgele Butonu

Planlama işlemleri tamamlandıktan sonra, "Çizelgele" butonuyla üretim sıralaması kesinleştirilir ve "Raporla" butonuyla yönetim için görsel içerikli üretim planı raporları hazırlanır (Şekil 16–17). Bu raporlar, karar destek süreçlerine katkı sağlar.

Tezgah No	Parça Kodu	MİKTAR Değişiklik	YENİ Kalan Miktar adet	Ham malzeme Kodu	Renk Kodları	İlk Sevk Tarihi	Son Sevk Tarihi	Sıralama	Saatlik Üretim Adedi	Toplam Üretim Süresi (gün)	Parti Büyüklüğü	Müşteri Kodu	Ağırlık/adet	Üretilecek Ağırlık	Üretimin Tamamlanması Gereken Tarih	İmalat Başlama Tarihi	İmalat Bitiş Tarihi	Sevkiyat Aksama Gün
		1195	4169		1	21.3.25	28.3.25	10	165	2	2500			38.762	19.03.2025	27.02.2025	5.03.2025	20,00
		0	2643		1	6.3.25	24.7.25	15	71	9	2500			47.965	25.02.2025	5.03.2025	15.03.2025	- 8,00
		86	500		1	29.5.25	23.10.25	30	63	15	600			7.124	14.05.2025	15.03.2025	18.03.2025	60,00
		0	2267		1	13.3.25	13.3.25	50	64	18	1800			40.198	23.02.2025	18.03.2025	26.03.2025	- 23,00
		-1400	1660		1	21.5.25	3.12.25	100	105	39	3000			17.609	12.04.2025	26.03.2025	30.03.2025	17,00
		0	500		2	28.3.25	28.3.25	110	65	1	700			11.336	27.03.2025	30.03.2025	3.04.2025	- 3,00
		-513	2756		1	13.3.25	5.6.25	115	87	9	3000			25.309	4.03.2025	3.04.2025	11.04.2025	- 30,00
		0	635		1	11.4.25	17.6.25	150	70	18	1000			3.586	24.03.2025	11.04.2025	16.04.2025	- 18,00
		0	2368		2	15.5.25	30.10.25	180	85	56	2200			14.161	20.03.2025	16.04.2025	26.04.2025	- 27,00
		-224	840		2	2.4.25	24.9.25	230	121	9	3000			9.741	24.03.2025	26.04.2025	29.04.2025	- 33,00
		-3000	2100		2	4.4.25	11.4.25	250	165	2	2500			19.525	2.04.2025	29.04.2025	2.05.2025	- 27,00
		0	1329		1	12.3.25	25.6.25	280	122	1	2000			10.366	11.03.2025	2.05.2025	7.05.2025	- 52,00
		-1224	6874		1	25.4.25	12.6.25	300	152	5	5600			36.245	20.04.2025	7.05.2025	17.05.2025	- 17,00
		0	1449		2	17.2.25	3.5.25	350	95	2	1400			22.454	15.02.2025	17.05.2025	23.05.2025	- 91,00
Tezgah No	Parça Kodları	0	50	Ham Malzeme Kodları	2	11.4.25	11.4.25	400	80	7	100	Müşteri Kodları	Parça Ağırlıkları	1.052	4.04.2025	23.05.2025	26.05.2025	- 49,00
		0	2209		2	17.4.25	10.7.25	420	93	9	2000			19.413	8.04.2025	26.05.2025	2.06.2025	- 48,00
		0	485		1	8.5.25	18.9.25	460	96	15	450			7.780	23.04.2025	2.06.2025	3.06.2025	- 40,00
		0	300		3	17.2.25	17.2.25		56	1	600			7.815	16.02.2025	3.06.2025	5.06.2025	- 107,00
		-59	0		5	6.3.25	6.3.25		70	1	400			-	5.03.2025	5.06.2025	6.06.2025	- 92,00
		0	2100		6	24.4.25	25.4.25		165	2	2500			19.525	22.04.2025	6.06.2025	11.06.2025	- 45,00
		0	3300		6	25.4.25	25.4.25		165	2	2500			30.682	23.04.2025	11.06.2025	18.06.2025	- 49,00
		0	3520		6	15.5.25	17.7.25		64	18	1800			62.417	27.04.2025	18.06.2025	28.06.2025	- 52,00
		0	600		6	1.5.25	1.5.25		165	2	2500			5.579	29.04.2025	28.06.2025	1.07.2025	- 60,00
		0	1462		4	6.5.25	17.3.26		104	1	2400			29.801	5.05.2025	1.07.2025	7.07.2025	- 57,00
		0	1687		2	26.6.25	21.8.25		71	52	1500			14.211	5.05.2025	7.07.2025	15.07.2025	- 63,00
		0	998		1	15.5.25	1.8.25		105	1	600			10.691	14.05.2025	15.07.2025	17.07.2025	- 62,00
		0	438		6	22.5.25	22.5.25		70	5	1000			6.232	17.05.2025	17.07.2025	21.07.2025	- 61,00
		0	500		1	21.5.25	21.5.25		119	1	600			4.745	20.05.2025	21.07.2025	22.07.2025	- 62,00
		0	1197		4	10.6.25	24.2.26		111	16	1300			24.898	25.05.2025	22.07.2025	25.07.2025	- 58,00

Şekil 16. Üretim programı çalışma raporu.



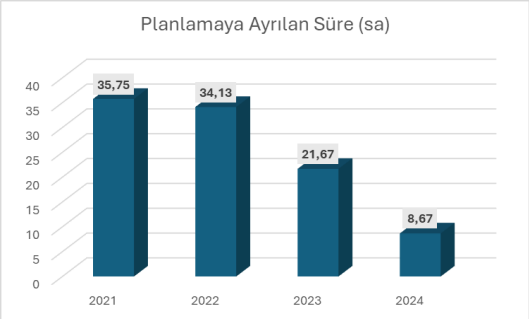
Şekil 17. Üretim programı çalışma raporu.

4. Sonuç

Bu çalışmada, sıcak dövme sektöründe üretim planlama süreçlerinin daha verimli, esnek ve entegre bir yapıya kavuşturulması amacıyla bir Yönetim Bilişim Sistemi (YBS) tasarlanmış ve gerçek bir üretim işletmesinde uygulanmıştır. Geliştirilen sistem sayesinde; sipariş takibi, stok yönetimi, makine kapasite planlaması ve tedarikçi entegrasyonu gibi süreçler dijitalleştirilmiş ve merkezi bir yapıda yönetilebilir hale getirilmiştir.

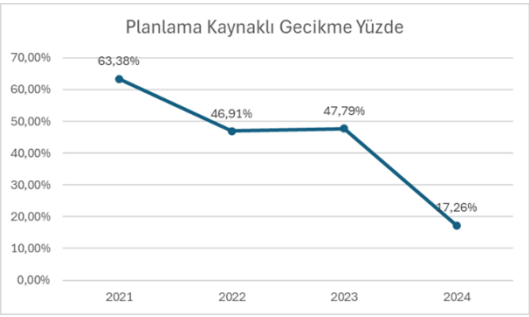
Yapılan analizler sonucunda, üretim planlama süreçlerinde üç temel performans göstergesinde (planlama süresi, planlama kaynaklı gecikmeler ve planlama doğruluğu) anlamlı iyileşmeler elde edilmiştir. Yapılan iyileştirmeler sonucunda:

- Planlama süreleri %60 oranında azaltılmıştır, yıllara göre planlamaya ayrılan süreye Şekil 18'de yer verilmiştir. - Ortalama Planlama Süresi (Saat / Gün): Planlama sürecinde harcanan toplam zaman / planlama sayısı formülü ile hesaplanmaktadır.



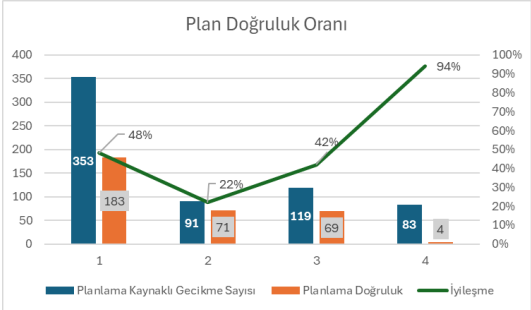
Şekil 18. KPI-1 planlama ayrılan süre grafiği.

- Planlama Kaynaklı Üretim Gecikmeleri %30 oranında düşürülmüştür, yıllara göre planlama kaynaklı gecikme yüzdelerine Şekil 19'da yer verilmektedir. – Planlama Kaynaklı Gecikme/ Toplam Gecikme *100 formülü ile hesaplanmaktadır.



Şekil 19. KPI-2 planlama kaynaklı üretim gecikmeleri grafiği.

- Planlama doğruluk oranı %94 seviyesine çıkarılmıştır, yıllara göre üretim planının doğruluğunun testine dair grafiğe Şekil 20'de yer verilmiştir. – Üretim Planı ile ilgili Gecikme / Planlama Kaynaklı Gecikme*100 formülü ile hesaplanır.-



Şekil 20. KPI-3 planlama doğruluk oranı grafiği.

Bu bulgular, literatürde YBS'nin üretim yönetimi süreçlerine olan katkılarını ortaya koyan önceki çalışmalarla da örtüşmektedir. Örneğin, Gökşen ve arkadaşları [14], YBS'nin süreç koordinasyonunu artırarak operasyonel verimliliği desteklediğini belirtmiş, Ediz ve Turan [15] ise çok değişkenli üretim kararlarının alınmasında bilişim sistemlerinin karar desteği sunduğunu vurgulamıştır. Bu çalışma, benzer biçimde, YBS'nin üretim planlama gibi karmaşık süreçlerde karar verme hızını ve doğruluğunu artıran bir araç olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, uygulanan sistemin görsel ağırlıklı kullanıcı arayüzü ve makro destekli buton yapısı sayesinde, planlama sürecine kullanıcı müdahalesi kolaylaşmış, değişken üretim koşullarına hızlı adaptasyon sağlanmıştır. Bu yönüyle sistem, sadece bir otomasyon aracı değil, aynı zamanda üretim yönetiminde stratejik bir karar destek mekanizması olarak işlev görmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen sistemin etkinliği yalnızca tek bir işletme üzerinden test edilmiştir. Bu durum, bulguların diğer sektörler veya işletme ölçekleri için doğrudan genellenebilirliğini sınırlamaktadır. Ayrıca sistemin sürdürülebilirliği, Excel-VBA platformunun teknik sınırlamaları ve kullanıcıların teknik bilgi düzeyine bağlıdır. Kullanıcı adaptasyonu, veri girişlerinin doğruluğu ve ERP sisteminden alınan verilerin güncelliği gibi faktörler, sistem performansını doğrudan etkileyebilir. Bu sınırlılıklar, ileride sistemin farklı teknolojik altyapılarla entegre edilmesi veya farklı sektörlerde test edilmesiyle aşılabilir.

Elde edilen olumlu sonuçların büyük ölçüde geliştirilen sistemle ilişkili olduğu düşünülse de sistemin uygulandığı dört yıllık dönem boyunca üretim personelinde yapılan eğitim yatırımları, ERP sisteminin ara yüz iyileştirmeleri ve kapasite yatırımları gibi dışsal faktörlerin de bu gelişmelere katkı sağlamış olabileceği göz ardı edilmemelidir.

Sonuç olarak, bu çalışma, literatürdeki mevcut teorik yaklaşımları sahadan elde edilen verilerle destekleyerek YBS'nin sıcak dövme sektöründeki üretim planlama süreçlerine nasıl somut katkılar sunduğunu göstermiştir. Uygulama temelli bu yaklaşım hem akademik hem de sektörel açıdan değerli bir model sunmakta; benzer sektörlerdeki dijital dönüşüm süreçlerine örnek teşkil etmektedir.

Kaynaklar

[1] Hartley P, Pillinger I. Numerical Simulation of the Forging Process. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 2006; (1): 48-49.
[2] Sert Y, Yeşilyurt M, Günaydın O, Emir LT, Küçükömeroğlu, T. Dövme Aşınma Mekanizmaları. ECJSE 2021; (5): 202-219.
[3] Kabataş B, Livatyalı H, Temiztaş Aşçıoğlu B. Process optimization for hot forging of difficult parts by computer. JAME 2022; (1): 33-45.
[4] Campi F, Favi C, Mandolini M, Germani M. An analytical cost estimation model for the design of axisymmetric components with open-die forging technology. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2020: 1869-1892.
[5] Aydoğan E, Asal Ö. Malzeme İhtiyaç Planlaması ve Üretim Kaynakları Pazarlamasının KOBİ'ler Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. SUSBED 2009: 34-42.
[6] Stevenson M, Hendry L. A review of production planning and control: The applicability of key concepts to the make-to-order industry. IJPR 2005: 869-898.
[7] Demir H, Gümüşoğlu Ş. Üretim Planlaması, Üretim Yönetimi (İşlemler Yönetimi), 7. Baskı, İstanbul: Beta, 2009: 447.
[8] Özgen D, Üretim Planlama ve Kontrol Sisteminin Temel Girdilerine Bağlı olarak Toplu Üretim Planlamasının Bilgisayar Destekli Optimizasyonu. (master), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2001.
[9] Alayalı N. Sıcak dövme sektörü araştırması. (master), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1994.

[10] Gökçen H. Yönetim Bilgi/Bilişim Sistemleri, Ankara: Palme Yayıncılık. 2007.
[11] Damar M, Aydın Ö. Türkiye'nin 2010 Sonrası Yönetim Bilişim Sistemleri Alanında Uluslararası Q1 Dergilerinde Durumu. Yönetim Bilişim Sistemleri Dergisi 2021: 811-842.
[12] Damar M, Bölen MC. Türkiye'de Yönetim Bilişim Sistemleri Alanındaki Araştırmacıların Genel Dokusu Üzerine Bir Değerlendirme. Yönetim Bilişim Sistemleri Dergisi 2021; 12(20): 86-97.
[13] Mediafy. Yönetim Bilişim Sistemleri: İşletmelere Sağladığı Faydalar ve Uygulama Alanları. 2024 (https://www.mediafy.com.tr/blog/yonetim-bilisim-sistemleri%3A-isletmelere-sagladigi-faydalar-ve-uygulama-alanlari)
[14] Gökşen Y, Damar M, Doğan O. Üniversite İş Süreçlerinin Koordinasyonu İçin Yönetim Bilişim Sistemlerinin İnşası: Dokuz Eylül Üniversitesi İçin Model Önerisi. Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi 2016; (22): 361-373.
[15] Ediz Ç, Turan AH. Çok Değişkenli Üretim Planlama Kararlarında Bilişim Teknolojisi Uygulamaları. UİİİD 2019; (4): 20-30.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 839-852, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1579540

Mobil Uygulama Kullanıcı Yorumları Üzerinde Metin Madenciliği ve Müşteri Memnuniyeti Analizi: E-Ticaret Markası Örneği

Mehmet KAYAKUŞ[1*], Fatma YİĞİT AÇIKGÖZ[2]
[1] Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Sosyal ve Beşerî Bilimler Fakültesi Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye
[2] Pazarlama ve Reklamcılık Bölümü, Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye
[*1] mehmetkayakus@akdeniz.edu.tr, [2] fatmayigit@akdeniz.edu.tr

(Geliş/Received: 05/11/2024; Kabul/Accepted: 17/09/2025)

Öz: Müşteri memnuniyeti, bir şirketin sunduğu ürün ve hizmetlerin kullanıcı beklentilerini ne ölçüde karşıladığını ifade eder. Bu çalışmanın amacı, Trendyol markasının müşteri memnuniyetini kullanıcı yorumları üzerinden değerlendirmektir. Veri seti, Google Play'de son bir ayda Trendyol mobil uygulaması hakkında yapılan yorumlardan elde edilmiştir. Python kullanılarak gerçekleştirilen analizde, duygu analizi, metin madenciliği ve konu modelleme yöntemleri uygulanmıştır. Duygu analizi, yorumları olumlu, olumsuz veya nötr olarak sınıflandırırken, metin madenciliği ve konu modelleme ise yorumlarda öne çıkan kelimeleri ve temaları belirlemiştir. Analiz sonuçları, Trendyol'un müşteri memnuniyetini etkileyen faktörleri ortaya koymuştur. Olumlu yorumlarda ürün çeşitliliği, hızlı teslimat ve müşteri hizmetleri ön plana çıkarken, olumsuz yorumlarda ürün kalitesi, gecikmeli teslimatlar ve iade süreçleri ile ilgili şikayetler dikkat çekmiştir. Çalışmanın bulguları, Trendyol'un müşteri memnuniyetini artırmak için iyileştirilmesi gereken alanları işaret etmektedir. Bu çalışma, mobil uygulama kullanıcı yorumlarının analiz edilerek müşteri memnuniyetinin değerlendirilebileceğini ve bu yaklaşımın diğer markalar için de önemli olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Müşteri memnuniyeti, Trendyol, mobil uygulama, duygu analizi, metin madenciliği, konu modelleme, LDA, TextBlob

Text Mining and Customer Satisfaction Analysis on Mobile Application User Reviews: An E-Commerce Brand Case Study

Abstract: Customer satisfaction refers to the extent to which the products and services offered by a company meet user expectations. The purpose of this study is to evaluate customer satisfaction of the Trendyol brand through user reviews. The dataset was obtained from the comments about Trendyol mobile applications on Google Play in the last month. Sentiment analysis, text mining, and topic modelling methods were applied in the analysis using Python. Sentiment analysis categorized the comments as positive, negative, or neutral, while text mining and topic modelling identified the prominent words and themes in the comments. The results of the analysis revealed the factors affecting Trendyol's customer satisfaction. Positive comments emphasized product variety, fast delivery, and customer service, while negative comments highlighted complaints about product quality, delayed deliveries, and return processes. The findings of the study point to areas where Trendyol needs to improve to increase customer satisfaction. This study shows that customer satisfaction can be assessed by analyzing mobile app user reviews and that this approach is also important for other brands.

Key words: Customer satisfaction, Trendyol, mobile application, sentiment analysis, text mining, topic modelling, LDA, TextBlob

1. Giriş

Müşteri memnuniyeti, e-ticaret sektöründe önemli bir rekabet avantajı ve marka değeri oluşturma aracı olarak kabul edilmektedir. Müşteri memnuniyeti, bir şirketin sunduğu ürün veya hizmetlerin, müşterilerin beklentilerini karşılama düzeyi ile yakından ilişkilidir. Yüksek müşteri memnuniyeti, müşteri sadakatini güçlendirirken, uzun vadeli müşteri ilişkileri ve işletmenin genel performansı üzerinde de doğrudan etkili olabilir.

Memnuniyet sağlayan firmalarla müşteriler daha güçlü ve uzun vadeli ilişkiler kurma eğilimindedir. Müşteri memnuniyeti, müşterilerin marka ile ilgili bilgiye daha fazla güven duymasını sağlar ve pazarlama iletişiminin etkinliğini artırır [1]. Ayrıca, olumlu müşteri geri bildirimi kriz anlarında şirketin daha hızlı toparlanmasına ve müşteri güvenini yeniden kazanmasına yardımcı olur. Yüksek memnuniyet düzeyi, şirketin pazarda kendini farklılaştırmasına ve rekabet avantajı elde etmesine katkı sağlar [2]. Memnuniyet düzeyi yüksek firmalar,

[*] Sorumlu yazar: mehmetkayakus@akdeniz.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0003-0394-5862, [2] 0000-0003-3748-1496

rakiplerine göre daha az reklam harcaması yaparak benzer bir marka bilinirliği elde edebilirler. Bu da pazarlama bütçesinin daha verimli kullanılmasını sağlar [3].

Müşteri memnuniyetini analiz etmede duygu analizi, metin madenciliği ve konu modelleme gibi yapay zekâ tabanlı yöntemlerin kullanılması son yıllarda büyük önem kazanmıştır. Bu teknikler, müşteri yorumlarının ve geri bildirimlerin büyük veriler halinde analiz edilmesine olanak tanır [4]. Özellikle metin madenciliği, yapılandırılmamış müşteri yorumlarından anlamlı bilgiler çıkararak, firmaların müşterilerinin ihtiyaç ve beklentilerini daha iyi anlamasını sağlar. Duygu analizi ise, müşteri yorumlarının genel eğilimini (olumlu, olumsuz veya nötr) tespit ederek müşteri memnuniyetinin genel düzeyini hızlı bir şekilde ölçer [5]. Konu modelleme ise, müşteri geri bildirimlerinde öne çıkan konuları belirleyerek işletmelerin iyileştirme yapması gereken alanları anlamalarına yardımcı olur [6]. Bu yöntemler, dijital platformlarda hızla yayılan müşteri yorumları ve geri bildirimler üzerinden hızlı ve kapsamlı analiz yapılmasını sağlar, bu sayede firmaların daha stratejik kararlar almasına olanak tanır.

Düşük müşteri memnuniyetinin e-ticaret sektörü üzerindeki etkileri geniş ve derindir. Müşteri güveninin azalması, marka algısının zayıflaması, dijital pazarlama çabalarının etkisiz hale gelmesi ve iş ortaklıkları ile yatırımcı güveninin azalması, düşük müşteri memnuniyetinin neden olabileceği başlıca sorunlardır [7]. Bu nedenle, firmaların müşteri memnuniyeti yönetimine büyük önem vermesi ve olumsuz müşteri deneyimlerinin etkilerini minimize etmek için stratejik adımlar atması kritik öneme sahiptir.

Müşteri yorumları, günümüzde marka değeri, müşteri memnuniyeti ve işletmelerin pazardaki rekabet gücü açısından önemli bir veri kaynağı olarak görülmektedir. Bu yorumların analizinde duygu analizi, metin madenciliği ve konu modelleme gibi yapay zekâ tabanlı yöntemler, müşteri geri bildirimlerini sistematik ve kapsamlı bir şekilde incelemek için sıklıkla kullanılmaktadır. Hennig-Thurau ve diğerleri (2004), müşteri yorumlarının dijital platformlar üzerinden hızla yayılarak marka algısını doğrudan etkilediğini vurgulamaktadır. Bu durum, duygu analizinin müşteri memnuniyeti ölçümünde önemini ortaya koymaktadır [8]. Hu ve Liu (2004), duygu analizinin, özellikle ürün veya hizmetlerin güçlü ve zayıf yönlerinin tespit edilmesinde etkili olduğunu göstermektedir [9]. Pang ve Lee (2008), metin madenciliği tekniklerinin müşteri yorumlarını analiz etmede etkili olduğunu ve pazarlama stratejilerinin belirlenmesine katkı sağladığını belirtmektedir. Metin madenciliği ayrıca, kullanıcı geri bildirimlerinin hızlı bir şekilde analiz edilmesine ve şirketlerin müşteri memnuniyetini artıracak stratejik kararlar almasına olanak tanır [10]. Blei ve arkadaşları (2003) tarafından geliştirilen LDA (Latent Dirichlet Allocation) algoritması, metin verilerinden farklı konuları çıkarmakta etkili bir yöntem olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntem, müşterilerin en çok hangi konularda geri bildirimde bulunduğunu belirleyerek firmaların odaklanması gereken alanları anlamalarına yardımcı olur [11]. Algoritmanın müşteri yorumları üzerinde uygulanması, işletmelerin stratejik kararlar almalarına katkı sağlar [12]. Schivinski ve Dabrowski (2016), dijital platformlarda müşteri yorumlarının hızla yayıldığını ve markaların itibar yönetiminde önemli bir veri kaynağı haline geldiğini belirtmektedir [13]. Bu yorumların analiz edilmesi, markaların müşteri beklentilerini daha iyi anlamalarını ve hizmet kalitelerini geliştirmelerini sağlar. Özellikle dijital platformlar, müşteri geri bildirimlerini sürekli olarak izlemeye olanak tanıdığından, duygu analizi ve konu modelleme gibi teknikler bu alanda etkili bir şekilde uygulanabilmektedir [14].

Son yıllarda müşteri memnuniyetinin ölçülmesi ve analiz edilmesi konusunda duygu analizi ve metin madenciliği gibi yapay zekâ tabanlı yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır [15]. Özellikle çevrimiçi incelemeler, sosyal medya paylaşımları ve e-ticaret platformlarındaki kullanıcı yorumları, müşteri memnuniyetini anlamak için önemli veri kaynakları haline gelmiştir [16]. Bu bağlamda, duygu analizi ve konu modelleme gibi metin madenciliği teknikleri kullanılarak müşteri deneyimlerini anlamaya yönelik birçok çalışma yapılmıştır [17, 18].

Örneğin, Tuzcu (2020) çevrimiçi kullanıcı yorumlarını duygu analizi ile sınıflandırarak müşteri memnuniyetiyle ilgili eğilimleri belirlemiştir [19]. Benzer şekilde, Kılıçer ve Şamlı (2023), e-ticaret sitelerindeki elektronik cihazlar hakkında yapılan 11.412 Türkçe yorum üzerinde çeşitli makine öğrenmesi algoritmaları uygulanarak duygu analizi yapılmıştır. Pozitif, negatif ve nötr olarak sınıflandırılan yorumlar, farklı algoritmaların performansları karşılaştırılarak analiz edilmiştir [20]. Yılmaz ve Adalı (2024) ise e-ticaret sitelerindeki müşteri yorumlarını metin madenciliği teknikleriyle inceleyerek, marka algısının müşteri yorumlarıyla nasıl şekillendiğini ortaya koymuştur [21].

Bununla birlikte, mevcut literatürde Türkiye'nin en büyük e-ticaret platformlarından biri olan Trendyol özelinde yapılmış kapsamlı bir metin analizi çalışması bulunmamaktadır. Bu çalışma, Trendyol mobil uygulaması kullanıcılarının yorumlarını metin madenciliği ve duygu analizi teknikleri ile inceleyerek müşteri memnuniyetini değerlendirmekte ve bu alandaki literatüre katkı sunmaktadır.

Bu çalışmada, Türkiye'nin en büyük ve en hızlı büyüyen e-ticaret platformlarından biri olan Trendyol markasının müşteri memnuniyeti kullanıcı yorumları üzerinden duygu analizi, metin madenciliği ve konu

modelleme teknikleri ile değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme, müşteri memnuniyetinin dijital platformlar üzerinden sistematik olarak ölçülmesinin önemi ve zorluklarına dikkat çekmektedir. Çalışmada kullanılan yapay zekâ tabanlı analiz yöntemleri, Trendyol'un müşteri memnuniyeti düzeyini detaylı bir şekilde ele alırken, platformun müşteriler nezdindeki güçlü ve zayıf yönlerini de ortaya koymaktadır.

Önceki çalışmalar genellikle belirli bir zaman aralığındaki verileri analiz ederken, bu çalışmada Trendyol mobil uygulaması hakkında son bir ayda yapılan yorumlar incelenmiştir. Bu çalışmanın literatüre katkısı; belirli bir e-ticaret platformu bağlamında müşteri memnuniyetini değerlendirmesi, duygu analizi, metin madenciliği ve konu modelleme tekniklerini bir arada kullanması ve e-ticaret sektöründeki firmalara müşteri geri bildirimlerinin analizi konusunda veri odaklı içgörüler sağlamasıdır. Elde edilen bulgular, Trendyol'un müşteri memnuniyeti düzeyini belirlemekle kalmayıp, e-ticaret sektöründe müşteri deneyimini iyileştirmek isteyen diğer platformlar için de önemli çıkarımlar sunmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada kurumların kurumsal itibarları mobil uygulamayı kullanan kullanıcıların görüşleri analiz edilerek yorumlanmıştır. Veri seti, kullanıcıların Google Play uygulamasında son bir ayda yapılan yorumlardan elde edilmiştir. Müşteri yorumlarını analiz etmek için Python programında duygu analizi ve metin madenciliği yöntemleri kullanılmıştır.

2.1. Veri seti

Çalışmada kurumsal itibarı analizi için Türkiye'nin en büyük e-ticaret şirketi olan Trendyol seçilmiştir. 2010 yılında kurulan Trendyol ve Türkiye'nin en büyük e-ticaret platformlarından biridir. Merkezi İstanbul'da bulunan Trendyol, Türkiye'nin ilk decacorn şirketidir. Trendyol'a hem web sitesi hem de mobil uygulama üzerinden erişilebilir. Uygulama, Android ve iOS cihazlar için ücretsiz olarak indirilebilir. Trendyol'un mobil uygulaması 30 Mayıs 2013'te yayımlanmış olup, bu uzun geçmiş kullanıcı tabanının genişlemesini ve marka bilinirliğinin artmasını sağlamıştır. Trendyol mobil uygulaması, kullanıcılar tarafından 100 milyondan fazla indirilmiştir. Boyutu 78 MB olan uygulamaya toplam 1,87 milyon yorum yapılmıştır [22].

Bu çalışmada kullanılan veri seti, Trendyol'un Android cihazlar için geliştirdiği mobil uygulamanın kullanıcı yorumlarından elde edilmiştir. Veri setinin oluşturulabilmesi için, Google Play platformu üzerinden son bir ay içinde yapılan kullanıcı yorumları manuel olarak toplanmıştır. Google Play'in sunduğu API erişiminin mevcut olmaması nedeniyle, veriler manuel olarak indirilmiş ve incelemeye uygun hale getirilmiştir. Bu yöntem, veri toplama sürecinde zaman ve iş gücü açısından bazı sınırlamalara yol açsa da elde edilen yorumlar, kullanıcı memnuniyetini analiz etmek için yeterli kapsamda ve çeşitliliktedir. Elde edilen 500 yorum, kullanıcı deneyimlerini anlamaya yönelik duygu analizi ve metin madenciliği teknikleri ile incelenmiştir. Tablo 1'de örnek Google Play yorumları görülmektedir.

Tablo 1. Örnek Veri Seti [23]

Kullanıcı yorumları
Güzel sistem. Trendyol iş yükünü sağlam strateji yaparak en aza indirmiş. Tebrikler
Kesinlikle her alışverişte kusursuz gelmiştir.
Keyifle ve güvenle alışveriş yapıyorum başarılarınızın devamını dilerim
Geç açılıyor ve uygulama içinde takılıyor. Bir şey aramak istediğimizde çıkan sonuçlardan herhangi bir ürüne tıklayıp geri arama sonuçlarına döndüğümüzde en başa atıyor. Eski sürüm daha güzeldi
Gayet kullanımı kolay bir uygulama reklam var ama çok fazla değil. Onun dışın alışveriş yapmayı sevdiğim bir uygulama.

Bu çalışmada belirli sınırlamalar bulunmaktadır. İlk olarak, 500 yorumdan oluşan veri seti, günümüzün gelişmiş algoritmalarıyla değerlendirildiğinde nispeten küçük bir örneklem olarak kabul edilebilir. Ancak, veri seti, çalışmanın amacına yönelik olarak kullanıcı memnuniyeti hakkında anlamlı sonuçlar elde edebilmek için yeterli çeşitliliği ve kapsamı sunmaktadır. Ayrıca, yalnızca Android platformuna odaklanılması, iOS kullanıcılarının yorumlarının dışarıda bırakılmasına yol açmıştır. Ancak, Android kullanıcılarının büyük bir pazar payına sahip olması ve araştırmanın bu platformda yoğunlaşması, sonuçların çoğunlukla Android kullanıcılarının deneyimlerini temsil etmesine olanak tanımıştır. Çalışma, son bir ayda yapılan yorumlarla sınırlı tutulmuş olsa da bu süre, kullanıcıların uygulama ile ilgili yakın tarihli deneyimlerini yansıtarak güncel ve anlamlı veriler sunmaktadır. Daha uzun bir zaman dilimi üzerinden yapılan analizler farklı eğilimler ortaya koyabilirken, bu araştırma, kısa vadeli kullanıcı memnuniyetini ölçmeyi hedeflemiştir. Verilerin manuel olarak toplanması, platformdan otomatik veri çekilememesi nedeniyle tercih edilen bir yöntemdir. Bu sınırlamalar, çalışmanın

özgüllüğünü ve amacını netleştiren faktörler olup, ilerleyen araştırmaların daha geniş veri setleriyle ve farklı platformlarla yapılması, sonuçların genellenebilirliğini artırabilir.

2.2. Metin Madenciliği

Metin madenciliği, büyük miktarlarda yapılandırılmamış metin verilerini yapılandırılmış, organize bir veri formatına dönüştürür. Metin madenciliği, anlamlı kalıplar ve öngörüler çıkarmak için yapılandırılmamış metin verilerini analiz etme sürecidir [24]. Bu süreç, metinsel bilgileri kolayca analiz edilebilecek yapılandırılmış bir formata dönüştürmek için doğal dil işleme (NLP), makine öğrenimi ve istatistik tekniklerinin kullanılmasını içerir [25, 26].

Metin madenciliği süreci, büyük veri kümelerinden anlamlı bilgiler çıkarmak için bir dizi aşamadan oluşur. İlk aşamada, veriler toplanır ve temizlenir. Ardından, önişleme adımlarına geçilir; bu adımlar arasında tokenizasyon (kelime ya da cümle bazında metnin ayrılması) [19], köklenme (kelimelerin köklerine indirgenmesi) [27], lemmatization (kelimelerin anlamına dayalı olarak köklerine indirgenmesi) [28] ve durma kelimelerinin çıkarılması yer alır [29]. Sonrasında, metin verisi sayısal formatta temsil edilerek, anlamlı bilgiler çıkarılmak üzere çeşitli modeller uygulanır. Bu aşamada, topic modelleme, sınıflandırma algoritmaları veya kümelenme yöntemleri gibi teknikler kullanılabilir [30]. Yaygın olarak kullanılan algoritmalar arasında Naive Bayes, Support Vector Machines (SVM), LDA ve Word2Vec bulunur [31].

Metin madenciliği ürün incelemeleri, müşteri geri bildirimleri, haber makaleleri ve sosyal medya gönderileri gibi çeşitli şirket veri kaynaklarından anlamlı bilgi ve içgörülerin çıkarılmasını sağlar [32]. Müşteri davranışı, pazar eğilimleri, kamuoyu ve diğer önemli ticari bilgiler gibi bu bilgiler, şirketin pazarda rekabet avantajı elde etmek için daha iyi ve daha bilinçli kararlar almasına olanak tanır.

Metin madenciliğinde yapılandırılmamış metin verileri Bilgi Erişimi (BE), NLP ve Bilgi Çıkarma (BÇ) teknikleri yardımıyla analiz edilir. İlk olarak, yapılandırılmamış verilerden önemli verileri tanımlamak için bilgi erişim teknikleri kullanılır. Bu, kelimenin kök biçimine indirgendiği kök çıkarma ve metnin kelimelere ve cümlelere bölündüğü tokenizasyon gibi teknikleri içerir. Metin madenciliğinde kullanılan NLP teknikleri, metindeki konuşma bölümlerini tanımlayan konuşma kısmı etiketlemeyi, metin özetlemeyi ve bir cümlenin konusunu, fiilini ve nesnesini tanımlamak için metin ayrıştırmayı içerir. Son olarak, bilgi çıkarımı sırasında yapılandırılmış bilgi çıkarılır. Bu, metindeki belirli varlıkları tanımlamak için özellik seçimi, özellik çıkarma ve varlık çıkarma gibi alt görevleri içerir [33, 34].

2.3. Duygu Analizi

Duygu analizi, metinde ifade edilen duygu ve düşünceleri anlamak için kullanılan ve genellikle bunları olumlu, nötr veya olumsuz olarak sınıflandıran bir veri madenciliği tekniğidir [35]. Pazarlama, politika ve finans gibi alanlardaki analistler, NLP kullanarak ve bilgisayar algoritmalarının gücünden yararlanarak, duyarlılığı anlayarak yüksek değerli bilgiler elde etmek için büyük hacimli metinleri hızla işleyebilir [36].

Günümüzde duygu analizi birçok alanda uygulanmaktadır. Pazarlamaya yönelik duygu analizi, bir ürün veya marka hakkındaki müşteri geri bildirimlerini analiz etmek için kullanabilir [37]. Duygu analizi, veri madenciliği ürün incelemeleri ve sosyal medya içeriği aracılığıyla müşteri memnuniyeti ve marka sadakati hakkında bilgi sağlar. Duygu analizi aynı zamanda pazarlama kampanyalarının etkililiğinin değerlendirilmesine ve iyileştirilecek alanların belirlenmesine de yardımcı olabilir [38]. Duygu analizi, kamuoyu hakkında bilgi edinmek ve siyasi strateji ve karar alma sürecini bilgilendirmek için siyasetin her alanında kullanılır. Politika yapıcılar, duyarlılık analizini kullanarak, ideal olarak, kendi seçmenlerini olumsuz yönde etkileyen yeni ortaya çıkan eğilimleri ve sorunları belirleyebilir ve ardından durumu hafifletmek ve iyileştirmek için harekete geçebilir (Rita et al., 2023). Finans için duyarlılık analizi, piyasayı etkileyecek temel eğilimleri veya sorunları belirlemek amacıyla mali raporları, rezerv toplantılarını ve kazanç çağrılarını incelemek için duygu analizini kullanabilir. Bu bilgi, yatırım kararlarına bilgi verebilir ve bir şirketin mali sağlığı, hatta bir bütün olarak ekonomi hakkında tahminlerde bulunulmasına yardımcı olabilir [39].

Duygu analizi gerçekleştirmek için üç yaklaşım vardır. Kurala dayalı bir yaklaşım, bir metnin duygusunu belirlemek için bir dizi kural kullanmayı içerir. Örneğin, bir kural, "sevgi" kelimesini içeren herhangi bir metnin olumlu, "nefret" kelimesini içeren herhangi bir metnin ise olumsuz olduğunu belirtebilir. Metin hem "sevgi" hem de "nefret" içeriyorsa tarafsız veya bilinmiyor olarak kabul edilir [40, 41]. Duygu analizine yönelik bir makine öğrenimi yaklaşımı, eğitim verilerine dayalı makine öğrenimi algoritmalarını kullanarak bir modelin eğitilmesini içerir. Duygu analizi, olumlu ve olumsuz olmak üzere ikili bir sınıflandırma gerçekleştirir. Algoritma, her metnin duyarlılık sınıfının manuel olarak etiketlendiği geniş bir açıklamalı metin verisi topluluğu üzerinde eğitilir. Bu tür

makine öğrenimine denetimli öğrenme denir [42]. Hibrit yöntem, kurallara dayalı ve makine öğrenimine dayalı yöntemlerin her birinin artıları ve eksileri olduğundan, bazı sistemler yalnızca birini kullanmanın olumsuz yanlarını azaltmak için her iki yaklaşımı da birleştirir. Hibrit yaklaşım, belirli kelimelerin daha fazla ağırlık taşıdığı durumlarda kullanışlıdır ve aynı zamanda çok fazla jargona sahip alanlarla baş etmenin bir yoludur [43].

Makalede, duygu analizi için TextBlob kütüphanesi ve kurallara dayalı yaklaşım kullanılmıştır. Bu yaklaşım, Türkçe diline özgü zorlukları ele alabilmek adına tercih edilmiştir. TextBlob, kelimeler arasındaki ilişkileri ve bağlamı analiz ederek metnin polarite (olumlu/olumsuz) ve öznellik (nesnel/öznel) skorlarını hesaplar. Bu skorlara göre metinler sınıflandırılır [44]. TextBlob'ın kullanılması, hızlı ve etkin bir çözüm sunarken, Türkçe metinlerdeki bazı zorluklar (örneğin, dilin yapısal özellikleri veya kelime çeşitliliği) de göz önünde bulundurulmuştur. Bu zorluklar, metni daha doğru analiz edebilmek için ek önişleme adımlarıyla (örneğin, durma kelimelerinin çıkarılması ve kelime köklerinin belirlenmesi) giderilmiştir. TextBlob'ın avantajları arasında kolay kullanımı ve hızlı işlem yapabilmesi bulunurken, sınırlı bağlam anlayışı gibi dezavantajları da vardır [45]. Bu nedenle, TextBlob kullanımı, genellikle basit ve hızlı çözüm arayan durumlar için uygundur, ancak daha derinlemesine analizler için ek yöntemlere ihtiyaç duyulabilir.

2.4. Konu modelleme

Konu modelleme, büyük hacimli metin verilerinde gizli kalmış konuları veya temaları ortaya çıkarmayı amaçlayan bir metin madenciliği tekniğidir. Bu yöntem, özellikle sosyal medya, inceleme platformları ve dijital haber siteleri gibi büyük ölçekli veri kaynaklarından elde edilen metinlerin analiz edilmesinde oldukça etkilidir. Konu modelleme, kelime dağılımlarını analiz ederek birbirleriyle anlamlı bağ kuran kelime gruplarını belirler ve bu grupları "konu" olarak adlandırır. Bu konular, genellikle incelenen metnin ana temalarını yansıtır ve içeriklerin sınıflandırılması, özetlenmesi veya öneri sistemlerinin geliştirilmesi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir [46, 47].

LDA, konu modelleme alanında en yaygın kullanılan algoritmalardan biridir. LDA, veride gizli olarak var olan konuları belirlemek için kelimeler arasındaki ortak kullanımları dikkate alır. Algoritma, metin koleksiyonunun belirli bir sayıda konuya sahip olduğunu varsayar ve her bir belgenin bu konuların bir karışımından oluştuğunu öne sürer. LDA, "belge-konu" ve "konu-kelime" dağılımlarını öğrenerek, belirli kelimelerin belirli konulara ait olma olasılıklarını hesaplar [48, 49].

LDA amaç fonksiyonu denklem 1'de görülmektedir.

$$\mathcal{L}(\alpha,\beta) = \prod_{d=1}^{D} \int \left(\prod_{n=1}^{N_d} \sum_{z_{dn}} p(w_{dn}|z_{dn},\beta) p(z_{dn}|\theta_d) \right) p(\theta_d|\alpha) d\theta_d \quad (1)$$

Burada:
D: Toplam belge sayısı
N_d: d-inci belgedeki toplam kelime sayısı
z_{dn}: d-inci belgedeki n-inci kelimenin konu ataması
w_{dn}: Belgedeki gözlemlenen kelime
θ_d: Belgeye ait konu dağılımı (Dirichlet dağılımı, hiper parametre α ile kontrol edilir)
β: Konuların kelime dağılımları (Dirichlet dağılımı, hiper parametre η ile kontrol edilir)

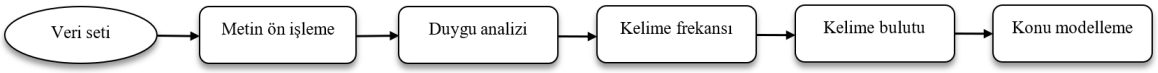
LDA'nın çalışma prensibi, Dirichlet dağılımı ile ilişkilidir; her bir belgenin çeşitli konulardan oluştuğunu ve her konunun da belirli bir kelime dağılımına sahip olduğunu varsayar. LDA, Gibbs sampling veya variational inference gibi tekniklerle tahmin edilen parametreler doğrultusunda konu dağılımlarını optimize eder. Bu sayede, herhangi bir metin koleksiyonunda her belgenin konu olasılıklarını belirler [50].

Konu sayısının belirlenmesi, LDA algoritmasının önemli bir parçasıdır. Bu sayının seçilmesi, modelin başarısı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Genellikle, konu sayısı, deneysel bir süreçle belirlenir ve topic coherence (konu tutarlılığı) gibi metrikler kullanılarak doğrulanabilir [51]. Konu sayısı hem deneme yanılma yöntemiyle hem de daha sofistike yöntemlerle optimize edilebilir. Ayrıca, LDA'nın dışında, Non-Negative Matrix Factorization (NMF) ve LSA gibi alternatif konu modelleme yöntemleri de bulunmaktadır. Bu yöntemler, bazı durumlarda LDA'dan daha iyi performans gösterebilir ve özellikle büyük veri kümelerinde daha verimli olabilirler [52].

Konu modellemesinin görselleştirilmesi, elde edilen konuları daha iyi yorumlamak için önemlidir. t-SNE veya Principal Component Analysis (PCA) gibi boyut indirgeme yöntemleri, konuların daha anlamlı bir şekilde görselleştirilmesine olanak tanır. Ayrıca, pyLDAvis gibi araçlar, LDA çıktılarının görselleştirilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu araçlar, her bir konunun kelime dağılımlarını, konular arasındaki ilişkiyi ve konu dağılımlarını görsel olarak anlamayı kolaylaştırır [53].

3. Bulgular

Çalışmada, Trendyol mobil uygulaması kullanıcı yorumları analiz edilmeden önce kapsamlı bir ön işleme ve normalleştirme süreci uygulanmıştır [54]. İlk aşamada metinler küçük harfe dönüştürülmüş, sayılar, noktalama işaretleri, özel karakterler, URL, e-posta, mention ve hashtag ifadeleri temizlenmiş, ayrıca gereksiz boşluklar giderilmiştir [55]. Ardından yorumlar kelime bazında tokenlere ayrılmış [56] ve anlam taşımayan sık kullanılan bağlaçlar, zamirler ile dilbilgisel unsurlar stop-word listeleri aracılığıyla çıkarılmıştır [57]. Bu aşamayı, kelimelerin sözlük biçimlerine indirgenmesini sağlayan lemmatizasyon ve kök ayırma adımları izlemiştir. Böylece aynı anlama sahip farklı biçimlerdeki kelimeler tek bir form altında birleştirilmiştir. Analizde unigramların yanı sıra bigramların da kullanılması, özellikle "hızlı teslimat" veya "ürün kalitesi" gibi kullanıcı deneyimini doğrudan yansıtan kalıpların korunmasına olanak tanımıştır. Daha sonra, metinlerin sayısallaştırılması için TF-IDF ağırlıkları hesaplanmış, böylece sık geçen ancak analize katkısı sınırlı kelimeler düşük ağırlık alırken, veri setine özgü ayırt edici kelimeler daha yüksek ağırlık kazanmıştır. Son aşamada elde edilen TF-IDF tabanlı belge-terim matrisi, duygu analizi ve konu modelleme süreçleri için girdi verisi olarak kullanılmıştır. Çalışmanın iş akışı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. İş akışı

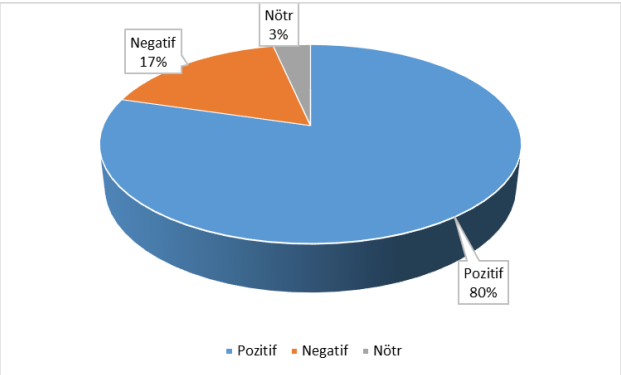
Çalışmada duygu analizi için kural tabanlı bir yöntem olarak Python'un TextBlob kütüphanesi kullanılmıştır. TextBlob, duygu analizi gerçekleştirmek amacıyla sıklıkla tercih edilen ve Doğal Dil İşleme Araç Kiti (NLTK) ile entegre çalışan bir kütüphanedir [58]. Bu araç, metin girdilerini kullanarak polarite ve öznellik gibi duygu değerlendirme ölçütlerini hesaplar. Polarite, [-1,1] aralığında bir değer alır ve -1 değeri olumsuz, +1 değeri ise olumlu bir duygu ifadesini tanımlar. Olumsuz kelimeler, cümlenin polaritesini tersine çevirebilmektedir. Ayrıca, TextBlob her cümlenin polaritesini ve öznelliğini tespit ederek duygu analizini ayrıntılı bir şekilde gerçekleştirir ve anlamsal etiketleme ile daha derin bir analiz imkânı sunar [59]. Bu nedenle, TextBlob özellikle metinlerdeki duygu yönelimini tespit etmek için uygun bir araçtır. Tablo 2'de Google Play yorumların duygu durumuna ait sayısal bilgileri görülmektedir.

Tablo 2. Duygu durumu istatistikleri

Duygu Durumu	Yorum Sayısı	Yüzdesel Değeri (%)
Pozitif	398	%79.6
Negatif	85	%17
Nötr	17	%3.4

Pozitif yorumlar, kullanıcıların ürün veya hizmetten memnun olduklarını ve beklentilerinin karşılandığını gösterir. 398 pozitif yorum, Trendyol'un müşteri memnuniyetini yüksek bir seviyede tuttuğunu ve kullanıcıların çoğunlukla olumlu deneyimler yaşadığını işaret eder. Bu durum, markanın güvenilirliğini ve kalitesini vurgulayarak müşteri memnuniyetini artırmaktadır. Negatif yorumlar, kullanıcıların yaşadığı sorunları veya memnuniyetsizlikleri ifade eder. 85 negatif yorum, toplam yorum sayısının %17'sine tekabül etmektedir. Bu oran, dikkate alınması gereken ancak alarm verici düzeyde olmayan bir orandır. Negatif yorumlar, Trendyol'un bu geri bildirimleri dikkate alarak hizmetlerini ve ürünlerini iyileştirmesi için bir fırsat sunar. Bu tür geri bildirimlerin etkin bir şekilde yönetilmesi ve çözülmesi, markanın müşteri odaklı yaklaşımını gösterir ve uzun vadede müşteri memnuniyetini olumlu etkileyebilir. Nötr yorumlar ise, kullanıcıların ne olumlu ne de olumsuz bir değerlendirme yapmadığını gösterir. Bu tür yorumlar, markanın genel hizmet standardını koruduğunu, ancak kullanıcılar üzerinde güçlü bir izlenim bırakmadığını işaret eder. 17 nötr yorum, toplam yorumların %3,4'ünü oluşturur ve genellikle müşteri memnuniyeti üzerinde belirgin bir etkiye sahip değildir. Trendyol markasının müşteri memnuniyeti, mobil

uygulama kullanıcılarının yorumlarına göre oldukça olumlu bir seviyededir. Müşteri geri bildirimlerine duyarlı olup sürekli iyileştirmeler yaparak bu memnuniyeti koruyabilir ve daha da artırabilir.



Şekil 2. Duygu durumu dağılımı

Şekil 2'de, Trendyol mobil uygulamasına yapılan yorumların %80'i pozitif, %17'si negatif, %3'ü ise nötr olarak dağılım göstermektedir. Bu dağılım, Trendyol'un müşteri memnuniyetinin yüksek olduğunu yansıtır. Pozitif yorumların yüksek oranı, kullanıcıların çoğunluğunun uygulamadan memnun kaldığını ve olumlu deneyimler yaşadığını gösterir. Negatif yorumların %17'lik oranı ise yönetilebilir seviyededir; bu yorumların dikkate alınarak yapılacak iyileştirmeler, müşteri memnuniyetini daha da artırabilir. Nötr yorumların düşük olması ise kullanıcıların uygulamaya yönelik belirgin bir görüşe sahip olduğunu ve genel memnuniyetin yüksek olduğunu işaret eder.

Bu çalışmada, sözcükler arasındaki olası bağlantıları ve örüntüleri modellemek amacıyla n-gram yöntemi kullanılmıştır. N-gramlar, bir belgedeki kelimelere göre ayrılmış tekil sözcükler veya kelime kombinasyonları olarak tanımlanır. Bir n-gram, tek bir kelimeyle sınırlı olabileceği gibi (unigram) iki veya daha fazla kelimeden de oluşabilir [60]. N-gramlar, metindeki kelimeler arasındaki bağlamsal ilişkileri ve dilsel örüntüleri yakalama açısından önemlidir. N değeri, n-gramların isimlendirilmesini belirler; örneğin, 1-gram (unigram) tek bir kelimeyi, 2-gram (bigram) iki kelimelik bir ifadeyi, 3-gram (trigram) ise üç kelimelik bir ifadeyi ifade eder [61]. Bu çalışmada, metin analizinde 2-gram (bigram) yöntemi tercih edilmiştir.

Bu çalışmada, metin madenciliği teknikleri kapsamında özellik çıkarma yöntemi olarak Terim Frekansı-Ters Belge Sıklığı (TF-IDF) kullanılmıştır. Özellik çıkarma, ham metin verilerini makine öğrenimi modellerinde kullanılabilecek sayısal özelliklere dönüştürme sürecidir. Bu süreçte yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında Kelime Çantası modeli ve TF-IDF bulunmaktadır [62]. TF-IDF, belirli bir belgedeki kelimenin diğer belgelerle karşılaştırıldığında önemini ölçmek için Terim Sıklığı (TF) ile Ters Belge Sıklığını (IDF) bir araya getirir. Bu yöntem, belgede sıkça geçen ancak genel veri kümesinde nadir olan anahtar kelimelere daha yüksek ağırlık vererek önemli ifadeleri ortaya çıkarır [63].

Tablo 3'te yorumlarda en çok geçen kelimeler görülmektedir.

Tablo 3. Kelime frekans listesi

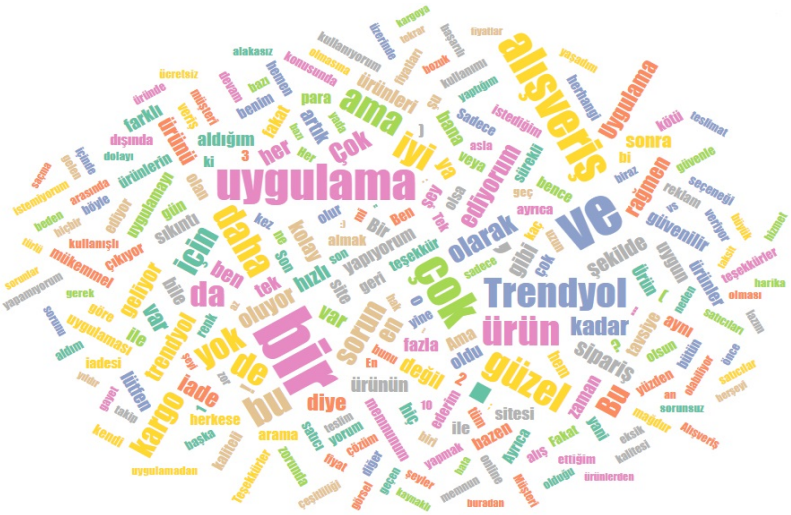
Pozitif	Negatif	Nötr
('uygulama', 117)	('alışveriş', 18)	('problem', 14)
('alışveriş', 112)	('problem', 16)	('mağaza', 14)
('iyi', 73)	('satıcı', 14)	('kargo', 12)
('kargo', 52)	('mağaza', 12)	('servis', 10)
('gönderim', 48)	('satıcı', 11)	('iade, 7)

Trendyol mobil uygulamasına yapılan kullanıcı yorumlarının analizi, uygulamanın çeşitli yönlerine dair kullanıcı memnuniyeti ve beklentilerini ortaya koymaktadır. Pozitif yorumlarda, kullanıcıların genel olarak uygulamanın işlevselliğinden, alışveriş deneyiminden ve teslimat süreçlerinden memnun kaldıkları gözlenmektedir. Olumsuz yorumlarda ise, alışveriş süreci ve satıcı kaynaklı sorunlar öne çıkmakta, bu da bazı kullanıcıların belirli hizmet alanlarında daha yüksek bir beklenti içinde olduklarını göstermektedir. Nötr yorumlar ise genellikle tarafsız gözlemler içermekte olup kargo ve iade süreçlerine dair genel değerlendirmeleri

yansıtmaktadır. Bu sonuçlar, kullanıcı deneyimini daha da iyileştirmek için uygulamanın güçlü yönlerini korumanın yanı sıra, belirli hizmet süreçlerinde iyileştirmelere gidilmesinin faydalı olabileceğini göstermektedir.

Pozitif yorumlarda geçen kelimeler, Trendyol'un güçlü yönlerini ve müşteri memnuniyetini gösterirken, negatif yorumlarda geçen kelimeler ise iyileştirilmesi gereken alanları işaret eder. Nötr yorumlarda geçen kelimeler ise genel kabul edilebilirlik seviyesini yansıtır. Bu analiz, Trendyol'un kurumsal itibarını sürdürmek ve daha da güçlendirmek için müşteri geri bildirimlerine dikkat etmesi ve gerekli iyileştirmeleri yapması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Python dilinin Seaborn kütüphanesi kullanılarak veri görselleştirme yapılmıştır. Seaborn kütüphanesi, kelime bulutları oluşturmak için kullanılır [64]. Kelime bulutları, bir metin içindeki kelimelerin sıklığına göre boyutlandırılmış kelimeler içeren görsellerdir. Bu görseller, metin içindeki önemli kelimeleri ve konuları vurgulamak için kullanılabilir [65].



Şekil 3. Pozitif yorumlara göre kelime bulutu

Şekil 3'te yer alan pozitif yorumlara dayanan kelime bulutu, kurumsal itibar açısından önemli bulgular sunmaktadır. Yorumlarda sıkça geçen "uygulama" kelimesi, kullanıcıların Trendyol'un mobil uygulamasını genel olarak beğendiğini ve olumlu değerlendirdiğini göstermektedir. Bu durum, uygulamanın kullanıcı dostu ve kolay erişilebilir olduğunu ifade etmektedir. "Alışveriş" kelimesi, kullanıcıların alışveriş deneyimlerinden memnun kaldığını ve gelecekteki alışverişlerinde Trendyol'u tercih etme olasılıklarının yüksek olduğunu işaret etmektedir. "Güzel" kelimesinin kullanımı, kullanıcıların uygulama ve alışveriş deneyimlerine duyduğu memnuniyeti vurgulamaktadır. "Ürün" kelimesi, ürün kalitesi ve çeşitliliği ile ilgili olumlu algıları yansıtırken, "kolay" ifadesi uygulamanın kullanımının basit ve kullanıcı dostu olduğunu göstermektedir. Ayrıca, "güvenilir" kelimesi, kullanıcıların Trendyol'a olan güvenini ifade ederek markanın itibarını pekiştirmektedir. "Memnun" kelimesi, kullanıcı memnuniyetinin yüksek olduğunu ve Trendyol'un müşteri odaklı çalıştığını ortaya koymaktadır. Son olarak, "hızlı" ifadesi, hızlı kargo ve teslimat hizmetlerine yönelik olumlu geri bildirimleri temsil etmekte ve bu durumun online alışverişteki rekabetçilik açısından kritik bir öneme sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Kelime bulutu bütüncül olarak değerlendirildiğinde, kullanıcıların Trendyol mobil uygulamasından genelde memnun olduklarını, uygulamanın kullanıcı dostu olduğunu, alışveriş deneyimlerinin olumlu olduğunu ve güvenilir bir platform olarak değerlendirildiğini göstermektedir. Bu, Trendyol'un kurumsal itibarını olumlu yönde etkileyen önemli bir göstergedir. Müşteri memnuniyetinin yüksek olması, olumlu kullanıcı deneyimleri ve güven duygusu, Trendyol'un dijital platformlar arasındaki rekabet gücünü artırmakta ve marka sadakatini sağlamaktadır.


alışveriş
uygulama
Trendyol
güzel
ürün
çok
bir
yok
sorun
kargo
ve
için
ama
değil
iyi
da
bu
daha
oluyor
ediyorum
rağmen
de
Bu
kadar
sipariş
ürünler
ürünü
ürünün
Uygulama
Sonra
Çok
Kolay
Ama
Fakat
Bir
Sadece
Şekilde
Ürün
Müşteri
Para
Zaman
İade
Hızlı
Bazen
Olsa
Kaç
Kargoya
Kargo
Alışveriş
Teşekkürler
Teşekkür
Güvenilir
Memnuniyet
Memnun
Hizmet
Uygulamayı
Uygulamayı
Kaliteli
Satıcı
Satıcıları
Ürünler
Ürünün
Ürünlerin
Ürünlere
Ürünleri
Ürünü
Ürünler

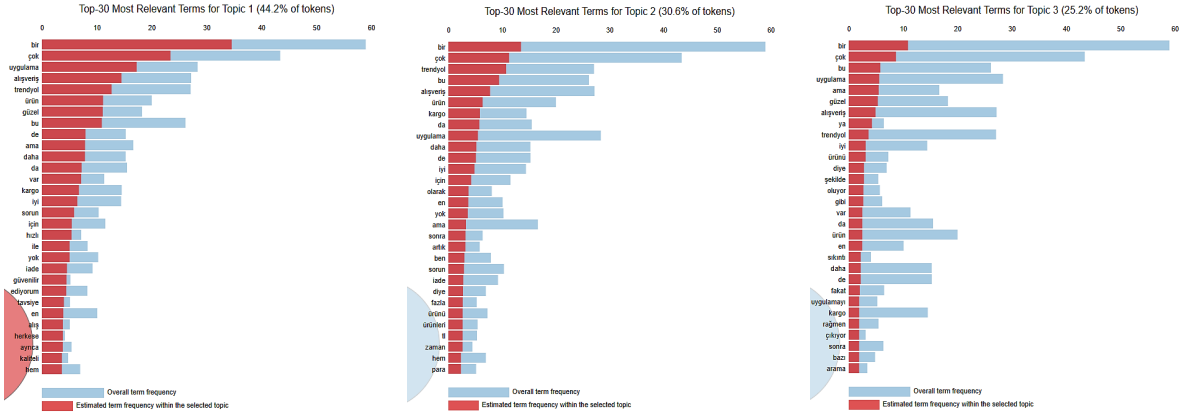
Şekil 5'teki nötr yorumlar kelime bulutu incelendiğinde, “uygulama,” “alışveriş,” “ürün,” “Trendyol,” “güzel,” ve “kargo” gibi anahtar kelimelerin sıkça kullanıldığı gözlenmiştir. Bu ifadeler, kullanıcıların yorumlarının belirli konular etrafında yoğunlaştığını ve Trendyol mobil uygulamasıyla ilgili görüşlerinin dengeli bir şekilde olumlu ve olumsuz yönlere odaklandığını göstermektedir. “Uygulama” ve “alışveriş” ifadelerinin nötr yorumlarda sıklıkla yer alması, kullanıcıların uygulamanın performansı ve alışveriş deneyimi konusunda kararsız olduklarını düşündürmektedir. Ürünlerle ilgili nötr yorumlar, kullanıcıların ürün kalitesinde çeşitlilik algıladığını, dolayısıyla beklentilerinin tam olarak karşılanmadığını ima eder. Kargo hizmetlerine yönelik nötr ifadeler ise teslimat süreçlerinin bazı kullanıcılar için yeterli olduğunu, diğerleri için ise geliştirilmesi gerektiğini yansıtmaktadır. Genel olarak, nötr yorumlar, Trendyol’un çeşitli hizmetlerinde iyileştirme potansiyeli olduğunu işaret etmekte ve marka memnuniyetini artırmak adına dikkate alınması gereken değerli geri bildirimler sunmaktadır.

Sonuç olarak Trendyol markasının; olumlu, olumsuz ve nötr yorumları düzenli olarak analiz etmesi ve kullanıcı yorumlarına yansıyan müşteri; istek, beklenti, şikâyet ve önerileri ışığında gerekli düzenlemeleri yapmaları gerekmektedir. Bu doğrultuda Trendyol'un müşteri memnuniyetini artırmak ve kurumsal itibarını güçlendirmek için uygulamanın performansını düzenli güncellemelerle iyileştirerek teknik hataları çözmek, kullanıcı dostu bir arayüz sunmak, hızlı ve güvenilir kargo teslimat hizmetleri sağlamak, iade ve para iadesi süreçlerini hızlandırmak, ürün kalitesini sürekli izlemek ve müşteri hizmetlerini güçlendirmesi gerekmektedir. Diğer yandan kullanıcı geri bildirimlerini analiz edip dikkate almak, uygun fiyatlar ve promosyonlar sunmak, kullanıcıların kolayca iletişime geçebileceği çeşitli kanallar sağlamak da önemli avantajlar sunmaktadır. Bu proaktif yaklaşımlar, uzun vadede sadık müşteri kitlesi oluşturma konusunda yardımcı olacaktır.

Yapılan analizde, Trendyol mobil uygulaması kullanıcı yorumlarını daha iyi anlamak amacıyla LDA yöntemi kullanılarak konusal modelleme gerçekleştirilmiştir. LDA, metin verisinde gizli temaları (konuları) ortaya çıkarmada etkili bir yöntem olarak tercih edilmiştir [66]. Bu çalışmada, kullanıcı yorumlarının temsili için en uygun konu sayısının üç olduğu belirlenmiştir. LDA analizinde 3 konu başlığı belirlenmesindeki konu tutarlılığı (topic coherence), konu okunabilirliği (topic readability) ve konu kapsamı (topic coverage) gibi metrikler yer almaktadır [67]. Konu tutarlılığı, bir konu altında bulunan kelimeler arasındaki semantik benzerliği ölçen bir metriktir. Yüksek bir konu tutarlılığı, aynı konuda bulunan kelimelerin anlamlı ve birbiriyle ilişkili olduğunu gösterir. Bu metrik, modelin daha anlamlı ve tutarlı konular oluşturduğunu belirlemek için kullanılabilir [68]. Konu okunabilirliği, konuların insan gözlemcileri tarafından ne kadar anlaşılır olduğunu değerlendirir. Daha okunabilir konular, daha anlaşılır ve anlamlı temalar oluşturur [69]. Konu kapsamı ise, modelin ne kadar geniş bir konu yelpazesinde bilgi sunduğunu ölçer ve tüm konuların belirli bir temaya hizmet edip etmediğini belirlemeye yardımcı olabilir [70].

Bu çalışmada kullanıcı yorumlarının tematik yapısını belirlemek için LDA yöntemi uygulanmıştır. Model, Gensim kütüphanesindeki LdaModel sınıfı ile oluşturulmuş ve parametreler özenle yapılandırılmıştır. Öncelikle, yorumların üç ana tema altında toplanabileceği öngörülerek konu sayısı (num_topics) 3 olarak belirlenmiştir. Modelin tekrar üretilebilirliğini sağlamak amacıyla rastgelelik tohumu (random_state = 42) sabitlenmiştir. Eğitim sürecinde yorumların yeterli düzeyde işlenmesi için passes = 10 olarak seçilmiş, böylece modelin kararlı sonuçlar üretmesi hedeflenmiştir. LDA’nın hiperparametrelerinden α ve η değerleri, varsayılan ayarlarda bırakılarak, veri boyutunun sınırlılığı nedeniyle aşırı uyum riski azaltılmıştır. Ön işleme aşamasında metinler küçük harfe çevrilmiş, sayılar ve noktalama işaretleri temizlenmiş, ayrıca İngilizce stop-word listesi kullanılarak gereksiz kelimeler çıkarılmıştır. Bu yapılandırma sayesinde, yorumların temsili için anlamlı konu dağılımları elde edilmiş ve analizde kullanılan üç ana başlık (genel memnuniyet, kargo süreci, ürün kalitesi) belirgin bir biçimde ortaya konmuştur.

Üç konu seçimi, yorumlardaki temaların anlamlı bir şekilde gruplandırılmasına ve önemli içeriklerin kapsamlı bir şekilde ele alınmasına olanak sağlamıştır. Bu üç konu, kullanıcıların genel memnuniyeti, kargo ve teslimat süreci ile ürün kalitesi gibi ana temaları kapsayarak, yorumların büyük çoğunluğunu temsil eden başlıca değerlendirme alanlarını yansıtmaktadır.



Şekil 6. Konu modelleme

Şekil 6'da Trendyol mobil uygulaması kullanıcı yorumlarına dayalı olarak gerçekleştirilen bir konusal modelleme analizinin sonuçlarını göstermektedir. Üç ana konu başlığı altında yapılan analizde, yorumlarda en sık kullanılan ve her bir konu için en yüksek anlam ifade eden terimlere yer verilmiştir. Konu-1, genel memnuniyet ve kullanıcı deneyimine dair ifadelerle öne çıkarken; "bir," "çok," "güzel," ve "teşekkür" gibi olumlu değerlendirilebilecek kelimeler sıklıkla kullanılmıştır. Konu-2'de kullanıcıların kargo süreci, teslimat süreleri ve hizmet kalitesi ile ilgili yorumlarının ağırlık kazandığı görülmektedir. "geç," "kargo," ve "zaman" gibi terimler, bu konu başlığında öne çıkan şikâyet unsurlarını yansıtmaktadır. Konu-3 ise ürün kalitesi ve fiyat-performans ilişkisi üzerine odaklanmakta olup, "ürün," "kalite," ve "para" gibi terimler üzerinden kullanıcıların değerlendirmelerini yansıtmaktadır. Bu sonuçlar, Trendyol mobil uygulamasına dair kullanıcı deneyimlerinin belirli başlıklar altında yoğunlaştığını ve özellikle kargo süreci ile ürün kalitesine ilişkin iyileştirmelere ihtiyaç duyulabileceğini göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışma, Trendyol mobil uygulamasındaki kullanıcı yorumlarını metin madenciliği ve duygu analizi yöntemleriyle inceleyerek, müşteri memnuniyetinin belirleyicilerini ortaya koymaya çalışmıştır. Elde edilen bulgular, benzer literatür çalışmalarının sonuçlarıyla tutarlıdır, ancak bazı önemli farklılıklar ve katkılar da içermektedir. Literatürde, e-ticaret platformlarında müşteri memnuniyetini ölçmek için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Örneğin, Liu (2012), kullanıcı yorumları ve ürün değerlendirmeleri üzerinden yapılan duygu analizi ile, ürün kalitesi ve teslimat süreçlerinin müşteri memnuniyetinde belirleyici unsurlar olduğunu belirtmiştir [71]. Bu çalışma da aynı şekilde, ürün kalitesinin ve teslimat sürelerinin Trendyol kullanıcılarının memnuniyetini şekillendiren ana faktörler olduğunu ortaya koymuştur. Kullanıcıların genel memnuniyeti, kargo süreçlerinin hızı ve ürün kalitesi gibi faktörlerin öne çıktığı gözlemlenmiştir.

Bununla birlikte, bu çalışma bazı önemli sınırlamalar ve farklılıklar içermektedir. Öncelikle analiz, yalnızca Google Play üzerinden elde edilen 500 Android kullanıcı yorumuna dayanmakta olup, iOS kullanıcılarının geri bildirimleri kapsam dışı bırakılmıştır. Literatürde, müşteri memnuniyetini daha kapsamlı bir şekilde inceleyen çalışmalarda, iOS kullanıcıları ve farklı platformlardaki yorumlar da analiz edilmiştir [72]. Google Play üzerinden yapılan incelemeler, yalnızca belirli bir kullanıcı grubunun görüşlerini yansıttığı için, sonuçların genellenebilirliği sınırlıdır. iOS ve diğer platformlardaki kullanıcı deneyimlerinin analiz edilmemesi, platformlar arası farklılıkları göz ardı etmemize yol açmıştır. E-ticaret platformlarının farklı cihazlarda sunulması, kullanıcı deneyimlerinin değişmesine neden olabileceği için, bu noktada platform çeşitliliği de dikkate alınarak daha geniş bir veri setiyle çalışma yapılması faydalı olacaktır.

Diğer bir farklılık, çalışmada kullanılan LDA yönteminin konusal modelleme için oldukça yaygın bir teknik olmasına karşın, literatürde daha gelişmiş metin madenciliği ve duygu analizi teknikleri de yer almaktadır. Blei et al. (2003)'ün önerdiği LDA yöntemi, metin verilerinden konuları çıkartmada etkili bir model olmasına karşın, daha derinlemesine duygu analizi yöntemleri kullanılarak, kullanıcı yorumlarındaki duygusal ifadeler daha ayrıntılı bir şekilde incelenebilir [11, 72]. Bu çalışma, LDA yöntemi yerine daha ayrıntılı duygu analizi yapmayı gerektirebilir, böylece kullanıcı geri bildirimlerinin duygusal boyutu daha derinlemesine incelenebilir.

Ayrıca, çalışma yalnızca belirli bir zaman dilimindeki verileri kullanmıştır. Literatürde, kullanıcı memnuniyetinin zaman içindeki değişimini izleyen çalışmalar bulunmaktadır [73]. Bu tür uzun vadeli analizler, kullanıcı memnuniyetinin zaman içinde nasıl evrildiğini ve mevsimsel değişimlerin etkisini anlamamıza yardımcı olabilir. Örneğin, özel kampanyaların veya tatil dönemlerinin kullanıcı yorumları üzerinde nasıl bir etkisi olduğu, zaman içinde değişen beklentiler ile daha net bir şekilde gözlemlenebilir. Bu nedenle, gelecekteki çalışmalar, kullanıcı yorumlarının uzun vadeli değişimini izleyerek, müşteri memnuniyetinin dinamiklerini daha kapsamlı bir şekilde inceleyebilir.

Bu çalışmanın bir diğer sınırlaması, yalnızca Android kullanıcı yorumları ile sınırlı olmasıdır. iOS ve diğer platformlar üzerinden yapılan yorumların dahil edilmesi, daha genellenebilir sonuçlar elde edilmesine katkı sağlar. Ayrıca, farklı demografik grupların (yaş, cinsiyet, gelir düzeyi gibi) memnuniyet seviyelerini incelemek, kullanıcı memnuniyetine dair daha spesifik içgörüler elde edilmesine olanak tanıyabilir. Gelecekteki araştırmalar, kullanıcı yorumlarını sadece platform bazında değil, aynı zamanda demografik özellikler veya kullanıcı segmentleri bazında analiz ederek, müşteri memnuniyetini daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirebilir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, daha geniş zaman aralıklarını ve farklı platformları (örneğin iOS App Store) kapsayan daha büyük veri setlerinin kullanılması, sonuçların genellenebilirliğini artıracaktır. Ayrıca, BERT tabanlı modeller gibi ileri düzey doğal dil işleme yöntemlerinin uygulanması, Türkçe metinlerde duygu analizinin doğruluğunu yükseltebilir. Uzun vadeli çalışmalar, müşteri memnuniyetindeki mevsimsel veya kampanya dönemlerine bağlı dalgalanmaları da ortaya çıkarabilir.

Son olarak, bu çalışmanın bulguları, Trendyol'un müşteri memnuniyetini artırmaya yönelik stratejik yaklaşımlar geliştirmesine katkı sağlayabilir. Kullanıcı yorumları üzerinden yapılan analizler, şirketlere müşteri ihtiyaçlarını anlamada ve müşteri deneyimini iyileştirmede yardımcı olabilir. Örneğin, Liu (2012), bir e-ticaret platformunun kullanıcı memnuniyetini artırmak için, hizmet kalitesini ve ürün çeşitliliğini sürekli olarak iyileştirmesi gerektiğini vurgulamıştır [71]. Bu çalışma da Trendyol'un kargo süreçlerini hızlandırması, ürün kalitesini sürekli izleyerek iyileştirmesi ve iade süreçlerini daha etkili yönetmesi gerektiği önerisini sunmaktadır. Bu tür proaktif yaklaşımlar, müşteri sadakatini artırabilir ve uzun vadede platformun itibarını güçlendirebilir.

Teşekkür

F.Y.A., fikir sahibi, M.K. analizleri gerçekleştirdi, F.Y.A. sonuçları yorumladı, F.Y.A. ve M.K., makaleyi yazdı.

Kaynaklar

[1] Boyraz C, Gençoğlu ÇN, Türüt P. Marka sadakati ile bağlanma stilleri arasındaki ilişki: Türk Sivil Havacılık sektörü üzerine bir araştırma modeli önerisi. Hum Factors Aviat Aerosp 2024; 1(1): 42-55. https://doi.org/10.26650/hfaa.2024.1468721

[2] Akkan MM. Pazarlama ve lojistik ilişkisine yönelik kavramsal bir inceleme: pazarlama lojistiği. J Econ Financ Res 2022; 4(2): 201-229. https://doi.org/10.56668/jefr.1120235

[3] Kim HB, Kim WG, An JA. The effect of consumer-based brand equity on firms' financial performance. J Consum Mark 2003; 20(4): 335-351. https://doi.org/10.1108/07363760310483694

[4] Sun H, Zafar MZ, Hasan N. Employing natural language processing as artificial intelligence for analysing consumer opinion toward advertisement. Front Psychol 2022; 13: 856663. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.856663

[5] Wankhade M, Rao ACS, Kulkarni C. A survey on sentiment analysis methods, applications, and challenges. Artif Intell Rev 2022; 55(7): 5731-5780. https://doi.org/10.1007/s10462-022-10144-1

[6] Lghaouch EM, et al. Enhancing sentiment analysis through topic modelling: comprehensive overview. In: Industry 5.0 and Emerging Technologies: Transformation Through Technology and Innovations. 2024. pp. 161-179. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70996-8_8

[7] Anderson EW, Fornell C, Lehmann DR. Customer satisfaction, market share, and profitability: Findings from Sweden. J Mark 1994; 58(3): 53-66. https://doi.org/10.1177/002224299405800304

[8] Hennig-Thurau T, et al. Electronic word-of-mouth via consumer-opinion platforms: what motivates consumers to articulate themselves on the internet? J Interact Mark 2004; 18(1): 38-52. https://doi.org/10.1002/dir.10073

[9] Hu M, Liu B. Mining and summarizing customer reviews. In: Proceedings of the Tenth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2004. https://doi.org/10.1145/1014052.1014073

[10] Pang B, Lee L. Opinion mining and sentiment analysis. Found Trends Inf Retr 2008; 2(1-2): 1-135. https://doi.org/10.1561/1500000011

[11] Blei DM, Ng AY, Jordan MI. Latent Dirichlet Allocation. J Mach Learn Res 2003; 3: 993-1022.

[12] Boyd-Graber J, Hu Y, Mimno D. Applications of topic models. Found Trends Inf Retr 2017; 11(2-3): 143-296. https://doi.org/10.1561/1500000030

[13] Schivinski B, Dabrowski D. The effect of social media communication on consumer perceptions of brands. J Mark Commun 2016; 22(2): 189-214. https://doi.org/10.1080/13527266.2013.871323
[14] He W, Zha S, Li L. Social media competitive analysis and text mining: A case study in the pizza industry. Int J Inf Manage 2013; 33(3): 464-472. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2013.01.001
[15] Liu B. Sentiment analysis: Mining opinions, sentiments, and emotions. Cham, Switzerland: Nota, 2022.
[16] Karamanli E. Makine öğrenmesi algoritmaları kullanarak, metin madenciliği ve duygu analizi ile müşteri deneyiminin geliştirilmesi. MSc, Sosyal Bilimler Enstitüsü, 2019.
[17] Sezgin M, Duman A. Elektronik ağızdan ağıza pazarlama kapsamında konaklama işletmelerine yönelik çevrimiçi yorumların duygu analizi yöntemiyle incelenmesi: Alanya örneği. Turk Turizm Arastirmalari Derg 2023; 7(2): 244-265. https://doi.org/10.26677/TR1010.2023.1240
[18] Demirbilek M, Demirbilek SÖ. Google yorumları üzerinden makine öğrenme yöntemleri ve amazon comprehend ile duygu analizi: İç Anadolu'da bir üniversite örneği. Univ Arastirmalari Derg 2023; 6(4): 452-461. https://doi.org/10.32329/uad.1383794
[19] Tuzcu S. Çevrimiçi kullanıcı yorumlarının duygu analizi ile sınıflandırılması. ETDUAM Bilisim Derg 2020; 1(2): 1-5.
[20] Kılıçer S, Şamlı R. E-ticaret sitelerindeki Türkçe ürün yorumları üzerine makine öğrenmesi algoritmaları ile duygu analizi. Veri Bilimi 2023; 6(2): 15-23.
[21] Yılmaz F, Adalı GK. Metin Madenciliği yaklaşımı ile e-ticaret sitesi uygulamalarının müşteri yorumlarına yönelik duygu analizi. Fenerbahçe Univ Sos Bilim Derg 2024; 4(2): 57-75. https://doi.org/10.58620/fbujoss.1558727
[22] Trendyol. Biz Kimiz. 2024 [cited 2024 15.10.2024]; Available from: https://www.trendyol.com/aboutus
[23] GooglePlay. Yorumlar. 2024 [cited 2024 16.06.2024]; Available from: https://play.google.com/store/search?q=trendyol&c=apps
[24] Talib R, et al. Text mining: techniques, applications and issues. Int J Adv Comput Sci Appl 2016; 7(11): 414-418. https://doi.org/10.14569/IJACSA.2016.071153
[25] Kayakuş M, Yiğit Açıkgöz F. Classification of news texts by categories using machine learning methods. Alphanumeric J 2022; 10(2): 155-166. https://doi.org/10.17093/alphanumeric.1149753
[26] Joshi AK. Natural language processing. Science 1991; 253(5025): 1242-1249. https://doi.org/10.1126/science.253.5025.1242
[27] Doğuc O. Twitter verisi ile doğal afet müdahale süreci için karar destek uygulaması. Afet Risk Derg 2022; 5(2): 408-419. https://doi.org/10.35341/afet.1144350
[28] Pant VK, Sharma R, Kundu S. An overview of stemming and lemmatization techniques. Adv Netw Intell Comput 2024: 308-321. https://doi.org/10.1201/9781003430421-31
[29] Şahin H, et al. Sağlık kuruluşlarının kurumsal itibarının metin madenciliği ve duygu analizi ile değerlendirilmesi. Mehmet Akif Ersoy Univ J Soc Sci Inst 2024; 40: 91-104. https://doi.org/10.20875/makusobed.1500054
[30] Alhawarat M, Hegazi M. Revisiting k-means and topic modelling, a comparison study to cluster Arabic documents. IEEE Access 2018; 6: 42740-42749. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2852648
[31] Kayan F, et al. Analysing sustainability and green energy with artificial intelligence: A Turkish English social media perspective. Sustainability 2025; 17(5). https://doi.org/10.3390/su17051882
[32] Kayakuş M, Yiğit Açıkgöz F. Twitter'da makine öğrenmesi yöntemleriyle sahte haber tespiti. Abant Sos Bilim Derg 2023; 23(2): 1017-1027. https://doi.org/10.11616/asbi.1266179
[33] Adnan K, Akbar R. An analytical study of information extraction from unstructured and multidimensional big data. J Big Data 2019; 6(1): 1-38. https://doi.org/10.1186/s40537-019-0254-8
[34] Gupta S, Gupta S. Natural language processing in mining unstructured data from software repositories: A review. Sādhanā 2019; 44(12): 244. https://doi.org/10.1007/s12046-019-1223-9
[35] Hemmatian F, Sohrabi MK. A survey on classification techniques for opinion mining and sentiment analysis. Artif Intell Rev 2019; 52(3): 1495-1545. https://doi.org/10.1007/s10462-017-9599-6
[36] Sharma S, Jain A. Role of sentiment analysis in social media security and analytics. Wiley Interdiscip Rev Data Min Knowl Discov 2020; 10(5): e1366. https://doi.org/10.1002/widm.1366
[37] Grljević O, Bošnjak Z. Sentiment analysis of customer data. Strateg Manag 2018; 23(3). https://doi.org/10.5937/StraMan1803038G
[38] Kauffmann E, et al. Managing marketing decision-making with sentiment analysis: An evaluation of the main product features using text data mining. Sustainability 2019; 11(15): 4235. https://doi.org/10.3390/su11154235
[39] Sohangir S, et al. Big Data: Deep Learning for financial sentiment analysis. J Big Data 2018; 5(1): 1-25. https://doi.org/10.1186/s40537-017-0111-6
[40] Asghar MZ, et al. RIFT: A rule induction framework for Twitter sentiment analysis. Arab J Sci Eng 2018; 43(2): 857-877. https://doi.org/10.1007/s13369-017-2770-1
[41] Yenkikar A, Babu N, Sangve S. R-SA: A Rule-based Expert System for Sentiment Analysis. In: IEEE Pune Section Int Conf (PuneCon); 2019. IEEE. https://doi.org/10.1109/PuneCon46936.2019.9105682
[42] Kabir M, et al. An empirical research on sentiment analysis using machine learning approaches. Int J Comput Appl 2021; 43(10): 1011-1019. https://doi.org/10.1080/1206212X.2019.1643584
[43] Liu Q, Hagenmeyer V, Keller HB. A review of rule learning-based intrusion detection systems and their prospects in smart grids. IEEE Access 2021; 9: 57542-57564. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3071263

[44] Fadhli I, Hlaoua L, Omri MN. Sentiment analysis csam model to discover pertinent conversations in twitter microblogs. Int J Comput Netw Inf Secur 2022; 10(5): 28. https://doi.org/10.5815/ijcnis.2022.05.03
[45] Kaur G, et al. Sentiment polarity analysis of love letters: evaluation of TextBlob, Vader, flair, and hugging face transformer. Comput Sci Inf Syst 2024; 40-40.
[46] Murshed BAH, et al. Short text topic modelling approaches in the context of big data: taxonomy, survey, and analysis. Artif Intell Rev 2023; 56(6): 5133-5260. https://doi.org/10.1007/s10462-022-10254-w
[47] Lee H, Kang P. Identifying core topics in technology and innovation management studies: A topic model approach. J Technol Transf 2018; 43: 1291-1317. https://doi.org/10.1007/s10961-017-9561-4
[48] Jelodar H, et al. Latent Dirichlet allocation (LDA) and topic modelling: models, applications, a survey. Multimed Tools Appl 2019; 78: 15169-15211. https://doi.org/10.1007/s11042-018-6894-4
[49] Bastani K, Namavari H, Shaffer J. Latent Dirichlet Allocation (LDA) for topic modelling of the CFPB consumer complaints. Expert Syst Appl 2019; 127: 256-271. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.03.001
[50] Onan A, Korukoglu S, Bulut H. LDA-based topic modelling in text sentiment classification: An empirical analysis. Int J Comput Linguist Appl 2016; 7(1): 101-119.
[51] Maier D, et al. Applying LDA topic modelling in communication research: Toward a valid and reliable methodology. In: Computational Methods for Communication Science. Routledge, 2021. pp. 13-38.
[52] Vangara R, et al. Finding the number of latent topics with semantic non-negative matrix factorization. IEEE Access 2021; 9: 117217-117231. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3106879
[53] Tripathy BK, Sundareswaran A, Ghela S. Unsupervised learning approaches for dimensionality reduction and data visualization. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2021. https://doi.org/10.1201/9781003190554
[54] Khyani D, et al. An interpretation of lemmatization and stemming in natural language processing. J Univ Shanghai Sci Technol 2021; 22(10): 350-357.
[55] Chai CP. Comparison of text preprocessing methods. Nat Lang Eng 2023; 29(3): 509-553. https://doi.org/10.1017/S1351324922000213
[56] Angiani G, et al. A comparison between preprocessing techniques for sentiment analysis in Twitter. KDWeb 2016; 1748: 1-11.
[57] Sarica S, Luo J. Stopwords in technical language processing. PLoS One 2021; 16(8): e0254937. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254937
[58] Raut P, et al. Sentiment Analysis of Twitter. Int J Res Appl Sci Eng Technol 2022; 10(12): 621-627. https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.47954
[59] Abubakar B, Uppin C. A natural language processing approach to determine the polarity and subjectivity of iPhone 12 twitter feeds using TextBlob. Open J Phys Sci 2021; 2(2): 10-17. https://doi.org/10.52417/ojps.v2i2.276
[60] Shirakawa M, Hara T, Nishio S. IDF for word n-grams. ACM Trans Inf Syst 2017; 36(1): 1-38. https://doi.org/10.1145/3052775
[61] Ojo O, et al. Performance study of n-grams in the analysis of sentiments. J Niger Soc Phys Sci 2021: 477-483. https://doi.org/10.46481/jnsps.2021.201
[62] Ahuja R, et al. The impact of features extraction on the sentiment analysis. Procedia Comput Sci 2019; 152: 341-348. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.05.008
[63] Qaiser S, Ali R. Text mining: use of TF-IDF to examine the relevance of words to documents. Int J Comput Appl 2018; 181(1): 25-29. https://doi.org/10.5120/ijca2018917395
[64] Mendez KM, et al. Toward collaborative open data science in metabolomics using Jupyter Notebooks and cloud computing. Metabolomics 2019; 15: 1-16. https://doi.org/10.1007/s11306-019-1588-0
[65] Villarroel Ordenes F, Zhang S. From words to pixels: text and image mining methods for service research. J Serv Manag 2019; 30(5): 593-620. https://doi.org/10.1108/JOSM-08-2019-0254
[66] Çaylak PÇ, et al. Analysing online reviews consumers' experiences of mobile travel applications with sentiment analysis and topic modelling: The example of Booking and Expedia. Appl Sci 2024; 14(24): 11800. https://doi.org/10.3390/app142411800
[67] Newman D, et al. Automatic evaluation of topic coherence. In: Human Language Technologies: NAACL 2010. 2010.
[68] Aletras N, Stevenson M. Evaluating topic coherence using distributional semantics. In: Proc 10th Int Conf Comput Semantics (IWCS 2013). 2013.
[69] Smith CA, et al. Beyond readability: Investigating coherence of clinical text for consumers. J Med Internet Res 2011; 13(4): e1842. https://doi.org/10.2196/jmir.1842
[70] Lu Y, Mei Q, Zhai C. Investigating task performance of probabilistic topic models: an empirical study of PLSA and LDA. Inf Retr 2011; 14: 178-203. https://doi.org/10.1007/s10791-010-9141-9
[71] Liu B. Sentiment analysis and opinion mining. Cham, Switzerland: Springer, 2022.
[72] Wang Y, et al. How does social support promote consumers' engagement in the social commerce community? The mediating effect of consumer involvement. Inf Process Manag 2020; 57(5): 102272. https://doi.org/10.1016/j.ipm.2020.102272
[73] Hu N, Zhang J, Pavlou PA. Overcoming the J-shaped distribution of product reviews. Commun ACM 2009; 52(10): 144-147. https://doi.org/10.1145/1562764.1562803

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 853-861, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1727670

AFAD Yönetim Döngüsünün Depreme Uyarlanarak Riskleri Azaltmadaki Etkisinin ANP Yöntemi ile Analizinin Yapılması, Sağlık ve Güvenliğe Etkisinin Yorumlanması

Güler AKSÜT[1*]
[1]İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Uşak Üniversitesi, Uşak, Türkiye
[*1] guleraksut@hotmail.com.

(Geliş/Received: 26/06/2025 Kabul/Accepted: 16/09/2025)

Öz: Türkiye, kuzeyde Avrasya levhası ile güneyde kuzeybatı ve kuzeye hareket eden Arabistan ve Afrika levhaları arasında yer almaktadır. Ülkemizde levha içi aktif fayların sebep olduğu çok sayıda deprem meydana gelmektedir. Hasara ve can kayıplarına neden olabilen depremlerin büyüklükleri ise beş ve daha büyük olanlardır. Yapılan bu çalışma da doğal afetler arasında en zararlı ve felaketli doğa olayı olan depremlerin önlenmesine engel olunmasa da proaktif yaklaşım sergileyerek çalışanların ve toplumun diğer kesiminin sağlık ve güvenliklerini sağlamada etkili olması amacıyla yapılmıştır. Çalışmada ANP yöntemi kullanılmıştır. Afet yönetim döngüsünde yer alan azaltma, hazırlık, müdahale ve iyileştirmeden oluşan birbirine bağlı faaliyetleri kriter olarak belirlenerek bu kriterlerin birbiri ve alt kriterler içerisindeki ilişkileri dikkate alınarak uzman görüşleri doğrultusunda önem ağırlıkları belirlenmiştir. En yüksek ağırlığı 0,186417 ile risk değerlendirme oluşturmuştur. Yapılan çalışma afet yönetim planının uygulanmasında önceliklerin belirlenmesiyle depremin neden olduğu sağlık, güvenlik, sosyal, ekonomik ve çevresel kayıp ve zararların etkilerini azaltmaya veya önlemeye katkı sağlayacaktır.

Anahtar kelimeler: Sağlık ve güvenlik, deprem, ANP.

Analysis of the Effect of AFAD Management Cycle on Reducing Risks by Adapting to Earthquake with ANP Method and Interpretation of its Effect on Health and Safety

Abstract: Türkiye is located between the Eurasian plate in the north and the Arabian and African plates in the south, which move northwest and north. Many earthquakes caused by active intraplate faults occur in our country. Earthquakes that can cause damage and loss of life are those with magnitudes five and greater. This study was carried out with the aim of not preventing earthquakes, which are the most harmful and disastrous natural events among natural disasters, but to be effective in ensuring the health and safety of employees and other parts of society by taking a proactive approach. ANP method was used in the study. The interconnected activities of reduction, preparation, intervention and recovery in the disaster management cycle were determined as criteria and the relationships between these criteria and the sub-criteria were taken into account and their importance weights were determined in line with expert opinions. Risk assessment had the highest weight of 0.186417. The study will contribute to reducing or preventing the effects of health, security, social, economic and environmental losses and damage caused by the earthquake by determining the priorities in the implementation of the disaster management plan.

Key words: Health and safety, earthquake, ANP.

1. Giriş

Depremler, Yerkabuğunun kırılması neticesinde meydana gelen enerjinin sismik dalgalar halinde yayılarak yüzey kırılması, yer sarsıntısı, yapılara ve insan yerleşimlerinde potansiyel hasara neden olan jeolojik olaylardır [1]. Öngörülemeyen yapıları ve potansiyel olarak yıkıcı sonuçları nedeniyle dünya çapında mağduriyete sebebiyet verir [2]. Depremler önlenebilir olmasa da erken tahmin, daha dayanıklı altyapı ve acil durum hazırlığı gibi önlemlerle felaketle ilişkili ölümleri ve yaralanmaları azaltılabilir. Bu nedenle, beklenmeyeni öngörmek ve en kötü senaryolarla başa çıkmaya hazır olmak önemlidir. Aynı derecede önemli olan, felaketler meydana geldiğinde gereken hızlı müdahaledir; bu, can kaybını ve yaralanmaların ciddiyetini önemli ölçüde azaltabilir [3].

Birbirine bağlı önleme, hazırlık, müdahale ve iyileştirme aşamalarından oluşan afet yönetim döngüsü faaliyetlerinin bir sürekliliği vardır [4]. Tehlike kaynaklı potansiyel hasarı azaltmak ve önlemek, afet mağdurlarına gerekli yardımı hızlıca ulaştırmak, etkili ve süratli bir iyileşme sağlamak afet yönetiminin hedeflerindendir [5].

Ülkemizin jeopolitik konumu göz önüne alındığında özellikle deprem gibi insan hayatını ciddi boyutlarda etkileyen bir afet karşısında işverenlerin çalışanların iş sağlığı ve güvenliğini sağlamak adına yapması gereken birtakım yükümlülükleri de vardır [6]. Sadece afet müdahale ve kurtarma aşamalarına (yani afet kriz yönetimi) odaklanılması azaltma ve hazırlık aşamalarına (yani afet risk yönetimi) yeterli özen ve dikkat gösterilmemesi

* Sorumlu yazar: guleraksut@hotmail.com. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-3637-1335

Türkiye'de bugüne kadar farklı sorunlara yol açmıştır [7]. Yapılan çalışma da afet yönetim döngüsünde yer alan azaltma, hazırlık, müdahale ve iyileştirmeden oluşan birbirine bağlı faaliyetleri kriter olarak belirleyip bu kriterlerin birbiri ve alt kriterler içerisindeki ilişkileri dikkate alınarak her bir kriterin önem ağırlığı belirlenerek gerek çalışanların gerekse halkın ölüm ve yaralanma riskinin önlenmesi ya da azaltılması hedeflenmiştir.

Literatürde deprem afetinin yönetim döngüsü aşamaları ile ilgili yapılmış çalışmalar mevcuttur.

Caymaz vd., [7] çalışmalarında kapsamlı ve stratejik düzeyde uygun bir afet yönetim modelini Birleşmiş Milletler Afet Riskini Azaltma Ofisi standartlarına uygun olarak hazırlayarak gereksiz can kayıplarını, ulusal ve kişisel varlık ve mülklere verilen zararı önlemeyi hedeflemişlerdir. Wang ve Wei [8] depremi algılamak için minimum maliyetli bir dedektör tasarlamayı hedeflemişlerdir. Zhang vd., [9] araştırmalarında arama kurtarma ekibi yerine çökmüş binalara yiyecek, su, iletişim sistemi vb malzemeleri ulaştırmaları için robot kullanılması üzerine çalışmışlardır. Auclair vd. [10] çalışmalarında 11 farklı ülkeden 104 Kentsel Arama ve Kurtarma ekibi üyesinin katıldığı bir anketin sonuçlarını kullanarak bir deprem erken uyarı sisteminin, kurtarma ekiplerinin artçı şokların neden olduğu harabelerin çökmesi nedeniyle korunma ihtiyaçlarının ne ölçüde karşılanabileceğini belirlemek üzere yapılandırmışlardır. Kasnesis vd. [11] çalışmalarında, giyilebilir bir cihaz, bir baz istasyonu, bir mobil uygulama ve bir bulut tabanlı altyapı içeren derin öğrenme destekli bir uygulamayla enkaz altında kalan kişilerin tespit edilmesini amaçlamışlardır. Ahmadi vd. [12] çalışmalarında deprem müdahale ortamında kurtarma ekiplerinin sağlam tahsisi ve rotası için iki aşamalı bir yaklaşımla yeni bir karar destek çerçevesi sunmuşlardır. Huu vd. [13] acil durumlarda kurtarmayı kontrol etmek için robotik kol sistemi tasarlamışlardır. Adıgüzel [14] lojistik sektöründeki yapay zekâ teknolojisi alanının ekonomik katkılarını ve afet lojistiğinde yapay zekâ kullanım alanlarını araştırmışlardır. De Donato vd. [15] çalışmalarında deprem durumunda kurtarma operasyonları sırasında kişilerin tespiti ve yerinin belirlenmesini desteklemek için SAFE ICT Platformunun kavramsallaştırılması, tasarımı, geliştirilmesi ve değerlendirilmesi hakkında bilgi vermişlerdir. Zaker vd. [16] deprem sonrası etkili afet yönetimi için doğru bina hasar değerlendirmesinin kritik rolünü vurgulamışlardır. Çalışma, arama ve kurtarma çabaları için öncelikleri belirleme ve acil durum kaynaklarını tahsis etme gibi afet yönetim planlarına önemli ölçüde katkıda bulunacaktır. Li ve Zhao [17] çalışmalarında deprem arama ve kurtarma robotlarının performansını değerlendirmek ve sıralamak için geliştirilmiş bir radar çizelgesine dayalı geliştirilmiş bir bulanık analitik hiyerarşi süreci önererek üstün genel performansa sahip arama ve kurtarma robotunun seçilmesini kolaylaştırmışlardır. Aydın [18] çalışmasında şehirler arasındaki mesafeye dayalı olasılıkları hesaba katan sismik riske dayalı bir çerçeve sunmuştur. Akdaş ve Eren [19] çalışmalarında, riskli bir bölgede bulunan bir ildeki deprem senaryosunu dikkate alarak, yıkım yaşanan 8 bölgeye gönderilecek 380 Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) arama kurtarma ekibinin görevlendirilmesini ayarlamışlardır. Farajkhah ve Coban [20] mevcut veri tabanlarını, varsayımları ve girdileri değerlendirerek ve sistematik planlamaya ve geliştirilmiş müdahale stratejilerine yol açan diyaloğu teşvik ederek gelecekteki arama ve kurtarma çabalarının etkinliğini artırmayı hedeflemişlerdir. Öztürk ve Kuday, [21] çalışmalarında, 2023 Kahramanmaraş depremlerine müdahale eden arama ve kurtarma görevlileri arasında İşle İlgili Stres Ölçeği'nin Türkçe versiyonunun güvenilirliğini ve geçerliliğini değerlendirmişlerdir. Yousef vd. [22] deprem sonrası hızlı müdahaleyi kolaylaştırmak için yardımcı bir deprem acil durum çerçevesi önermişlerdir. Contini ve Martins [23] araştırmalarında giyilebilir cihazlara uygulanabilir sensörleri analiz ederek, köpekler kullanılarak yapılan arama ve kurtarma operasyonları bağlamında giyilebilir bir cihazda uygulanacak operasyon, güvenilirlik ve maliyet açısından en iyi teknolojilerin tanımlanmasını sağlamayı amaçlamışlardır. Ding and Pei [24] büyük doğal afetlerden sonraki dinamik acil durum müdahale planı seçimi problemi için yenilikçi bir metodoloji sunmuşlardır.

Literatürdeki çalışmaların incelenmesi neticesinde yapılan çalışmaların daha çok arama ve kurtarmaya odaklandığı diğer aşamalara ise daha az yer verildiğine rastlanmıştır. Yapılan bu çalışma afet yönetim döngüsünde yer alan azaltma, hazırlık, müdahale ve iyileştirmeden oluşan birbirine bağlı faaliyetleri kriter olarak belirleyip bu kriterlerin birbiri ve alt kriterler içerisindeki ilişkileri dikkate alınarak her bir kriterin önem ağırlığı belirlenmiştir.

Bu çalışma deprem afetinin önceliklendirmesini sağlayarak, bir sıralama yaparak çalışan ve halkın ölüm ve yaralanma riskinin azaltılmasına, önlenmesine afet yönetim planının uygulanmasına katkı sağlayacaktır.

Çalışma planı şu şekildedir: İkinci bölüm girişi takip etmektedir ve kullanılan metot hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde çalışma uygulamasına yer verilmiştir. Dördüncü bölümde çalışmanın bulguları tartışılmıştır. Beşinci ve son bölümde ise sonuçlara yer verilmiştir.

2. Metot ve Yöntem

ANP yöntemi

Çok ölçütlü bir ölçüm teorisi olan Analitik Ağ Süreci (ANP), mutlak sayıların temel bir ölçeğine ait olan bireysel yargılardan (veya göreceli bir biçime normalleştirilmiş gerçek ölçümlerden) mutlak sayıların göreli

öncelik ölçeklerini türetmek için kullanılır. Bu yargılar, temeldeki bir kontrol kriterine göre sistemdeki üçüncü bir öğe üzerindeki ikili karşılaştırma sürecinde iki unsurdan birinin diğerine göreceli etkisini temsil eder. ANP, girişleri sütun önceliklerinin matrisleri olan süper matrisi aracılığıyla, öğe kümeleri içinde ve arasında bağımlılığın ve geri bildirimin sonucunu sentezler [25].

Dört ana adımdan oluşan ANP süreç adımları aşağıda yer almaktadır [26-27]

Adım 1. Model oluşturma ve problem yapılandırma: Problem açıkça ifade edilerek ağ gibi rasyonel bir sisteme ayrıştırılmalıdır. Yapı, beyin fırtınası veya diğer uygun yöntemlerle karar vericilerin görüşleri doğrultusunda elde edilebilir.

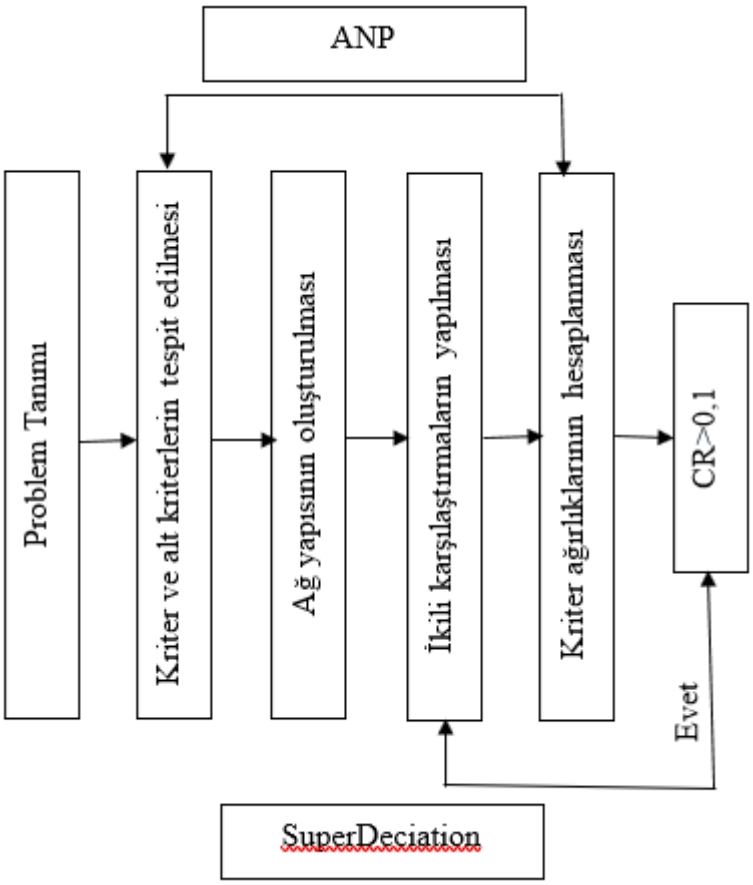
Adım 2. İkili karşılaştırma matrisleri ve öncelik vektörleri: ANP' de her bileşendeki karar öğeleri, kontrol kriterlerine göre önemlerine göre ikili olarak karşılaştırılır ve bileşenlerin kendileri de amaca katkılarına göre ikili olarak karşılaştırılır. Karar vericilerden, aynı anda iki unsurun veya iki bileşenin kendi üst düzey kriterlerine nasıl katkıda bulundukları açısından karşılaştırılacağı bir dizi ikili karşılaştırmaya yanıt vermeleri istenir.

Adım 3. Süper Matris Oluşumu ve Analiz: Birbirine bağlı etkilere sahip bir sistemde küresel öncelikleri elde etmek için, yerel öncelik vektörleri, süper matris olarak bilinen bir matrisin uygun sütunlarına girilir. Sonuç olarak, bir süper matris aslında bölümlenmiş bir matristir, burada her bir matris segmenti bir sistemdeki iki düğüm (bileşenler veya kümeler) arasındaki bir ilişkiyi temsil eder.

Adım 4. Matris tutarlılığının kontrolü: Her bir karşılaştırma matrisinin tutarlılık oranı (CR) CR<0,10 ise matris tutarlıdır. Bu şart sağlanmazsa Adım 3'e geri dönülür.

3. Bulgular

Problemin akış şeması Şekil 1'de yer almaktadır.



Şekil 1. Problemin akış şeması.

3.1. Problemin tanımlanması

Depremler**,** doğal afetler arasında yaygın yıkıma neden olan en zararlı ve felaketli doğa olaylarıdır [17]. Depremler önlenebilir olmasa da erken tahmin, daha dayanıklı altyapı ve acil durum hazırlığı gibi önlemlerle felaketle ilişkili ölümler ve yaralanmaları azaltılabilir. Bu nedenle, beklenmeyeni öngörmek ve en kötü senaryolarla başa çıkmaya hazır olmak önemlidir. Aynı derecede önemli olan, felaketler meydana geldiğinde gereken hızlı müdahaledir. Bu can kaybını ve yaralanmaların ciddiyetini önemli ölçüde azaltabilir [3]. Etkili afet yönetimi, depremlerin etkisini en aza indirmek ve depremler gibi afetlerin insan yaşamları, altyapı ve çevre üzerindeki etkisini en aza indirmeyi amaçlayan hızlı ve koordineli bir müdahale sağlamak için çok önemlidir [28]. Bir afet yönetim döngüsü önleme, hazırlık, müdahale ve iyileştirmeden oluşan birbirine bağlı faaliyetlerin bir sürekliliğidir [22]. Ancak her faaliyete gereken hassasiyetin gösterilmemesi afet yönetim sürecinde farklı sorunlara yol açmaktadır. Yapılan çalışma afet döngüsündeki sorunları önleyerek proaktif yaklaşım sergileyerek çalışanların ve toplumun diğer kesiminin sağlık ve güvenliklerini sağlamada önemli olacaktır.

3.2. Kriterlerin tanımlanması

Afet yönetim döngüsü afetten önce potansiyel bir tehlikenin neden olduğu insan ve mülk kayıplarını azaltmak, hafifletme ve hazırlık ve afetten sonra etkilenen toplulukların erken iyileşmesini ve rehabilitasyonunu sağlamak, müdahale ve iyileşmeyi sağlamak için dahil olan sürekli ve birbiriyle bağlantılı aşamaları kapsar. Bu aşamalar kriter olarak belirlenmiştir. Bu aşamalarda yer alan her bir faktör ise alt kriter olarak belirlenmiştir [29- 30, 15].

Azaltma Aşaması: Gelecekteki depremlerin etkisini azaltmaya odaklanır. Bina mevzuatını uygulama, savunmasız yapıları güçlendirme, altyapıda sismik değerlendirmeler yapma vb. gibi önlemleri kapsar.

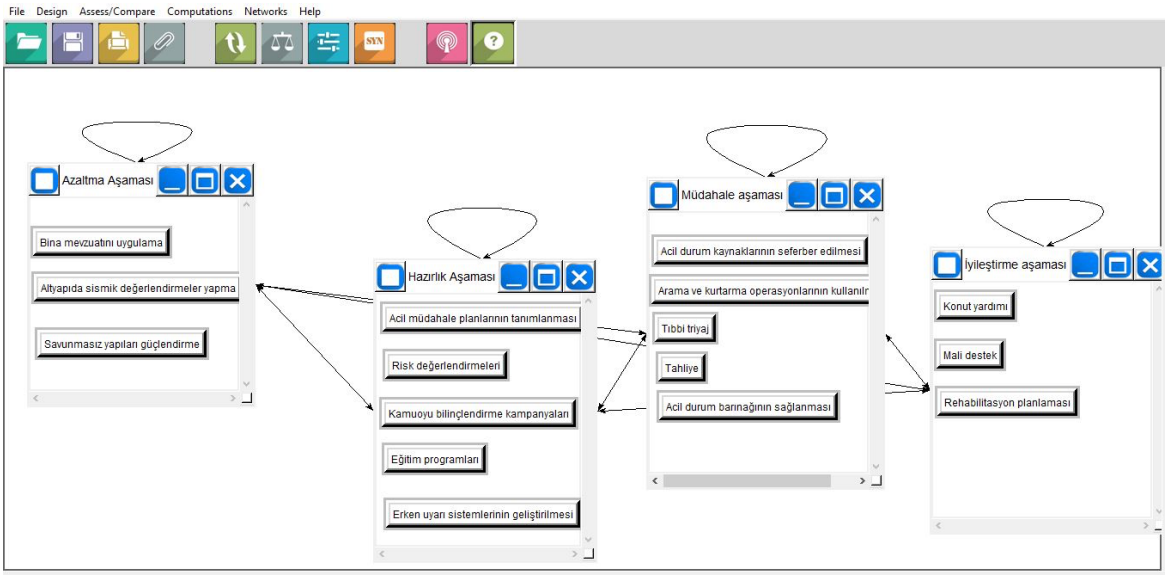
Hazırlık Aşaması: Deprem meydana geldiğinde olaya müdahalede hazırlığı artırmak için gerçekleştirilen faaliyetleri kapsar. Risk değerlendirmeleri, acil müdahale planlarının tanımlanması, eğitim programları, kamuoyu bilinçlendirme kampanyaları ve erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesini içerir.

Müdahale Aşaması: Felaketin sonuçlarını en aza indirmek için olaydan hemen sonra gerçekleşir ve acil eylemleri içerir. Arama ve kurtarma operasyonlarının kullanılmasını, acil durum kaynaklarının seferber edilmesini, tahliyeyi, tıbbi triyajı ve acil durum barınağının sağlanmasını içerir.

İyileştirme Aşaması: Temel hizmetleri yeniden kazandırmak, toplulukların hayatlarını yeniden inşa etmelerine destek olmak, hasarlı altyapıyı onarmak için müdahale faaliyetlerinden sonra başlar. İyileştirmede mali destek, konut yardımı, rehabilitasyon planlaması vb. içerebilir.

3.3. Ağ yapısının oluşturulması

Kriterlerin ağırlıkları ANP yöntemi ile hesaplanmıştır. Kriterler arasındaki bağımlılıkları gösteren ağ yapısına Şekil 2'de yer verilmiştir.

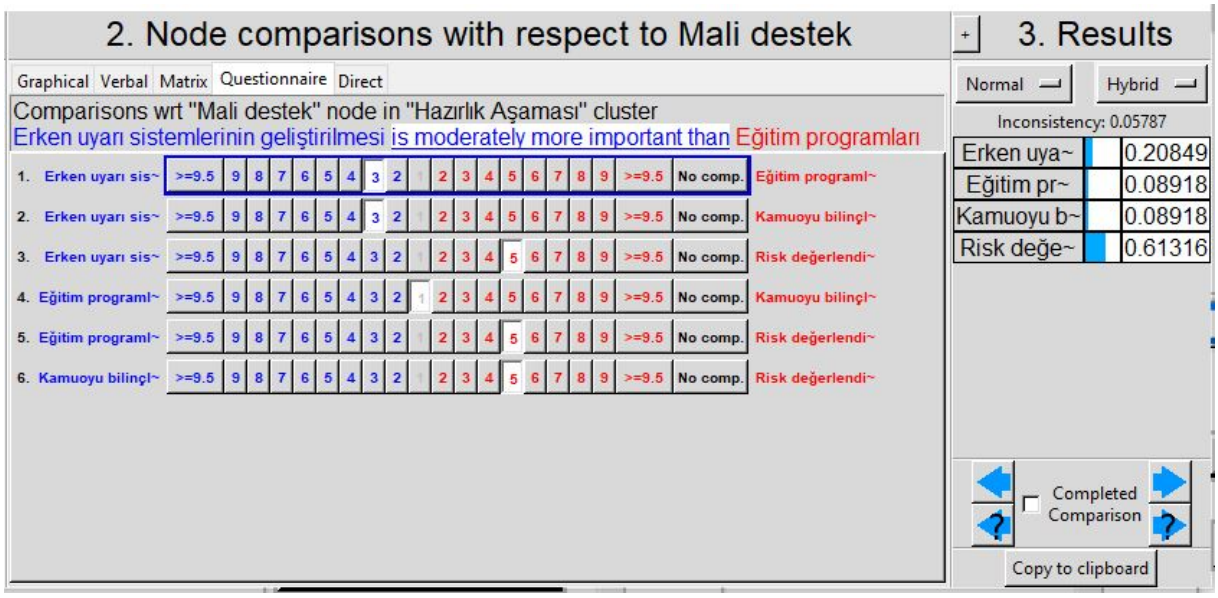


Şekil 2. ANP ağ yapısı.

İkili karşılaştırmaların yapılmasında Tablo 1' de yer alan Saaty'nin 1-9 skalası kullanılmıştır [31]. İkili karşılaştırmalar uzman görüşlerine göre yapılmıştır. Uzman grubu; İş Sağlığı ve Güvenliği dalında akademisyen, jeoloji mühendisi, A sınıfı iş sağlığı ve güvenliği uzmanı; jeoloji mühendisi C sınıfı iş sağlığı ve güvenliği uzmanı, Afet Yönetim Daire Başkanlığında görevli; Jeoloji mühendisi, Afet Yönetim Daire Başkanlığında görevli ve Afet yönetimi alanında yüksek lisans yapan alanlarında yetkin uzman ekipten oluşmuştur. Uzmanların jeoloji mühendisi, afet, sağlık ve güvenlik dalında deneyim sahibi kişilerden oluşmasına dikkat edilmiştir. Uzmanlar 4 ila 11 yıllık deneyime sahiptir. İkili karşılaştırmalar uzman karar vericinin grup kararı ile yapılmıştır. Şekil 3'te örnek ikili karşılaştırmaya yer verilmiştir. Tutarlılık oranının 0,1'den küçük olma koşulu sağlanmıştır.

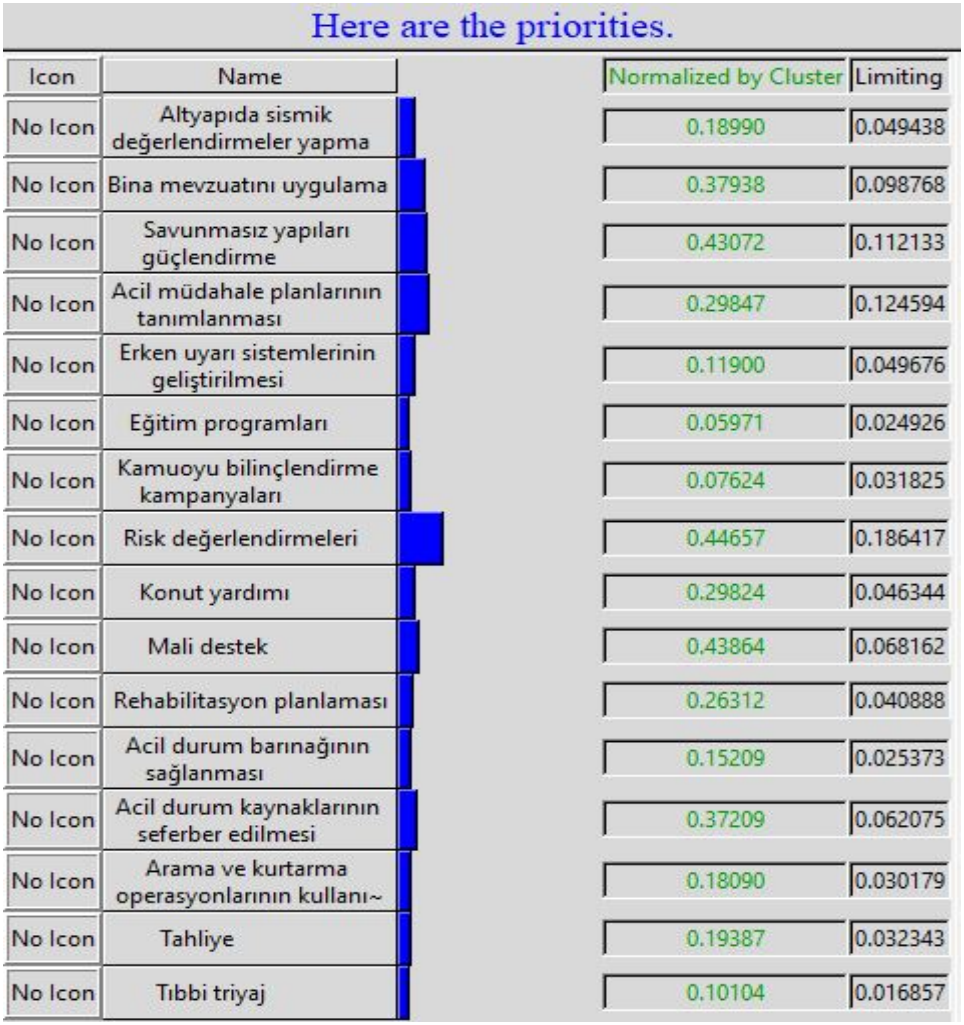
Tablo 1. Önem skala değerleri ve tanımları.

Değer	Tanım	Açıklama
1	Eşit önemli	İki seçenekte eşit derecede öneme sahip
3	Biraz önemli	Tecrübe ve yargı bir kriteri diğerine karşı biraz üstün kılmakta
5	Fazla önemli	Tecrübe ve yargı bir kriteri diğerine karşı oldukça üstün kılmakta
7	Çok fazla önemli	Bir kriter diğerine göre üstün sayılmıştır
9	Aşırı derece önemli	Bir kriterin diğerlerine göre üstün olduğunu gösteren kanıt çok büyük güvenilirliğe sahiptir
2,4,6,8	Ara değerler	Uzlaşma gerektiğinde kullanılmak üzere iki ardışık yargı arasındaki değerler



Şekil 3. İkili karşılaştırma.

Şekil 4'te ANP ile kriter ağırlıklarının hesaplanması yapılmıştır.



Şekil 4. ANP ile kriter ağırlıklarının hesaplanması.

4. Tartışma

Belirli bir ülke olan Türkiye'ye odaklanılarak yapılan çalışmada kriterlerin ağırlıklarının hesaplanmasında ANP yöntemi kullanılmıştır. Yapılan modelleme neticesinde azaltma kriterinde yer alan alt kriter ağırlıkları şu şekilde sıralanmıştır: Savunmasız yapıları güçlendirme 0,112133, bina mevzuatını uygulama 0,098768 altyapıda sismik değerlendirmeler yapma 0,049438 olarak sıralanmıştır. Sismik değerlendirme bir yapının sismik kuvvetlere dayanma kabiliyetinin değerlendirilmesini içerir. Altyapı yatırımları deprem gibi afetlerin bir şehri nasıl etkileyeceği göz önünde bulundurularak daha fazla artırılmalıdır [22]. Binaların Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde belirtilen amaç ve esaslarına uygun olarak gerekli koşulları sağlaması oldukça önem arz etmektedir.

Hazırlık kriterinde yer alan alt kriter ağırlıkları şu şekilde sıralanmıştır: Risk değerlendirmeleri 0,186417, acil müdahale planlarının tanımlanması 0,124594, erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi 0,049676 kamuoyu bilinçlendirme kampanyaları 0,031825 eğitim programları 0,024926 olarak sıralanmıştır. Risk değerlendirmeleri 0.186417 ile en yüksek ağırlığa sahip olan alt kriter olarak karşımıza çıkmıştır. Bu sonuç bize proaktif bir yaklaşımla tehlike ve risklerin önceden tespit edilerek önlemlerin alınması gerekliliği konusunda da uyarıcı niteliktedir. Bu bağlamda afet eğitimi de önem kazanmaktadır. Afet eğitimi bilgi aktarmayı, becerileri geliştirmeyi, bireylerin ve grupların savunmasızlıklarını azaltmayı motive etmeyi amaçlamaktadır. Savunmasız insanları eğitmek başkaları ve toplum üzerinde olumlu bir etki ortaya çıkarır. Afet eğitimi operasyonel, işlevsel ve uygun maliyetlidir. Aksi takdirde riske ilişkin yetersiz anlayış ve düşük farkındalık insanların hazırlığını, müdahalesini ve iyileşmesini olumsuz yönde etkileyecektir. Özellikle savunmasız insanlar için tehlikeler, savunmasızlıklar ve kapasiteler hakkında bilgi toplamak ve yaymak bir öncelik olmalıdır [5]. Uyarı sistemleri de oldukça önemlidir.

Bir deprem uyarı sistemini Android akıllı telefonlar için Google geliştirmiştir. Telefonlar bu sistem sayesinde depremin başlamadan önce sarsıntıyı algılayarak kullanıcılara uyarı göndermektedir. İnsanlar bu uyarı sayesinde deprem anına daha hazırlıklı olarak zarar görmelerini önleyebilmektedir [32].

Müdahale kriterinde yer alan alt kriter ağırlıkları şu şekilde sıralanmıştır: Acil durum kaynaklarının seferber edilmesi 0,062075 Tahliye 0,032343 Arama ve kurtarma operasyonlarının kullanılması 0,030179 Acil durum barınağının sağlanması 0,025373 Tıbbi triyaj 0,016857 olarak sıralanmıştır. Arama ve kurtarma operasyonlarında günümüz teknoloji ve modern araçları depremden hemen sonra ilk durumu değerlendirmek için büyük destek sağlamaktadır. Bunlar arasında İnsansız Hava Araçları (İHA), uzaktan algılama, sosyal medya acil durum çağrıları vb. yer almaktadır [33]. Arama ve kurtarma ekibinin çevre ve sağlık, iletişim ve bilgi, örgütsel, lojistik vb. alanda sıkıntı yaşamamaları oldukça önemlidir [34]. Bir yandan kaynakların bulunabilirliğindeki karmaşıklık, diğer yandan da mahsur kalan insanların hayatta kalma şanslarının azalması, müdahale aşamasının hayat kurtarma çabalarında zamanında kaynak tahsisinin önemini vurgulamaktadır [35]. Sosyal medya platformları ve mobil uygulamalar tahliye emirleri, müdahale çabalarının durumuna ilişkin güncellemeler ve barınak yerleri gibi kritik bilgileri halka iletmek için kullanılabilmektedir [36]. Tıbbi triyaj kurtulanlar bulunduğunda acil tıbbi müdahale sağlamak için ilk yardım sağlamayı, yaralıları sabitlemeyi ve güvenli bir şekilde tahliye edilip tıbbi profesyonellere teslim edilene kadar refahlarını sağlamak için temel tıbbi prosedürleri gerçekleştirmeyi içerir [15]. Potansiyel yaralıları hayati parametrelerine ve fiziksel durumlarına göre sınıflandırılması tıbbi ve kurtarma kaynaklarının daha iyi tahsis edilmesini sağlamada faydalı olacaktır [22].

İyileştirilme kriterinde yer alan alt kriter ağırlıkları şu şekilde sıralanmıştır: Mali destek 0.068162, Konut yardımı 0,046344 Rehabilitasyon planlaması 0,040888 olarak sıralanmıştır. İyileştirme çalışmaları; kayba uğrayan, zarar ve hasar gören varlıkları iyileştirmek; afetlere daha dirençli yapıları afet tehlikelerinden uzak alanlarda inşa etmek; yalnızca yapısal kayıpları değil ayrıca sosyal, ekonomik, kültürel ve çevresel kayıpları da gidermek; uzun vadeli bir bakış açısıyla afetten etkilenen bölgede sürdürülebilir kalkınmaya katkıda bulunmak olarak ele alınır. Türkiye Afet Sonrası İyileştirme Planı (TASİP) ile bu süreçte çok daha planlı şekilde iyileştirmede yol alacaktır [37].

5. Sonuç

Yapılan bu çalışma da doğal afetler arasında en zararlı ve felaketli doğa olayı olan depremlerin önlenmesine engel olunmasa da proaktif yaklaşım sergileyerek çalışanların ve toplumun diğer kesiminin sağlık ve güvenliklerini sağlamada etkili olması amacıyla yapılmıştır. Her bir evre bütünleşik afet yönetiminde birbirini takip ettiği gibi aynı zamanda birbirleriyle de iç içedir. Bu nedenle bir sonraki aşama bir önceki aşamada gerçekleştirilen faaliyetlerden doğrudan etkilemektedir [37]. ANP yöntemi ile yapılan bir ağ yapısı ile modellenen karar verme probleminde faktör içindeki iç bağımlılıklar ve faktörler arasındaki bağımlılıklar dikkate alınmaktadır [38]. Bu yüzden bu çalışmaya bu yöntem uygun olmuştur. Çalışma sonucunda en yüksek ağırlığı 0,186417 ile risk değerlendirme oluşturmuştur. Afetlerle mücadele de başarılı olabilmek için tehlike ve risk analizine dayandırılmış risk azaltma çalışmalarına ihtiyaç olduğu [39] da bu çalışmayla pekiştirilmiştir. Proaktif yaklaşım sergilenerek azaltma ve hazırlık aşamalarına (yani afet risk yönetimi) yeterli özen ve dikkat gösterilmesi sonraki aşamaların da başarılı olmasında etkili olarak gerek çalışanların gerekse toplumun her kesiminin sağlık güvenliklerini sağlama da etkili olacaktır.

Ülkemizde risk azaltma çalışmalarının yönetimi için Türkiye Afet Risk Azaltma Planı (TARAP) ve İl Risk Azaltma Planı (İRAP); müdahale süreci için Türkiye Afet Müdahale Planı (TAMP) ve İl Afet Müdahale Planları uygulamaya geçirilmiştir. İyileştirme sürecine ilişkin ise ulusal düzeyde rehber niteliği taşıyan Türkiye Afet Sonrası İyileştirme Planı (TASİP) ve bu kapsamda yaşanan afete özgü ve afet sonrasında kullanılmak üzere TASİP-Uygulama Planı (TASİP-UP) hazırlanmıştır [37]. Yapılan bu çalışma da bu planlarla birlikte depremin neden olduğu fiziksel, sosyal, ekonomik, çevresel zarar ve kayıpların etkilerini azaltmak veya önlemek ve depreme dirençli, hazırlıklı, güvenli ve sürdürülebilir yeni yaşam çevreleri oluşturulmasına [39], ağırlıkların sıralaması dikkate alınarak önceliklendirilmelerle katkı sunacaktır.

Yapılacak diğer çalışmalarda farklı çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak kriterler ağırlıklandırılıp alternatifler belirlenerek bu alternatiflerin sıralaması yapılabilir. Bu çalışma Türkiye ile sınırlı olup Türkiye ile başka ülkelerin kriter ağırlıkları karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılabilir.

Kaynaklar

[1] Cassidy JF. Earthquake. In Encyclopedia of natural hazards 2013;208-223). Springer, Dordrecht.

[2] Wyss M, Speiser M, and Tolis S. Earthquake fatalities and potency. Nat Hazard 2023;119(2):1091-1106.

[3] Çalışkan C, ve Özcebe H. Afetlerde Enfeksiyon Hastalıkları Salgınları ve Kontrol Önlemleri. TAF Preventive Medicine Bulletin 2013; 12(5).

[4] Coetzee C, and Van Niekerk D. Tracking the evolution of the disaster management cycle: A general system theory approach. Jàmbá: J. Disaster Risk Studies 2012; 4(1):1-9.

[5] İskender H. Establishment of modern disaster management in Turkey: operational improvements. Karadeniz Uluslararası Bilimsel Dergi 2021; (52):243-255.

[6] Demir DÇ. Depreme ilişkin iş sağlığı ve güvenliği anlamında işveren yükümlülükleri. Ankara Barosu Dergisi 81(Özel Sayı), 197-232.

[7] Caymaz E, Akyon FV, and Erenel F. A model proposal for efficient disaster management: the Turkish sample. Procedia-Social and Behavioral Sciences 2013; 99:609-618.

[8] Wang CC, and Wei GH. A Low-cost Design of Earthquake Detector with Rescue Message Deliver using Mobile Device. Proc of Eng and Technol. Innovation 2016; 2: 04-05.

[9] Zhang D, Shiguematsu YM, Lin JY, Ma YH, Al Maamari MS, and Takanishi A. Development of a hybrid locomotion robot for earthquake search and rescue in partially collapsed building. In 2019 IEEE Int. Conference on Mechatronics and Automation (ICMA) 2019, August; (pp. 2559-2564). IEEE.

[10] Auclair S, Gehl P, and Delatre M. Needs and opportunities for seismic early warning prior to aftershocks for search and rescue teams: An in-depth analysis of practitioners' perceptions. Int. J. Disaster Risk Reduct. 2021; 65:102545.

[11] Kasnesis P, Doulgerakis V, Uzunidis D, Kogias DG, Funcia SI, González MB, and Patrikakis CZ. Deep learning empowered wearable-based behavior recognition for search and rescue dogs. Sensors 2022;22(3): 993.

[12] Ahmadi G, Tavakkoli-Moghaddam R, Baboli A, and Najafi M. A decision support model for robust allocation and routing of search and rescue resources after earthquake: a case study. Oper Res. 2022; 1-43.

[13] Huu PN, Thi QN, Nam VTN, Nguyen TD, and Minh QT. Design of Robotic Arm Control Model for Rescue Applications. In 2022 Int. Conference on Advanced Computing and Analytics (ACOMPA) 2022, November; (pp. 72-79). IEEE.

[14] Adıgüzel S. Afet durumlarinda yapay zeka teknolojisi ile lojistik yönetimi örnekleri. Akademik İzdüşüm Dergisi 2022;7(1): 47-70.

[15] De Donato MC, Corradini F, Fornari F, and Re B. SAFE: An ICT platform for supporting monitoring, localization and rescue operations in case of earthquake. Internet Things 2024;27: 101273.

[16] Zaker M, Alsan HF, and Arsan T. Building Damage Assessment to Facilitate Post-Earthquake Search and Rescue Missions by Leveraging a Machine Learning Algorithm. In 2024 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU) 2024 October ; (1-5). IEEE.

[17] Li L, and Zhao Z. Comprehensive Performance Evaluation of Earthquake Search and Rescue Robots Based on Improved FAHP and Radar Chart. Appl Sci 2024;14(7):3099.

[18] Aydın NS. A seismic-risk-based bi-objective stochastic optimization framework for the pre-disaster allocation of earthquake search and rescue units. Math. Modell. and Numer. Simul. with Appl. 2024;4(3): 370-394.

[19] Akdaş E, ve Eren T. A sample application for scheduling search and rescue teams in an earthquake disaster. Sigma J. Eng Nat Sci. 2024; 42(5):1555-1562.

[20] Farajkhah SK, and Coban E. International Search And Rescue Teams In Kahramanmaraş Earthquake. In 2024 Int. Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA) (2024, May) ; 1-5). IEEE.

[21] Öztürk MH, and Kuday AD. Psychometric evaluation of the Turkish version of the Work-Related Stress Scale: A study among search and rescue workers responding to the 2023 Kahramanmaraş earthquakes. J. of Health Psychology 2024; 13591053241287675.

[22] Yousefi MH, Behnam B, and Farahani S. An auxiliary framework to facilitate earthquake search and rescue operations in urban regions. Nat Hazard. 2024;120(12): 11107-11131.

[23] Contini M S, and Martins LEG. Wearable device sensing technologies: a systematic literature review: Analysis of sensors applicable to wearable devices. Res Biomed Eng. 2024; 40(1):69-84.

[24] Ding X, and Pei Z. Post-Natural Disasters Emergency Response Scheme Selection: An Integrated Application of Probabilistic T-Spherical Hesitant Fuzzy Set, Penalty-Incentive Dynamic Attribute Weights, and Non-Compensation Approach. Information 2024; 15(12): 775.

[25] Saaty TL. Fundamentals of the analytic network process—Dependence and feedback in decision-making with a single network. J Syst Sci Syst Eng. 2004**;** 13: 129-157.

[26] Meade LM, and Sarkis JJIJ. Analyzing organizational project alternatives for agile manufacturing processes: an analytical network approach. Int J Prod Res. 1999**;** *37*(2): 241-261.

[27] Saaty TL. Decision making with dependence and feedback: The analytic network process 1996**;** (4922,2). Pittsburgh, PA, USA: RWS Publ..

[28] Khorram-Manesh A, Goniewicz K., Hertelendy A, and Dulebenets M. (Eds.). Handbook of disaster and emergency management. Kompendiet. 2021 ISBN: 978-91-527-0705-0.

[29] Coppola D. Introduction to international disaster management. Elsevier 2006.ISBN: 0-7506-7961-1.

[30] Khan H, Vasilescu LG, and Khan A. Disaster management cycle-a theoretical approach. J. Management and Marketing 2008**;** 6(1): 43-50.

[31] Saaty TL.Decision making with the analytic hierarchy process. Int J Serv Sciences 2008;1(1): 83-98.

[32] URL1, Depremden korunmak için kullanılabilecek teknolojiler, Erişim Tarihi: 3.5.2025: https://mediatrend.mediamarkt.com.tr/depremden-korunmak-icin-kullanilabilecek-teknolojiler/

[33] Hossain MS, Chaitanya K, Bhattacharya Y, Numada M, Kamal ASM M, and Meguro K.. Integration of smart watch and geographic information system (GIS) to identify post-earthquake critical rescue area part. II. Analytical evaluation of the system. Prog Disaster Sci. 2021**;** 9:100132.

[34] Kuday AD, Özcan T, Çalışkan C, ve Kınık K. Challenges faced by medical rescue teams during disaster response: a systematic review study. Disaster medicine and public health preparedness 2023**;** 17: e548.

[35] Mohamadi A, Yaghoubi S, and Pishvaee MS. Fuzzy multi-objective stochastic programming model for disaster relief logistics considering telecommunication infrastructures: a case study. Operational Research 2019**;**19:59-99.

[36] URL2, Deprem: Afet yönetiminde kullanılan önemli teknolojiler, Erişim Tarihi 1.1.2025: https://www.ekonomim.com/cozum-arenasi/deprem-afet-yonetiminde-kullanilan-onemli-teknolojiler-haberi-691327,

[37] Türkiye Afet Sonrası İyileştirme Planı. 9889 Sayılı Resmi Gazete, 2025.

[38] Dağdeviren M., Dönmez N, ve Kurt M. Bir İşletmede Tedarikçi Değerlendirme Süreci İçin Yeni Bir Model Tasarimi ve Uygulamasi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2006**;**21(2): 247-255.

[39] Türkiye Afet Risk Azaltma Planı, 31890 sayılı Resmi gazete, 2022.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 863-875, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1739022

Metal Eklemeli ve Geleneksel İmalat Yöntemleriyle Üretilen Alüminyum Profillerin Sıcaklık Davranışının Bulanık Mantık ve Yapay Zekâ Tabanlı Modellemesi

Koray ÖZSOY[1*], Bekir AKSOY[2]
[1] Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Isparta OSB MYO, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversite, Isparta, Türkiye
[2] Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversite, Isparta, Türkiye
[*1] korayozsoy@isparta.edu.tr, [2] bekiraksoy@isparta.edu.tr

(Geliş/Received: 09/07/2025; Kabul/Accepted: 07/09/2025)

Öz: Çalışmada, alüminyum ekstrüzyon profillerinin sıcaklık özellikleri üzerinde üretim teknolojilerinin etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Mevcut geleneksel imalat yöntemlerinin üretim kısıtlamalarını aşmak amacıyla, metal eklemeli imalat yöntemiyle üretilen kalıplar kullanılarak profil çıkış sıcaklıkları değerlendirilmiştir. Eklemeli imalat teknolojisinin sunduğu tasarım esnekliği sayesinde, alüminyum profillerin termal analizleri gerçekleştirilmiş ve böylece üretim teknolojisinin süreç performansı üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Çalışma kapsamında, alüminyum ekstrüzyon kalıpları hem geleneksel imalat yöntemiyle hem de EOS© tarafından sağlanan maraging çeliği (MS1) metal tozu kullanılarak Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) yöntemiyle üretilmiştir. Alüminyum profillerin termal davranışlarını belirlemek amacıyla saha testleri gerçekleştirilmiş ve profil çıkış sıcaklıkları ölçülmüştür. Elde edilen bu deneysel verilere dayanarak, hız ve üretim teknolojileri giriş değişkenleri ile çıkış değişkeni olarak sıcaklık değerleri kullanılarak bulanık mantık ve yapay zeka tabanlı bir modelleme gerçekleştirilmiştir. Bulanık mantık tabanlı model, hız ve üretim teknolojisi parametrelerine bağlı sıcaklık tahminlerinde deneysel verilerle %95'in üzerinde gerçekleşmiştir. Çalışmanın son aşamasında, bu çalışmaya özgü hazırlanan veri seti yapay sinir ağları modeli ile eğitilmiş ve elde edilen sonuçlara göre R^2 performans değerlendirme metriğinde %93 doğruluk oranına ulaşılmıştır. Sonuçlar, metal eklemeli imalat yöntemiyle üretilen kalıplar kullanılarak elde edilen alüminyum profillerin çıkış sıcaklıklarının, geleneksel imalatla üretilen profillere kıyasla daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, özellikle maraging çeliğinden üretilen kalıp bileşenlerinin termal yük altında daha uzun ömürlü olabileceğini ve kalıp verimliliğinin önemli ölçüde artırılabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, metal eklemeli imalat, geleneksel imalat, ekstrüzyon, bulanık mantık, yapay zeka, profil sıcaklığı.

Modeling the Temperature Behavior of Aluminum Profiles Produced by Metal Additive and Conventional Manufacturing Methods Using Fuzzy Logic and Artificial Intelligence

Abstract: The aim of this study is to investigate the effects of production technologies on the thermal properties of aluminum extrusion profiles. To overcome the limitations of conventional manufacturing methods, profile exit temperatures were evaluated using molds produced via metal additive manufacturing. Leveraging the design flexibility offered by additive manufacturing technology, thermal analyses of aluminum profiles were conducted, thereby revealing the influence of production technology on process performance. Within the scope of the study, aluminum extrusion molds were manufactured using both conventional methods and the Direct Metal Laser Sintering (DMLS) process, employing maraging steel (MS1) metal powder provided by EOS©. To determine the thermal behavior of the aluminum profiles, field tests were conducted, and profile exit temperatures were measured. Based on the experimental data obtained, a fuzzy logic and artificial intelligence-based model was developed, with speed and production technology as input variables and temperature as the output variable. The fuzzy logic-based model achieved more than 95% agreement with the experimental data in predicting temperatures depending on production speed and manufacturing technology parameters. In the final stage of the study, a dataset specifically prepared for this research was used to train an artificial neural network model, and the results indicated that the R^2 performance evaluation metric reached an accuracy level of 93%. The results indicate that the exit temperatures of aluminum profiles produced using molds manufactured via metal additive manufacturing are lower than those produced using conventional methods. This suggests that mold components—particularly those made of maraging steel—can exhibit longer service life under thermal loads, leading to a significant improvement in mold efficiency.

Key words: Additive manufacturing, metal additive manufacturing, conventional manufacturing, extrusion, fuzzy logic, artificial intelligence, profile temperature.

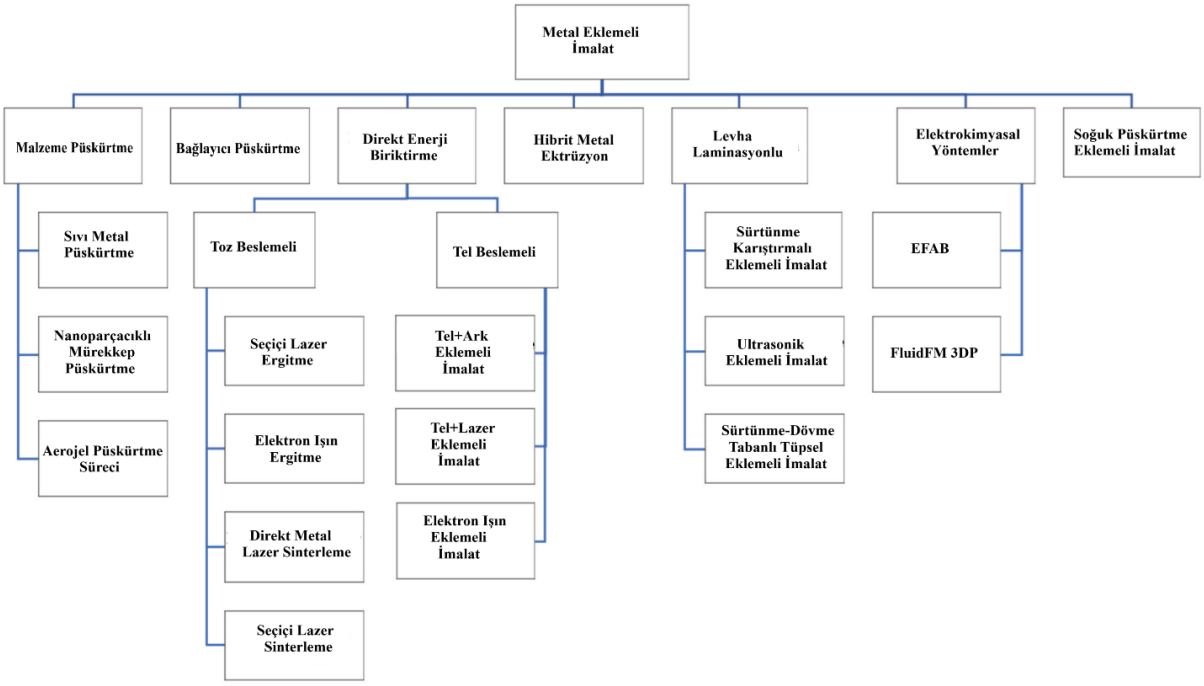
1. Giriş

Eklemeli imalat (Eİ), üç boyutlu (3B) dijital modellerden doğrudan parça elde etmek amacıyla malzemeyi katmanlar hâlinde biriktiren ve geleneksel üretim süreçlerinde karşılaşılan zorluklara çözüm sunan ileri bir üretim

[*] Sorumlu yazar: korayozsoy@isparta.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0001-8663-4466, [2] 0000-0001-8052-9411

teknolojisidir [1-3]. Son otuz yılda Eİ, prototipten seri üretime geçerek havacılık, kalıplama ve biyomedikal gibi sektörlerde kritik bir teknoloji haline gelmiştir. Birçok ülke Eİ ulusal stratejilerine entegre etmiş, bu doğrultuda araştırma enstitüleri ve politikalar geliştirerek ileri üretim teknolojilerine öncülük etmektedir [4]. Eİ, metaller, polimerler, seramikler ve kompozitler gibi çok çeşitli malzemeler üzerinde uygulanabilirliği sayesinde, neredeyse tüm malzeme türleri için uygun bir üretim teknolojisidir [5]. Lazer tabanlı eklemeli imalat (LAM) teknolojisi, yüksek enerji yoğunluğu ve hassas üretim yetenekleri sayesinde metal eklemeli imalat (MEİ) alanında baskın konuma gelmiştir [6]. LAM; lazer toz yatak füzyonu (laser powder bed fusion-LPBF) ve lazer yönlendiren enerji biriktirme (laser-directed energy deposition-LDED) olmak üzere iki ana sınıfa ayrılırken, LPBF yüksek hassasiyet ve mekanik özellikler sunarken, LDED daha büyük boyutlarda ve hızlı üretim avantajı sağlar [7-9].

MEİ, metal veya alaşımların enerji kaynağı ve malzeme biçimine göre farklılık gösteren çeşitli yöntemlerle katman katman birleştirilmesi yoluyla, karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesini sağlayan yenilikçi ve devrim niteliğinde bir üretim teknolojisidir [10]. Geleneksel üretim yöntemlerinden ayrılarak, bilgisayar destekli tasarım (CAD) modellerinden yararlanan MAM, her bir katmanın x ve y eksenlerindeki geometrisini hassas bir şekilde tanımlamaya olanak tanır. Ayrıca, ISO/ASTM 52900 standardına uygun olarak, üretim sürecinde katman kalınlıkları ihtiyaca göre esnek şekilde ayarlanabilmektedir [11]. Bu sürece yönelik yoğun ilgi, araştırmacıları yeni ve gelişmiş metal katmanlı üretim teknikleri geliştirmeye yönlendirmiş olup, bu tekniklerin sınıflandırması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Metal Katmanlı Üretim (AM) Tekniklerinin Sınıflandırılması [12].

Metal tozları, özellikle tasarım esnekliği ve üretim kabiliyeti açısından geleneksel yöntemlerin sınırlarını aşan metal Eİ süreçlerinde, lazer, elektron demeti veya plazma kaynaklı toz yataklı, toz beslemeli ve tel beslemeli sistemlerde yaygın olarak kullanılan ve sürekli çeşitliliği artan temel malzemelerdir [13]. Eİ kullanılan metal tozlarının, iyi bir yerleşim davranışı sağlamak amacıyla küresel geometriye sahip ve optimize edilmiş bir partikül boyut dağılımıyla tasarlandığı varsayılmakta olup, bu özellikler nihai parçanın yüksek yoğunluk ve üstün mekanik performans göstermesine olanak tanımaktadır [14]. Eİ teknolojilerinde kullanılmak üzere, maraging çeliği, paslanmaz çelikler, alüminyum, nikel, kobalt-krom ve titanyum alaşımları gibi çeşitli metal tozlarından oluşan yaygın malzeme türü tanımlanmıştır [15]. Maraging çeliği, Eİ teknolojilerinde kullanılan ve havacılık ile kalıpçılık sektörlerinde yaygın olarak tercih edilen ultra yüksek mukavemetli çelik sınıfına ait bir malzemedir. Fe–Ni–Co–Mo esaslı maraging çelikleri, yüksek akma mukavemeti ile kırılma tokluğunu bir arada sunan üstün mekanik özellikleri sayesinde, kritik mühendislik uygulamaları için son derece uygun bir seçenektir. Bu çeliklerin toz formu, Eİ süreçlerine başarıyla entegre edilebilmekte ve özellikle havacılık yapıları ile plastik enjeksiyon ve

ekstrüzyon kalıplarının üretiminde hem dayanım hem de hassasiyet gereksinimlerini karşılayan ideal bir malzeme alternatifi sunmaktadır [16,17].

Ekstrüzyon işlemi, metalin yüksek basınç altında bir kalıptan geçirilerek sabit kesit profiline sahip parçalar hâlinde şekillendirildiği bir metal şekillendirme yöntemidir; bu sayede, alüminyum külçenin kalıp geometrisine uygun enine kesitlere sahip ürünler elde edilme işlemidir [18]. Bu sebeple dolaylı ekstrüzyon yöntemi bir sıkıştırma prosesidir. Ekstrüzyon imalat işlemlerinde, yüksek basınçla bir kalıp boyunca itilmesi ve bu sayede kalıp çıkışında istenilen kesit geometrisine sahip sürekli bir profil elde edilmesi prensibine dayanır. İşlem sırasında uygulanan sıcaklık, basınç ve hız parametreleri, ürünün yüzey kalitesi, boyutsal hassasiyeti ve mikro yapısı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır [19]. Ekstrüzyon kalıpları yüksek sıcaklıklarda aşınma, çekme mukavemeti, tokluk, ısıl yorulma direnci, temperleme direnci özellikleri sahip olmalıdır. Bu gereksinimleri karşılamak üzere, MEİ teknolojileri, özellikle karmaşık soğutma kanalları ve özel yüzey geometrilerine sahip kalıpların hassas ve dayanıklı biçimde üretilmesine olanak tanıyarak, ekstrüzyon kalıp üretiminde yenilikçi bir çözüm sunmaktadır [20-22].

Alüminyum ekstrüzyon, çubuk, boru ve benzeri uzun profillerin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir sıcak şekillendirme işlemidir. Sıcak alüminyum kütüğü, yüksek basınçla kalıptan geçirilerek kalıp geometrisine uygun şekilde şekillendirilir. Kalıp dayanımı ile makine parametrelerinin hassas kontrolü, profil kalitesini doğrudan etkiler. Öte yandan, metal enjeksiyon kalıplarında kullanılan konformal soğutma kanalları, metal eklemeli imalatla üretilmekte ve soğutma verimini artırmak amacıyla bulanık mantık gibi yapay zekâ yöntemleriyle optimize edilmektedir [23]. Bulanık mantık, Lotfi Zadeh'in 1965'te ortaya koyduğu bulanık kümeler teorisine dayanır ve kesin olmayan bilgilerin 0 ile 1 arasında değişen üyelik dereceleriyle ifade edilmesini sağlar. Bu yaklaşım, insan düşüncesine benzer şekilde belirsizlik içeren ortamlarda akıl yürütme ve karar verme süreçlerini modellemek için geliştirilmiştir [24,25]. Bulanık mantık uygulamaları, Endüstri 4.0 kapsamında birçok sektörü etkilemektedir ve bu alanlardan biri de eklemeli imalat teknolojisidir [26]. Hua ve Choi çalışmasında, PBF alt dalı olan doğrudan metal biriktirme (DMD) süreci için tasarlanan bir bulanık mantık ile teorik olarak başarılı sonuçlar vermiştir [27]. Farshidianfar et al. çalışmasında, bulanık mantık ve yapay sinir ağlarını birleştiren ANFIS tabanlı bir denetleyiciyle lazer kaplama süreci modellenmiş ve kaplama yüksekliği başarıyla kontrol edilmiştir [28]. Li et al. çalışmasında, bulanık mantık ile tel ve ark tabanlı süreçte ergiyik biriktirme yüksekliği kontrol etmiler ve katman verilerine göre hız ayarlanarak geometrik doğruluk incelemişlerdir.[29].

Eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak son yıllarda ekstrüzyon konformal soğutma kanallarının tasarımı ve bu kanalların kalıp üretim süreçlerine entegrasyonu, üretim verimliliğinin artırılmasına yönelik dikkate değer katkılar sağlamıştır. Topoloji optimizasyonuna dayalı yöntemler, ekstrüzyon süreçlerinde kalıp yüzeylerindeki sıcaklık gradyanlarının azaltılması ve katılaşma sürelerinin kısaltılması açısından etkin ve doğrulanmış çözümler sunmaktadır [30,31]. Diğer taraftan, bulanık mantık ve yapay sinir ağları özellikle ANFIS gibi hibrit modeller, üretim süreçlerindeki belirsizliklerin yönetimi ve mekanik özellik tahminleme konusunda başarılı uygulamalar sunmuştur [32,33]. Bu bağlamda, eklemeli imalat kalıplarının hem kalıp ömrünü uzatma hem de süreç verimliliğini artırma potansiyeli, literatüre yenilikçi bir katkı olarak ortaya konulmaktadır.

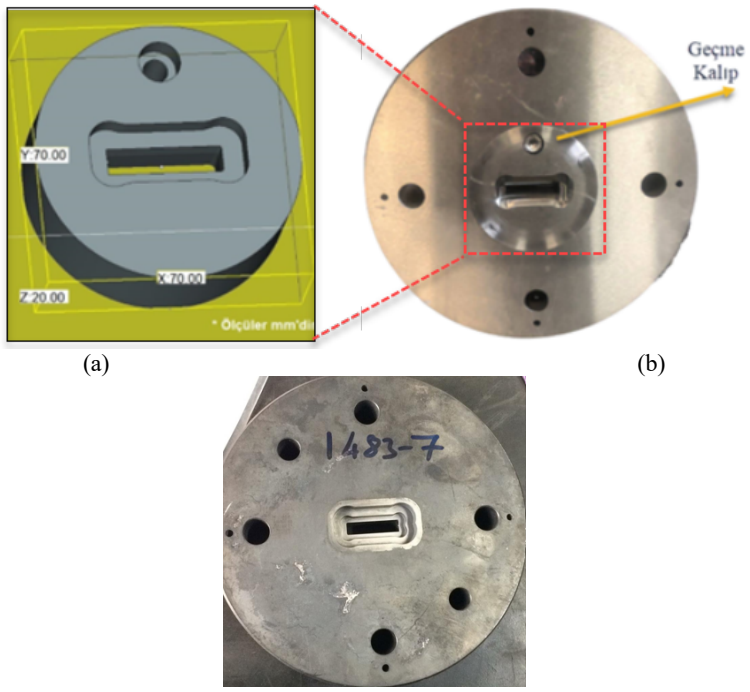
Çalışma, alüminyum ekstrüzyon kalıpları kullanılarak hem eklemeli imalat hem de geleneksel imalat yöntemleriyle üretilen alüminyum profillerin sıcaklık tahmininin bulanık mantık ve yapay zeka ile modellenmesi ile ilgilidir; hız ve üretim teknolojileri değişkenlerinin sıcaklık üzerindeki etkilerine vurgu yapmaktadır. Alüminyum ekstrüzyon profil sıcaklıklarında sıcaklık en kritik faktördür ve profilin yüzey kalitesini ve mekanik özelliklerini belirler. Çalışmada alüminyum ekstrüzyon kalıbın saha deneylerinde 1460 ABD tonluk bir ekstrüzyon presi kullanılmıştır. AA 6063 alaşım profillerinin sıcaklık değerlerini belirlemek için hız ve üretim teknolojileri giriş parametre değerlerine göre belirlenmiştir. Çalışmada, bulanık mantık ve yapay zeka tabanlı kontrol ve tahmin sistemleri kullanarak alüminyum profil sıcaklığı tahmini gerçekleştirilmiştir. Ayrıca MEİ yöntemiyle üretilen alüminyum profillerin çıkış sıcaklığının, geleneksel imalat yöntemiyle üretilen profillere kıyasla daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, özellikle maraging çeliğinden üretilmiş kalıp bileşenlerinin termal yük altında daha uzun ömürlü olabileceğini ve kalıp verimliliğinin artırılabileceğini göstermektedir. Böylece, metal eklemeli imalat ile üretilen ekstrüzyon kalıplarından elde edilen sıcaklık çıktılarının üretim endüstrisinde daha fazla ilgi görmesi beklenmektedir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada materyal olarak Maraging steel (MS1) metal toz malzemesi kullanılmıştır. Alüminyum ekstrüzyon geçme kalıp EOS M290 DMLS tezgâhında imal edilmiştir.

2.1. Materyal

Çalışmada, Şekil 2a'da gösterildiği gibi geçme kalıp parça katı modeli 70x70x20 mm boyutlarındadır. Çalışmada, EOS M290 Direkt Metal Lazer Sinterleme (Direkt Metal Laser Sintering-DMLS) cihazı ile Şekil 2b'de geometrisi verilen alüminyum ekstrüzyon geçme kalıp imalatı maraging steel metal toz malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Geçme kalıp, 0,04 mm sabit katman kalınlığı ve standart EOS üretim parametreleri ile imalatı gerçekleştirilmiştir [2]. Şekil 2c'de alüminyum ekstrüzyon kalıbın geleneksel imalat yöntemiyle üretilmiş hali verilmiştir.



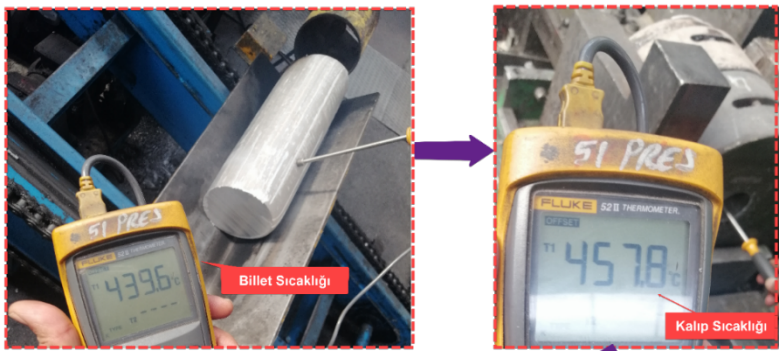
Şekil 2. Alüminyum ekstrüzyon kalıbı görüntüleri a) Kalıbın 3B katı model görüntüsü, b) MEİ yöntemiyle üretilmiş hali, c) Geleneksel imalat yöntemiyle üretilmiş hali.

2.2. Metot

2.3.1. Geleneksel İmalat Yöntemiyle Üretilen Kalıplarla Alüminyum Ekstrüzyon İşlemi

Çalışmada, alüminyum profil üretimi için geleneksel imalat yöntemiyle üretilmiş takım çeliklerinden oluşan ekstrüzyon kalıpları kullanılmıştır. Ø152 mm çapında 6060AA alüminyum alaşımı, ekstrüzyon öncesi billet sıcaklığı 440 °C'ye ısıtılarak hazırlanmış; kovan sıcaklığı 429 °C ve kalıp sıcaklığı 458 °C olarak ayarlanmıştır (Şekil 3).

Tablo 1'de verildiği üzere, alüminyum ekstrüzyon işlemi 160 bar giriş basıncıyla başlatılmış ve 110 bar çıkış basıncıyla tamamlanmıştır. Uygulanan bu termomekanik koşullar altında, 0,567 kg/m birim ağırlığa sahip profiller elde edilmiştir. Kullanılan kalıp sistemi üç ana bileşenden oluşmaktadır: arka parça ve ön hazne, temperlenebilir bir sıcak iş takım çeliği olan 1.2714 EFS (DIN standardı) malzemeden imal edilmiştir. Arka parça 47,9 HRC, ön hazne ise 48 HRC sertlik değerine sahiptir. Kalıbın ana form veren bölümü ise yüksek sıcaklık altında mekanik kararlılık ve aşınma direnci sunan 1.2344 EFS sıcak iş takım çeliğinden üretilmiş olup, 49,5 HRC sertliğe sahiptir.



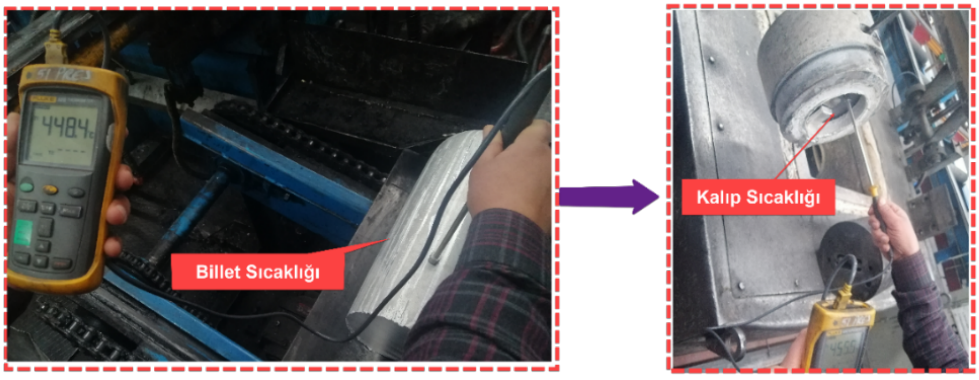
Şekil 3. Geleneksel yöntemle üretilen alüminyum ekstrüzyon kalıp işlem süreci.

Tablo 1. Geleneksel kalıplarla alüminyum ekstrüzyon işleminde kullanılan işlem parametreleri.

İşlem	Özellikler
Billet Alaşımı	Ø152 6060AA
Profil Ağırlığı	0,567
Kovan Sıcaklığı	429 °C
Billet Sıcaklığı	440 °C
Kalıp Sıcaklığı	458 °C
Baskı Girişi	160 bar
Baskı Sonu	110 bar

2.3.2. Metal Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Kalıplarla Alüminyum Ekstrüzyon İşlemi

Çalışmada, alüminyum profil üretimi için metal eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş takım çeliklerinden oluşan geçme ekstrüzyon kalıpları kullanılmıştır. Ø152 mm çapında 6060AA alüminyum alaşımı, ekstrüzyon öncesi billet sıcaklığı 448 °C'ye ısıtılarak hazırlanmış; kovan sıcaklığı 426 °C ve kalıp sıcaklığı 455 °C olarak ayarlanmıştır (Şekil 4). Tablo 2'de alüminyum ekstrüzyon işlemi 155 bar giriş basıncıyla başlatılmış ve 110 bar çıkış basıncıyla tamamlanmıştır. Uygulanan bu termomekanik koşullar altında, 0,562 kg/m birim ağırlığa sahip profiller elde edilmiştir. Kullanılan kalıp sistemi dört ana bileşenden oluşmaktadır: arka parça ve ön hazne, temperlenebilir bir sıcak iş takım çeliği olan 1.2714 EFS malzemeden imal edilmiştir. Arka parça 47,9 HRC, ön hazne ise 48 HRC'dir. Kalıbın ana form veren bölümü ise yüksek sıcaklık altında mekanik kararlılık ve aşınma direnci sunan 1.2344 EFS sıcak iş takım çeliğinden üretilmiş olup, 49,5 HRC sertlik değerine sahiptir. Ayrıca metal eklemeli imalat ile üretilmiş geçme kalıp Maraging çeliğinden üretilmiş olup, 57,87 HRC sertliğine sahiptir.



Şekil 4. Metal eklemeli imalat yöntemle üretilen alüminyum ekstrüzyon kalıp işlem süreci.

Tablo 2. MEİ kalıplarla alüminyum ekstrüzyon işleminde kullanılan işlem parametreleri.

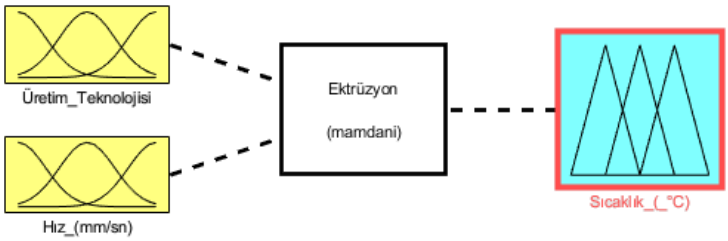
İşlem	Özellikler
Billet Alaşımı	Ø152 6060AA
Profil Ağırlığı	0,562
Kovan Sıcaklığı	426 °C
Billet Sıcaklığı	448 °C
Kalıp Sıcaklığı	455 °C
Baskı Girişi	155 bar
Baskı Sonu	110 bar

2.3.3. Bulanık Mantık Modelleme

Bu çalışmada, bulanık mantık modellemesi kapsamında kullanılan Genel Bell üyelik fonksiyonunun (Denklem 1) oluşturulmasında, fonksiyona ait a, b ve c parametreleri temel alınarak bulanık mantık işlemleri gerçekleştirilmiştir [34]. Bulanık mantık tabanlı modelleme için parametreler; üyelik fonksiyonunun bileşenleri olarak tanımlanır. Buna göre, x giriş değişkenini, a eğrinin genişliğini kontrol eden parametreyi, b eğrinin eğimini belirleyen parametreyi ve c eğrinin merkez noktasını (tepe değeri) ifade eder. Bu parametreler, giriş verilerine ait üyelik derecelerinin hesaplanmasında kritik bir rol üstlenmiştir. Böylece, sistemdeki belirsizliklerin modellenmesi sağlanmış ve bulanık karar mekanizması etkin bir şekilde yapılandırılmıştır.

$$\boldsymbol{Bell(x,a,b,c)} = \frac{1}{1+\left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}} \tag{1}$$

Çalışmada iki adet giriş ve bir adet çıkış değişkeni bulunmaktadır. Giriş değişkeni olarak üretim teknolojisi ve hız parametresi, çıkış değişkeni olarak ise sıcaklık kullanılmıştır. Bulanık mantık arayüzü Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Geliştirilen bulanık mantık modelinin genel yapısı.

2.3.4. Yapay Sinir Ağları

Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beyninin yapısından ve çalışma prensiplerinden esinlenerek geliştirilmiş, karmaşık örüntü tanıma ve sınıflandırma görevlerini yerine getirebilen hesaplamalı modellerdir [35]. Temel olarak birbirine bağlı düğümlerden (nöronlardan) oluşan bu ağlar, ağırlıklı bağlantılar aracılığıyla bilgi işlemekte ve öğrenme yeteneği sergilemektedir [36]. Bir YSA, girdi katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve çıktı katmanı olmak üzere genellikle katmanlı bir yapıya sahiptir. Her bir nöron, diğer nöronlardan gelen girdileri alır, bu girdileri bağlantı ağırlıklarıyla çarpar, bias terimini ekler ve bir aktivasyon fonksiyonundan geçirerek bir çıktı üretir [37]. Ağın öğrenme süreci, genellikle ileri beslemeli bir pasla başlar, burada girdiler ağ üzerinden geçirilerek bir çıktı üretilir. Ardından, üretilen çıktı ile beklenen çıktı arasındaki farkı minimize etmek amacıyla geriye yayılım algoritması kullanılarak ağırlıklar ve biaslar güncellenir [38]. Bu iteratif süreç, ağın verilen veri setindeki örüntüleri öğrenmesini sağlar. YSA'lar, geniş bir yelpazede karmaşık problemlere çözüm sunmak amacıyla kullanılmaktadır. Başlıca uygulama alanları arasında görüntü tanıma [39], doğal dil işleme [40], konuşma tanıma [41], dolandırıcılık tespiti ve finansal tahminler yer almaktadır [42]. YSA'ların büyük ve karmaşık veri kümelerinden anlamlı ilişkileri çıkarabilme ve genelleme yapabilme yetenekleri, onları birçok bilimsel ve mühendislik disiplininde değerli bir araç haline getirmektedir.

2.3.5. Performans Değerlendirme Metrikleri

Çalışmada yapay sinir ağları modelinin eğitimden elde edilen sonuçların Kök ortalama kare hata (Root Mean Square Error-RMSE), ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error-MAE) ve determinasyon katsayısı (R Square-R^2) performans değerlendirme metrikleri ile değerlendirilmiştir. RMSE, tahmin hatalarının karelerinin ortalamasının karekökü olarak tanımlanır ve normal dağılım varsayımı altında hata dağılımını daha verimli bir şekilde yansıtan bir performans değerlendirme metriğidir. MAE ise mutlak hata değerlerinin ortalamasını temsil eder ve uç değerlerden daha az etkilendiği için tutarlılığı değerlendirmek için daha verimli sonuçlar elde etmede sıklıkla kullanılan bir performans değerlendirme metriğidir [43]. Son olarak ise R^2 modelin bağımlı değişkendeki toplam varyansın ne kadarını açıkladığını gösteren bir performans değerlendirme metriğidir [44]. Çalışmada kullanılan RMSE, MAE, R^2 performans değerlendirme metriklerini matematiksel ifadeleri sırayla Denklem 2-4'de verilmiştir [45,46].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(Y_i - \hat{Y}_i\right)^2} \tag{2}$$

$$MAE = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left|Y_i - \hat{Y}_i\right| \tag{3}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{m}(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{m}(Y_i - \bar{Y})^2} \tag{4}$$

Denklem 2-4'te Y_i gerçek değeri, $\hat{Y}_i$ tahmin edilen değeri, $\bar{Y}$ gerçek değerlerin ortalaması, m toplam veri sayısını ve i ise verinin indeks numarasını ifade etmektedir.

3. Araştırma Bulguları

3.1. Deney Bulguları

Alüminyum ekstrüzyon sürecinde, ısıl işlem görmüş alüminyum kütükler yoğun basınç altında özel olarak tasarlanmış kalıplardan geçirilerek, belirli kesitlere sahip uzun profiller üretilir. Tablo 3'te verilen deneysel bulgular, ekstrüzyon hızının profil çıkış sıcaklığı üzerindeki belirleyici etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Geleneksel imalat yöntemiyle elde edilen sıcaklık değerleri incelendiğinde, hız 2 mm/sn'den 6 mm/sn'ye çıkarıldığında çıkış sıcaklığının 511 °C'den 538 °C'ye yükseldiği görülmektedir. Buna karşılık, metal eklemeli imalat yöntemiyle üretilen kalıplarda aynı hız aralığında sıcaklık değerleri 508 °C'den 527 °C'ye ulaşmıştır. Bu durum, eklemeli imalat kalıplarının geleneksel yöntemlere kıyasla ortalama 3–11 °C daha düşük sıcaklık ürettiğini göstermektedir. Özellikle 5 mm/sn ve 6 mm/sn hızlarında elde edilen 10–11 °C'lik sıcaklık farkı, yüksek hızlarda termal yükün azaltılması açısından kritik bir avantaj sağlamaktadır. Bu farklılık, yalnızca proses verimliliği açısından değil, aynı zamanda kalıp ömrü ve profil yüzey kalitesi bakımından da önemli sonuçlar doğurmaktadır. Daha düşük çıkış sıcaklıkları, kalıp malzemesinin termal yorulma direncini artırarak çatlak oluşumunu ve deformasyonu geciktirmekte, ayrıca alüminyum profilin mekanik özelliklerinin daha kararlı bir şekilde korunmasına katkıda bulunmaktadır.

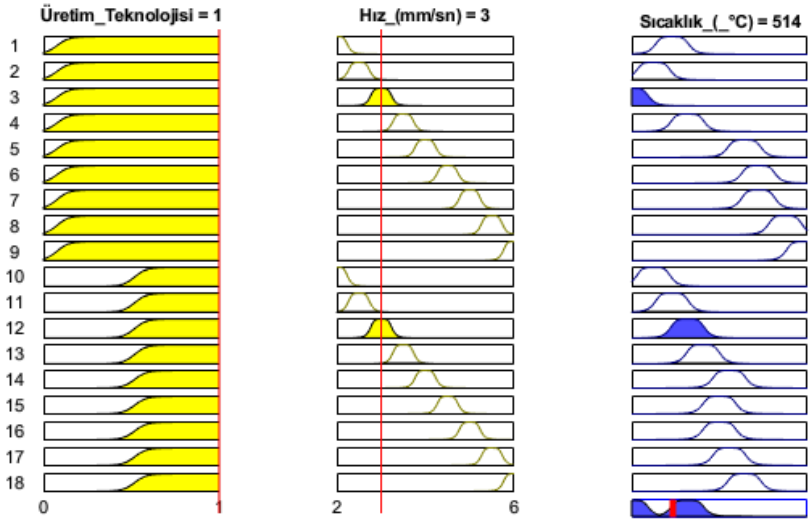
Tablo 3. Alüminyum ekstrüzyon işlemi profil hız-sıcaklık değerleri.

	Geleneksel İmalat	**Metal Eklemeli İmalat**
Hız	**Sıcaklık (**°C)	**Sıcaklık (**°C)
2 mm/sn	511 °C	508 °C
3 mm/sn	506 °C	515 °C
4 mm/sn	528 °C	525 °C
5 mm/sn	531°C	521 °C
6 mm/sn	538 °C	527 °C

3.2. Bulanık Mantık Bulguları

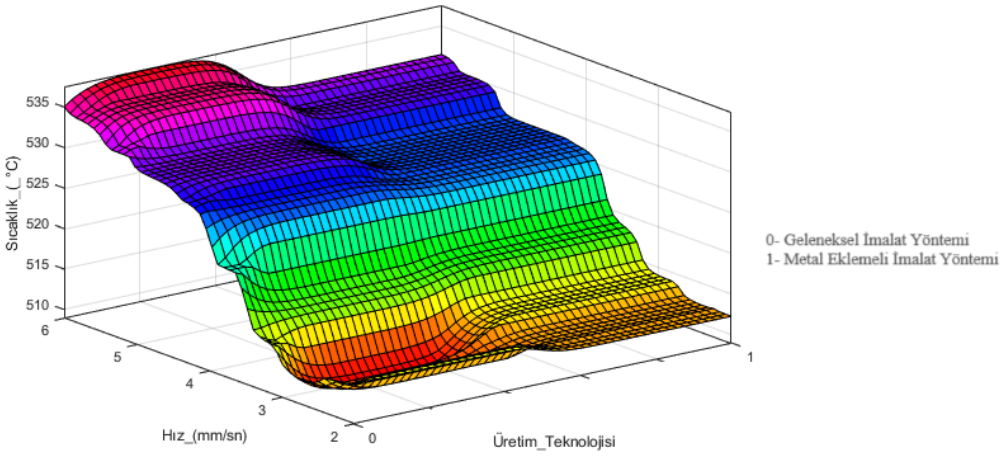
Bulanık mantık tabanlı modellemede hız ve üretim teknolojileri değişkenlerine ait üyelik fonksiyonu değerleri ile ayak genişlikleri, sıcaklık tahminlerini önemli ölçüde etkileyen, deneysel çalışmalar ve uzman görüşlerinden elde edilen verilere dayanarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, giriş üyelik fonksiyonları kapsamında hız değişkeni dokuz ayaklık, üretim teknolojileri ise iki ayaklık bir aralıkta tanımlanmıştır. Çıkış değişkeni olan sıcaklık ise on iki ayaklık bir aralıkta ifade edilmiştir.

Seçilen üyelik fonksiyonlarının sıcaklık üzerindeki etkilerini tahmin edebilmek amacıyla Şekil 6'da gösterildiği gibi on sekiz kuraldan oluşan bir kural tabanı oluşturulmuştur. Bu kurallar, üretim teknolojisi ve ekstrüzyon hızı gibi giriş değişkenlerine bağlı olarak sıcaklık çıktısını belirlemek üzere tanımlanmıştır. Üretim teknolojisi "1" olarak seçilmiş ve bu değer, sistemin "metal eklemeli imalat" yöntemiyle çalıştığını ifade etmektedir. İkinci giriş olan hız parametresi ise 3 mm/sn olarak belirlenmiştir. Çıktı değişkeni olan sıcaklık, her bir kuralın sonuç üzerindeki etkisine göre 514 °C olarak tahmin edilmiştir. Çıktı kısmındaki mavi alanlar, farklı kuralların bu tahmine hangi derecede katkı sağladığını göstermektedir. Sonuç olarak, bulanık mantık kural tabanı, giriş verileri doğrultusunda güvenilir ve doğrulukla çalışan bir sıcaklık tahmini bulanık mantık modeli kurulmuştur.



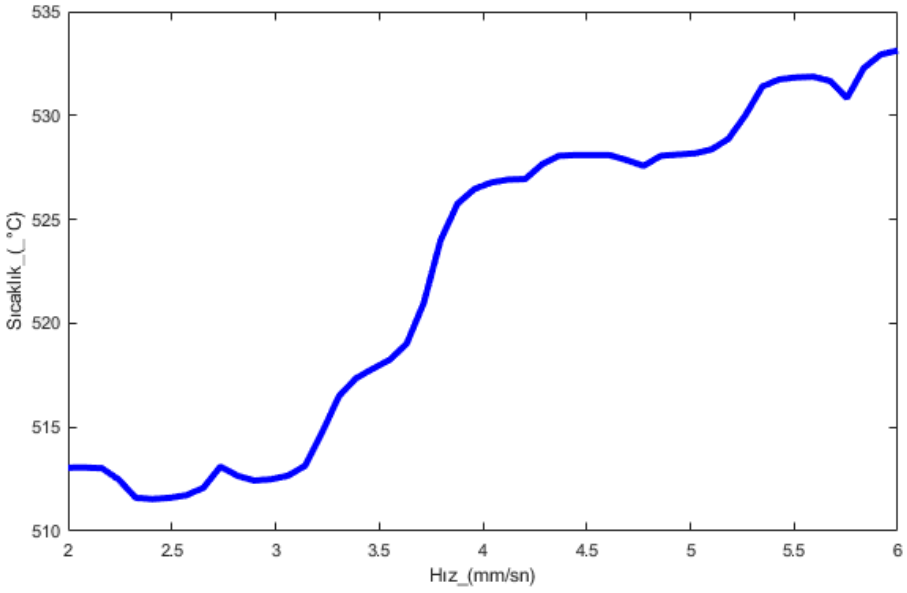
Şekil 6. Deneysel verilerden elde edilen bulanık mantık kural görüntüsü.

Ekstrüzyon sürecinde, alüminyum profilin hızı ve üretim teknolojileri değişkenlerinin sıcaklık çıktısı üzerindeki etkisini bütünsel olarak ilişki Şekil 7'de sunulmuştur. Bulanık mantık modelin doğrusal olmayan yapısını, üretim teknolojisinin sıcaklık davranışı üzerindeki belirleyici etkisini ve hız parametresinin kritik rolünü net şekilde ortaya koymaktadır. Eklemeli imalat teknolojisi (1) kullanıldığında, özellikle düşük hız değerlerinde sıcaklık değeri yaklaşık 510–515 °C arasında düşük kalmaktadır. Bu durum, eklemeli yöntemle yapılan üretimlerde sıcaklığın daha kontrollü ve düşük seviyelerde seyrettiğini gösterir. Geleneksel imalat yöntemi (0) kullanıldığında tarafına doğru ilerledikçe, aynı hız seviyelerinde sıcaklık değerinin belirgin şekilde arttığı gözlenmektedir (yaklaşık 530–535 °C aralığına kadar çıkmaktadır). Bu da geleneksel yöntemin termal etkisinin daha yüksek olduğunu işaret eder. Hız arttıkça her iki yöntemde de sıcaklık genel olarak artış göstermektedir; ancak geleneksel yöntemin termal etkisinin daha yüksek olduğu ve sıcaklık artışının daha belirgin olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, eklemeli imalatın daha kontrollü bir ısıl davranış sergilediğini ve özellikle düşük hızlarda termal avantaj sağladığını göstermektedir.



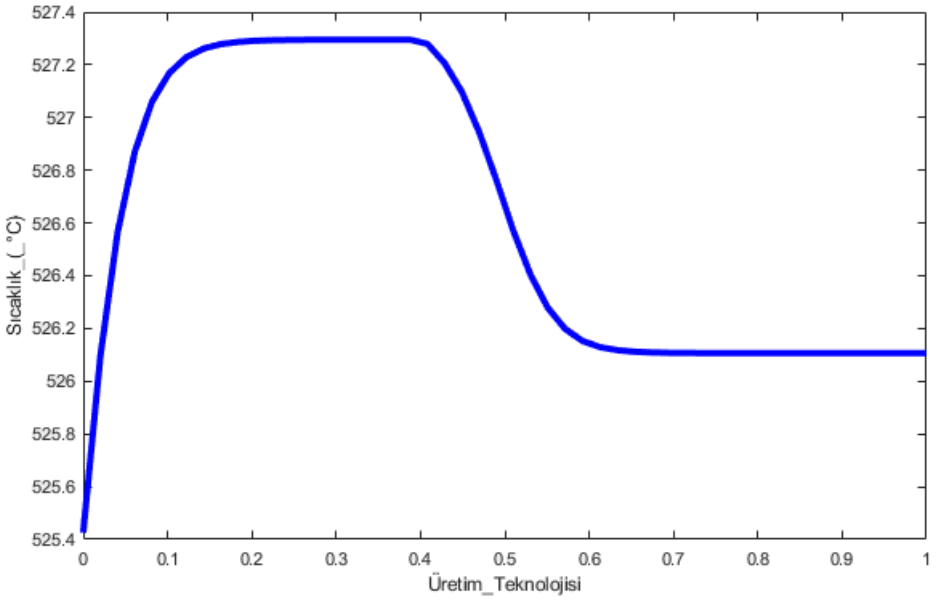
Şekil 7. Alüminyum profil malzemesinin hız ve üretim teknolojileri ile sıcaklık arasındaki yüzey grafiği.

Şekil 8'de, alüminyum ekstrüzyon sürecinde hız (mm/sn) ile çıkış sıcaklığı (°C) arasındaki ilişki gösterilmiştir. Hız arttıkça, sıcaklık değerlerinde genel olarak artış eğilimi gözlemlenmektedir. 2 mm/sn ile 6 mm/sn aralığında, başlangıçta sıcaklık sabit ya da hafif dalgalı bir seyir izlerken, özellikle 4 mm/sn'nin üzerindeki hızlarda sıcaklıkta belirgin bir artış meydana gelmiştir. Bu durum, ekstrüzyon hızının artmasının profil üzerindeki ısıl etkiyi artırdığını ve sistemin termal dengesini etkilediğini göstermektedir.



Şekil 8. Alüminyum profil malzemesinin hız ve sıcaklık değişimi arasındaki ilişki.

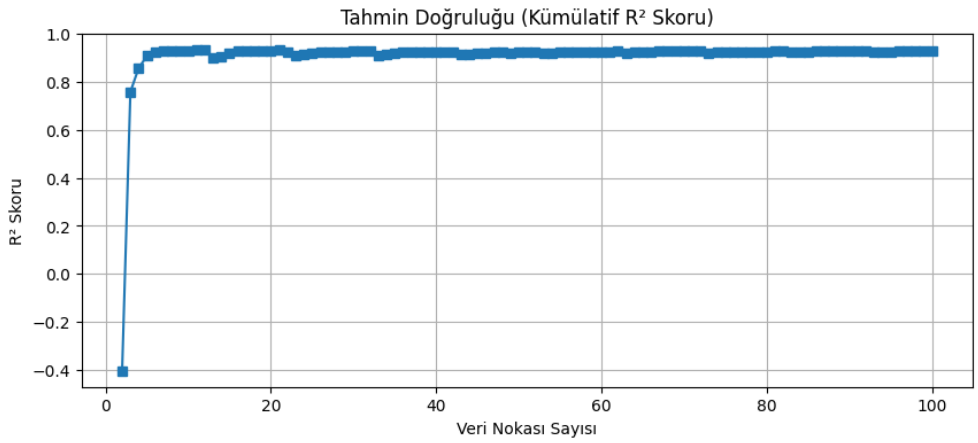
Şekil 9'da, üretim teknolojisine bağlı olarak alüminyum profilin sıcaklık değişimini göstermektedir. Geleneksel imalat yönteminden eklemeli imalata geçişle birlikte sıcaklıkta belirgin bir azalma gözlemlenmektedir. Bu durum, geleneksel yöntemin daha yüksek termal etki oluşturduğunu, eklemeli imalatın ise daha düşük ve dengeli bir sıcaklık profili sağladığını göstermektedir.



Şekil 9. Alüminyum profil malzemesinin üretim teknolojisi ve sıcaklık değişimi arasındaki ilişki.

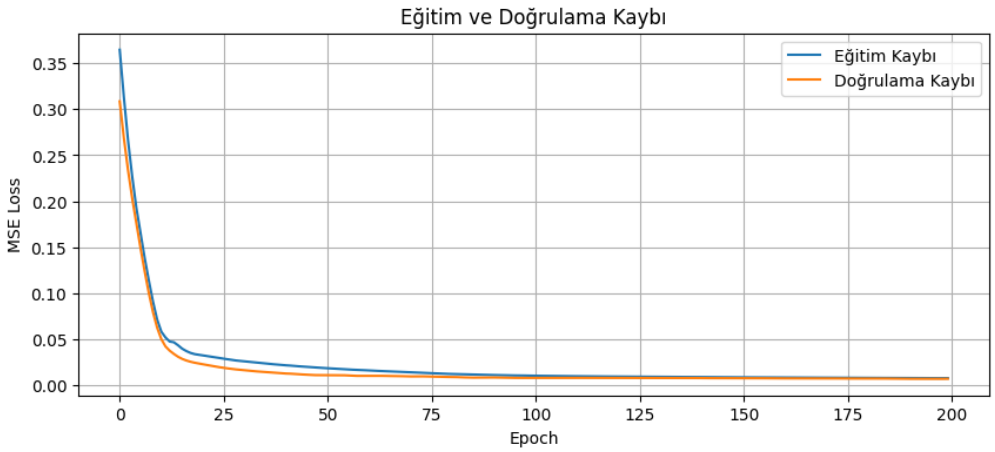
3.3. Yapay Sinir Ağlarından Elde Edilen Bulgular

Alüminyum profil üretiminde kullanılan teknoloji ile sıcaklık değişimi arasındaki ilişkiyi modelleyen makine öğrenme algoritmasının tahmin doğruluğu Şekil 10'da gösterildiği gibi kümülatif R^2 skoru incelendiğinde 100 eğitim tekrarı sonrasında R^2'değeri yaklaşık olarak 0,93 seviyesinde sabitlendiği görülmektedir. Elde edilen bu değer, modelin yüksek doğrulukla tahmin performansı sergilediği grafikten anlaşılmaktadır.



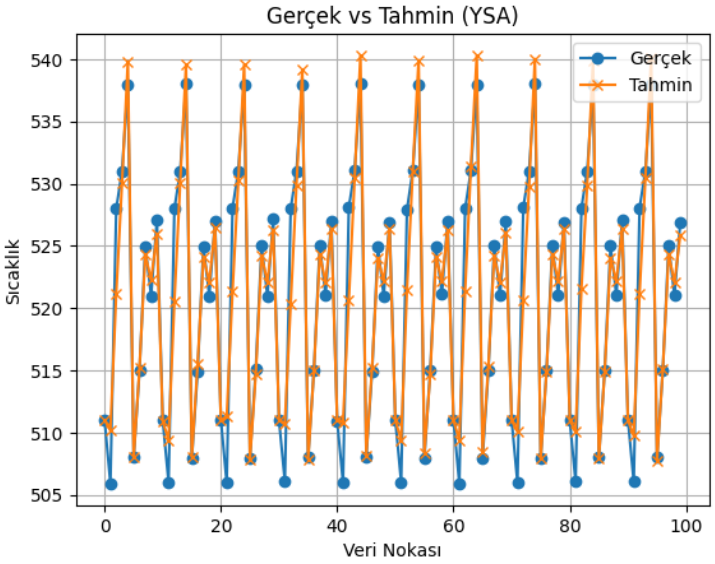
Şekil 10. Alüminyum profil malzemesinin üretim teknolojisi ve sıcaklık değişimi arasındaki ilişki.

Şekil 11'de modelin eğitim ve doğrulama sürecindeki MSE (ortalama kare hata) kayıplarının epoch sayısına göre azaldığı ve 25. epoch sonrasında dengelendiği görülmektedir. Eğitim ve doğrulama kayıplarının birbirine yakın seyretmesi, modelin aşırı öğrenme yapmadığını ve genelleme yeteneğinin yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 11. Alüminyum profil malzemesinin üretim teknolojisi ve sıcaklık değişimi arasındaki ilişki.

Şekil 12'de, yapay sinir ağı (YSA) ile tahmin edilen sıcaklık değerlerinin, gerçek sıcaklık verileriyle büyük oranda örtüştüğü görülmektedir. Tahminler zaman zaman sapma gösterse de genel eğilimler başarıyla yakalanmış ve modelin yüksek doğrulukta çalıştığı anlaşılmaktadır. Modelin R^2, MAE ve RMSE performans değerlendirme metrikleri göre elde edilen sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 12. Alüminyum profil malzemesinin üretim teknolojisi ve sıcaklık değişimi arasındaki ilişki.

Tablo 4. Yapay sinir ağları modeline ait performans değerlendirme metriklerinin sonuçları.

Metrik	Değer
R^2	0,93
MAE	1,69
RMSE	2,71

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, geleneksel ve metal eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen alüminyum ekstrüzyon kalıplarının profil çıkış sıcaklığı üzerindeki etkileri deneysel ve bulanık mantık tabanlı modelleme yaklaşımlarıyla analiz

edilmiştir. Ekstrüzyon sürecinde kullanılan hız parametresi 2 mm/sn ile 6 mm/sn arasında değiştirilmiş ve her bir hız değerine karşılık gelen çıkış sıcaklıkları ölçülmüştür. Geleneksel imalat yöntemiyle üretilen kalıplarla elde edilen sıcaklıklar sırasıyla 511 °C, 506 °C, 528 °C, 531 °C ve 538 °C olarak belirlenmiştir. Aynı hız değerleri için metal eklemeli imalat yöntemiyle üretilen kalıplarla elde edilen sıcaklıklar ise 508 °C, 515 °C, 525 °C, 521 °C ve 527 °C olarak ölçülmüştür. Bu veriler, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen kalıpların, özellikle 5 mm/sn ve 6 mm/sn hızlarında geleneksel yönteme kıyasla sırasıyla 10 °C ve 11 °C daha düşük çıkış sıcaklığı sağladığını göstermektedir. Bu farklılık, özellikle yüksek sıcaklık altında çalışan kalıp bileşenlerinde termal yüke bağlı aşınma ve deformasyonun azaltılması açısından önemlidir. Ayrıca, maraging çeliği ile üretilmiş kalıpların 57,87 HRC sertlik değerine ulaşması, geleneksel takım çeliği malzemelerine göre daha yüksek mekanik dayanım sunduğunu desteklemektedir. Bulanık mantık yaklaşımı sayesinde, hız ve üretim teknolojileri gibi değişkenler ile sıcaklık çıktısı arasındaki belirsizlikler etkili bir şekilde modellenmiş; bu yöntem, geleneksel imalat yöntemiyle üretilen kalıplara kıyasla daha esnek ve gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak, metal eklemeli imalat yöntemi ile üretilen kalıplar yalnızca üretim esnekliği sağlamamakta, aynı zamanda çıkış sıcaklığını düşürerek kalıp ömrünü uzatmakta ve ekstrüzyon sürecinin genel verimliliğini artırmaktadır. Bu bulgular, alüminyum ekstrüzyon endüstrisinde eklemeli imalatın yaygın kullanım potansiyeline işaret etmektedir. Çalışmanın son aşamasında ise yapay sinir ağları modeli ile gerçekleştirilen eğitim sonucu R^2, RMSE ve MAE performans değerlendirme metriklerine göre analiz edilerek, R^2 değeri 0,93, MAE değeri 1,69 ve RMSE değeri de 2,71 olarak belirlenmiştir. Performans değerlendirme metriklerinden elde edilen yüksek doğruluk ve düşük hata oranları veri setinin yapay sinir ağları ile uyumlu bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak bulanık mantık yaklaşımlarının yanı sıra yapay zekâ tabanlı yöntemlerinin de ekstrüzyon sürecinde güvenilir ve endüstriyel açıdan uygulanabilir bir çözüm sunduğunu tespit edilmiştir.

Teşekkür

Yazarlar saha destekleri için Arfem Alüminyum Ekstrüzyon Ltd. Şti. ve Eksen Alüminyum Ekstrüzyon Teknolojileri Ltd. Şti.'ne teşekkür eder.

Kaynaklar

[1] Aslantas K, Hasçelik A, Erçetin A, Danish M, Alatrushi LK, Rubaiee S, Mahfouz AB. Effect of cutting conditions on tool wear and wear mechanism in micro-milling of additively manufactured titanium alloy. Tribol Int 2024;193:109340.
[2] Özsoy K. Examining mechanical properties of profiles manufactured aluminium extrusion dies using powder bed fusion. Meas 2021;177, 109266.
[3] Li D, He J, Tian X, Liu Y, Zhang A, Lian Q, Lu B. Additive manufacturing: integrated fabrication of macro/microstructures. Chin J Mech Eng 2013; 49(6): 129-135.
[4] Lu B. Additive manufacturing—Current situation and future. Chin Mech Eng 2020; 31(01): 19.
[5] Katz-Demyanetz A, Popov Jr VV, Kovalevsky A, Safranchik D, Koptioug A. Powder-bed additive manufacturing for aerospace application: Techniques, metallic and metal/ceramic composite materials and trends. Manuf Rev 2019; 6.
[6] Xiao Y, Yang Y, Wang D, Zhou H, Liu Z, Liu L, Song C. In-situ synthesis of spatial heterostructure Ti composites by laser powder bed fusion to overcome the strength and plasticity trade-off. Int J Mach Tools and Manuf, 2024; 196: 104117.
[7] Yang Y, Jiang R, Han C, Chen J, Li H, Wang Y, Wang D. Frontiers in laser additive manufacturing technology. Addit. Manuf Front 2024; 200160.
[8] Dong Z, Han C, Zhao Y, Huang J, Ling C, Hu G, Yang Y. Role of heterogenous microstructure and deformation behavior in achieving superior strength-ductility synergy in zinc fabricated via laser powder bed fusion. Int J Extreme Manuf 2024; 6(4): 045003.
[9] Han C, Fang Q, Shi Y, Tor SB, Chua CK, Zhou K. Recent advances on high-entropy alloys for 3D printing. Adv Mater 2020; 32(26): 1903855.
[10] Sarzyński B, Śnieżek L, Grzelak K. Metal additive manufacturing (MAM) applications in production of vehicle parts and components—a review. Metals 2024; 14(2): 195.
[11] ISO/ASTM 52900 .Additive manufacturing—general principles—fundamentals and vocabulary. ISO, Geneva, 2021.
[12] Ansell TY. Current status of liquid metal printing. J Manuf Mater Process 2021; 5(2): 31.
[13] Qian M. Metal powder for additive manufacturing. Jom 2015; 67(3): 536-537.
[14] Slotwinski JA, Garboczi EJ, Stutzman PE, Ferraris CF, Watson SS, Peltz MA. Characterization of metal powders used for additive manufacturing. J Res Natl Inst Stand Technol 2014; 119:460.
[15] Isaza JF, Aumund-Kopp C. Additive Manufacturing with metal powders: Design for Manufacture evolves into Design for Function. Powd Meta Rev 2014; 3(2): 41-50.
[16] Jha AK, Sreekumar K, Tharian T, Sinha PP. Process optimization for high fracture toughness of maraging steel rings formed by mandrel forging. J Manuf Proce 2010; 12(1): 38-44.

[17] Samei J, Asgari H, Pelligra C, Sanjari M, Salavati S, Shahriari A, Mohammadi MA hybrid additively manufactured martensitic-maraging stainless steel with superior strength and corrosion resistance for plastic injection molding dies. Addit Manuf 2021; 45: 102068.
[18] Oter ZC, Coskun M, Akca Y, Sürmen Ö, Yılmaz MS, Özer G, Koc E. Benefits of laser beam based additive manufacturing in die production. Optic 2019; 176: 175-184.
[19] Sheppard T. Extrusion of Aluminium Alloys. 1nd ed. New York, NY, USA: Springer Science, 2013.
[20] Hölker R, Haase M, Khalifa NB, Tekkaya AE. Hot extrusion dies with conformal cooling channels produced by additive manufacturing. Mater Today Proc 2015; 2(10): 4838-4846.
[21] Chung CY, Liu CJ. Metal additive manufacturing of conformal cooling channels for improving the quality of metal injection–molded products. Adv Mech Eng 2024; 16(10).
[22] Marqués A, Dieste JA, Monzón I, Laguía A, Gracia P, Javierre C, Elduque D. Improvements in Injection Moulds Cooling and Manufacturing Efficiency Achieved by Wire Arc Additive Manufacturing Using Conformal Cooling Concept. Poly 2024; 16(21): 3057.
[23] Butdee SA. Prediction approach for aluminum extrusion processing using neuro-fuzzy based decision making. In International Scientific-Technical Conference Manufacturıng. Switzerland AG: Springer International Publishing, 2022. pp. 237-249.
[24] Zadeh LA. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility." Fuzzy sets and systems 1999; 100: 9-34.
[25] Zadeh LA. Is there a need for fuzzy logic?. Infor Sci 2008; 178(13): 2751-2779.
[26] Al-Saadi T, Rossiter JA, Panoutsos G. Control of selective laser melting processes: existing efforts, challenges, and future opportunities. In 2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), IEEE. pp.89-94.
[27] Hua Y, Choi J. Adaptive direct metal/material deposition process using a fuzzy logic-based controller. J Las Appl 2005; 17(4): 200-210.
[28] Farshidianfar M.H, Khajepour A, Zeinali M, Gelrich A. System identification and height control of laser cladding using adaptive neuro-fuzzy inference systems. 32nd International Congress on Laser Materials Processing, Laser Microprocessing and Nanomanufacturing, 6–10 October 2013; Miami, Florida, USA: AIP Publishing. pp. 615-623.
[29] Li Y, Li X, Zhang G, Horv´ath I, Han Q. Interlayer closed-loop control of forming geometries for wire and arc additive manufacturing based on fuzzylogic inference. J Manuf Proc 2020; 63: 35–47
[30] Lamarche-Gagnon MÉ, Molavi-Zarandi M, Raymond V, Ilinca F. Additively manufactured conformal cooling channels through topology optimization. Struc Mult Opt 2024; 67(8): 138.
[31] Çalışkan Cİ, Özer G, Koç E, Sarıtaş US, Yıldız CF, Çiçek ÖY. Efficiency research of conformal channel geometries produced by additive manufacturing in plastic injection mold cores (inserts) used in automotive industry. 3D Prin Addi Manuf 2023; 10(2): 213-225.
[32] Sagias VD, Zacharia P, Tempeloudis A, Stergiou C. Adaptive neuro-Fuzzy inference system-based predictive modeling of mechanical properties in additive manufacturing. Mach 2024; 12(8): 523.
[33] Toprak CB, Dogruer CU. Neuro-fuzzy modelling methods for relative density prediction of stainless steel 316L metal parts produced by additive manufacturing technique. J Mech Sci Tech 2023; 37(1): 107-118.
[34] Kodaloğlu M, Akarslan KF, Evaluation of Thermal Comfort In Terms of Occupational Safety In Weaving Facilities By Fuzzy Logic", Int J 3D Prin Tech Dig Ind 2022; 6 (2): 273-279.
[35] McCulloch WS, Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bul Math Bio 1943; 5(4): 115-133.
[36] Rosenblatt F. The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. Psych Rev 1958; 65(6): 386.
[37] Rumelhart DE, Hinton, G. E., & Williams, R. J. Learning representations by back-propagating errors. Nat 1986; 323(6088): 533-536.
[38] Werbos PJ. Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences, Ph. D., Harvard University. USA, 1974.
[39] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. Adv Neu Infor Proce Sys 2012, pp. 1097-1105.
[40] Mikolov T, Chen K, Corrado G, Dean J. Efficient estimation of word representations in vector space. arXiv preprint arXiv:1301.3781. 2013.
[41] Hinton G, Deng L, Yu D, Dahl G, Mohamed A, Jaitly N, Kingsbury B. Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition. IEEE Sig Proce Mag 2012; 29(6): 82-97.
[42] Kohara K, Ishikawa T, Yoshikawa Y, Morita Y. Financial forecasting with neural networks. Neu Comp Appl 1997; 5(4): 213-220.
[43] Chai T, Draxler RR. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?–Arguments against avoiding RMSE in the literature. Geosc Mod Devel 2014; 7(3): 1247-1250.
[44] Chicco D, Warrens MJ, Jurman G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. Peerj Comp Sci 2021; 7: e623.
[45] Özer D, Aksoy B. Yapay Zeka Uygulaması ile Güneş Paneli Sistemi Enerji Üretimi Tahmini. Yalvaç Aka Der 2024; 9(2): 138-151.
[46] Hodson TO. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not, Geosci. Mod Dev 2022; 15: 5481–5487.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 877-884, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1691862

Hızlı Katılaştırma ile Üretilen $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ Alaşımının Mekanik Özelliklerinin ve Faz Dönüşümlerinin İncelenmesi

Musa GÖGEBAKAN[1*]
Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye
gogebakan@ksu.edu.tr

(Geliş/Received: 05/05/2025; Kabul/Accepted: 16/09/2025)

Öz: Mevcut çalışmada, $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımı hızlı katılaştırma yöntemiyle amorf şeritler halinde üretilmiştir. Alaşımın faz tanımlaması, X-ışını difraksiyonu (XRD) ile, faz dönüşüm sıcaklıkları ve aktivasyon enerjisi gibi ısıl özellikleri diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile belirlenmiştir. Alaşımın oda sıcaklığındaki ve yüksek sıcaklıklardaki mekanik özellikleri Vickers mikrosertlik (HV) ölçümü yapılarak incelenmiştir. XRD sonuçları, hızlı katılaştırma ile üretilen alaşımın amorf yapıda olduğunu göstermiştir. Ancak, 544 °K'nin üzerindeki sıcaklıklarda faz dönüşümü gerçekleşmiş ve alaşım kristal yapıya dönüşmüştür. DSC sonuçlarına göre, amorf $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının kristalleşme başlangıç sıcaklığı (T_x) 544 °K olup, kristalleşmeden önce belirgin bir camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve geniş bir aşırı soğutulmuş sıvı bölgesi (ΔT_x) sergilediği görülmüştür. Alaşımın T_g ve ΔT_x değerleri sırasıyla 511 °K ve 33 °K olarak ölçülmüştür. Kristalleşme pikine ait aktivasyon enerjisi Kissinger yöntemiyle hesaplanmış ve 258 kJ/mol olarak bulunmuştur. Amorf alaşımın oda sıcaklığındaki mikrosertlik değeri 388 HV olarak ölçülmüştür. Mikrosertlik değeri ısıl işlem sonucu artarak 550 °K'de 564 HV değerine ulaşmıştır. 550 °K'den daha yüksek sıcaklıklarda mikro sertlik değeri azalmış ve alaşım gevrek hale gelmiştir.

Anahtar kelimeler: Hızlı katılaştırma, mekanik özellikler, amorf alaşım, faz dönüşümü, kristalleşme.

Investigation of Mechanical Properties and Phase Transformations of $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ Alloy Produced by Rapid Solidification

Abstract: In the current study, $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alloy was obtained as amorphous ribbons by rapid solidification method. Phase identification of the alloy were examined by X-ray diffraction (XRD), and thermal properties such as, phase transformation temperatures and activation energy were examined by differential scanning calorimetry (DSC). The mechanical properties of the alloy at room temperature and high temperatures were examined by Vickers microhardness (HV) measurement. XRD results showed that the alloy produced by rapid solidification had an amorphous structure. However, at temperatures above 544 °K, phase transformation occurred and the alloy became crystalline. DSC results show that the crystallization onset temperature (T_x) of the amorphous $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alloy was 544 °K, the alloy exhibits a distinct glass transition temperature (T_g) and a large supercooled liquid region (ΔT_x) before crystallization. T_g and ΔT_x values of amorphous $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alloy were measured as 511 °K and 33 °K, respectively. The activation energy of the crystallization peak was determined with the Kissinger equation and found to be 258 kJ/mol. The hardness value of the amorphous alloy at room temperature was measured as 388 HV. The microhardness value increased as a result of thermal treatment and reached 564 HV at 550 °K. The hardness value of the alloy decreased at temperatures higher than 550 °K and the alloy became brittle.

Key words: Rapid solidification, mechanical properties, amorphous alloy, phase transformation, crystallization.

1. Giriş

Alüminyum (Al) esaslı alaşımlar; düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci, iyi elektriksel ve ısıl iletkenlik ile, kolay şekillendirilebilirlik gibi üstün özellikleri sayesinde oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir [1-9]. Öte yandan, Al-esaslı alaşımlara ilave edilen bazı elementler, başta mekanik özellikler olmak üzere alaşımın çeşitli özelliklerini geliştirmiş ve böylece kullanım alanlarının genişlemesine katkı sağlamıştır. En hafif malzemelerden biri olan Al ve alaşımları, özelliklerinde sağlanacak önemli iyileştirmeler sayesinde diğer malzemelere tercih edilebilen çok fonksiyonlu malzemeler hâline gelme potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, Al esaslı alaşımlar en çok araştırılan malzemeler arasında ilk sıralardadır. Diğer taraftan, Al esaslı alaşımlara olan ilgi bu alaşımların; amorf, nanokristal ve kuazıkristal malzemeler olarak üretilebilmesinden de kaynaklanmaktadır. Yarı-kararlı malzemeler

* Sorumlu yazar: gogebakan@ksu.edu.tr Yazarın ORCID Numarası: [1] 0000-0001-5104-2874

olarak da adlandırılan bu malzemeler; yüksek mukavemet, mükemmel korozyon direnci, iyi süneklik, gelişmiş manyetik davranış ve üstün mekanik performans gibi özellikleriyle aynı kompozisyondaki kristal karşıtlarından daha üstün özellikler sergilemektedir [10-14]. Yapılan bazı çalışmalarda, amorf ve nanokristal alaşımların mekanik özelliklerinin aynı kompozisyondaki kristal alaşımlarınkinden yaklaşık 2-3 katı daha yüksek olduğu rapor edilmiştir [15-17]. Amorf ve nanokristal alaşımların dikkat çekici bir diğer özelliği ise yüksek miktarda hidrojen depolama kapasitelerine sahip olmalarıdır [18-20]. Bunun yanında, düşük yoğunluklu alaşımlar, sağlık sektöründe özellikle de protez ve implant gibi uygulamalarda tercih edilmektedir [21]. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, amorf ve nanokristal alaşımların atık su arıtımında oldukça etkili olduğu rapor edilmiştir [22-24]. Bu nedenlerden dolayı, amorf ve nanokristal alaşımlar araştırmacıların ilgi odağı olmaya devam etmektedir.

Amorf alaşımlar yarı-kararlı oldukları için yüksek sıcaklıklarda faz dönüşüme maruz kalarak kristal hale dönüşürler ve bu dönüşüm sonucunda amorf yapıya özgü özelliklerini kaybederler. Böyle bir durum, söz konusu malzemelerin endüstriyel uygulamalarını sınırlamaktadır. Dolayısıyla, amorf malzemelerin kristalleşme sıcaklığı olarak bilinen kristal hale geçiş sıcaklığının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Amorf alaşımların özelliklerini geliştirmek amacıyla, kristalleşme sıcaklıklarının altında gerçekleştirilen tavlama işlemleriyle nano boyutlu partiküllerin oluşumu sağlanabilir. Bu partiküllerin malzeme boyunca homojen dağılması, alaşımın performansını artıran önemli bir faktördür. Amorf alaşımların endüstriyel uygulamalarında kristalleşme sıcaklığı kadar önemli bir diğer parametre ise malzemenin mikroyapısını oluşturan fazlar, bu fazların dağılımları, yoğunlukları, boyutları ve faz dönüşümü sonrasında bu parametrelerde meydana gelen değişimlerin bilinmesidir. Bu nedenle, amorf olarak üretilen bir alaşımın faz dönüşüm sıcaklığının ve dönüşüm sonrasındaki faz yapısının doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem arz etmektedir.

Amorf alaşımlar; hızlı katılaştırma, mekanik alaşımlama (öğütme), buhar çökeltme, gaz atomizasyonu ve geleneksel döküm gibi çeşitli yöntemlerle üretilebilmektedir. Hızlı katılaştırma yönteminde, metalik eriyikler 104 K/s'nin üzerinde soğutularak amorf yapıların oluşması sağlanır. Bu nedenle, yüksek soğutma hızı gerektiren uygulamalarda hızlı katılaştırma tekniği tercih edilmektedir. Mekanik alaşımlama yönteminde ise alaşımı oluşturacak elementlerin ergitilmesine ihtiyaç duyulmaz; bu sayede yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerden de alaşımlar üretmek mümkün olmaktadır. Örneğin, ergime sıcaklıkları farklı elementlerden oluşan $Al_{86}Ni_8Y_{4.5}La_{1.5}$ alaşımı, mekanik alaşımlama yöntemi ile amorf olarak üretilmiştir [25]. Mekanik alaşımlama tekniğinin bir diğer önemli avantajı, alaşımlama süreci sırasında mikroyapının kontrol edilebilmesi ve hedeflenen mikroyapıya ulaşıldığında işlemin sonlandırılabilmesidir. Ancak bu teknikle alaşımlar toz formunda üretilmekte ve mekanik testlerin gerçekleştirilebilmesi için bu tozların preslenerek külçe haline getirilmesi gerekmektedir. Öte yandan, hızlı katılaştırma yöntemiyle amorf olarak üretilebilen bazı alaşımlar, mekanik alaşımlama ile amorf yapıda elde edilememektedir. Örneğin, $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$ alaşımı hızlı katılaştırma yöntemiyle amorf yapıda kolayca üretilebilirken, aynı alaşım mekanik alaşımlama tekniğiyle amorf olarak elde edilememiş, buna karşın nanokristal yapıda üretilebilmiştir [26]. Amorf alaşım üretiminde kullanılan bir diğer yöntem olan geleneksel döküm tekniği ile alaşımlar külçe formunda üretilebilmektedir. Geleneksel döküm yönteminde soğutma hızının düşük olması nedeniyle, bu teknikle Al-esaslı amorf alaşımların üretilmesi oldukça zordur. Dolayısıyla, amorf veya nanokristal alaşım elde etmek amacıyla bu yöntemler kullanılırken, üretilecek alaşım miktarı, üretim maliyeti, ürün geometrisi, alaşımı oluşturan elementlerin ergime sıcaklıkları ve malzemenin mikroyapısı gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Bir malzemenin amorf yapıda üretilebilmesi için, üretim süreci boyunca kristalleşmenin önlenmesi zorunludur. Bu nedenle, amorf alaşım üretiminde en çok tercih edilen yöntem hızlı katılaştırma tekniğidir. Bu teknik kullanılarak birçok Al-esaslı alaşım amorf yapıda üretilmiştir. Ancak, Co içeren Al-esaslı amorf alaşımlar üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır. Bunu yanında, Al-esaslı amorf alaşımların mekanik özelliklerine etki eden faktörler ile bu özelliklerin sıcaklıkla nasıl değiştiğine ilişkin ayrıntılı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımı hızlı katılaştırma yöntemiyle amorf şeritler halinde üretilmiştir. Alaşımların faz tanımlaması yapılarak, faz dönüşüm sıcaklıkları ve aktivasyon enerjisi gibi ısıl özellikleri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Ayrıca, amorf alaşımların oda sıcaklığındaki ve 650 °K'e kadar olan sıcaklıklardaki mekanik özellikleri, mikrosertlik ölçümleriyle değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ (% atomik) alaşımı hızlı katılaştırma yöntemiyle amorf şeritler halinde üretilmiştir. Alaşım için gerekli olan saf elementler (Al, Y, Ni, Co) yüksek saflıkta temin edilmiştir. $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımı, hızlı katılaştırma yönteminin eriyik-döndürme tekniğiyle amorf yapıda elde edilmiştir. Hızlı katılaştırılmış amorf şeritler, 4-6 mm genişliğinde ve 40-70 μm kalınlığında üretilmiştir. Amorf şeritlerin ısıl davranışları, Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) yöntemiyle incelenmiştir. Bu amaçla, Perkin Elmer Sapphire marka cihaz kullanılmıştır. Her analiz için 15-30 mg alaşım kullanılmıştır. DSC incelemeleri, 450–650 °K sıcaklık

aralığında, 20 °K/dk ısıtma hızıyla ve nitrojen atmosferi altında gerçekleştirilmiştir. Alaşımların faz analizi ile ısıl işlem sonrası faz dönüşümleri, X-ışını difraksiyonu (XRD) yöntemiyle incelenmiştir. XRD analizleri, Philips X'Pert PRO marka XRD cihaz kullanılarak, 40 kV gerilim ve 30 mA akım altında, monokromotik CuKα radyasyonu (λ = 0.154 nm) ile gerçekleştirilmiştir. XRD ölçümler, tüm numuneler için; 20°- 90° aralığında, 0.02° artışlarla ve her artıştan sonra 1s bekleme süresi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Amorf şeritlerin mekanik özellikleri, Vickers mikrosertlik testi ile yüzey sertlikleri ölçülerek belirlenmiştir. Mikrosertlik incelemeleri, Shimadzu HMV-2 model mikrosertlik cihazı ile gerçekleştirilmiş; ölçümler 980,7 mN (HV0.1) yük altında, 15 s süreyle yapılmıştır. Mikrosertlik değerleri, tüm numuneler için 15 farklı noktadan yapılan ölçümler sonucunda elde edilen ortalama değerler üzerinden belirlenmiştir. Ölçüm yapılacak yüzeylerin ölçüme uygun olduğundan emin olunduktan sonra gerekli ölçümler yapılmıştır. Alaşımların sünekliği, basit bir 180° bükülme testi uygulanarak ve kırılmanın makroskobik olarak gözlemlenmesiyle değerlendirilmiştir. Tablo 1'de, bu çalışmada kullanılan Al, Ni, Y ve Co elementlerinin bazı kimyasal özellikleri sunulmuştur.

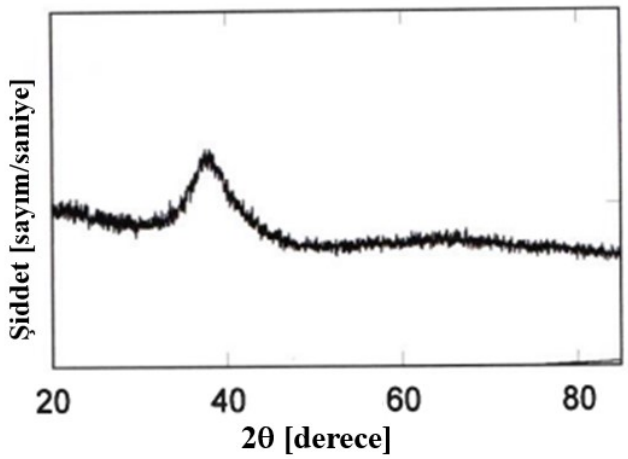
Tablo 1. Amorf alaşım üretiminde kullanılan Al, Ni, Y ve Co elementlerinin bazı kimyasal özellikleri.

Element (Sembol)	Ergime sıcaklığı (°K)	Yoğunluk (g/cm^3)	Atomik kütle (g/mol)	Kristal yapı	Atomik çap (Å)	Örgü parametresi (Å)
Al	933,5	2,70	26,98	YMK	1,43	4,05
Ni	1728	8,91	58,71	YMK	1,25	3,52
Co	1770	8,90	58,93	HCP	1,25	a=2,51, c=4,07
Y	1801	4,48	88,91	HCP	1,80	a=3,65, c=5,73

YMK: Yüzey merkezli kübik, HCP: Hekzagonal sıkı paket

3. Sonuçlar ve Tartışma

Hızlı katılaştırma yöntemiyle amorf malzeme üretiminde, alaşımı oluşturan elementler ergitildikten sonra, ısı iletkenliği yüksek bir disk (alt yüzey) üzerine püskürtülmektedir. Bu süreçte 10^4 °K/s'yi aşan hızlarda soğuma sağlanmakta ve aşırı soğutulmuş malzemeler üretilmektedir. Katılaşma çok kısa sürede gerçekleştiği için eriyikler kristal hale geçiş zamanı bulamamakta ve sıvı haldeki atomik dizilişlerini kısmen koruyarak katılaşmaktadır. Dolayısıyla, amorf malzemelerin atomik dizilişi sıvılarınkine benzer özellik göstermektedir. Amorf alaşımları karakterize etmenin güvenilir ve yaygın yöntemlerinden biri X-ışını difraksiyonu (XRD) analizidir. Bu çalışmada, hızlı katılaştırılan $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımında amorf yapının oluşup oluşmadığı XRD yöntemiyle incelenmiştir. $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının XRD grafiği Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü üzere, hızlı katılaştırma yöntemiyle şeritler hâlinde üretilen $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının XRD deseninde 2θ=32-48° aralığında geniş bir pik gözlenmiştir. Bu geniş pik, alaşımın tamamının amorf yapıda olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının hızlı katılaştırma yöntemiyle amorf yapıda üretildiğini doğrulamaktadır.



Şekil 1. Hızlı katılaştırma yöntemiyle üretilen $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının oda sıcaklığındaki XRD deseni.

Amorf alaşımlar, hangi yöntemle üretilirse üretilsin yarı-kararlı bir yapıya sahiptir. Isıl işlem sonucunda amorf bir alaşım, öncelikle gevşeme yoluyla enerjisini daha kararlı bir seviyeye düşürmekte, daha yüksek sıcaklıklarda ise tamamen kristalleşmektedir. Tamamen kristal hale dönüşen amorf bir alaşımın, yumuşak manyetik davranış, yüksek sertlik ve mukavemet, süneklik ve korozyon direnci gibi çekici üstün özellikleri büyük ölçüde kaybolmaktadır. Öte yandan, amorf matris içinde nanokristal partiküllerin homojen dağılımını sağlamak amacıyla amorf alaşımın düşük sıcaklıklarda kısmen kristalleştirilmesi, alaşımın özelliklerini daha da geliştirmeyi mümkün kılmaktadır. Bu nedenle, amorf alaşımların endüstriyel uygulamalarda kullanılmadan önce ısıl davranışlarının ve ısıl kararlılıklarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Amorf bir alaşımın ısıl kararlılığı; camsı geçiş sıcaklığı (T_g), kristalleşme başlangıç sıcaklığı (T_x) ve kristalleşme aktivasyon enerjisi (E_A) ile ilişkilidir. Genellikle T_g, T_x ve E_A değerleri ne kadar yüksekse, amorf alaşımın ısıl kararlılığı o kadar fazladır.

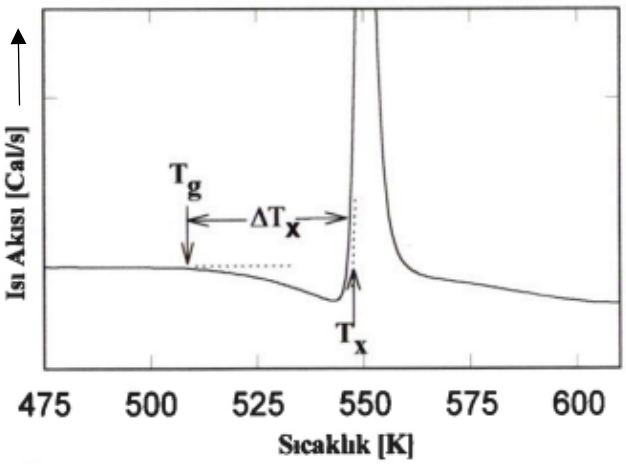
Amorf alaşımların kristalleşme başlangıç sıcaklığı (T_x), camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve aktivasyon enerjisi (E_A) gibi ısıl özellikleri genellikle diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve diferansiyel termal analiz (DTA) yöntemleriyle belirlenmektedir. Bu çalışmada üretilen amorf alaşımın ısıl özellikleri, DSC yöntemiyle incelenmiştir. DSC analizi, 450–650 °K sıcaklık aralığında ve 10, 20, 30 ve 40 °K/dk ısıtma hızlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de, $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının 20 °K/dk ısıtma hızıyla elde edilen DSC sonuçları görülmektedir. Bu alaşımın DSC grafiği incelendiğinde, kristalleşme başlangıç sıcaklığının (T_x) 544 °K olduğu görülmektedir. Bu sonuç, $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ amorf alaşımının 544 K'e kadar kararlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımı 544 °K'e kadar amorf halde sergilediği özelliklerini korumaktadır. Bu sıcaklığın üzerinde amorf alaşım kristalleşmeye başlamakta, yani yarı-kararlı halden daha kararlı bir yapıya dönüşmektedir. Bu dönüşümden sonra alaşım, amorf yapıya özgü üstün özelliklerini kaybetmektedir. Diğer taraftan, Şekil 2'de açıkça görüldüğü üzere amorf $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımı, kristalleşmeden önce belirgin bir camsı geçiş sıcaklığı (T_g=511°K) ve geniş bir aşırı soğutulmuş sıvı bölgesi (ΔT_x=33 °K; $\Delta T_x=T_x-T_g$) sergilemiştir. Amorf alaşımların camsı geçiş davranışı ile aşırı soğutulmuş sıvı bölgesinin genişliği hem teknolojik hem de bilimsel açıdan büyük öneme sahiptir. Çünkü T_g, alaşımların amorf yapı oluşturma yeteneğinin ve ısıl kararlılığının önemli bir göstergesidir. Öte yandan, ΔT_x bölgesindeki aşırı soğutulmuş sıvının viskozitesi düşüktür ve bu sıcaklık aralığında malzemeler kolaylıkla deforme edilebilir. Örneğin, ince amorf şeritler veya amorf tozlar şeklinde üretilen alaşımların endüstriyel uygulamaları sınırlıdır. Ancak bu malzemeler, ΔT_x bölgesindeki sıcaklıklarda preslenerek, amorf yapıları ve özellikleri bozulmadan külçe haline getirilebilir.

Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda, hızlı katılaştırma yöntemiyle üretilen Al-esaslı amorf alaşımların ısıl özellikleri incelenmiştir. Avar ve arkadaşları, $Al_{85}Co_7Y_8$ alaşımını hızlı katılaştırma yöntemiyle amorf yapıda üretmiş ve T_x, T_g ile ΔT_x değerlerini sırasıyla 569 °K, 586 °K ve 17 °K olarak belirlemişlerdir [27]. Daha önce yapılan benzer bir çalışmada ise $Al_{85}Y_{10}Ni_5$ alaşımının T_x, T_g ve ΔT_x değerleri sırasıyla 498 °K, 517 °K ve 19 °K olarak rapor edilmiştir [15]. Dolayısıyla, mevcut çalışmada ölçülen ΔT_x değeri, amorf $Al_{85}Co_7Y_8$ ve $Al_{85}Y_{10}Ni_5$ alaşımlarının ΔT_x değerlerinden daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuç, $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının ısıl kararlılığının, $Al_{85}Co_7Y_8$ ve $Al_{85}Y_{10}Ni_5$ alaşımlarının ısıl kararlılığından daha yüksek olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, Co elementi alaşımın ısıl kararlılığını olumlu yönde etkilemiştir. Öte yandan, hızlı katılaştırma yöntemiyle üretilen Al-RE-TM, (RE=Y, La, Nd, Ce ve TM=V, Nb, Cr, Mo, Mn, Fe, Co, Ni, Cu) amorf alaşımlarında, camsı geçiş sıcaklığı Al oranının % 86 daha düşük olduğu kompozisyonlarda gözlenmiştir. Bu alaşımlarda, Tx'den önce aynı zamanda aşırı soğutulmuş sıvı bölgesi de gözlenmiştir. Al oranının % 86'dan daha yüksek olduğu alaşımlarda ise T_g gözlenmemiştir [13,28]. 2020 yılında Jin ve arkadaşları, $Al_{84}Y_9Ni_4Co_{1.5}Fe_{0.5}TM_1$ (TM = V, Nb, Cr, Mo, Mn, Fe, Co, Ni veya Cu) alaşımlarını hızlı katılaştırma yöntemiyle amorf yapıda üretmiş ve bu alaşımların ısıl kararlılıkları ile mekanik özelliklerini incelemiştir [13]. Geniş bir alaşım grubu üzerinde yapılan bu araştırmada, tüm alaşımların amorf yapıda üretildiği, T_g davranışı sergilediği ve T_x'den önce ΔT_x bölgesi gösterdiği rapor edilmiş; ayrıca bu alaşımların ısıl kararlılıklarının yüksek olduğu belirtilmiştir.

Amorf $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının kristalleşme aktivasyon enerjisi (E_A) Kissinger denklemi kullanılarak hesaplanmıştır [29]. Kissinger denklemi aşağıda verilmiştir (Denklem 1).

$$ln\left(\frac{T^2}{\beta}\right) = \left(\frac{E}{RT}\right) + A \quad (1)$$

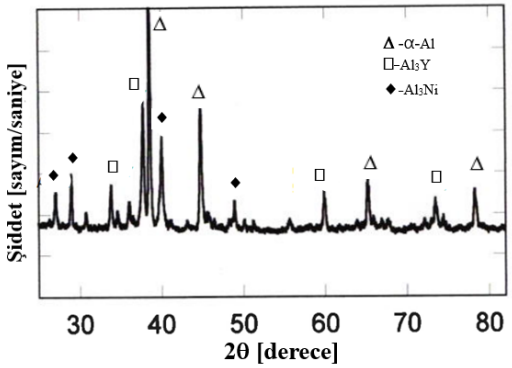
Burada; T, DSC grafiğinde gözlenen kristalleşme başlangıç sıcaklığını; E_a, aktivasyon enerjisini, β, ısıtma hızını; R, evrensel gaz sabitini ve A ise sabiti ifade etmektedir.



Şekil 2. Hızlı katılaştırma yöntemiyle elde edilen $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının DSC grafiği.

Amorf $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının aktivasyon enerjisi 258 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının kristalleşeme aktivasyon enerjisi, literatürde benzer kompozisyona sahip Al-esaslı amorf alaşımlar için aynı yöntemle hesaplanan aktivasyon enerjilerine yakın bulunmuştur. Örneğin, hızlı katılaştırma yöntemiyle amorf yapıda üretilen ve ısıl kararlılığının yüksek olduğu belirtilen $Al_{84}Y_9Ni_4Co_{1.5}Fe_{0.5}TM_1$ (TM = V, Nb, Cr, Mo, Mn, Fe, Co, Ni or Cu) alaşımlarının E_a değeri Kissinger yöntemiyle hesaplanmış ve 252-286 kJ/mol aralığında bulunmuştur [13]. Sonuç olarak, bu çalışmada hızlı katılaştırma yöntemiyle amorf yapıda üretilen $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının DSC analizinde T_g'nin gözlenmesi, ΔTx değerinin geniş olması, T_x değerlerinin nispeten yüksek bulunması ve E_a değerinin ısıl kararlılığı yüksek benzer kompozisyonlardaki alaşımların E_a değerlerine yakın olması, $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının ısıl kararlılığının yüksek olduğunu göstermektedir [13,15, 30-32].

Hızlı katılaştırma yöntemiyle amorf yapıda üretilen $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının kristal hale dönüştükten sonra oluşan fazlarını analiz etmek amacıyla, alaşım kristalleşme sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta tavlanmış ve ardından XRD ile yeniden incelenmiştir. 550 °K'de 30 dakika süreyle tavlanan alaşımın XRD grafiği Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3'te açıkça görüldüğü üzere, 550 °K'de ısıl işleme tabi tutulan amorf alaşımın XRD deseninde kristal yapıyı ifade eden keskin pikler gözlenmektedir. Bu sonuç, amorf yapıda üretilen alaşımın 550 °K'de faz dönüşümüne uğrayarak kristal yapıya dönüştüğünü göstermektedir. Amorf alaşım kristal yapıya dönüştükten sonra hangi fazların oluştuğunu belirlemek amacıyla, XRD grafiğinde gözlenen pikler analiz edilmiştir. Isıl işlem sonrasında XRD grafiğinde gözlenen piklerin; kübik α-Al fazının yanı sıra hekzagonal Al_3Y ve ortorombik Al_3Ni fazlarına ait yansımalar olduğu tespit edilmiştir. α-Al fazı, Ni, Y ve Co içermesi nedeniyle aşırı doymuş Al fazı olarak da adlandırılmaktadır. Öte yandan, amorf $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımı kristal yapıya dönüştükten sonra Y ve Ni içeren intermetalik fazlar gözlenmesine rağmen, Co içeren herhangi bir intermetalik faza rastlanmamıştır. Bunun, alaşım içerisindeki Co miktarının diğer elementlere kıyasla daha az olmasından ve mevcut Co'un tamamının Al matrisi içerisinde çözünmesinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Bu çalışmada üretilen ve incelenen amorf $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımında kristalleşme sonrasında gözlenen fazlar, literatürdeki benzer çalışmaların sonuçlarıyla uyum içindedir [13, 32-34].



Şekil 3. Hızlı katılaştırma yöntemiyle üretilen $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının ısıl işlemden sonraki XRD deseni.

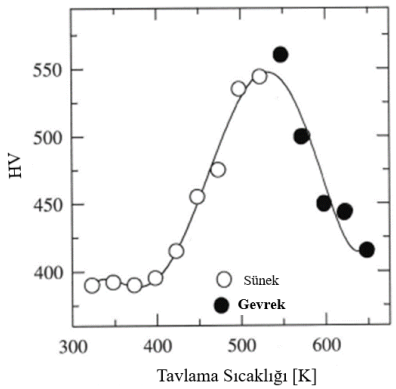
Bu araştırmanın amaçlarından biri de şerit formunda üretilen amorf $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının mekanik özelliklerinin incelenmesidir. Bazı üstün özellikleri sayesinde geniş bir uygulama potansiyeline sahip olan amorf alaşımların, oda sıcaklığındaki ve yüksek sıcaklıklardaki mekanik özelliklerinin bilinmesi endüstriyel uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır. Alaşımların mekanik özellikleri genellikle sertlik, çekme ve eğme testleri gibi yöntemlerle belirlenmektedir. Hızlı katılaştırılmış şeritlerin gerçek çekme testi, şerit yüzey kalitesine bağlı olması ve sonuçlarının tutarsızlık göstermesi nedeniyle uygulanmamış; bunun yerine mekanik özellikler, tutarlı sonuçlar veren ve kolay uygulanabilen yöntemlerden biri olan Vickers mikrosertlik testiyle belirlenmiştir. Bu testte numuneye belirli bir süre boyunca statik bir yük uygulanır ve yükün yüzeyinde oluşturduğu deformasyon izi ölçülerek sertlik değeri belirlenir. Mikrosertlik değeri, aşağıdaki eşitlik ile belirlenmektedir (Denklem 2).

$$HV = \frac{2P\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = \frac{1.845(P)}{d^2} \quad (2)$$

Burada; P, uygulanan yükü; d, yükün oluşturduğu izin köşegen uzunluklarının ortalamasını; θ ise elmas ucun yüzeyleri arasındaki 136°'lik açıyı ifade etmektedir.

Bu çalışmada, $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının oda sıcaklığındaki ve yüksek sıcaklıklardaki sertlik değerlerini belirlemek amacıyla, alaşım 300-650 °K sıcaklık aralığında 30 dakika süreyle ısıtılmış ve her numune için 10 farklı bölgeden ölçümler yapılmıştır. Bu şekilde elde edilen değerlerin ortalaması alınarak alaşımın sertlik değeri hesaplanmıştır. Ayrıca, alaşımın sünekliği basit bir 180° bükülme testi uygulanarak ve kırılmanın gözlemlenmesiyle incelenmiştir.

Şekil 4'te, $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının farklı sıcaklıklarda ısıl işlem sonrasında Vickers mikrosertlik değerleri ile sünek-gevrek değişimi görülmektedir. Şekil 4'te görüldüğü üzere, amorf $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının oda sıcaklığındaki Vickers mikrosertlik değeri 388 HV olarak belirlenmiştir. Bu değer, kristal yapılı Al-esaslı alaşımların sertlik değerlerinden oldukça yüksektir. Bu amorf alaşım 400 °K'e kadar ısıtıldığında, sertlik değerinde önemli bir değişiklik olmadığı gözlenmiştir. 400 °K'nin üzerindeki sıcaklıklarda sertlik değerinin arttığı ve 550 °K'de 564 HV'ye ulaştığı görülmektedir. Daha önce incelenen benzer kompozisyona sahip amorf alaşımlarda, sertlik değerinin yüksek sıcaklıklarda artığı rapor edilmiş ve bunun amorf fazla birlikte α-Al fazının varlığından kaynaklandığı belirtilmiştir [13]. Ayrıca, alaşımın 550 °K'e kadar iyi bir bükülme esnekliği sergilediği ve kırılmadan 180°'ye kadar bükülebilir bir sünekliğe sahip olduğu gözlenmiştir. 550 °K'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise alaşımın mikrosertlik değerinin azaldığı ve 650 °K'de yaklaşık 420 HV olduğu görülmektedir. Bu sertlik değeri, amorf alaşımın oda sıcaklığındaki değerinden daha yüksektir. Öte yandan, 550 °K'nin üzerindeki sıcaklıklarda alaşımın gevrek hale dönüştüğü görülmektedir. Şekil 3'te görüldüğü üzere, amorf alaşım kristalleşme sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda ısıtıldığında Al_3Ni ve Al_3Y gibi intermetalik fazlar oluşmaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmada incelenen amorf alaşımın yüksek sıcaklıklarda gevrek hale gelmesinde Al_3Ni ve Al_3Y intermetalik fazları etkili olmuştur. Literatürde, aynı elementleri içeren amorf alaşımlar için benzer sonuçlar rapor edilmiştir [13],[28]. Mevcut çalışmanın analiz sonuçları, hızlı katılaştırma yöntemiyle amorf şeritler halinde üretilen $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının mikrosertlik ve süneklik gibi mekanik özelliklerinin yüksek olduğunu; kristalleşme sıcaklığına kadar ısıtıldığında sünekliğini koruduğunu ve sertlik değerinin artığını; kristal yapıya dönüştükten sonra ise alaşımın gevrek hale geldiğini ve sertlik değerinde düşüş görüldüğünü ortaya koymuştur.



Şekil 4. $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımının tavlama sıcaklığı ile mikrosertlik ve sünek-gevrek değişimi.

4. Sonuç

Bu çalışmada, $Al_{84}Y_{10}Ni_4Co_2$ alaşımı hızlı katılaştırma yöntemiyle amorf şeritler halinde üretilmiştir. Amorf yapıda üretilen alaşımların mekanik ve ısıl özellikleri incelenmiştir. DSC sonuçları, amorf alaşımın yüksek sıcaklıklarda faz dönüşümüne uğradığını ve 544 °K'de kristal yapıya dönüştüğünü göstermiştir. Kristalleşmeden önce ise 511 °K'de camsı geçiş sıcaklığı ve 33 °K genişliğinde bir aşırı soğutulmuş sıvı bölgesi sergilemiştir. Kristalleşme pikinin aktivasyon enerjisi 258 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. XRD sonuçları, kristal yapıya dönüşen alaşımın mikro yapısının α-Al, Al_3Y ve Al_3Ni fazlarından oluştuğunu ortaya koymuştur. Amorf alaşımın oda sıcaklığındaki mikrosertlik değeri 388 HV olarak belirlenmiş; bu değer ısıl işlem sonucunda artarak 550 °K'de 564 HV'ye ulaşmıştır. Ancak 550 °K'nin üzerindeki sıcaklıklarda mikrosertlik değerinde düşüş gözlenmiş ve alaşım sünekliğini kaybederek gevrek hâle gelmiştir. Mevcut çalışma, hızlı katılaştırma tekniğinin alaşımları amorf şeritler halinde üretmek için uygun bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur.

Teşekkür

Mevcut çalışma, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından (Proje No: 2010/5-13 YLS) desteklenmiştir.

Bu çalışmada Yazar 1; konunun belirlenmesi, literatür taraması, deneysel çalışmaların ve analizlerin gerçekleştirilmesi ile makalenin yayına hazırlanmasının tüm aşamalarına katkı sağlamıştır.

Kaynaklar

[1] Chen J, Lengsdorf R, Henein H, Herlach D. M, Dahlborg U, Calvo-Dahlborg M. Microstructure evolution in undercooled Al–8 wt% Fe melts: comparison between terrestrial and parabolic flight conditions. J Alloys Compd, 2013; 556: 243-251.

[2] Kaya H, Böyük U, Çadırlı E, Maraşlı N. Measurements of the microhardness, electrical and thermal properties of the Al–Ni eutectic alloy. Materials & Design, 2012; 34: 707-712.

[3] Troeger LP, Starke EA. Microstructural and mechanical characterization of a superplastic 6xxx aluminum alloy. Mater Sci Eng A, 2000; 277: 102-113.

[4] Inoue A. Amorphous, nanoquasicrystalline and nanocrystalline alloys in Al-based systems. Progress in Mater Sci, 1998; 43: 365-520.

[5] Dursun T, Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. Mater Design, 2014; 56: 862–871.

[6] Inoue A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys. Acta Materialia, 2000; 48: 279-306.

[7] Zhang L, Zhang H, Ji B, Liu L, Liu X, Chen D**.** Application of Machine Learning in Amorphous Alloys. Materials, 2025; 18: 1771

[8] Wang W. Development and Implication of Amorphous Alloys. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022; 37(3): 1-9.

[9] Sahu A, Maurya RS, Laha T. Advances in Synthesis and Characterization of Aluminum-Based Amorphous Alloys, A Review Advan Eng Mater, 2024; 26(1): 761-784.

[10] Viet NH, Oanh NTH, Quynh PND, Lap TQ, Kim JS. Thermal stability of amorphous Al-Fe-Y alloy prepared by mechanical alloying. Mater. Sci. Forum, 2015; 804: 271-274.

[11] Li W, Kong LT, Li JF. Thermal stability and crystallization behavior of $Al_{86}Ni_9Y_5$ amorphous alloys with different Si addition. Mater Charac, 2022; 194: 112-122.

[12] Yuan J, Jing Z, Zhang Z, Lu W, Zhang S, Cheng Y, Liang X. Tribocorrosion behavior of Al-based amorphous coatings prepared by different spraying methods. J Mater Research and Techn, 2025; 35: 220-234.

[13] Jin Y, Inoue A, Kong FL, Zhu SL, Al-Marzouki F, Greer AL. Ultrahigh thermal stability and hardness of nano-mixed fcc-Al and amorphous phases for multicomponent Al-based alloys. J Alloys and Compds, 2020; 832: 154997.

[14] Khrushchyk K, Barylski A, Aniolek K, Karolus M, Boichyshyn L. Mechanical properties of amorphous metal alloy Al87(Ni,Fe)8(REM)5 system as a result of short-term annealing. Phys Chem Solid State, 2024; 25(1): 178-184.

[15] Gögebakan M, Uzun O. Thermal stability and mechanical properties of Al-based amorphous alloy. Journal of Materi. Processing Techn, 2004; 153-154:829–832.

[16] Maurya RS, Sahu A, Laha T. Effect of consolidation pressure on phase evolution during sintering of mechanically alloyed $Al_{86}Ni_8Y_6$ amorphous powders via spark plasma sintering. Mater. Sci. Eng. A, 2016; 649: 48-56.

[17] Mudry SI, Kulyk YO, Boichyshy LM. Nanocrystallization of amorphous alloy Al87Ni8Dy5 induced by heat treatment. Mater. Today: Proceedings, 2022; 62: 5805-5810.

[18] Knotek V, Ekrt O, Vojtěch D. Electrochemical hydriding of Mg–Ni alloys compacted by spark plasma sintering. Intern J Hydrogen Energy, 2017;43: 23098-23914.

[19] Xie L, Li J, Zhang T, Kou H. De/hydrogenation kinetics against air exposure and microstructure evolution during hydrogen absorption/desorption of Mg-Ni-Ce alloys. Renewable Energy, 2017;113: 1399-1407.

[20] Lass EA. Hydrogen storage measurements in novel Mg-based nanostructured alloys produced via rapid solidification and devitrification. Inter J Hydrogen Energy, 2011; 36: 10787-10796,
[21] Riaz U, Shabib I, Haider W. The current trends of Mg alloys in biomedical applications-A review. Journal of Biomedical Mater. Research Part B, 2019; 1970–1996.
[22] Luo X, Li R, Zong J, Zhang Y, Li H, Zhang T. Enhanced degradation of azo dye by nanoporous-copper-decorated Mg–Cu–Y metallic glass powder through dealloying pretreatment. Appl Surface Sci, 2014; 305: 314–320.
[23] Tang M, Lai L, Ding D, Liu T, Kang W, Guo N, Song B, Guo S. Rapid degradation of Direct Blue dye by Co-based amorphous alloy wire. J.Non-Cryst Solids, 2022; 576:121282.
[24] Ma Y, Xie L, Li Q, Chang C, Li H, Mu B, Ma X. Influence of surface morphology of Fe-based amorphous alloys on degradation of azo dye. J Phys Chem Solids, 2022; 163: 110596.
[25] Maurya R.S, Laha T. Effect of rare Earth and transition metal elements on the glass forming ability of mechanical alloyed Al–TM–RE based amorphous alloys. J Mater Sci & Techn., 2015; 31:1118–1124.
[26] Gögebakan M, Cana, N. Hızlı katılaştırma ve mekaniksel alaşımlama yöntemleri ile üretilen Al85Ni5Fe5Nd5 alaşımının yapısal ve ısısal özellikleri. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. 2023;13(2): 322-332.
[27] Avar B, Gogebakan M, Tarakci M, Gencer Y, Kerli S. Microstructural Investigations of Rapidly Solidified Al-Co-Y Alloys. Advan. Mater Sci Eng., 2013; 163537,1-7.
[28] Bi HW, Inoue A, Han F.F, Han Y, Kong FL, Zhu S.L, Shalaan E, Al-Marzouki F, Greer A.L. Novel deformation-induced polymorphic crystallization and softening of Al-based amorphous alloys. Acta Materialia, 2018; 147: 90-99.
[29] Kissinger HE. Reaction kinetics in differential thermal analysis. Analytical Chemistry, 1957;29: 1702.
[30] Gögebakan M, Okumus M. Structure and crystallization kinetics of amorphous Al–Ni–Si alloy. Mater Sci Poland, 2009; 27(1): 79-87.
[31] McKay BJ, Cizek P, Schumacher P, O'Reilly K.A.Q. Heterogeneous nucleation in an Al–Ni–Si alloy studied using a metallic glass technique. Mater Sci Eng A, 2001;304-306(31): 240-244.
[32] Gögebakan M, Warren PJ, Cantor B. Crystallization behaviour of amorphous $Al_{85}Y_{11}Ni_4$ alloy. Mater Sci Eng A, 1997; 226-228: 168-172.
[33] Gögebakan M. The Effect of Si Addition on Crystallization Behavior of Amorphous Al-Y-Ni Alloy. J Mater Eng Perfor, 2004; 13(4): 504-508.
[34] Katarzyna MZ, Dhiman I, Matus K, Mariola KG, Lonski W, Radon A, Czeppe T, Babilas R. Structural characterization of newly-developed $Al_{79}Ni_5Fe_5Y_{11}$ and $Al_{79}Ni_{11}Fe_5Y_5$ alloys with amorphous matrixes. Scientific Reports, 2023; 13: 21322.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 885-896, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1676412

İç Mekanda İşleve Göre Renk Tercihlerinin Mekansal Deneyim ve Sanal Gerçeklik Yöntemleriyle Değerlendirilmesi: Yaşam Alanı ve Hasta Odası Örneği

Fatmanur YÜKSEKTEPE[1], Esra KÜÇÜKKILIÇ ÖZCAN[2*]
[1] Endüstri Ürünleri Tasarımı Programı, İstanbul Beykent Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
[2] Mimarlık Bölümü, Mimarlık Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
[1] fatmanuryuksektepe@beykent.edu.tr, [2] esrakucukkilic@gmail.com

(Geliş/Received: 16/04/2025; Kabul/Accepted: 02/09/2025)

Öz: Mimari mekanda renk düzeni, rengin bileşenleri, mekanın işlevi ve kullanıcı üzerindeki psikolojik etkiler dikkate alınarak oluşturulmalıdır. Mekanda renk, bireyin mekansal algısını ve deneyimini şekillendiren önemli bir etken olup, farklı işlevlere sahip mekanlarda değişik etkiler gösterebilmektedir. Bu çalışmada, farklı işlevlerdeki iç mekanlara yönelik renk tercihlerinin, kullanıcı algısı ve sanal mekansal deneyime bağlı değişkenliği karşılaştırılmalı analizle incelenmiştir. Çalışma kapsamında, yaşam alanlarına yönelik renk tercihleri, bireylerin mevcut mekansal deneyimleri ve algısal değerlendirmeleri doğrultusunda; hasta odalarına yönelik renk tercihleri ise sanal ortamda oluşturulan mekansal deneyim yöntemiyle incelenmiştir. Bu doğrultuda çalışmada sanal gerçeklik gözlüğüyle (VR) deneyimlenecek bir hasta odası modeli, Munsell Renk Dizgesi'ndeki beş ana tür ile her türün 1,5 (çok az doymuş), 3,5 (az doymuş) ve 5,5 (orta doymuş) olmak üzere üç farklı doymuşluğu ve bir adet türsüz düzen olmak üzere toplam 16 renk düzeninde oluşturulmuştur. Yetmiş katılımcı ile yürütülen sanal anket çalışması sonucunda, farklı fonksiyonlarda N-türsüzün (gri) diğer renk türlerine kıyasla daha fazla tercih edildiği ve renk türü tercihleri arasında belirgin farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, hasta odası renk düzenleri arasında en yüksek beğeni düzeyinin 5-8,5/1,5 (çok az doymuş kırmızı), en düşük beğeni düzeyinin 45-8,5/5,5 (orta doymuş yeşil) olduğu, her türün doymuşluk düzeyi arttıkça beğeni düzeyinin azaldığı görülmüştür. Bu çalışmadan elde edilecek sonuçlar, renk tasarımcılarına katkı sağlayarak, disiplinler arası etkileşim oluşturacaktır.

Anahtar kelimeler: Renk tasarımı, hasta odası rengi, yaşam alanı rengi, sanal gerçeklik, renk algısı, mekansal deneyim.

Evaluating Interior Color Preferences by Function through Spatial Experience and Virtual Reality: The Case of Living Spaces and Patient Rooms

Abstract: In architectural spaces, color schemes should be designed by taking into account the components of color, the function of the space, and the psychological effects on the user. Color is a significant factor in shaping an individual's spatial perception and experience, and it may produce varying effects depending on the function of the space. This study comparatively analyzes the variability of color preferences in interior spaces with different functions, based on user perception and virtual spatial experience. Within the scope of the study, color preferences for living spaces were evaluated according to users' existing spatial experiences and perceptual assessments, whereas color preferences for patient rooms were examined through virtual spatial experience techniques. Accordingly, in this study, a virtual patient room model to be experienced through a virtual reality (VR) headset was created using the five main hues from the Munsell Color System, with each hue presented in three levels of chroma: 1.5 (very low), 3.5 (low), and 5.5 (moderate), along with one achromatic (neutral gray) scheme, resulting in a total of 16 color schemes. Based on the results of a virtual survey conducted with seventy participants, it was found that in functional spaces, the achromatic (neutral gray) scheme was preferred more than other hues, and there were significant differences among hue preferences. Furthermore, among the patient room color schemes, the highest level of aesthetic appreciation was observed for 5-8.5/1.5 (very low chroma red), while the lowest was for 45-8.5/5.5 (moderate chroma green). It was also observed that, for each hue, as chroma increased, the level of appreciation decreased. The findings of this study aim to contribute to the field of color design and foster interdisciplinary collaboration.

Key words: Color design, patient room color, living space color, virtual reality, color perception, spatial experience.

1. Giriş

Renk, bireyin yaşamı boyunca birçok alanda var olan, bireyin içinde bulunduğu fiziksel çevre ya da mimari mekan ile etkileşiminde büyük öneme sahip yapı fiziği öğelerinden biridir. Renk, bireyin sürekli etkileşimde olduğu mimari mekanda, bireyde oluşan görsel duyulanmanın yorumlanmasına yardımcı olmaktadır. Birey, mekansal uyaranlardan biri olan rengi, bileşenlerinde ortaya çıkan karşıtlıklar sayesinde algılamakta ve anlamlandırmaktadır.

* Sorumlu yazar: esrakucukkilic@gmail.com Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-2331-469X, [2] 0000-0001-9106-0006

Mimari mekanda çeşitli karşıtlıklarla oluşturulan renk düzenleri, hacme yönelik anlamsal bir kompozisyonun oluşmasına katkıda bulunarak mekanın kimlik kazanmasına yardımcı olmaktadır. Bu bağlamda, mimari mekanda renk düzeni; rengin bileşenleri, mekanın işlevi ve kullanıcı üzerindeki psikolojik etkileri doğrultusunda bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilerek oluşturulmalıdır. Mekanın işlevi ve gereksinimlerine bağlı olarak oluşturulan renk düzeni, mekanı deneyimleyen bireyin görsel algısını etkileyerek, birey ile mekan arasında güçlü bir iletişim kurulmasına olanak tanımaktadır. Bu doğrultuda, birey deneyimlediği mekanı anlamlandırmakta ve görsel konfor koşulları, psikolojik ve duyuşsal etkiler açısından olumlu ya da olumsuz yönde etkilenerek mekana ilişkin belirli anlamlar yükleyebilmektedir. Porter ve Mikellides, mimari mekanın işlevini destekleyici psikolojik bir ortam oluşturulmasında, renk izleniminin ve oluşturduğu mesajın oldukça önemli olduğunu ifade etmiştir [1,2]. Pile ise, mimari mekanda başarılı olarak uygulanmış rengin, bireylerin bulundukları mekanda ortaya çıkabilecek olumsuz etkileri azaltabileceğini ve mekanın işlevine uygun olarak algılanmasını sağlayabileceğini belirtmiştir [3,4].

Literatürde, farklı işlevlere sahip mekanlarda renk kullanımının kullanıcılar üzerindeki etkisini inceleyen çalışmalar, mekanın işlevine bağlı olarak oluşturulan renk tasarımına yönelik etkinin değiştiğini ortaya koymaktadır. Örneğin, Ergün ve arkadaşlarının sanal ortamda gerçekleştirdiği çalışmada, açık ofislerde duvar ve donatı elemanlarında kullanılan renklerin kullanıcıların algısal değerlendirmeleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve sıcak renk kullanılan mekânın, nötr ve soğuk renk kullanılan mekanlara göre daha olumlu yönde algılandığı belirlenmiştir [5]. Yıldırım ve arkadaşlarının sanal ortamdaki tasarım stüdyolarında yürüttükleri araştırmada ise, öğrencilerin soğuk renkli mekanları, sıcak renkli mekanlara kıyasla “daha ferah” ve “daha davetkar” olarak algıladıkları görülmüştür. Ayrıca soğuk renkli mekanın sosyal uyum ve bireysel verimlilik ölçeklerinde daha olumlu değerlendirildiği belirlenmiştir [6]. Yıldırım ve arkadaşlarının kırmızı, mavi ve türsüz renk ile iki farklı tefriş düzeni uygulayarak oluşturdukları bir başka çalışmasında ise, yaşam alanında kullanılan renklere göre kullanıcılar üzerindeki renk tercihleri incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular, sıcak (kırmızı) renklerin uyarıcı, canlandırıcı ve heyecan verici; soğuk (mavi) renklerin ise geniş, dinlendirici, çok uyarıcı olmayan, sakin ve huzurlu olarak değerlendirildiğini göstermiştir. N-türsüz (gri) ise sakinlik ve huzur ifadeleri dışında genelde sıcak ve soğuk renklere kıyasla daha olumsuz değerlendirilmiştir [7]. Diğer yandan, Gao ve Zhang’ın hasta odası tasarımına yönelik yürüttükleri araştırma kapsamında önemli bileşenler olarak belirlenen 6 farklı tasarım özelliğinin (doğa manzarası, sanat eseri, kapının konumu, mobilya düzeni, oda boyutu ve duvar rengi) sanal ortamda incelendiği çalışmasında; sıcak turuncu rengin, soğuk mavi ve türsüze göre hastalar üzerinde daha olumlu bir etki oluşturduğu görülmüştür [8]. Ayrıca, İbili’nin çalışmasında, hasta odalarında uygulanacak renklerin, yatakta uzun süre geçiren hasta için yorgunluk ve huzursuzluğa sebep olabilecek parlak renklerden kaçınılması belirtilmiştir [9]. Benzer şekilde Alakuş ve Sema çalışmalarında, hasta odalarında hastayı yoracak ya da heyecanlandıracak doymuş renkler ve zıtlıklardan kaçınılması gerektiğini belirtmiştir [10,11]. Mahnke ise, hasta yatak başındaki duvara, görsel tanı nedeniyle çok doymuş renkler uygulanmaması gerektiğini; hastanın hasta yatağından bakış doğrultusundaki duvar yüzeyine, renk uygulanabileceğini ifade etmiştir [12,13,14]. Elde edilen veriler doğrultusunda, farklı işlevlere sahip mekanlarda uygulanan renk düzenlerinin, rengin bileşenleri ve mekanın işlevine bağlı olarak değiştiği görülmüş; renk tasarımı oluşturulurken mekanın işlevi ve kullanıcı gereksinimlerinin bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerektiği bulgularla desteklenmektedir.

Literatürde farklı işlevlerdeki mimari mekanlarda oluşturulan renk düzenleri incelendiğinde, bireylerin günlük yaşam alanlarında bulundukları mekanlara kıyasla hasta odalarının stres ve kaygı seviyesinin daha yüksek olduğu ve bu ortamların tedirginlik hissini artırdığı görülmektedir. Ayrıca günlük yaşam alanlarında renk tercihi bireyin kişisel zevkine bağlı olarak değişkenlik gösterebilirken; hasta odalarındaki renk düzeni, kullanıcının stres seviyesini azaltan, görsel konfor koşullarını iyileştiren, rahatlatıcı ve sakinleştirici bir ortam oluşturmayı hedefleyen unsurlar göz önünde bulundurularak tasarlanmalıdır. Bu unsular dikkate alındığında, hasta odalarının psikolojik ve fiziksel etkileri doğrultusunda daha özel ve spesifik bir renk düzenine sahip olması gerektiği öngörülmektedir. Bu doğrultuda, bu çalışma kapsamında farklı işlevlerdeki iç mekan renk tercihlerinin kullanıcı algısı ve mekansal deneyime bağlı değişkenliğinin karşılaştırılarak analiz edilmesi amaçlanmıştır. Belirlenen bu amaç doğrultusunda çalışmada, yaşam alanı ve hasta odası renk düzenlerine yönelik kullanıcı tercihleri karşılaştırılmıştır. Katılımcıların yaşam alanlarına yönelik renk tercihleri, bireylerin mevcut mekansal deneyimleri ve kullanıcı algısı kapsamında değerlendirilirken; hasta odalarına yönelik renk tercihleri, bu mekanların deneyimlenme sıklığı ve süresinin sınırlılığı sanal ortamda oluşturulan mekansal deneyim yöntemiyle incelenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda tercih ve beğeni kavramlarının oldukça yakın sonuçlar verdiği ortaya çıkmış ve bu doğrultuda katılımcıların tercih ettikleri renkler için beğendikleri renklerin sorulması planlanmıştır [15]. Hasta odalarına ilişkin renk düzenleri, Munsell Renk Dizgesi’nde belirtilen rengin tür, değer ve doymuşluk bileşenlerinden yararlanarak oluşturulan farklı tür ve doymuşluktaki 16 farklı renk düzeninde oluşturulmuştur. Araştırma kapsamında belirlenen amaç doğrultusunda, kullanıcıların renk tercihlerinin

değerlendirilmesi için anket çalışması uygulanmış ve elde edilen veriler analiz edilmiştir [16, 17]. Bu makalede, çalışmanın yöntemi, yöntem adımları ve elde edilen sonuçlara yönelik bulgular ayrıntılı olarak sunulmuştur.

2. Kapsam ve Yöntem

Deneye katılanların sanal gerçeklik ortamında deneyimleyerek hasta odası renk düzenlerine yönelik tercihlerinin incelenmesi amacıyla hasta odası modeli oluşturulmuştur. Hasta odası modeli Turbosquid uygulamasından elde edilmiştir. Modele, çalışma kapsamında belirlenen doku ve renklerin uygulanması için Cinema 4d 2023.1.3 programı kullanılmıştır. Hasta odası ölçüleri, ıslak hacim dahil 8 m × 5 m boyutlarına ve 2,75 m yüksekliğe sahip olup, ıslak hacim çalışma kapsamı dışında tutulmuştur. Tasarlanan hasta odasında, hacmin gün ışığını alması için oluşturulan pencere açıklığı, hasta yatağının yan duvarında oluşturulmuş olup söz konusu hasta odasının plan ve kesiti Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Hasta odası plan ve kesiti.

Bir yüzeyin renksel özellikleri, yüzeyin tür, açıklık-koyuluk (değer) ve doymuşluk bileşenlerine göre tanımlanır. Bu çalışma kapsamında yüzey renklerinin belirlenmesi için, Albert H. Munsell (1858-1918) tarafından oluşturulan ve rengin üç bileşeni (tür, değer, doymuşluk) ile tanımlanan, Munsell Renk Dizgesi ele alınmıştır [18,19,20,21].

Çalışmada hasta odası renklerinin değerlendirilmesi bağlamında bir rengi diğer renklerden ayırt eden nitelik olan tür bileşenleri, Munsell Renk Dizgesi'ndeki ana renkler 5 (kırmızı), 25 (sarı), 45 (yeşil), 65 (mavi) ve 85 (mor) olarak seçilmiştir. Rengin açıklık koyuluğunu veren değer bileşeni, bir yüzeyin yansıtma çarpanını (r) ifade ettiği için, çalışma kapsamında belirlenen renklerin değer bileşeni, hacmin tavan, duvar ve döşeme yüzeyinde uygulanması önerilen yansıtma çarpanı değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir [18,22]. TS-EN 12464-1:2021 Işık ve Işıklandırma- İş Mahallerin Aydınlatılması- Bölüm 1: Kapalı Alandaki İş Mahalleri (Light and lighting-Lighting of work places- Part 1: Indoor work places) standardında, iç mekanlarda tavan, duvar ve döşemede önerilen yansıtma çarpanı değer aralıkları, tavan yüzeyi için 0,7-0,9; duvar yüzeyi için 0,5-0,8; döşeme yüzeyi için 0,2-0,6 olarak belirtilmiştir [23]. Bu doğrultuda çalışma kapsamında belirlenen renk düzenlerinin değer bileşeni, standartta verilen yansıtma çarpanı değeri aralık sınırları içerisinde yer alacak şekilde sabit tutulmuştur. Renk düzenlerinin değer bileşeni, tüm duvar yüzeylerinde 8,5, yansıtma çarpanı değeri %63,75 (8,5 × 7,5 = 63,75); tavan yüzeyinde 9,5, yansıtma çarpanı değeri %80,75 (9,5 × 8,5=80,75); döşeme yüzeyindeki ahşabın yaklaşık

değer bileşeni 6,5, ortalama yansıtma çarpanı değeri (6,5 × 5,5=35,75) olacak şekilde belirlenmiştir. Rengin griden ayrım derecesini veren doymuşluk bileşeninin, hacimde ortaya çıkabilecek renk etkileşiminin oluşmasını önlemek amacıyla çok yüksek olmasından kaçınılmıştır. Bu doğrultuda Munsell Renk Dizgesi'nden belirlenen 5 farklı türün 1,5 (çok az doymuş); 3,5 (az doymuş) ve 5,5 (orta doymuş) olmak üzere 3 farklı doymuşluk düzeyi belirlenmiştir. Belirlenen tüm bileşenler doğrultusunda 5 türün 3 farklı doymuşluk düzeyi ve 1 türsüz (gri) düzen ile toplam 16 farklı renk düzeninde hasta odası modeli oluşturulmuştur. Renklerin Munsell ve RGB değeri karşılıkları, Babel Color CT&A uygulaması kullanılarak elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında oluşturulan ve deneyimlenen hasta odası modelinde değerlendirilecek renk düzenlerinin uygulandığı alan dışındaki tüm yüzeylerin dokuları, mimari özellikleri ve belirlenen türlere göre yüzey renkleri sabit tutulmuş, değerlendirilecek renklerin vurgulanması için oldukça türsüz (nötr) bir ortam oluşturulmuştur. Hasta odası modelinde rengi sabit tutulan yüzeylerin renksel özellikleri Tablo 1'de açıklanmıştır.

Tablo 1. Hasta odası modelinde sabit tutulan yüzeylerin özellikleri.



Yüzey	Tür	Munsell Simgesi	RGB Simgesi	Yansıtma Çarpanı (r)	Renk
Tavan	Tüm Türler	N-9,5/0	241,241,241	%80,75	
Duvar	5-(Kırmızı)	5-8,5/0,3	215,213,212	%63,75	
	25-(Sarı)	25-8,5/0,3	215,213,209	%63,75	
	45-(Yeşil)	45-8,5/0,3	210,214,212	%63,75	
	65-(Mavi)	65-8,5/0,3	211,214,215	%63,75	
	85-(Mor)	85-8,5/0,3	214,213,214	%63,75	
	N-Türsüz (Gri)	N-8,5/0	213,213,213	%63,75	
Döşeme (Ahşap)	Tüm Türler	N-6,5/0	159,159,159	%35,75	

Söz konusu renkler ile hasta odasında, eş türler renk düzeni oluşturulmuştur. Değerlendirilecek renkler, modellenen hasta odası toplam yüzey alanının yaklaşık %30'u kadar alan kaplayacak biçimde; yatakta yatan hastanın bakış doğrultusundaki duvara ve ayakucundaki koltuğa uygulanarak, renk düzeni içinde vurgulanacak öğe (oluşturulan renk tasarımda ön plana çıkarılmak istenen öğe) olarak belirlenmiştir [22,24]. Modele yönelik aydınlatma koşulları, hasta odasının karma gök koşullarında yalnız pencereden gelen gün ışığı ile aydınlatıldığı varsayılarak oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında belirlenen renk düzenleri ile örnek hasta odası görselleri Tablo 2 ve Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Hasta odası renk düzenleri ve görselleri.

Tür	**Renk Düzeni**		
	Munsell Simgesi	**RGB Simgesi**	**Renk**
5- Kırmızı	5-8,5/1,5 (Çok Açık, Çok Az Doymuş Kırmızı)	224, 210, 209	
	5-8,5/3,5 (Çok Açık, Az Doymuş Kırmızı)	244, 204, 200	
	5-8,5/5,5 (Çok Açık, Orta Doymuş Kırmızı)	255, 197, 191	
25- Sarı	25-8,5/1,5 (Çok Açık, Çok Az Doymuş Sarı)	220, 213, 190	
	25-8,5/3,5 (Çok Açık, Az Doymuş Sarı)	227, 214, 163	
	25-8,5/5,5 (Çok Açık, Orta Doymuş Sarı)	233, 213, 136	
45-Yeşil	45-8,5/1,5 (Çok Açık, Çok Az Doymuş Yeşil)	197, 219, 206	
	45-8,5/3,5 (Çok Açık, Az Doymuş Yeşil)	175, 225, 197	
	45-8,5/5,5 (Çok Açık, Orta Doymuş Yeşil)	151, 230, 190	
65-Mavi	65-8,5/1,5 (Çok Açık, Çok Az Doymuş Mavi)	200, 216, 220	
	65-8,5/3,5 (Çok Açık, Az Doymuş Mavi)	175, 221, 232	
	65-8,5/5,5 (Çok Açık, Orta Doymuş Mavi)	143, 226, 245	
85-Mor	85-8,5/1,5 (Çok Açık, Çok Az Doymuş Mor)	216, 212, 219	
	85-8,5/3,5 (Çok Açık, Az Doymuş Mor)	221. 209, 232	
	85-8,5/5,5 (Çok Açık, Orta Doymuş Mor)	226, 205, 246	
N-Türsüz (Gri)	N-8,5/0 (Türsüz, Gri)	213, 213, 213	



Şekil 2. 5-8,5/5,5 (çok açık, orta doymuş kırmızı) ve 45-8,5/3,5 (çok açık, az doymuş yeşil) rengindeki hasta odaları görselleri.

Belirlenen 16 farklı renk düzeni ile oluşturulan hasta odası modellerinin 3840 × 2160 piksel boyutlarındaki 360° panoramik görselleri Cinema 4d programı ile oluşturulmuştur. Çalışmada, "Oculus Quest 2" marka sanal gerçeklik (VR) gözlüğü kullanılmıştır. Oluşturulan modellerin sanal gerçeklik gözlüğüne aktarılması, sanal bir uygulama olan "Sentio VR" uygulaması aracılığıyla sanal gerçeklik gözlüğüne aktarılmış; bu sayede katılımcıların, sanal gerçeklik ortamında oluşturulan gerçekçi bir mekanda deneyim yaşaması hedeflenmiştir.

3. Anket Tasarımı ve Uygulanması

Çalışma kapsamında belirlenen amacın incelenmesi için bir anket uygulanmış olup, ankete başlamadan önce katılımcılara araştırmanın amacı ve süreci hakkında gerekli bilgiler verilmiştir. Katılımcılardan, yaşam alanlarına yönelik renk tercihlerinin, kendilerinin mevcut mekansal deneyimleri doğrultusunda değerlendirilmesi beklenmiştir. Katılımcılar farklı demografik özelliklere sahip, daha önce hastanede yatış deneyimi olan sağlıklı kişilerden oluşmaktadır. Katılımcılardan, sanal gerçeklik ortamında hasta odasını deneyimlerken, kendilerini bu odada kalan bir hasta olarak hayal etmeleri ve genel sağlık durumlarının olumlu olduğunu düşünmeleri istenmiştir. Bu yönlendirme, katılımcıların hasta odası deneyimini daha gerçekçi bir bağlamda değerlendirmelerine yardımcı olmayı amaçlamaktadır.

Ankette katılımcılara, cinsiyet, yaş ve eğitim durumu gibi demografik bilgileri içeren sorular yöneltilmiş, ardından aşağıdaki sorular sorulmuş ve katılımcılardan yazılı olarak yanıtlamaları beklenmiştir.

- En sevdiğiniz renk ya da renkleri yazınız.
- Daha çok doymuş (canlı, parlak) renkleri mi, az doymuş (cansız, pastel, soluk) renkler mi sevdiğinizi yazınız.
- Yaşadığınız mekanda en fazla tercih ettiğiniz renkleri yazınız.
- Yaşadığınız mekanda daha çok doymuş (parlak, canlı) renkleri mi, az doymuş (cansız, pastel, soluk) renkleri mi tercih ettiğinizi yazınız.

Daha sonra katılımcılara sanal gerçeklik gözlüğü takılmış ve 16 farklı renk düzenindeki hasta odalarını deneyimlemeleri sağlanmıştır. Katılımcılardan, her bir renk düzenine yönelik beğeni düzeylerini 5'li likert ölçeğiyle "1-Hiç Beğenmedim", "5-Çok Beğendim" olacak şekilde değerlendirmeleri istenmiştir. Bu süreçte sorulan sorular, katılımcılar 16 farklı renk düzenindeki hasta odasını deneyimlerken araştırmacı tarafından sorulmuş ve not alınmıştır. Katılımcıların anketi cevaplamaları için bir süre sınırlandırması yapılmamış ancak anketler yaklaşık olarak 30-45 dk aralığında tamamlanmıştır.

4. Bulgular

Uygulanan anket sonucu elde edilen veriler, Google Forms uygulamasından Microsoft Excell programına aktarılmış, istatiksel veri analizi için SPSS 29.0.1.0 programı kullanılmıştır. Çeşitli eğitim durumunda ve mesleklerde olan toplam 70 kişinin katıldığı anket çalışmasının ilk bölümünde yer alan demografik soruların yanıtları Tablo 3'te verilmiştir. Tabloda bulunan "n" kişi sayısı yani frekans değerini, "%" toplam kişi sayısına oranlanan yüzdelik değeri ifade etmektedir.

Tablo 3. Ankete katılanların demografik sonuçları.

Değişkenler		**Frekans**	**Yüzde**
		n	**%**
Cinsiyet	Kadın	43	61
	Erkek	27	39
Yaş	18-35	38	54
	35-50	26	37
	50-65	6	9
	65 ve üzeri	0	0
Eğitim Durumu	İlköğretim	15	21
	Lise	16	23
	Önlisans	5	7
	Lisans	19	27
	Lisansüstü	15	21
Herhangi bir görme sorununuz var mı? (renk körülüğü, renk görme sapaklığı, vb.)	Evet	0	0
	Hayır	70	100
Daha önce herhangi bir uzmanlık alanı kapsamında (sanat, tasarım, fizik, psikoloji vb.) renk konularıyla ilgili eğitim aldınız mı?	Evet	17	24
	Hayır	53	76
Daha önce herhangi bir uzmanlık alanı kapsamında (sanat, tasarım, fizik, psikoloji vb.) renk konularıyla ilgili profesyonel olarak çalıştınız mı?	Evet	5	7
	Hayır	65	93

Katılımcılara anketin ilk bölümünde sorulan en sevdikleri renk ve yaşadıkları mekanda tercih ettikleri renklerin konuşma diliyle ifade edilen adları, Munsell Renk Dizgesi yaklaşık karşılıklarına dönüştürülmüş ve buna göre değerlendirilmiştir. Bu bağlamda sorulara verilen yanıtlar Munsell Renk Dizgesi karşılıkları, Pantone Renk Kartelası'ndaki renk adlarıyla eşleştirilip, Pantone karşılıklarının RGB değerlerine dönüştürülmesiyle elde edilmiş ve Tablo 4'te sunulmuştur.

Anket sonuçları, sorulara verilen cevap sayısının, toplam yanıt sayısına yüzdelik oranlarının bulunmasıyla hesaplanmıştır. Bu bağlamda katılımcıların anketin ilk bölümünde sorulan en sevdikleri ve yaşadıkları mekanda tercih ettikleri renklerin Munsell Renk Dizgesi'ne göre karşılıklarının frekans, yüzde ve sıra numaraları Tablo 5'te; en sevdikleri ve yaşadıkları mekanda tercih ettikleri doymuşluk düzeyi yanıtları Tablo 6'da verilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda katılımcıların yanıtları Munsell Renk Dizgesi'ndeki karşılıklarına göre incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Katılımcıların en sevdikleri ve yaşadıkları mekanda tercih ettikleri renk sıralamasında N-türsüz (gri)'ün en fazla tercih edildiği görülmüştür.
- Katılımcıların en sevdikleri ilk üç sıradaki renkler sırasıyla, N-Türsüz (gri), 65 (mavi), 45(yeşil), mavimsi mor (45< <55) ve 85 (mor) tir.
- Yaşadıkları mekanda tercih ettikleri ilk üç sıradaki renkler sırasıyla, N-Türsüz (gri), turuncumsu sarı (20< <25) ve sarımsı turuncu (15< <20) dur.
- Katılımcıların en sevdikleri ve yaşadıkları mekanda tercih ettikleri doymuşluk düzeyinin "az doymuş" olduğu görülmüştür.

Tablo 4. Katılımcıların en sevdikleri ve yaşadıkları mekanda tercih ettikleri renklerin Munsell Renk Dizgesi'ndeki karşılıkları.

Renk Düzeni						**Sorular**	
Munsell Renk Karşılığı	**Renk**	**Pantone Renk Kartelası Karşılığı**	**Renk Görseli**	**RGB Simgesi**	**Munsell Simgesi**	**En Sevilen Renk**	**Yaşadıkları Mekanda Daha Çok Tercih Edilen Renk**
						Frekans (n)	**Frekans (n)**
Turuncumsu Kırmızı	Mercan	Pantone Coral		22,123,106	7,6 R-6,1/9,1 7,6-6,1/9,1	-	1
	Oranj	Pantone Orange		235,94,42	9,7 R-5,7/13,9 9,7-5,7/13,9	-	1
Sarımsı Turuncu	Kahverengi	Pantone Cocoa Brown		105,82,69	5,1 YR-3,6/2,2 15,1-3,6/2,2	3	8
	Vizon	Pantone 170-5-U		152,139,127	7,6 YR-5,8/1,3 17,6-5,8/1,3	1	1
	Ekru	Pantone Ecru		241,229,212	8,2 YR-9,1/1,3 18,2-9,1/1,3	-	1
	Amber	Pantone Amber		231,178,98	9,8 YR-7,5/7,5 19,8-7,5/7,5	-	1
Turuncumsu Sarı	Bej	Pantone 466 U		190,167,133	0,9 Y-6,9/3,2 20,9-6,9/3,2	1	7
	Krem	Pantone Cloud Cream		229,221,200	2,8 Y-8,8/1,4 22,8-8,8/1,4	3	19
	Fildişi	Pantone Pearled Ivory		237,228,211	1,3 Y-9,1/1,2 21,3-9,1/1,2	-	2
	Kum Beji	Pantone Sandshell		218,209,191	0,9 Y-8,4/1,3 20,9-8,4/1,3	-	1
	Çakıl Kumu	Pantone Pebble		202,188,158	2,2 Y-7,6/2,3 22,2-7,6/2,3	-	1
	Hardal	Pantone Spicy Mustard		210,176,90	2 Y- 7,2/6,8 22 Y- 7,2/6,8	-	1
	Deve Tüyü	Pantone Buff		228,198,154	0,1 Y- 8,1/4 20,1- 8,1/4	-	1
	Ten Rengi Tonları	Pantone 468 U		223,206,175	0,8 Y-8,3/2,4 20,8-8,3/2,4	-	1
Mavimsi Yeşil	Turkuaz	Pantone Turquoise		102,182,172	4,9 BG-6,8/5,3 54,9-6,8/5,3	1	1
Mavimsi Mor	Lacivert	Pantone Navy Blue		63,63,110	8,2 PB-2,9/6,2 78,2-2,9/6,2	7	2
Morumsu Kırmızı	Pembe	Pantone Pink Cosmos		225,130,164	5,6 RP-6,5/9,8 95,6-6,5/9,8	5	3

Tablo 5. Katılımcıların en sevdikleri ve yaşadıkları mekanda tercih ettikleri renklerin Munsell Renk Dizgesi karşılıklarına göre sonuçları.

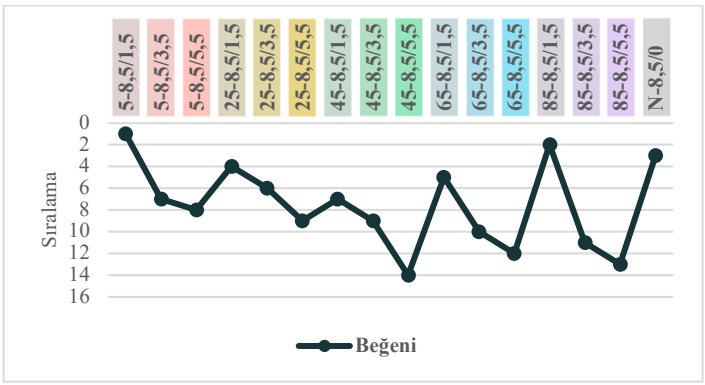
	Frekans (n)	**Yüzde (%)**	**Sıra No**	**Frekans (n)**	**Yüzde (%)**	**Sıra No**
5-Kırmızı	2	2.53	**6**	6	4.20	**6**
5< <10-Turuncumsu Kırmızı	-	-	**-**	2	1.40	**9**
15- Turuncu	4	5.06	**5**	4	2.80	**7**
15< < 20- Sarımsı Turuncu	4	5.06	**5**	11	7.69	**3**
20< <25-Turuncumsu Sarı	4	5.06	**5**	33	23.08	**2**
25-Sarı	2	2.53	**6**	4	2.80	**7**
45-Yeşil	7	8.86	**3**	8	5.59	**5**
45< <55- Mavimsi Yeşil	1	1.27	**7**	1	0.70	**10**
65-Mavi	14	17.72	**2**	9	6.29	**4**
75< <85- Mavimsi Mor	7	8.86	**3**	2	1.40	**9**
85-Mor	7	8.86	**3**	2	1.40	**9**
95< <5 Morumsu Kırmızı	5	6.33	**4**	3	2.10	**8**
N-Türsüz (Gri)	22	27.85	**1**	58	40.56	**1**
Toplam	**79**	**100**		**143**	**100**	

Tablo 6. Katılımcıların en sevdikleri ve yaşadıkları mekanda tercih ettikleri doymuşluk düzeyi sonuçları.

Sorulan Sorular	**Doymuşluk Düzeyi**	**n**	**%**
Daha çok doymuş (canlı, parlak) renkleri mi, az doymuş (cansız, pastel, soluk) renkleri mi sevdiğinizi yazınız.	Az doymuş	38	54.3
	Orta Doymuş	1	1.4
	Doymuş	31	44.3
	Toplam	**70**	**100**
Yaşadığınız mekanda daha çok doymuş (canlı, parlak) renkleri mi, az doymuş (cansız, pastel, soluk) renkleri mi tercih ettiğinizi yazınız.	Az doymuş	44	62.9
	Orta Doymuş	1	1.4
	Doymuş	24	34.3
	İkisi de	1	1.4
	Toplam	**70**	**100**

Hasta odası renk düzenlerine yönelik analiz, katılımcıların yanıt verdikleri "1" ve "2" numaralı puanlar toplanıp "En Olumsuz", "3" puan "Orta" ve "4" ve "5" numaralı puanlar toplanıp "En Olumlu" olacak şekilde ifade edilerek 3 gruba ayrılmıştır. Daha sonra her gruba yanıt veren kişi sayısının, toplam katılımcı sayısına oranının yüzdelik dilimi hesaplanarak puanlama yapılmıştır. Bu doğrultuda, hasta odası renk düzenlerine yönelik sıralama, katılımcıların "En Olumlu" düzeyde verdikleri puanlar doğrultusunda oluşturulmuş, Şekil 3'te verilmiştir. Anket sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

- Beğeni düzeyi en yüksek 3 hasta odası renk düzeni sırasıyla 5-8,5/1,5 (çok az doymuş kırmızı), 85-8,5/1,5 (çok az doymuş mor) ve N-8,5/0 (türsüz, gri) dır.
- Beğeni düzeyi en düşük 3 hasta odası renk düzeni sırasıyla, 45-8,5/5,5 (orta doymuş yeşil), 85-8,5/5,5 (orta doymuş mor) ve 65-8,5/5,5 (orta doymuş mavi) tur.
- Türler arasındaki beğeni düzeyi değerlendirildiğinde, incelenen tüm türlerde en yüksek beğeni düzeyinin her türün 1,5 (çok az doymuş) doymuşluk düzeyine sahip renkler olduğu; tüm türlerde en düşük beğeni düzeyinin her türün 5,5 (orta doymuş) doymuşluk düzeyine sahip renkler olduğu görülmüştür.
- N-türsüz yani grinin, - 5-8,5/1,5 (çok az doymuş kırmızı) ve 85-8,5/1,5 (çok az doymuş mor) hariç-tüm renk düzenlerindeki doymuşluk düzeylerinden daha yüksek beğeni düzeyi oranına sahiptir.
- Doymuşluklar arasında beğeni düzeyi değerlendirildiğinde, 1,5 (çok az doymuş) doymuşluğa sahip hasta odası renk düzenleri arasında en yüksek beğeni düzeyi oranına sahip renk düzenlerinin, türü 5 (kırmızı) ve 85 (mor) olan renk düzenleri olduğu; 3,5 (az doymuş) ve 5,5 (orta doymuş) doymuşluğa sahip hasta odası renk düzenleri arasında en yüksek beğeni düzeyi oranına sahip renk düzenlerinin, türü 5 (kırmızı) ve 25 (sarı) olan renk düzenleri olduğu görülmüştür. 1,5 (çok az doymuş) doymuşluğa sahip hasta odası renk düzenleri arasında en düşük beğeni düzeyi oranına sahip renk düzeninin türünün 45 (yeşil) olduğu; 3,5 (az doymuş) ve 5,5 (orta doymuş) doymuşluğa sahip hasta odası renk düzenleri arasında en düşük beğeni düzeyi oranına sahip renk düzenlerinin türünün 45 (yeşil), 85 (mor) ve 65 (mavi) olduğu görülmüştür.



Şekil 3. Hasta odası renk düzenlerinin kullanıcılar üzerindeki beğeni düzeyi.

Anketin ilk bölümünde katılımcıların yaşam alanlarına yönelik renk tercihlerini kendilerinin mevcut mekansal deneyimleri doğrultusunda değerlendirmelerine göre en sevdikleri ve yaşadıkları mekanda tercih ettikleri renklere verdikleri sözlü yanıtlar ile sanal ortamda deneyimledikleri hasta odası renk düzenlerine yönelik tercihlerine göre beğeni düzeylerinin yanıtları, Munsell Renk Dizgesi'ndeki ana renkler kapsamında karşılaştırılmıştır. Böylece bireylerin mevcut mekansal deneyimleriyle algıları arasındaki ilişki, işlevi doğrultusunda deneyimledikleri hacmi değerlendirmeleri sonucu ortaya çıkan tercihler bağlamında incelenmiştir. Sanal ortamda deneyimlenen hasta odası renk düzenlerinin Munsell Renk Dizgesi'ndeki ana renkler kapsamında incelenmesi için, her türün 3 farklı doymuşluk düzeyine ait "En Olumlu" düzeydeki frekans değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmış, ilgili sonuçlar Tablo 7'de verilmiştir.

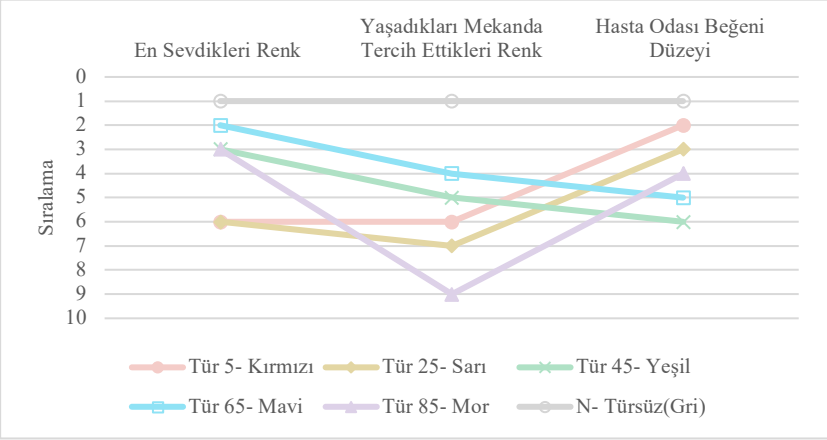
Tablo 7. Hasta odası renk düzenleri beğeni düzeyinin türlere göre sıralaması.

Munsell Renk Dizgesi	**En Olumlu Düzey Frekans Değerleri**			**Munsell Renk Dizgesi Ana Renklere Göre Ortalama Frekans(n)**	**Sıra No**
	Değer 8,5 Doymuşluk 1,5	**Değer 8,5 Doymuşluk 3,5**	**Değer 8,5 Doymuşluk 5,5**		
5-Kırmızı	49	33	32	38	2
25-Sarı	41	38	30	36,33≅36	3
45-Yeşil	33	30	13	25,33≅25	6
65-Mavi	39	29	25	31	5
85-Mor	48	27	24	33	4
N-Türsüz(Gri)	-	-	-	44	1

Elde edilen bu bulgularla, katılımcıların en sevdikleri renkler, yaşadıkları mekanda tercih ettikleri renkler ve hasta odasında beğeni düzeylerine göre renk tercihlerinin, Munsell Renk Dizgesi'ndeki ana renkler kapsamındaki karşılıklarına göre sıralamaları karşılaştırılmış, bulgular Şekil 4'te verilmiştir. Sonuçlara göre katılımcıların,

- En sevdikleri renklerin sırasıyla, N-Türsüz (gri), 65 (mavi), 45 (yeşil) ve 85 (mor), 5 (kırmızı) ve 25 (sarı),
- Yaşadıkları mekanda tercih ettikleri renklerin sırasıyla, N-Türsüz (gri), 65 (mavi), 45 (yeşil), 5 (kırmızı), 25 (sarı), 85 (mor),
- Hasta odasında beğeni düzeyleri doğrultusunda tercih ettikleri renklerin sırasıyla, N-Türsüz (gri), 5 (kırmızı), 25 (sarı), 85 (mor), 65 (mavi), 45 (yeşil),
- İncelenen üç grupta en fazla tercih edilenin N-Türsüz (gri),

olduğu görülmüştür. Bu doğrultuda, türsüz hariç diğer tüm renk türlerinin, incelenen 3 fonksiyona yönelik elde edilen sonuçlarla genel olarak paralellik göstermediği görülmüştür.



Şekil 4. Katılımcıların en sevdikleri ve yaşadıkları mekanda tercih ettikleri renkler ile hasta odası renk düzenleri beğeni düzeyinin türlere göre karşılaştırılması.

5. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada, katılımcıların yaşam alanlarına yönelik renk tercihleri kendilerinin mevcut mekansal deneyimleri doğrultusunda; hasta odasına yönelik renk tercihleri ise sanal gerçeklik ortamında deneyimlenerek değerlendirilmiştir. İlgili bulgular, Munsell Renk Dizgesi'ndeki ana renkler kapsamında incelenmiştir. Katılımcıların en sevdikleri ve yaşadıkları mekanda tercih ettikleri renkler ile sanal gerçeklik gözlüğü aracılığıyla deneyimlenen hasta odası renk düzenlerine yönelik tercihleri, ilgili sonuçlara göre karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, N-Türsüz (gri), diğer renk türlerine kıyasla daha fazla tercih edilmiştir. Bu bulgu, Yıldırım ve arkadaşlarının yaşam alanlarında yürüttüğü çalışmasında belirtilen, türsüzün renkli (sıcak ve soğuk) mekanlara göre daha olumsuz nitelendirilmesi ifadesiyle örtüşmemektedir [7]. Ayrıca, sıralamaya göre N-Türsüzden (gri) sonra 65 (mavi) ve 45 (yeşil) renk türleri, katılımcıların genel renk değerlendirmeleri ve yaşadıkları mekana yönelik algısal değerlendirmelerine göre olumlu bulunmuşken, hasta odası özelinde daha düşük düzeyde tercih edilmiştir. Bu durum, mavi ve yeşil renklerinin doğa ve su ögelerini çağrıştırmasına rağmen, aynı zamanda ameliyathane ve ölüm kavramlarıyla da ilişkilendirilmesiyle açıklanabilir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, katılımcıların yaşam alanlarına yönelik renk tercihlerinin kendilerinin mevcut mekansal deneyimleri ile değerlendirmesi ve hacmin renk düzenini işlevi doğrultusunda deneyimleyerek değerlendirmesi arasında, N-Türsüz (gri) dışında diğer tüm renk türlerinde farklılık olduğu tespit edilmiştir. Bu doğrultuda elde edilen bulgular, literatürde farklı işlevlere yönelik gerçekleştirilen çeşitli renk düzeni çalışmalarını destekleyici niteliktedir.

Katılımcıların 16 farklı hasta odası renk düzenine yönelik beğeni düzeyine göre tercihlerinin değerlendirilme sonuçlara göre, beğeni düzeyi en yüksek 5-8,5/1,5 (çok az doymuş kırmızı); beğeni düzeyi en düşük 45-8,5/5,5 (orta doymuş yeşil) renk düzenindeki hasta odasıdır. Sonuçlar Pile'ın çalışmasında belirttiği, hasta odasında yeşilin tonlarının kullanılmaması gerektiği ifadesiyle paralellik göstermiştir [3,4]. Hasta odası renk düzenlerine göre anket sonuçları değerlendirildiğinde çalışmadan, doymuşlukları aynı olan renk türleri arasında değerlendirme yapıldığında, rengin türüne bağlı olarak beğeni düzeyi oranının değişebileceği sonucu elde edilmiştir. Aynı zamanda türleri aynı olan renk düzenlerinin doymuşluklarına bağlı olarak beğeni düzeyinin değişebileceği ve hasta odası renk düzenlerinde doymuşluk düzeyi arttıkça her türün beğeni düzeyinin azaldığı net bir biçimde görülmektedir.

Katılımcıların sevdikleri ve yaşadıkları mekanda tercih ettikleri doymuşluk düzeyi sonuçları incelendiğinde, en yüksek oranda tercih edilen doymuşluk düzeyinin "az doymuş" olduğu görülmüştür. Hasta odası renk düzenlerine yönelik tercihleri incelendiğinde, her renk türünde en yüksek beğeni düzeyine sahip doymuşluk düzeyinin 1,5 (çok az doymuş) olduğu görülmüştür. Bu durum, ilgili sonuçlar arasında anlamlı bir ilişki olduğunu ve bulguların birbirleriyle paralellik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Sonuçlar, Carey'in fazla doymuş renklerin zihinde hoş olmayan çağrışımları etkileyebileceği ifadesiyle paralellik göstermiştir [12,25]. Yine benzer biçimde İbili'nin çalışmasında belirttiği hasta odalarında parlak renklerden kaçınılması gerektiğini ifadesiyle paralellik göstermiştir [9]. Ayrıca sonuçlara göre düşük doymuşluk düzeyindeki beğeni düzeyinin daha yüksek düzeyde olması, literatürdeki farklı işlevlerdeki mekanlarda uygulanan çalışmalarda belirtilen açık ve az doymuş renklerin daha koyu ve doymuş renklere göre daha olumlu anlamlar oluşturduğu ifadesiyle paralellik göstermiştir [26,27].

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar farklı uzmanlık alanlarında çalışan araştırmacılara ve renk tasarımcılarına katkı sağlayacak, renk konularıyla ilgili literatür çalışmalarını zenginleştirecek, disiplinlerarası etkileşim sağlayacaktır. Gelecekte uygulanacak benzer çalışmalarda, renk çeşitliliği arttırılarak literatüre konuya yönelik daha kapsamlı katkı sağlanabilir.

Kaynaklar

[1] Özata AC. Yapı biyolojisi kapsamında hasta odalarının incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye, 2018.
[2] Porter T, Mikellides B. Color for Architecture. New York, ABD: Van Nostrand Reinhold, 1976.
[3] Özsavaş N. Renk: Bir değerlendirme ölçütü olarak iç mekan tasarımındaki önemi ve bir ders içeriği önerisi. Sanatta Yeterlilik Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2015.
[4] Pile TJ. Color in Interior Design. New York, ABD: McGraw-Hill, 1997.
[5] Ergün B, Yıldırım K, Hidayetoğlu ML. Açık ofislerin duvar ve donatı elemanlarında kullanılan renklerin kullanıcıların algısal değerlendirmeleri üzerindeki etkileri. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 2023; 38(4): 2465-2475.
[6] Yıldırım K, Hidayetoğlu ML, Gökbulut N, Müezzinoğlu MK. Effects on students' perceptual evaluations of the wall colors used in design studios by the virtual reality method. International Journal of Architecture&Planning 2019; 7(1): 99-120.

[7] Yıldırım K, Hidayetoğlu ML, Capanoğlu A. Effects of ınterior colors on mood and preferences: comparions of two living rooms. perceptual and motor skills 2011; 112(2): 509-524.
[8] Gao C, Zhang S. The restorative quality of patient ward environment: test of six dominant design characteristics. building and environment 2020; 180: 1-11.
[9] İbili ŞG. Sağlık yapılarında iç mekan tasarımına yönelik renk etkileri. Yüksek Lisans Tezi, KTO Karatay Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2018.
[10] Alakuş YZ. Renk olgusu ve günümüz mimarisindeki yeri. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.
[11] Sema T. Mimarlık ve renk kavramı. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2006.
[12] Güller E. Sağlık yapılarında renk olgusunun özel dal hastaneleri hasta yatak odası örneklerinde araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2007.
[13] Mahnke FH. Color, Environment and Human Response. New York, ABD: Van Nostrand Reinhold Co. Inc., 1996.
[14] Tofle RB, Schwarz B, Yoon S, Max-Royale A. Color in Healthcare Environmentes-A Research Report. ABD: The Coalition for Health Environments Reseach (CHER), 2004.
[15] Zümrüt MS. Renk karşıtlık düzenlerinin renk uyumu, tercihi ve beğenisi açısından değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2023.
[16] Yüksektepe F. Hasta odası renk düzenlerinin kullanıcılar üzerindeki duyuşsal etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2024.
[17] Yüksektepe F, Küçükkılıç Özcan E. Hasta odası renk düzeninin kullanıcılar üzerindeki etkileri. 9. Uluslararası Mimarlık ve Tasarım Kongresi; 25-26 Kasım 2023; İstanbul, Türkiye. ss. 138-146.
[18] Sirel Ş. Kuramsal Renk Bilgisi. İstanbul, Türkiye: İDMM Akademisi Yayınları, 1974.
[19] Munsell AH. A Color Notation. Baltimore, Maryland, ABD: Munsell Color Company, Inc., 1971.
[20] Luke JT. The Munsell Color System: A Language for Color. New York, ABD: Fairchild Publications, 1996.
[21] Swirnoff L. Dimensional Color. New York, ABD: W. W. Norton & Company, 2003.
[22] Ünver R. Yapıların içinde ışık-renk Iilişkisi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1985.
[23] BS EN 12464-1:2021 Light and lighting- Lighting of Work Places.Part 1: Indoor Work Places. BSI Standards Publication, 2021.
[24] Özcan EK, Çelik K. Environmental color analysis and facade color design in a street rehabilitation: Adana, Kayalıbağ. Color Research and Application 2024; 49: 433-448.
[25] Carey DA. Hospice Inpatient Environments. New York, ABD: John Wiley and Sons, 1986.
[26] Kaya N, Crosby M. Color associations with different building types: An experimental study on american college students. color research and application 2006; 31(1): 67-71.
[27] Ulusoy B, Olguntürk N, Aslanoğlu R. Color semantics in residential interior architecture on different interior types. Color Research and Application 2020;45: 941-952.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 897-907, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1661969

KarcıFANN Yönteminin Yakınsama Kabiliyetinin Analiz Edilmesi

Hülya SAYGILI[1*], Meral KARAKURT[2], Ali KARCI[3]
[1,3] Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye
[2] Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Düziçi Meslek Yüksekokulu, Osmaniye, Türkiye
[*1]hulya-saygili@hotmail.com, [2]meralkarakurt@osmaniye.edu.tr,[3]ali.karci@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 20/03/2025; Kabul/Accepted: 29/09/2025)

Öz: YSA'ların optimizasyonunda yaygın kullanıma sahip tekniklerden gradyan iniş tabanlı geriye yayılım algoritmalarında, ağın çıktısı ile beklenen çıktı arasındaki hata hesaplanmakta ve bu hata geriye doğru yayılarak ağırlıklar güncellenmektedir. Ağırlıkların güncellenmesi işlemi, modelin öğrenme süresini ve performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Gradyan iniş tabanlı algoritmalarda kullanılan öğrenme katsayısının çok büyük ya da küçük seçilmesi ezberleme, öğrenememe ve ağırlıkların yakınsamaması gibi problemlere neden olmaktadır. YSA'ların eğitimi aşamasında ağırlıkların, iterasyon sayısı arttıkça salınımlar yapmadan kararlı bir eğri çizmesi, başarılı bir öğrenme gerçekleştiğini ya da yerel minimum bir noktaya takıldığını göstermektedir. Bu ayrımı yapabilmek için ağırlık değişim grafikleriyle beraber ağın ürettiği hata değerlerine bakılmalıdır. Bu makalede, kesir dereceli türevle modelleri daha iyi ifade etmek ve YSA'larda karşılaşılan problemleri çözmek amacıyla kullanılan KarcıFANN yönteminin yakınsama, ezberleme durumu ve öğrenme performansına etkisi incelenmiştir. Sabit bir öğrenme katsayısı yerine kesir dereceli türevin kullanıldığı KarcıFANN yöntemi ile ADAM, Momentumlu GD ve SGD yöntemleri karşılaştırılmıştır. Türevlerin öğrenmeye olan etkilerini incelemek amacıyla XOR probleminin çözümü deneysel çalışmalarda ele alınmış ve yöntemlerin ağırlık değişimleri gözlemlenmiştir. MSE değerleri ve ağırlık değişim grafikleri incelendiğinde en başarılı yöntemin Momentumlu GD, ikinci başarılı yöntemin KarcıFANN yöntemi olduğu ve ADAM yönteminin de yerel bir minimum noktaya takıldığı görülmektedir.

Anahtar kelimeler: KarcıFANN, yapay sinir ağları, ADAM, SGD, momentumlu GD.

Analyzing the Convergence Ability of the KarcıFANN Method

Abstract: In gradient descent–based backpropagation algorithms, which are among the most widely used techniques for the optimization of ANNs, the error between the network's output and the expected output is calculated, and this error is propagated backward to update the weights. The process of updating the weights significantly affects both the learning time and the performance of the model. In gradient descent–based algorithms, choosing a learning rate that is too large or too small may lead to problems such as overfitting, failure to learn, or the weights not converging. During the training phase of ANNs, if the weights follow a stable curve without oscillations as the number of iterations increases, this indicates either successful learning or that the model is stuck at a local minimum. To distinguish between these cases, both the weight change graphs and the error values produced by the network should be examined.In this study, the effects of the KarcıFANN method—which uses fractional derivatives to better represent models and to address the problems encountered in ANNs—on convergence, overfitting, and learning performance were investigated. The KarcıFANN method, in which a fractional derivative is used instead of a fixed learning rate, was compared with ADAM, Momentum-based GD, and SGD methods. To examine the effects of derivatives on learning, the XOR problem was addressed in the experimental studies, and the weight changes of the methods were observed. When the MSE values and weight change graphs were analyzed, it was observed that the most successful method was Momentum-based GD, the second most successful was the KarcıFANN method, and the ADAM method got stuck at a local minimum.

Key words: KarcıFANN, artificial neural networks, ADAM, SGD, momentum-based GD.

1. Giriş

Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beynindeki biyolojik sinir hücrelerinin (nöronların) çalışma prensiplerinden esinlenerek tasarlanmış, bilgi işleme ve öğrenme yeteneğine sahip matematiksel modellerdir. Bir YSA, veriyi işlemek için kullanılan nöronlar ve bu nöronlar arasındaki bağlantılar (ağırlıklar) gibi temel bileşenlerden oluşur

* Sorumlu yazar: hulya-saygili@hotmail.com. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0003-1926-9918, [2] 0000-0001-7318-2798, [3] 0000-0002-8489-8617

[1]. Görüntü işleme, doğal dil işleme, sağlık, finans, otonom sistemler gibi birçok karmaşık problemin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır.

YSA'larda ağırlıklar, giriş verisinin çıkış verisi üzerine etkisini belirleyen temel unsurlardır. Ağırlık değişimi, modelin performansını, genelleme kabiliyetini ve karar verme süreçlerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle ağırlıkların optimize edilmesi için optimizasyon yöntemleri kullanılarak geri yayılımlı YSA'lar eğitilmektedir. Geriye yayılımlı YSA' ların çalışması, ileri besleme ve geriye yayılım olarak iki aşamalıdır. İleri besleme aşamasında, ağa giriş verileri sunularak her veri ile o veriye ait ağırlıklar çarpılarak bu çarpımlar toplanmakta ve ağın bir çıktı değeri ile hata değeri üretmesi sağlanmaktadır. Elde edilen hata değeri, çıkış katmanından geriye doğru yayılarak ağırlıklar güncellenmektedir. Bu süreç, belli bir eğitim iterasyonu boyunca ya da hata değeri, istenen minimum değere indirilene kadar tekrarlanmaktadır [2]. Ağırlık güncelleme işlemi, modelin öğrenme sürecini ve yakınsama durumunu doğrudan etkilemektedir. Bir modelin yakınsaması, ağın eğitim verileri üzerinde giderek daha iyi performans göstermesi ve eğitim sonunda optimum çözüme ulaştığı anlamına gelmektedir. Ağırlık değişimleri, bu süreci hızlandırabilmekte, yavaşlatabilmekte ya da engelleyebilmektedir. YSA'ların eğitiminin başarılı olabilmesi için ağırlıkların güncellenmesinde kullanılan parametrelerden biri optimizasyon algoritmalarıdır.

Gradyan tabanlı optimizasyon algoritmalarının kullanıldığı geriye yayılımlı YSA'larda ağırlıkların ne kadar güncelleneceğini belirleyen önemli bir parametre de öğrenme katsayısıdır. Bu katsayısının seçiminde bazı belirsizlikler vardır. Öğrenme katsayısının çok küçük seçilmesi, öğrenme sürecini yavaşlatmakta ve dolayısıyla eğitimin süresini uzatmaktadır [3]. Bu durum, modelin istenilen şekilde öğrenememesine, yakınsayamamasına ve optimizasyonun tamamlanamamasına neden olabilmektedir. Öğrenme katsayısı büyük seçildiğinde de ağırlık güncellemeleri büyük adımlarla gerçekleştiğinden model kararsız hale gelmekte ve öğrenme süreci başarısız olabilmektedir. Bu durumlar, modelin öğrenememe ya da ezberlemesine neden olabilmektedir. Öğrenememe, modelin eğitim ve test aşamalarında çok büyük hata değerleri üreterek problemi çözememesidir. Ezberleme ise modelin eğitim aşamasında düşük hata değerleri üretirken test aşamasında çok büyük hata değerleri üretmesidir.

KarcıFANN yöntemi, öğrenme katsayısı yerine her adımdaki hata değerinin ilgili ağırlıklara göre hesaplanan kesir dereceli türevinden faydalanmakta ve ağırlıkların bu hatalara göre güncellenmesini sağlamaktadır. Böylece, sabit bir öğrenme katsayısı yerine ağın ürettiği değerlerin kullanılması ile ağa dışarıdan yapılan müdahaleyi en aza indirmektedir. KarcıFANN yöntemi, ağın daha erken süreçte yakınsamasını sağlayabilmekte ve ezberleme, öğrenememe, kaybolan ya da patlayan gradyan problemleri gibi YSA'da çok karşılaşılan sorunları çözebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, KarcıFANN yönteminin yakınsama kabiliyetini ve ağırlık değişimleri üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemekle beraber SGD, Momentumlu GD ve Adam yöntemleri ile karşılaştırmalı biçimde değerlendirmektir. XOR problemi üzerinde yürütülen deneylerde, yöntemlerin performansları MSE değerleri ve ağırlık değişim grafikleri üzerinden değerlendirilerek yakınsama, ezberleme ve öğrenme performansları ortaya konulmuştur.

Yapılan tüm deneyler Python 3.12.7 sürümü kullanılarak Anaconda dağıtımı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Veri işleme ve sayısal hesaplamalarda NumPy (v1.26.4), SciPy (v1.13.1), scikit-learn (v1.5.1) ve pandas (v2.2.2) kütüphanelerinden yararlanılmıştır. Sonuçların görselleştirilmesinde Matplotlib (v3.9.2) kullanılmıştır.

KarcıFANN algoritması ile tasarlanan modelde alfa parametresinin 0.1 ile 3.5 aralığı dışındaki değerler için başarılı bir öğrenme gerçekleşmemiştir. Bu nedenle alfa parametresi 0.1-3.5 aralığında sınırlandırılmıştır.

Çalışmanın devamı 4 bölümden oluşmaktadır. Bölüm 2'de ilgili literatür taraması yapılmıştır. Bölüm 3'te optimizasyon algoritmaları açıklanmıştır. Bölüm 4'te XOR probleminin çözümü ve elde edilen bulgular açıklanmıştır. Son bölümde ise sonuçlar tartışılmıştır.

2. İlişkili Çalışmalar

YSA'ların eğitim sürecinde ağırlıkların kısa sürede yakınsaması ve kararlı davranması beklenir. Ağırlıkların eğitim boyunca salınımlar yapması öğrenmenin başarısız olduğu anlamına gelmektedir. Bu bölümde, ağırlıkların değişimleri ve optimizasyonları amacıyla yapılan bazı çalışmalar sunulmaktadır.

Brutzkus ve Globerson, büyük ölçekli modellerin küçük modellere göre daha iyi genelleme yapmasının nedenlerini açıklamak amacıyla bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmada klasik XOR problemi genişletilmiş ve max-pooling içeren üç katmanlı bir evrişimsel sinir ağı (CNN) üzerinden analiz gerçekleştirilmiştir. Ağırlık kümelenmesi ile özellik uzayının keşfi arasındaki etkileşimin modelin genelleme performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir [4].

Pinto ve Tavares, yaptıkları çalışmada Parametric ReLU (PReLU) aktivasyon fonksiyonu kullanarak klasik olarak çok katmanlı yapay sinir ağları ile çözülebilen XOR probleminin tek katmanlı bir sinir ağı ile

çözülebileceğini ortaya koymuşlardır. Yapılan deneysel çalışmalarda PReLU, çok katmanlı algılayıcı (MLP) ve Büyüyen Kosinüs Birimi (GCU) aktivasyon fonksiyonları ile karşılaştırılmış ve yüksek başarı sağladıklarını sunmuşlardır [5]. Yang vd., yazılım tabanlı geri yayılım yöntemi ve donanım tabanlı RWC (Random Weight Change – Rastgele Ağırlık değişimi) yöntemini içeren yeni ve hibrit bir öğrenme yöntemi önererek çevrim tabanlı sinir ağlarının geliştirilmesini amaçlamışlardır. Geri yayılımla öğrenilen ağırlık değerlerini sinir ağının donanımına aktarırken yazılım ve donanım arasındaki farktan dolayı önemli miktarda çıktı hatası almışlardır. Önerdikleri yöntemde, basit bir donanımda uyguladıkları RWC algoritmasının tamamlayıcı bir öğrenmesiyle bu hatayı azaltmışlar ve yöntemlerinin kullanışlılığını göstermişlerdir [6]. Starodub vd., YSA'ların öğrenmesini optimize etmek amacıyla gradyanların ağırlık değerlerini değiştirdiği bir yöntem önermiştir. İlgili çalışma, öğrenmenin başarısız olduğu kısımlarda gradyan ağırlıkları değiştirilerek ağ ağırlıklarının eğitim sırasında ne kadar aktif olarak değiştiğini açıklamayı ve dolayısıyla eğitim sürecini anlamayı sağlamaktadır [7]. Li vd, orijinal Hopfield sinir ağları modelini, ağın ağırlıklarını zamanla değişecek şekilde uyarlayarak ağırlık fonksiyonu matrisli Ayrık Hopfield sinir ağları (Discrete Hopfield neural networks with weight function matrix - DHNNWFM) adını verdikleri yöntemi önermişlerdir. Kullandıkları ağırlık fonksiyon matrisini, negatif olmayan ve monoton artan şekilde oluşturmuşlardır. Yaptıkları deneysel çalışmalar sonunda yöntemlerinin istedikleri gibi yakınsadığını göstermişlerdir [8]. Nagel vd., YSA'ların yüksek doğrulukta ve hızlı öğrenmesini sağlamak amacıyla ağırlık ve aktivasyon fonksiyonlarının değerlerinin sıkıştırılarak işlendiği nicelemeye duyarlı eğitim (quantization-aware training - QAT) yöntemini kullanmışlardır. İlgili çalışmada, eğitim aşamasında nicelenmiş ağırlık değerlerinin salınımlarını önlemek için iki yeni QAT algoritmasını önermişlerdir: salınım sönümleme ve yinelemeli ağırlık dondurma. MobileNetV2, MobileNetV3 ve EfficentNet-lite ağ modelleri üzerinde yaptıkları çalışmalarda başarılı sonuçlara ulaşmışlardır [9]. Benzer amaçlarla Nagel vd. ve Banner vd. QAT yöntemini kullanarak çalışmalar yapmışlardır [10-11]. Agrawal ve Tendle derin sinir ağlarının katman bazında ağırlık değişimlerini inceledikleri çalışmada, eğitim süreci boyunca her katmandaki ağırlıkların değişim oranları analiz edilmiş ve derin katmanlarda daha belirgin ağırlık güncellemelerinin gerçekleştiği ortaya koymuşlardır. Elde ettikleri bulgular ile derin sinir ağlarının öğrenme dinamiklerinin katmanlar arası farklılık gösterdiğini ve belirli katmanların öğrenmeye daha fazla katkı sağladığını göstermişlerdir [12]. Wei vd., kesirli diferansiyel denklemlere dayalı çok katmanlı bir yapay sinir ağı modeli önermişlerdir. Çalışmada Caputo türevinden yararlanılmış ve parametre güncellemeleri Adam algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Gerçek yaşam verileriyle yapılan tahmin çalışmalarında, önerilen yöntemin klasik lojistik modellere kıyasla daha yüksek doğruluk ve daha fazla parametre serbestliği sağladığı gösterilmiştir [13]. Ancak bu çalışmada optimizasyon süreci, öğrenme katsayısına bağımlı olarak gerçekleşmektedir.

3. Optimizasyon Algoritmaları

Optimizasyon, bir problemi çözen en uygun çözümü bulma sürecidir. Gerçek hayattaki çoğu karmaşık problemi çözebilmek amacıyla çeşitli optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır. Gradyan iniş tabanlı bazı optimizasyon algoritmaları bu bölümde açıklanmaktadır.

3.1. Gradyan İniş Algoritması (GD)

GD algoritması, Rumelhart (1986) tarafından önerilmiştir. GD algoritması, hata fonksiyonunun değerini en aza indirmek için fonksiyonun gradyanını (türevini) kullanarak iteratif bir yaklaşım uygulamaktadır [2]. Bu yöntem ile ağ eğitilirken giriş katmanına eğitim verilerinin tümü sunulmaktadır. YSA'larda ağırlık değerlerinin GD algoritması ile güncellenmesi işlemi Denklem 1 ile formüle edilmektedir.

$$w_{t+1} = w_t - \alpha \frac{\partial L}{\partial w_t} \tag{1}$$

α, öğrenme oranı; w_t, ağırlık parametresi; L, hata fonksiyonunu; $\partial L/\partial w_t$, her bir örneğin gradyanıdır.

GD algoritması, büyük veri setlerinde etkili bir şekilde çalışabilmekte fakat bazı durumlarda yerel minimum (ya da maksimum) noktalara takılma, gradyanların kaybolması ve gradyan patlaması gibi problemlere neden olmaktadır. Bu problemleri çözebilmek amacıyla stokastik gradyan iniş, mini-batch gradyan iniş gibi GD tabanlı algoritmalar geliştirilmiştir.

3.2. Stokastik Gradyan İniş Algoritması (SGD)

SGD algoritması, hata fonksiyonunu en aza indirmek amacıyla modelin ağırlıklarını iteratif olarak güncellemektedir. Geleneksel GD algoritmasından farklı olarak, tüm eğitim verileri için gradyan hesaplamak yerine küçük veri grupları ya da her bir veri örneği için gradyan hesaplanarak parametre güncellemesi yapılmaktadır. Bu özelliği, SGD'yi büyük veri setleri için hesaplama açısından daha verimli kılmaktadır. Ancak, SGD algoritmasında gradyan hesaplamalarının her bir eğitim örneği için yapılması, salınımlara neden olabilmektedir. Bu salınımlar, öğrenme sürecinde kararsızlığa yol açarak algoritmanın global minimuma ulaşmasını zorlaştırabilir [14]. SGD algoritmasında ağırlık parametrelerinin güncelleme işlemi, GD algoritmasındaki gibi Denklem 1 ile gösterilen güncelleme denklemiyle hesaplanmaktadır.

3.3. ADAM

Uyarlanabilir Moment Tahmini (Adaptive Moment Estimation, ADAM) makine öğrenme ve derin öğrenme alanında kullanılan optimizasyon yöntemidir. Büyük veri setleri ve yüksek parametre sayısına sahip modeller de etkili olan bu yöntem, Momentum ve RMSProp yöntemlerinin avantajları birleştirdiği için daha hızlı ve kararlı bir yakınsama sağlamaktadır [15]. ADAM yönteminde moment değerleri Denklem 2 ve Denklem 3 ile gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. Ağırlıkların güncellenmesi için de Denklem 4 kullanılmaktadır.

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1-\beta_1) g_t \, , v_t = \beta_2 v_{t-1} + (1-\beta_2) g_t^2 \tag{2}$$

$$\widehat{m_t} = \frac{m_t}{1-\beta_1^t} \, , \widehat{v_t} = \frac{v_t}{1-\beta_2^t} \tag{3}$$

$$w_t = w_{t-1} - \frac{\alpha}{\sqrt{\widehat{v_t}+\epsilon}} \widehat{m_t} \tag{4}$$

Yukarıdaki denklemlerde, m_t ilk moment, v_t ikinci momenti, g_t gradyan, $\beta_1$ve β_2 moment tahminleri için çarpanlar, α öğrenme oranı, Є sayısal kararlılığı artırmak için küçük bir değeri ifade etmektedir.

3.4. Momentumlu GD

Momentumlu gradyan iniş algoritması, gradyan iniş algoritmasına momentum terimi eklenerek oluşturulan bir yaklaşımdır. Bu terim, gradyan iniş algoritmasına göre daha hızlı, daha doğru ve daha kararlı öğrenmesini sağlamaktadır [16]. v_t hız (velocity) vektörü, β momentum katsayısı, η öğrenme oranı, $\nabla f(\theta w_t)$ kayıp fonksiyonunun gradyanı ve w_t ağırlık değeri olmak üzere v_t değeri, Denklem 5 ile ve ağırlık güncelleme işlemi Denklem 6 ile gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$v_t = \beta v_{t-1} + \nabla f(w_t) \tag{5}$$

$$w_{t+1} = w_t - \eta v_t \tag{6}$$

Momentum teriminin eklenmesi, salınımları önleyerek algoritmanın daha hızlı yakınsamasını ve yerel minimumlara takılmamasını sağlamaktadır. Ancak, her ağırlık değeri için v_t hız vektörünün hesaplanması gerektiğinden hafıza ve hesaplama maliyeti artabilmektedir [17].

3.5. Karcı kesir dereceli YSA (KarcıFANN)

Karcı kesir dereceli YSA yöntemi, SGD yönteminde kullanılan sabit bir öğrenme katsayısı yerine sistemin ürettiği hataların ağırlık değerlerine göre kesir dereceli türevinin kullanıldığı bir yaklaşımdır. SGD yönteminde kullanılan öğrenme katsayısının seçimine dair belirsizlikler, problemlerin modellenmesinde ve karmaşık sistemlerin analizinde başarısızlıklara neden olabilmektedir. Bu durumlar, YSA'larda öğrenememe, ezberleme, yerel minimum noktalara takılma ve çözüme yakınsayamama gibi birçok problemi beraberinde getirmektedir. Bu problemleri çözmek amacıyla Karcı kesir dereceli türev kullanımı daha doğru ve etkin bir modelleme süreci sağlamaktadır. Ayrıca, KarcıFANN yöntemi kullanılarak global modeller üretilebilmektedir.

KarcıFANN yönteminde kesir dereceli türev tanımından gelen çarpan, her adımdaki hata değerine göre dinamik olarak değişmektedir. Böylece, sistemden gelen verilerle işlem yapılarak sisteme dışarıdan yapılan müdahale azaltılmakta ve modelin öğrenme sürecini daha erken aşamalarda tamamlaması sağlanmaktadır [18-23]. $f(x)$, hata fonksiyonunu; $f'(x)$, hata fonksiyonunun Newton türevini *ve* α, Karcı kesir dereceli türevin derecesini göstermek üzere Karcı kesir dereceli türev Denklem 7 ve ağırlıkların güncelleme işlemi Denklem 8 ile gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$D_{\alpha}^{K} f(x) = \left(\frac{f(x)}{x}\right)^{\alpha-1} . f'(x) \tag{7}$$

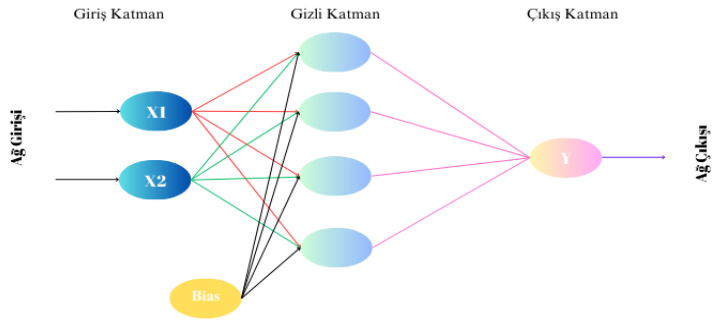
$$w_{t+1} = w_t - D_{\alpha}^{K} \frac{J}{W_t} \tag{8}$$

4. XOR Probleminin Çözümü

4.1.Doğrusal Olmayan Problem: XOR Problemi

XOR problemi, YSA uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir problemdir. XOR fonksiyonu, doğrusal değildir ve fonksiyona girilen iki giriş değeri aynı ise 0, farklı ise 1 değerini döndürmektedir. XOR problemi, doğrusal ayrımı mümkün olmayan bir problem olması nedeniyle tek katmanlı YSA'lar ile çözülemez. Bu problemin çözümünde geri yayılımlı çok katmanlı YSA'lar kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında SGD, Momentumlu GD, Adam ve KarcıFANN yöntemlerini kullanarak XOR probleminin çözümü için oluşturulan YSA modeli Şekil 1 ile gösterilmektedir. YSA modeli, giriş katmanında 2 nöron, ara (gizli) katmanda 4 nöron ve çıktı katmanında 1 nöron olmak üzere 3 katmanlı olarak tasarlanmıştır.



Şekil 1. XOR problemi çözümü için kullanılan ağ modeli.

Modelde ağırlık değerleri başlangıçta rastgele atanmış ve tüm optimizasyon yöntemleri için aynı olarak belirlenmiştir. Ağların eğitimi sırasında, eğitim tur sayısı (iterasyon, epoch) sayısı 10.000 olarak ayarlanmıştır. Modelin hata fonksiyonu olarak Ortalama Karesel Hata (Mean Squared Error – MSE) kullanılmıştır. Yi , beklenen değer; Ygi, modelin ürettiği değer ve n, örnek sayısını belirtmek üzere MSE fonksiyonu, Denklem 9 ile gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (Y_i - Yg_i)^2 \tag{9}$$

4.2. Uygulama Sonuçları

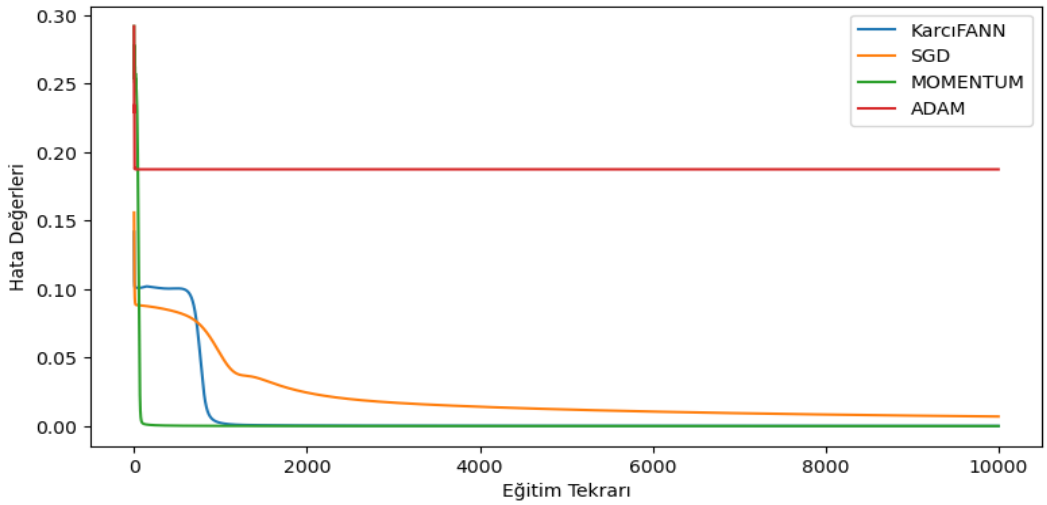
0,1 ile 3,5 aralığında belirlenen alfa ve öğrenme katsayısı değerleri kullanılarak dört optimizasyon yöntemiyle üretilen MSE değerleri Tablo 1 ile gösterilmektedir. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda, Momentumlu GD algoritmasının 0,9 ve 1,0 dışındaki tüm alfa ve öğrenme katsayısı değerleri için en başarılı sonuçları ürettiği ve ADAM algoritmasının da 0,1 ve 0,2 dışındaki tüm alfa ve öğrenme katsayısı değerleri için en yüksek MSE değerleri üreterek başarısız olduğu görülmektedir. Alfa ve öğrenme katsayısının 0,1 ve 0,2 değerleri için KarcıFANN, SGD ve ADAM yöntemleriyle eğitim aşamasında üretilen MSE değerleri test aşamasına göre daha

düşük ve ADAM yönteminin her iki veri setindeki MSE değerleri KarcıFANN ve SGD yöntemlerine göre daha düşük olarak ölçülmüştür. Alfa ve öğrenme katsayısının 0,3 değerinde KarcıFANN ve SGD yöntemlerinde bir önceki değerlere benzer MSE değerleri üretilirken ADAM yönteminde eğitim ve test aşamalarında çok yakın MSE değerleri üretilmiştir. Alfa ve öğrenme katsayısının 0,5-0,8 ve 2,1-3,5 aralığındaki değerler için SGD yöntemi KarcıFANN ve ADAM yöntemlerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. ADAM yöntemi, 0,5-3,5 aralığındaki her alfa ve öğrenme katsayısı değeri için eğitim ve test aşamalarında hemen hemen aynı MSE değerlerini üretmektedir. Alfa ve öğrenme katsayısının 0,9 ve 1,0 değerleri için tüm veri setlerinde KarcıFANN yöntemi daha düşük MSE değerleri üretmektedir. KarcıFANN yöntemi, alfa katsayısının 1,0 değerinde SGD yöntemine dönüşmektedir. Alfa ve öğrenme katsayısının 1,1-2,0 aralığındaki değerleri için KarcıFANN yöntemi, Momentumlu GD'ye göre daha yüksek ancak diğer iki yönteme göre daha düşük MSE değerleri üretmektedir.

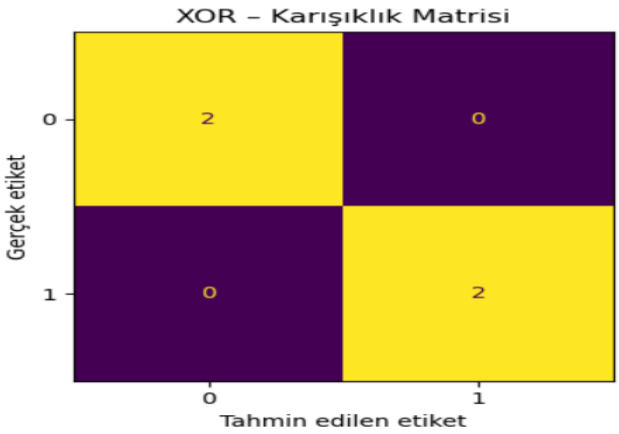
Tablo 1. XOR probleminin çözümünde farklı alfa ve öğrenme oranları için KarcıFANN, SGD, ADAM ve Momentumlu GD yöntemleri kullanılarak elde edilen MSE değerleri.

Alfa/ Öğrenme Oranı	KarcıFANN		SGD		ADAM		Momentumlu GD	
	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
0,1	0,07812500	0,500000	0,08253006	0,24845703	0,062652000	0,166669377	0,000217	0,00021726
0,2	0,07812500	0,49999998	0,08094572	0,24608712	0,062652000	0,12500013	0,000103	0,000102621
0,3	0,07812499	0,49999993	0,06762222	0,2129957	0,125027000	0,125000085	6,7e-05	6,6765e-05
0,4	0,07812470	0,49999813	0,02841464	0,07935195	0,125016000	0,062512554	4,9e-05	4,9365e-05
0,5	0,22438208	0,10426082	0,01887384	0,05040344	0,187504000	0,187500025	3,9e-05	3,9121e-05
0,6	0,06295320	0,06284979	0,01489248	0,03912254	0,187502000	0,187500018	3,2e-05	3,2386e-05
0,7	0,06282608	0,06283014	0,01261580	0,03284678	0,187502000	0,187500014	2,8e-05	2,7628e-05
0,8	0,06256070	0,06256367	0,01109465	0,02871668	0,187501000	0,187500011	2,4e-05	2,4094e-05
0,9	1,89923899e-06	8,06849866e-06	0,00998274	0,02572742	0,187501000	0,187500007	2,1e-05	2,1372e-05
1,0	4,95884825e-06	1,40047073e-05	0,00912247	0,02343168	0,187501000	0,187500005	1,9e-05	1,9215e-05
1,1	0,00016967	0,00031379	0,00843138	0,02159879	0,187501000	0,187500004	1,7468e-05	1,7e-05
1,2	0,00031259	0,00058045	0,00786209	0,02009758	0,187500000	0,187500003	1,6e-05	1,6029e-05
1,3	7,85829338e-05	0,00038912	0,00738564	0,01884862	0,187500000	0,187500003	1,5e-05	1,4828e-05
1,4	9,31395461e-05	0,00033893	0,00698383	0,01780243	0,187500000	0,187500002	1,4e-05	1,3816e-05
1,5	0,00012893	0,00050246	0,00664565	0,0169295	0,1875	0,187500002	1,3e-05	1,2956e-05
1,6	0,00203343	0,00433123	0,0063659	0,016217	0,1875	0,187500002	1,2e-05	1,222e-05
1,7	0,00073380	0,0020462	0,00614618	0,01567255	0,1875	0,187500001	1,2e-05	1,1591e-05
1,8	0,00145636	0,00398954	0,00600067	0,01534443	0,1875	0,187500001	1,1e-05	1,1054e-05
1,9	0,00304841	0,00690758	0,00598272	0,01541972	0,1875	0,187500001	1,1e-05	1,0594e-05
2,0	0,0003015	0,00258429	0,006415	0,01737656	0,1875	0,187500001	1e-05	1,0189e-05
2,1	0,03057281	0,09036979	0,00624748	0,01619678	0,1875	0,187500001	1e-05	9,774e-06
2,2	0,06158396	0,18229702	0,00559155	0,01450733	0,1875	0,187500001	9e-06	9,215e-06
2,3	0,05739571	0,17876757	0,00524042	0,01360238	0,1875	0,187500001	8e-06	8,372e-06
2,4	0,07754852	0,24460873	0,00498979	0,01295627	0,1875	0,1875	8e-06	7,6e-06
2,5	0,06711669	0,21677706	0,00479145	0,01244448	0,1875	0,1875	7e-06	7,264e-06
2,6	0,07536766	0,23818847	0,00462662	0,01201858	0,1875	0,1875	6e-06	5,778e-06
2,7	0,07536766	0,23818847	0,00448617	0,01165502	0,1875	0,1875	5e-06	5,358e-06
2,8	0,07405632	0,23346845	0,00436522	0,01134117	0,1875	0,1875	5e-06	5,233e-06
2,9	0,08426657	0,24887302	0,00426122	0,0110704	0,1875	0,1875	5e-06	5,343e-06
3	0,07340475	0,24726232	0,00417332	0,01084049	0,1875	0,1875	7e-06	6,872e-06
3,1	0,08165853	0,2497479	0,0041026	0,010654	0,1875	0,1875	7e-06	6,724e-06
3,2	0,08171047	0,24941668	0,0040533	0,01052175	0,1875	0,1875	7e-06	6,523e-06
3,3	0,08655396	0,24944721	0,00403802	0,01047583	0,1875	0,1875	7e-06	6,327e-06
3,4	0,08627174	0,24771767	0,00410504	0,01064029	0,1875	0,1875	6e-06	6,141e-06
3,5	0,08494966	0,25033277	0,00532371	0,01368371	0,1875	0,1875	6e-06	5,964e-06

Alfa ve öğrenme katsayısının Şekil 2 ile 1,4 değeri için KarcıFANN, Momentumlu GD, ADAM ve SGD yöntemlerine ait MSE grafiği, Şekil 3 ile KarcıFANN yöntemine ait XOR karışıklık matrisi gösterilmektedir. Momentumlu GD yönteminde, diğer yöntemlere göre daha hızlı bir öğrenme gerçekleşmiştir. ADAM yönteminde ise öğrenmenin başarısız olduğu görülmektedir. Yaklaşık 1000 iterasyondan sonra KarcıFANN yöntemi, SGD ve ADAM yöntemlerine göre çok daha başarılı performans göstermektedir ve ağırlıkların değişimleri yakınsamıştır.



Şekil 2. Alfa ve öğrenme katsayısının 1,4 değeri için KarcıFANN, momentumlu GD, ADAM ve SGD yöntemlerine ait MSE grafiği.

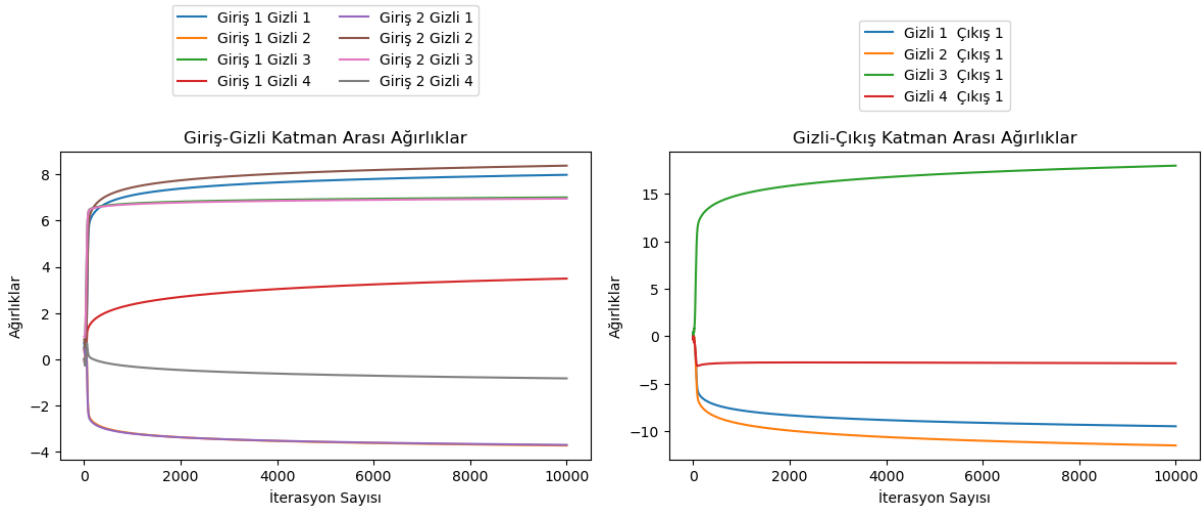


Şekil 3. Alfa 1,4 değeri için KarcıFANN yöntemine ait Karışıklık matrisi.

Bu çalışmada kullanılan optimizasyon yöntemlerine ait ağırlık değişimleri incelenirken ağın yakınsama durumu analiz edilmektedir. Ağırlıklar yakınsadığında ağın öğrenmesinin gerçekleştiği ya da ezberleme durumları; yakınsamadığında ise kullanılan veri setinin modele uygunluğu veya sistem parametrelerinin yetersizliği incelenmektedir.

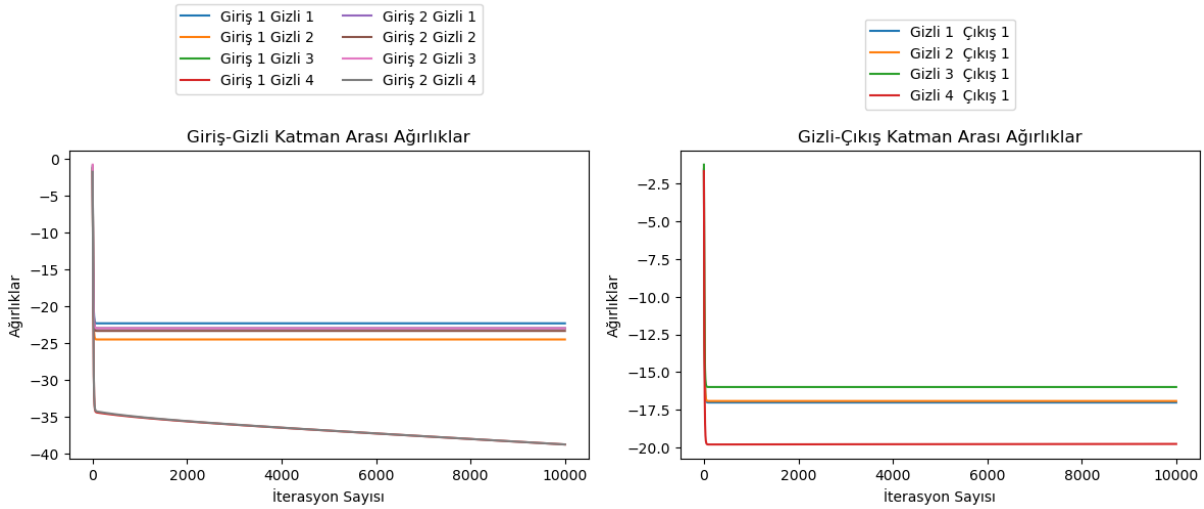
Tablo 1'de Momentum yöntemine ait eğitim ve test verilerinin MSE değerleri incelendiğinde, bu değerlerin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, modelin ezberleme yapmadığını ve öğrenmenin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Momentum yönteminde, giriş katmanı ile gizli katman ve gizli katman ile çıkış katmanı arasındaki ağırlık değişim grafikleri Şekil 4 ile gösterilmektedir. Modele ait ağırlık değişim grafikleri incelendiğinde, iterasyonlar ilerledikçe bazı ağırlık değerlerinin kararlı bir şekilde yakınsadıkları görülmektedir. Fakat bazı ağırlık değerlerinde değişimlerin devam etmesi (yakınsamama durumu) ağın daha fazla eğitime ihtiyaç

duyması, kullanılan veri setinin modele uygun olmaması veya parametrelerin değiştirilmesi gerektiğini göstermektedir.



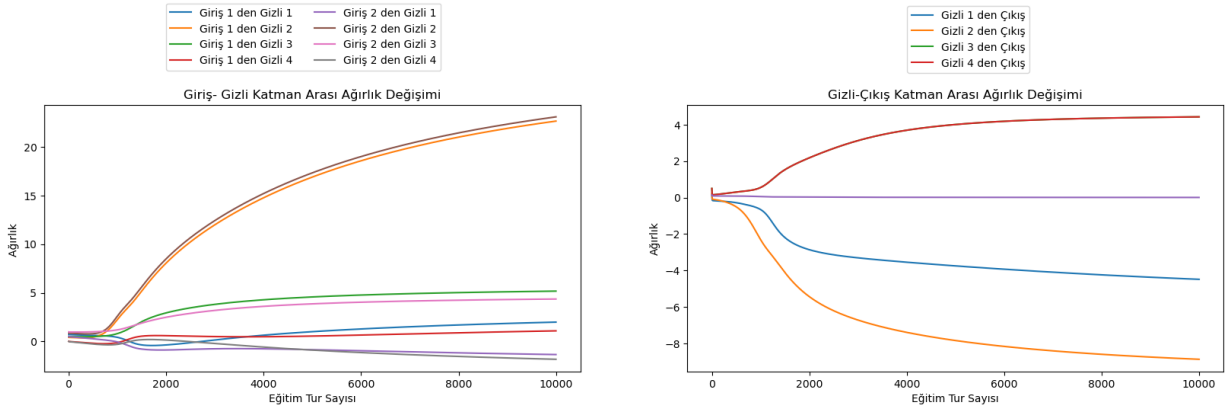
Şekil 4. Öğrenme katsayısının 1,4 değeri için Momentumlu GD yöntemine ait ağırlık değişimleri.

ADAM yönteminde, özellikle öğrenme katsayısının 0,5-3,5 aralığındaki değerleri için eğitim ve test aşamalarındaki MSE değerlerinin oldukça yakın ve büyük değerler olduğu Tablo 1'de görülmektedir. Modelin Şekil 5 ile gösterilen değişim grafikleri incelendiğinde ağırlık değerlerinin istikrarlı bir şekilde yakınsadığı görülmektedir. Tablo ve grafikler birlikte incelendiğinde de modelin ezberleme yapmadığı ancak yerel bir minimum noktaya takıldığı gözlemlenmektedir.



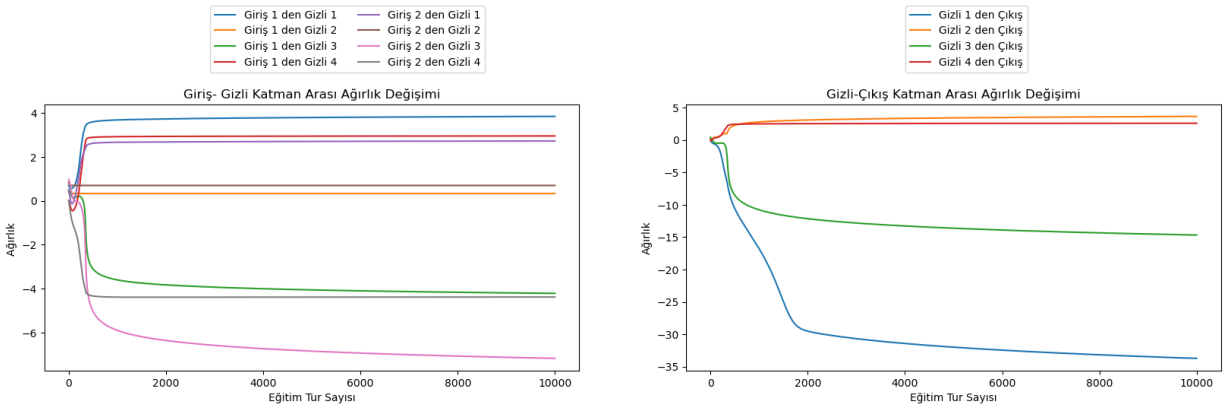
Şekil 5. Öğrenme katsayısının 1,4 değeri için ADAM yöntemine ait ağırlık değişimleri.

SGD yöntemine ait eğitim ve test verilerinin Tablo 1 ile gösterilen MSE değerleri incelendiğinde, bazı öğrenme katsayısı değerleri için eğitim hatalarının test hatalarına göre çok düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, modelin ezberleme yaptığına işaret etmektedir. Modelin Şekil 6 ile gösterilen ağırlık değişim grafiği incelendiğinde ağırlık değerlerinden bazılarının yakınsayamadığı görülmektedir. Burada modelin tam olarak öğrenemediği ve kararsız bir öğrenme sürecinde olduğu söylenebilir. Bu problemin çözümü için ağın daha fazla eğitilmesi, modele uygun bir veri setinin seçilmesi veya parametrelerin değiştirilmesi gibi yöntemler uygulanabilir.



Şekil 6. Öğrenme katsayısının 1,4 değeri için SGD yöntemine ait ağırlık değişimleri.

KarcıFANN yöntemine ait eğitim ve test verilerinin Tablo 1 ile verilen MSE değerlerine bakıldığında bazı alfa değerlerinde öğrenmenin gerçekleşmediği görülmektedir. KarcıFANN yöntemi, 0,8-2,1 aralığındaki alfa değerlerinde oldukça başarılı bir öğrenme gerçekleştirmektedir. Modelin Şekil 7 ile gösterilen ağırlık değişim grafiğinde, çoğu ağırlık değerlerinin kararlı bir şekilde yakınsadıkları görülmektedir. Yaklaşık 500 iterasyonda çoğu ağırlık değerinin yakınsaması ve tüm eğitim sürecinde kararlı bir şekilde devam etmesi öğrenmenin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 7. Alfanın 1,4 değeri için KarcıFANN yöntemine ait ağırlık değişimleri.

5. Sonuçlar

YSA'ların eğitimi aşamasında hataların düşmesi ve ağırlıkların eğitim boyunca kararlı bir şekilde yakınsaması istenir. YSA'ların başarılı bir şekilde eğitilip eğitilmediğini öğrenmek amacıyla hata değerleriyle beraber ağırlık değişimlerinin incelenmesi önemlidir. Bu sayede, ağın öğrenme durumu ve bir yerel minimum noktaya takılıp takılmadığı anlaşılmaktadır.

Bu makalede, XOR probleminin çözümünde YSA'larda yaygın olarak kullanılan Momentumlu GD, ADAM ve SGD yöntemleri ile KarcıFANN yönteminin öğrenme, ezberleme ve ağırlık değerleri üzerine etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen MSE tablosu incelendiğinde, 0,9 ve 1,0 dışındaki tüm alfa ve öğrenme oranı katsayıları için Momentumlu GD yönteminin diğer yöntemlerden daha düşük MSE değerleri ürettiği görülmektedir. Mometumlu GD yönteminin eğitim ve test aşamalarında üretilen MSE değerlerinin yakın olması, modelin ezberlemediğini göstermektedir. KarcıFANN yöntemi, alfa ve öğrenme katsayısının 0,9-2,0 aralığındaki değerleri için SGD yöntemine ve 0,3 değeri ile 0,6-3,5 aralığındaki değerler için de ADAM yöntemine göre daha düşük MSE değerleri üretmektedir. Ayrıca, KarcıFANN yönteminde alfa ve öğrenme katsayısının 0,9 ve 1,0 değerleri için üretilen MSE değerleri, tüm veri setlerinde diğer üç yönteme göre daha düşük olarak ölçülmektedir. Ezberleme bakımından incelendiğinde KarcıFANN yönteminde, alfa

katsayısının 0,8-2,1 aralığı dışındaki değerler için üretilen eğitim hatalarının test hatalarına göre düşük olması modelin ezberlemesi anlamına gelebilir. SGD yönteminde de 0,1-0,3 aralığındaki öğrenme katsayıları için modelin ezberlediği söylenebilir. ADAM yöntemi, 0,1 ve 0,2 dışındaki tüm öğrenme katsayısı değerleri için en başarısız sonuçları üretmektedir. ADAM yönteminin eğitim ve test aşamalarında üretilen MSE değerlerinin yakın olması modelin ezberleme yapmadığını ancak, çok büyük hatalar olduğundan öğrenme başarımının düşük olduğunu göstermektedir.

Tüm yöntemlerin grafikleri incelendiğinde, Momentumlu GD ve ADAM yöntemlerinin ağırlık değişimlerinin diğer yöntemlere göre daha iyi yakınsadığı görülmektedir. SGD yönteminde, ağırlık değerlerinin değişimlerinin devam ettiği ve yakınsama sağlanamadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, SGD yönteminin kararsız olduğuna işaret etmektedir. KarcıFANN yönteminde de az da olsa ağırlık değişimlerinin devam etmesi, tam olarak yakınsama sağlanamadığını göstermektedir. Bu problemi çözmek için modelin daha fazla eğitilmesi, veri setinin değiştirilmesi ve model parametreleri değiştirilerek daha uygun bir model elde edilmesi gibi yöntemler uygulanabilir.

MSE değerleri ve ağırlık değişim grafikleri birlikte incelendiğinde en başarılı yöntemin Momentumlu GD, ikinci başarılı yöntemin KarcıFANN yöntemi olduğu ve ADAM yönteminin de yerel bir minimum noktaya takıldığı görülmektedir.

KarcıFANN yöntemi, görüntü sınıflandırma gibi problemler üzerinde farklı aktivasyon ve farklı kayıp fonksiyonları kullanılarak test edilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [24-26].

Tam optimize edilmemiş KarcıFANN yönteminde yapılacak iyileştirmelerle yakınsama kabiliyetinin artacağı ve daha başarılı modeller elde edileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada KarcıFANN yöntemi XOR problemi üzerinde test edilerek ağırlık değişimleri incelenmiştir. Daha önceki çalışmalarda yöntem görüntü işleme veri kümelerinde uygulanmış ve sınıflandırma performansı değerlendirilmiştir. Gelecek çalışmalarda, KarcıFANN yönteminde kullanılan alfa parametresi, farklı değer aralıklarında seçilerek genellenebilirlik, daha yüksek doğruluk ve güvenilirlik elde etmek amacıyla farklı ağ modelleri ile metin sınıflandırma, görüntü ve ses işleme ile ilgili veri setlerini sınıflandırmada kullanılacaktır.

Kaynaklar

[1] Abraham A. Meta-Learning Evolutionary Artificial Neural Networks, Neurocomputing Journal, 2004, Vol. 56c, Elsevier Science, Netherlands, (1–38).

[2] Rumelhart DE, Durbin R, Golden RM, Chauvin Y. Backpropagation: the basic theory, 1995.

[3] Smith LN. A disciplined approach to neural network hyper-parameters: Part 1 – Learning rate, batch size, momentum, and weight decay. arXiv preprint arXiv:1803.09820, 2018.

[4] Brutzkus A, Globerson A. Why do larger models generalize better? A theoretical perspective via the XOR problem. Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning (ICML), 2019, 97, 822–830.

[5] Pinto RC, Tavares AR. (2024, September 17). PReLU: Yet Another Single-Layer Solution to the XOR Problem (arXiv:2409.10821v1) [Preprint].

[6] Yang C, Kim H, Adhikari SP, Chua LO. A Circuit-Based Neural Network with Hybrid Learning of Backpropagation and Random Weight Change Algorithms. Sensors. 2017, 17(1):16.

[7] Starodub A, Eliseeva N, Georgiev M. Gradient-based algorithm for tracking the activity of neural network weights changing. EPJ Web of Conferences, 248, 2021, 01012.

[8] Li Jun & Diao, Yongfeng & Li, Mingdong & Yin, Xing., Stability Analysis of Discrete Hopfield Neural Networks with the Nonnegative Definite Monotone Increasing Weight Function Matrix. Discrete Dynamics in Nature and Society. 2009.

[9] Nagel M, Fournarakis M, Bondarenko Y, Blankevoort T. Overcoming Oscillations in Quantization-Aware Training. International Conference on Machine Learning (ICML),2022,

[10] Nagel M, van Baalen M, Blankevoort T, and Welling, M. Data-free quantization through weight equalization and bias correction. In International Conference on Computer Vision (ICCV).

[11] Banner R, Nahshan Y, Soudry D. Post training 4-bit quantization of convolutional networks for rapiddeployment. In Advances in Neural Information Processing Systems (NeuRIPS), arXiv:1810.05723v3 [cs.CV] 29 May 2019.

[12] Agrawal AM, Tendle A. (2020). Investigating learning in deep neural networks using layer-wise weight change [Conference paper]. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 1-8., 2020, IEEE.

[13] Wei JL, Wu GC, Liu BQ. et al. An optimal neural network design for fractional deep learning of logistic growth. Neural Comput & Applic 35, 10837–10846 (2023).

[14] Bottou L. Stochastic gradient learning in neural networks. Proceedings of Neuro-Nımes, 1991, 91(8), 12.

[15] Kingma DP, Ba J, Adam: A Method for Stochastic Optimization. Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR), Banff, 14-16 April 2014.

[16] Fu J, Wang B, Zhang H, Zhang , Chen W, Zheng N, When and why momentum accelerates sgd: An empirical study, 2023, arXiv preprint arXiv:2306.09000.

[17] Seyyarer E, Ayata F, Uçkan T, Karcı A. Applıcatıons and comparıson of optımızatıon algorıthms used ın deep learnıng. Anatolian Science , 2020, vol.5, no.2, 90-98.
[18] Karcı A. A New Approach for Fractional Order Derivative and Its Applications, Universal Journal of Engineering Sciences, 2013, Vol:1, pp: 110-117.
[19] Karcı A. Properties of Fractional Order Derivatives for Groups of Relations/Functions, Universal Journal of Engineering Sciences, 2015a , vol:3, pp:39-45.
[20] Karcı A. The Properties of New Approach of Fractional Order Derivative, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 2015b ,Vol.30, pp:487-501.
[21] Karci A. Chain rule for fractional order derivative, Science Innovation, 2015c, Vol:3, pp:63-67.
[22] Karcı A. Properties of Karcı's Fractional Order Derivative, Universal Journal of Engineering Science, 2019, Vol:7, pp:32-38.
[23] Karci A. Fractional Order Integration: A New Perspective based on Karcı's Fractional Order Derivative. Computer Science, 2019, 6(2), 102-105.
[24] Karakurt M, Saygılı H, Karcı A. RMSE Yönteminde Aktivasyon Fonksiyonlarının Karşılaştırılması, 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP2024), IEEE.
[25] Karakurt M, Saygılı H, Karcı A. Karcı fractional artificial neural networks (KarcıFANN): a new artificial neural networks model without learning rate and its problems. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 33(3), 2025; 248-263.
[26] Saygılı H, Karakurt M, Karcı A. Comparison of Loss Functions in the KarcıFANN Method. In 2024 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), 2024 ;(pp. 1-5). IEEE.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 909-918, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1708787

A Generative AI-Driven Analysis of Airline Passenger Feedback: Revealing What Matters Most

Hakan KOÇAK[1*]
[1] Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Uzaktan Algılama Şube Müdürlüğü, Ankara, Türkiye
[*1] hkocak@gmail.com

(Geliş/Received: 29/05/2025; Kabul/Accepted: 29/09/2025)

Abstract: The airline industry, characterized by intense competition, relies heavily on customer satisfaction to assess strengths and weaknesses. Online passenger reviews provide a rich source of data, capturing customers' opinions, expectations, and emotions. Analyzing this feedback helps airlines identify areas for improvement and understand what matters most to passengers. This study employs a zero-shot prompting approach using Google Gemini to interpret Turkish Airlines reviews from Trip Advisor in 2024, demonstrating the model's effectiveness without domain-specific fine-tuning. The findings highlight factors influencing perceived service quality, performance, and value, illustrating the potential of generative AI in specialized customer sentiment analysis and its practical applications in the airline industry.

Key words: Customer review analysis, natural language processing, large language models, generative AI, google gemini.

Üretken Yapay Zekâ Destekli Bir Havayolu Yolcu Geri Bildirimi Analizi: En Önemli Olanı Ortaya Çıkarmak

Öz: Yoğun rekabetin yaşandığı havayolu endüstrisi, müşteri memnuniyetine büyük ölçüde dayanarak güçlü ve zayıf yönlerini değerlendirir. Çevrimiçi yolcu yorumları, müşterilerin görüşlerini, beklentilerini ve duygularını yansıtan zengin bir veri kaynağı sunar. Bu geri bildirimlerin analizi, havayollarının geliştirilmesi gereken alanları belirlemesine ve yolcular için en önemli olanı anlamasına yardımcı olur. Bu çalışma, 2024 yılında Trip Advisor web sitesinden toplanan Türk Hava Yolları yorumlarını yorumlamak için Google Gemini'nin sıfırdan yönlendirme (zero-shot prompting) yaklaşımını kullanarak, alan spesifik ince ayara gerek kalmadan modelin etkinliğini göstermektedir. Bulgular, algılanan hizmet kalitesini, performansını ve değeri etkileyen faktörleri ortaya koymakta ve üretici yapay zekânın uzmanlaşmış müşteri duygu analizindeki potansiyelini ve havayolu endüstrisindeki uygulamalarını göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Müşteri yorumları analizi, doğal dil işleme, büyük dil modelleri, üretken yapay zekâ, google gemini.

1. Introduction

In the airline industry, customer reviews provide direct insights into passenger experiences, expectations, and perceptions of service quality. Analyzing these reviews allows airlines to pinpoint operational strengths and weaknesses, improve service delivery, enhance customer satisfaction, and make informed strategic decisions [1,2]. The volume of feedback makes manual analysis impractical, highlighting the need for automated, scalable Sentiment Analysis solutions.

Sentiment Analysis (SA), a branch of Natural Language Processing (NLP), automatically identifies whether text expresses positive, negative, or neutral sentiment. Also known as Opinion Mining (OM), SA transforms large volumes of unstructured data from social media, review platforms, and forums into actionable insights [3].

Early approaches based on bag-of-words or lexical features often lacked accuracy. Machine learning classifiers, such as SVM and Naive Bayes, improved predictions, while modern Large Language Models (LLMs) like BERT and GPT enable high-accuracy, large-scale sentiment analysis [4,5]. Yet, few studies have applied these models specifically to airline customer feedback [6].

This study evaluates Google Gemini, an advanced LLM, for analyzing airline passenger reviews. Using a zero-shot prompting strategy, it assesses Gemini's ability to interpret sentiment without domain-specific fine-tuning. The research demonstrates how generative AI can turn customer feedback into actionable insights, support operational improvements, enhance passenger satisfaction, and provide a competitive edge, offering airlines practical guidance for data-driven decision-making in a customer-focused industry.

* Sorumlu yazar: hkocak@gmail.com Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0003-2491-327X

2. Related Work

Customer reviews are critical for airlines' reputation, operations, and strategic decisions. Several studies have applied machine learning and text mining to analyze such feedback. Wu and Gao [7] employed SVM on Kaggle's 2015 Twitter dataset, achieving 91.86% accuracy by excluding neutral entries. Patel et al. [8] compared Naïve Bayes, SVM, Decision Tree, and BERT, with BERT outperforming others at 83% accuracy, precision, recall, and F1 score. Sezgen et al. [9] used SVD on over 5,000 TripAdvisor reviews, demonstrating that LSA can identify factors influencing airline choice. Similarly, Siering et al. [10] analyzed airlinequality.com reviews using Naïve Bayes, SVM, and neural networks, reporting accuracies of 71–75% depending on sampling. Kumar and Zymbler [11] examined airline tweets using SVM, ANN, and CNN, finding CNN achieved the highest accuracy of 92%. Lucini et al. [12] combined LDA and logistic regression on 55,000+ reviews across 400 airlines, predicting customer recommendations with 79% accuracy. More recently, large language models have shown promise in sentiment analysis: ChatGPT effectively interprets customer sentiment [13] and performs comparably to BERT and other state-of-the-art models [14].

3. Literature Review

Sentiment analysis classifies text as positive, negative, or neutral, usually beginning with preprocessing steps such as removing punctuation, symbols, stop words, and stems. The processed text is then represented numerically, often through TF-IDF, to form a vector space model. Analysis can be performed at the document, sentence, or aspect level, enabling researchers to capture overall polarity, classify shorter texts, or extract opinions on specific features.

Two main approaches are commonly applied: lexicon-based and machine learning. Lexicon-based techniques use predefined polarity dictionaries such as SentiWordNet [5, 15] or TF-IDF weighting [16], but they often struggle with linguistic subtleties like slang, sarcasm, and negation. Machine learning methods, including Naïve Bayes and Support Vector Machines, generally deliver higher accuracy but depend heavily on large, high-quality datasets [17–18]. While smaller datasets reduce processing time, they tend to compromise performance [19]. These methods may be supervised, semi-supervised, or unsupervised, typically employing Bag-of-Words features, with effectiveness measured through precision, recall, and F-measure [5].

More recently, transformer-based models such as GPT and Google Gemini have shown strong potential by analyzing large volumes of unstructured text, including financial news, to inform decisions in areas like investment strategies and risk management [20–23]. Across both traditional and modern techniques, sentiment analysis generally follows five key stages: collecting and preprocessing data, preparing text, detecting subjectivity, classifying polarity, and presenting results through visualizations, which translate unstructured opinions into actionable insights [24].

4. Methodology

The code for this study was developed in Python 3 and executed on Kaggle Notebook. To utilize Large Language Models (LLMs) in Google Gemini Pro, an API key was obtained through Google AI, with a pay-as-you-use pricing model applying. Google Gemini was chosen for its advanced generative and contextual understanding capabilities, enabling zero-shot sentiment analysis and topic standardization with nuanced handling of domain-specific language, outperforming or matching BERT and GPT in similar tasks. Gemini Pro features seamless integration with topic standardization, leveraging representative documents from BERTopic.

While BERT excels at contextual embeddings and GPT at text generation, Gemini uniquely combines deep understanding of text with generative abilities, making it ideal for zero-shot sentiment and topic classification

The study followed a series of steps, including obtaining an online dataset from TripAdvisor, cleaning and preprocessing the data using NLTK and Spacy, conducting sentiment analysis with VADER, performing topic modeling and classification with BERTopic, re-generating topic labels and classifications using Google Gemini Pro 1.5 LLMs based on BERTopic outputs, and finally visualizing and interpreting the results.

4.1 Dataset

For this study, Turkish Airlines customer reviews from TripAdvisor (Jan-Dec 2024) were collected using a Google Chrome web scraping extension tool (Instant Data Scraper). The dataset includes 1,139 unique reviews, each containing a published date, username, route, flight type, title (or subject), date flown, and review text, all

stored in a CSV file for analysis. The dataset was then cleaned by removing entries with missing information or reviews written in languages other than English, as well as eliminating unnecessary fields not relevant to the study.

4.2 Pre-processing

The preprocessing process includes tokenization, part-of-speech tagging, stop-word removal, stemming, noun extraction, and noun filtering. Tokenization identifies individual words, which are then tagged with syntactic roles (e.g., verb, subject, adjective). Stop words such as “a,” “an,” “and,” “but” “the,” “that,” “of,” and “from” are removed. Afterward, prefixes and suffixes are eliminated from words, leaving only their stems. Stemming consolidates word derivatives with similar meanings into a single concept, such as reducing “flying” and “flew” to “fly.”

The removal of stop words and lemmatization of each review was performed using the Natural Language Toolkit (NLTK) and the Spacy libraries in Python. After removing non-alphabetic characters, stop words, and white spaces at the end of the reviews, all the review texts were converted into documents for further analysis.

4.3 Sentiment Analysis of Customer Reviews

VADER (Valence Aware Dictionary for Sentiment Reasoning) is employed in this study for sentiment analysis. VADER is a simple, rule-based model designed for general sentiment analysis, assessing both the polarity and intensity of emotions in unlabeled text data. Integrated into the NLTK package for Python, VADER improves upon traditional sentiment lexicons like LIWC (Linguistic Inquiry and Word Count) by offering greater adaptability across various domains and a heightened sensitivity to sentiment in social media contexts. VADER is an effective tool for analyzing sentiment in online customer reviews, news headlines, and social media posts.

The pre-processed reviews are then analyzed using the VADER library (vaderSentiment) in Python to generate sentiment scores for each review, categorizing them as negative, neutral, or positive. Sentiment scores in VADER range from -1 to +1, where -1 represents the most negative sentiment, 0 denotes neutrality, and +1 signifies the most positive sentiment. These sentiment scores are added to the original dataset for further analysis.

4.4 Topic Modeling

For sentiment classification, the topic modeling method BERTopic, as implemented in Python, was used to generate individual topic classes and assign each review to a specific topic class. The classification process begins by fine-tuning BERTopic on a pre-labeled dataset to tailor it for sentiment analysis. After fine-tuning, the model is applied to unlabeled customer review data to compute sentiment scores.

BERTopic is an advanced library that enhances traditional topic modeling by leveraging machine learning algorithms to cluster documents based on deep semantic representations. It excels at handling noisy tokens, such as stop words, and uses them to improve the representation of customer experiences.

Sentence embeddings were generated using Google’s Universal Sentence Encoder – Multilingual (USE) sentence transformers for reviews with VADER sentiment scores less than +0.1 to identify the most common customer complaints. This process resulted in 881 reviews being selected, representing the issues that are troubling customers the most.

VADER assigned scores between -1 and +1. Reviews scoring below 0.1 were selected for topic modeling to capture the most dissatisfied customers, as scores near 0 are indicative of neutral to slightly negative sentiment. This slightly relaxed threshold captures both clearly negative and borderline negative reviews, ensuring that subtle expressions of dissatisfaction or service-related concerns are included in the analysis. This threshold made it possible to capture predominantly negative experiences for topic modeling and issue prioritization.

To classify the 881 reviews, they were embedded into BERTopic using Google’s Universal Sentence Encoder (USE) to further assess the areas (i.e., topics) where customers were most dissatisfied. Reviews with sentiment scores of less than +0.1 were then clustered by creating and optimizing a BERTopic model using the USE embeddings generated in the previous step. BERTopic clustered 881 negative/neutral reviews into 21 topics. This process resulted in the identification of 21 distinct topics through the trained model.

Table 1. BERTopic-identified clusters of negative airline reviews, including topic names, representative words, and sample documents.

#	Topic	Count	Name	Representation	Representative_Docs
0	-1	379	-1_airline bad_bad	['airline bad', 'bad	[bad airline experience ve 40 year wife busine...
1	0	113	0_airline istanbul	['airline istanbul	[good airline good compliment inflight staff e...
2	1	110	1_airline terrible	['airline terrible	[staff airline rude mannerless staff come pay ...
3	2	33	2_terrible customer	['terrible customer	[bad customer service need help customer servi...
4	3	29	3_airline change_airline	['airline change',	[bad customer service imagine book advance feb...
5	4	29	4_horrible delay	['horrible delay hour',	[delay result miss connect 8 hour delay arriva...
6	5	24	5_customer service	['customer service	[bad airline bad customer service ground airpo..
7	6	23	6_pay seat	['pay seat selection',	[purchase seat 39 app seat single seat plan no...
8	7	20	7_luggage instanbul	['luggage instanbul	[terrible customer service lose bag receive ti...
9	8	19	8_meal airline	['meal airline horrible',	[horrible food disgusting cabin crew unfrienly...
10	9	12	9_luggage chase	['luggage chase	[airline rent car review objective frustration..
11	10	11	10_meal terrible	['meal terrible	[truly unpleasant staff sullen unhelpful ear p..
12	11	11	11_horrible baggage	['horrible baggage	[recent trip australia hear airline vote good ..
13	12	10	12_pathetic airline	['pathetic airline bad',	[arrive airport time waste lot time try find r...
14	13	10	13_disappointing	['disappointing	[subject extremely disappointing experience ai..
15	14	10	14_bad airline	['bad airline	[change transfer suddenly schedule ruin compla...
16	15	8	15_airline ticket	['airline ticket office',	[family plan trip year 1st problem cancel book..
17	16	8	16_point airline	['point airline cancel',	[good september 2023 cancel ticket family medi...
18	17	8	17_pay seat	['pay seat choice',	[pay select seat 74 year old mom knee surgery ..
19	18	7	18_refundable bad	['refundable bad	[bad airline change outbound ticket multiple t...
20	19	7	19_bad airline	['bad airline run',	[bad airline change outbound ticket multiple t...

Table 1 presents sample output from the BERTopic model used in this study. The Topic field represents the unique ID assigned to each topic. Count indicates the number of documents assigned to that topic. Name is the automatically generated topic name, while Representation lists the key words that summarize the topic. Representative_Docs provides a subset of documents that best exemplify the topic, illustrating the semantic content captured by the model. Figure 1 shows sentence embeddings by topic labels with each topic label represented with a different color.

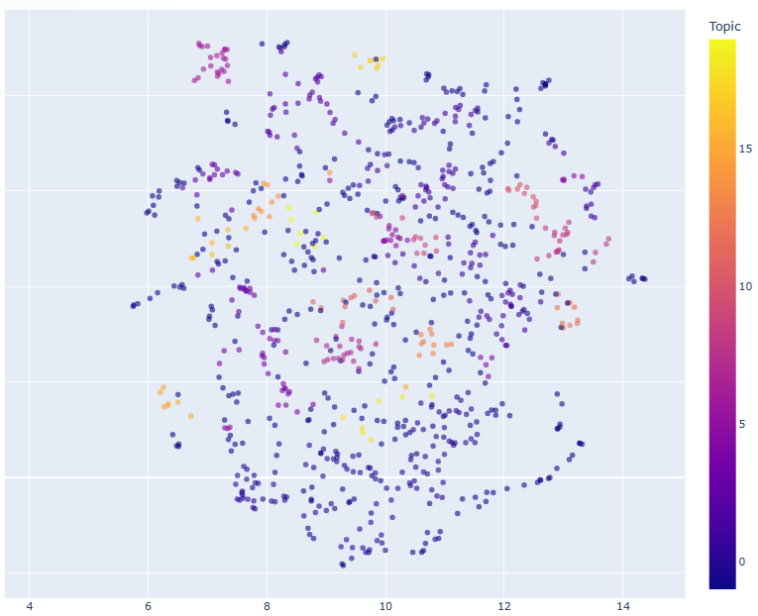


Figure 1. Sentence embeddings by topic labels colored by topic labels.

4.5 Re-generating Topic Labels with Gemini Pro LLM, Based on Bertopic Labels

The topic labels generated by the BERTopic model were often not meaningful or business-friendly. To enhance interpretability, they were standardized using Google Gemini Pro, which incorporated domain knowledge from both the BERTopic outputs and representative documents. Gemini Pro, an advanced large language model (LLM), is designed to capture the nuances of human language, making it well-suited for tasks such as sentiment analysis and topic labeling. In this study, Gemini Pro was engaged solely through natural language instructions, without any task-specific fine-tuning or additional training.

The input was prepared by combining topic representative words with the top 200 tokens from representative documents into a Pandas data frame, which was then used with the designed prompts for Gemini Pro. Example prompts include:

'''

As a Senior Customer Experience Executive in aviation, your task is to identify customer pain points from the provided reviews.

Here are your instructions:

Create one topic label (maximum 3 words) that reflects the themes in the input list.
Give priority to the first 10 topic words generated by BERTopic.
Output only the topic headline labels in list format.
Do not include supporting keywords.
Do not rephrase or alter the original label wording.

'''

The model then generated more coherent, business-oriented topic labels that were directly applicable to decision-making processes, addressing the limitations of the initial BERTopic outputs. For airlines in particular, clear and interpretable topic labels are essential, as they enable managers to identify customer concerns more efficiently, prioritize operational improvements, and develop strategies that enhance passenger satisfaction. While the use of Gemini Pro incurs costs due to API token consumption, the insights gained significantly outweigh these expenses by providing actionable intelligence for business applications.

The usefulness of the Gemini-generated labels was validated through a manual review by the author. A subset of topics and documents was examined to ensure that (1) the labels accurately reflected the semantic content of the clustered reviews, (2) the labels were clear, interpretable, and business-friendly, and (3) the insights were easy to communicate to airline management teams for strategic decision-making. This evaluation confirmed that the Gemini-generated labels aligned with human judgment and improved the overall interpretability of results.

5. Results

As an initial step, descriptive graphs were generated to explore the dataset. Figure 2 presents a histogram of sentence lengths in the reviews, showing that most sentences contain 10–50 words, with a few shorter than 10 or exceeding 200 words.

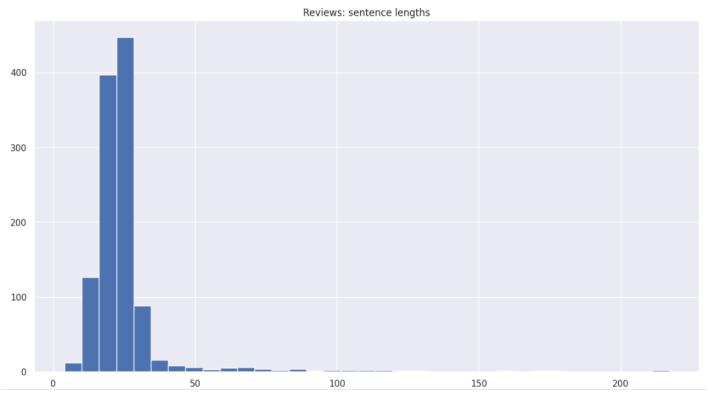


Figure 2. Histogram of review sentence lengths, showing most sentences are 10–50 words.

Figure 3 shows the distribution of flight types among customers in the dataset. Most reviews are from passengers on international flights, while domestic flight comments are relatively few. The plot also indicates that international flights outside Europe and North America considerably outnumber those associated with these regions.

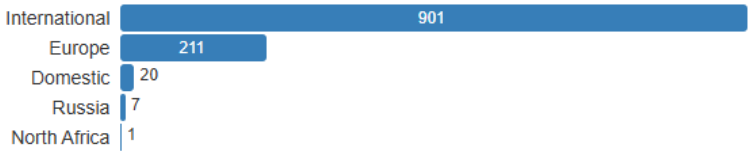


Figure 3. Distribution of flight types; majority are international, highlighting dataset bias.

A word cloud was generated to highlight the most frequent terms in the processed text. As shown in Figure 4, most comments pertain to flight experience and service issues. The most common words include: “flight,” “service,” “seat,” “customer,” “change,” “bad,” “good,” “gate,” “time,” “cancel,” “ticket,” “hour,” “terrible,” “delay,” “baggage,” “food,” “experience,” “luggage,” “boarding,” “staff,” “miss,” and “lose.”



Figure 4. Word cloud of frequent terms; common words relate to service, flight, seat, and baggage.

Following the descriptive statistics, customer sentiment analysis was performed, and the distribution of positive, negative, and neutral sentiments is shown in Figure 5. Negative sentiments dominate the dataset, comprising 70.4% of the total, while positive and neutral sentiments account for 23.6% and 6.0%, respectively, as illustrated in the pie chart.

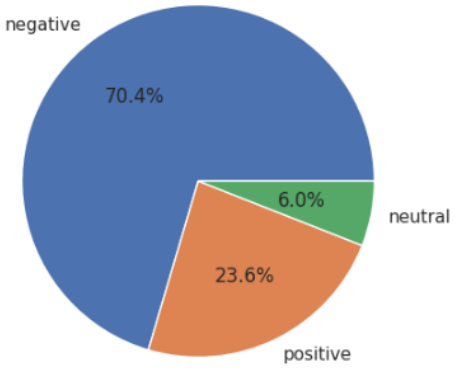


Figure 5. Pie chart of sentiment distribution (Negative 70.4%, Positive 23.6%, Neutral 6%).

Figure 6 presents a bar chart of binned sentiments ranging from -1 to +1 in 0.25 increments. The highest frequency occurs in the most negative bin, and as sentiment scores increase, their frequency decreases. Beyond 0.25, frequencies begin to rise again on the positive side, but at a slower rate compared to the negative side.

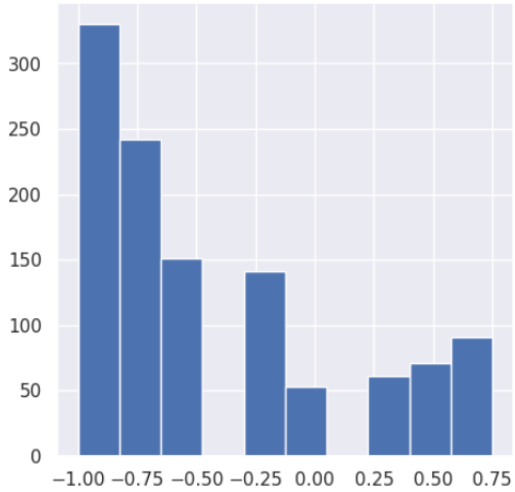


Figure 6. Histogram of VADER compound scores, showing skew toward negative sentiment.

BERTopic labels were standardized using Google Gemini Pro, as the initial model output was incoherent. The LLM processed the representative documents and a seed list of domain-specific topics to generate clear, business-friendly labels. Through prompt fine-tuning, each BERTopic label was matched with a standardized, AI-generated topic.

Table 2. Example Customer Reviews with BERTopic Topics and Gemini Pro LLM Labels.

Document	Topic	Representation	Probability	Representative document	LLM input	Gemini topic label
terrible deliberately delay luggage know come ir..	1	[staff airline rude mannerless staff come pay ...	0.663	False	airline terrible customer terrible customer se..	Customer Service Issues
istanbul delay 15 hour run denpasar lose luggage..	7	[luggage istanbul compensation, luggage leave.	0.982	False	luggage istanbul compensation luggage leave..	Missing Luggage Issues
good seat good lounge good regular food b...	-1	[bad airline experience ve 40 year wife busine...	0.000	False	airline bad bad airline experience airline air...	Customer Service Issues
buy ticket attempt modify return date website ...	16	[good september 2023 cancel ticket family medi...	0.950	True	point airline cancel lose return ticket cancel...	Cancellations Issues

Table 2 presents sample output from BERTopic topic modeling and subsequent re-labeling using Google Gemini Pro's LLM. It includes the Document, representing the original text or customer review being analyzed, and the Topic, which is the initial topic ID assigned by BERTopic. Representation field lists the key words that summarize the topic, while Representative_Docs shows a subset of documents that best exemplify the topic. Probability reflects the model's confidence that the document belongs to the assigned topic. The llm_input field contains the prompt provided to Gemini Pro to generate business-friendly labels, and gemini_topic_labels shows the final topic label output by the LLM, designed to be coherent, interpretable, and actionable for business decision-making.

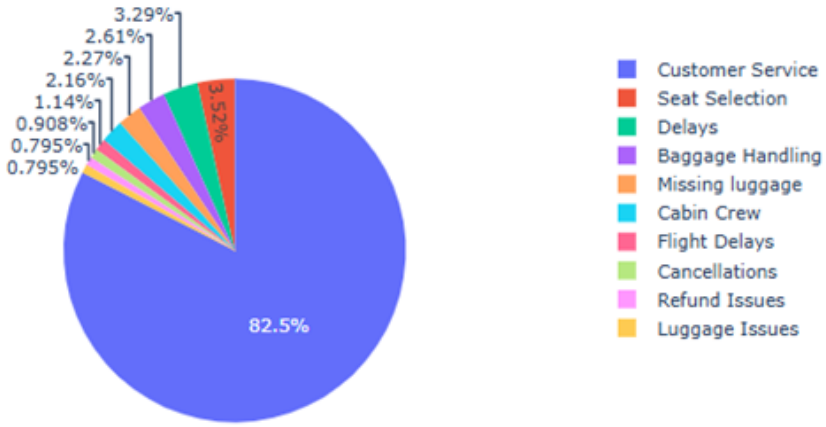


Figure 7. Turkish Airlines customer pain-points

Figure 7 shows customer reviews categorized by topic labels from Google Gemini, summarizing Turkish Airlines' main pain points. The 21 topic labels identified by BERTopic were consolidated into 10 standardized topics.

The largest share of complaints, 82.5%, relates to Customer Service, highlighting it as the primary source of customer dissatisfaction. Luggage issues follow at 3.52%, covering lost or damaged baggage. Flight delays account for 3.29%, flight cancellations 2.61%, seat selection issues 2.27%, and cabin crew complaints 2.16%, often related to service or attitude. Refund issues are the least frequent at 1.14%.

These results indicate that improving customer service should be Turkish Airlines' top priority. Enhanced training and process improvements are necessary to address complaints effectively. Luggage handling also requires attention to reduce lost or damaged baggage. Additionally, minimizing flight delays and cancellations, along with better communication and compensation, can improve overall passenger satisfaction. Analyzing the specific causes of customer service complaints can provide targeted insights for further improvements.

6. Conclusion and Discussion

This study demonstrates the practical potential of AI-powered sentiment analysis for understanding airline customer feedback. By integrating VADER sentiment scoring, BERTopic topic modeling, and Google Gemini Pro's zero-shot relabeling, the study successfully identified key customer pain points, particularly those related to service quality, responsiveness, and communication. These findings highlight the ability of generative AI to extract actionable insights from unstructured text without requiring domain-specific fine-tuning.

The effectiveness of Google Gemini Pro can be attributed to its extensive pre-training on diverse text corpora, enabling nuanced understanding of context, idiomatic expressions, and subtle sentiment cues. This capability allowed the model to capture customer concerns that may be overlooked by traditional sentiment analysis methods, emphasizing the importance of LLMs in specialized applications such as airline service evaluation.

Compared to previous approaches relying solely on lexicon-based or supervised methods, this zero-shot, topic-driven approach offers a scalable and flexible alternative for analyzing large volumes of customer feedback. The findings suggest that airlines can leverage generative AI not only to monitor sentiment trends but also to prioritize service improvements and enhance customer experience proactively.

It is worth noting that although the use of Google Gemini Pro involves token-based costs, these costs are modest relative to the value of actionable insights generated. The ability to produce coherent, interpretable, and business-oriented topic labels enables airlines to prioritize improvements efficiently, making the benefits of using the model substantially greater than the associated expenses. Therefore, cost does not pose a significant barrier to practical application, even for larger datasets or repeated analyses.

However, the study has several limitations. The analysis focused on a single airline's dataset, which may limit generalizability to other carriers or regions. Additionally, while zero-shot methods reduce the need for labeled data, their performance can vary depending on the complexity and specificity of the feedback. Human validation and cross-model comparisons remain essential to ensure robustness and reliability.

Future research could expand this framework to multi-airline datasets, incorporate comparative evaluations with other LLMs, and explore human-in-the-loop validation strategies. Further investigation into the model's

ability to detect subtle emotional cues could inform more personalized customer engagement and proactive service interventions.

The analysis revealed that the broad 'Customer Service' category encompassed a variety of issues, including staff attitude, responsiveness, communication breakdowns, and problem resolution challenges. While this study aggregated these issues into a single category to illustrate the methodology, a more granular, aspect-based sentiment analysis could provide deeper, more actionable insights for airlines. Future research should consider disaggregating customer service complaints to identify specific operational areas that require targeted improvement. Moreover, longitudinal datasets would be highly valuable to capture evolving trends, seasonal effects, and the impact of operational changes, enabling airlines to monitor service quality over time and respond proactively to shifting customer expectations.

Overall, the study illustrates that generative AI, particularly large language models like Google Gemini Pro, can significantly enhance the analysis of customer feedback, providing airlines with actionable insights and a foundation for data-driven service improvements.

References

[1] Al-Otaibi S T, Rasheed A. Review and Comparative Analysis of Sentiment Analysis Techniques. Informatica. 2022; 46 (1): 33–44

[2] Hai Z, Kim K C J ve Yang C. Identifying features in opinion mining via intrinsic and extrinsic domain relevance. IEEE Trans Knowl Data Eng. 2014; 26 (3): 634.

[3] Cui J, Wang Z ve Cambria E. Survey on sentiment analysis: evolution of research methods and topics. Artificial Intelligence Review. 2023; (56): 8469–8510.

[4] Taherdoost E ve Madanchian M. Artificial Intelligence and Sentiment Analysis: A Review in Competitive Research. Computers, 2023; 12 (37).

[5] Khan M T, Durrani M ve Ali A. Sentiment analysis and the complex natural language. Complex Adapt Syst Model. 2016; 4 (2).

[6] Ramadhan F, Sitanggang A, Wibawa J ve Radliya N. Implementation of Digital Marketing Strategy with Chatbot Technology. Int. J. Artif. Intell. Res. 2023; 7 (2): 132.

[7] Wu S ve Gao Y. Machine Learning Approach to Analyze the Sentiment of Airline Passengers' Tweets. Transp. Res. Rec. 2023; 2678 (1).

[8] Patel A, Oza P ve Agrawal S. Sentiment Analysis of Customer Feedback and Reviews for Airline Services using Language Representation Model. Procedia Comput. Sci. 2023; 218: 2459–2467.

[9] Sezgen E, Mason K J ve Mayer R. Voice of airline passenger: A text mining approach to understand customer satisfaction..J. Air Transp. Manag. 2019; 77: 65–74..

[10] Siering M, Deokar A V ve Janze C. Disentangling consumer recommendations: Explaining and predicting airline recommendations based on online reviews. Decis. Support Syst. 2018; 107: 52–63.

[11] Kumar S ve Zymbler M. A. Machine learning approach to analyze customer satisfaction from airline tweets. J. Big Data. 2019; 6 (62).

[12] Lucini F, Tonetto L M, Fogliatto F S ve Anzanello M J. Text mining approach to explore dimensions of airline customer satisfaction using online customer reviews. J. Air Transp. Manag. 2020; 83 (4).

[13] Sudirjo F, Diantoro K, Al-Gasawneh J -A, Azzaakiyyah H K ve Ausat A M A. Application of ChatGPT in Improving Customer Sentiment Analysis for Businesses. Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Bisnis. 2023; 5 (3): 283–288.

[14] Wang Z, Xie Q, Ding Z, Feng Y ve Xia R. Is ChatGPT a good sentiment analyzer? A preliminary study. arXiv preprint. 2023. arXiv 2304.04339.

[15] Agarwal B, Mittal N, Bansal P ve Garg S. Sentiment Analysis Using Common-Sense and Context Information. Journal of Computational Intelligence and Neuroscience. 2015; 6:715730.

[16] Das B ve Chakraborty S. An Improved Text Sentiment Classification Model Using TF-IDF and Next Word Negation. 2018; 10.48550/arXiv.1806.06407.

[17] Hassan A U, Hussain J, Hussain M, Sadiq M ve Lee S. Sentiment Analysis of Social Networking Sites (SNS) Data Using Machine Learning Approach for the Measurement of Depression. In: International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Jeju, South Korea: IEEE, 2017.

[18] Akter A ve Aziz M T. Sentiment Analysis on Facebook Group Using Lexicon Based Approach. In: 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT); September 2016.

[19] Dhaoui C, Webster C M ve Tan L P. Social Media Sentiment Analysis: Lexicon Versus Machine Learning. Journal of

Consumer Marketing. 2017; 34 (6): 480-488.

[20] George A S ve George A H. A review of chatgpt ai's impact on several business sectors. Partners Universal International Innovation Journal, 2023; 1 (1): 9–23.

[21] Radford A, Narasimhan K, Salimans T ve Sutskever I. Improving language understanding by generative pre-training. pre-print, 2018.

[22] Chen H, De P, Hu Y J ve Hwang B H. Wisdom of crowds: The value of stock opinions transmitted through social media. The Review of Financial Studies. 2014; 27: 1367–1403.

[23] Tetlock P C. Giving content to investor sentiment: The role of media in the stock market. The Journal of Finance. 2007; 62 (3): 1139–1168.

[24] Singh N ve Jaiswal U C. Sentiment Analysis Using Machine Learning: A Comparative Study. ADCAIJ (Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal) Regular Issue. 2023; 12 (1): 2255-2863.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 919-933, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1739008

Sakaltutan Geçidi Yerine Önerilen Eğimsiz Tünelin Emisyon, Yakıt Tüketimi ve Ekonomik Analizi

Oğuz Kürşat DEMİRCİ[1*]
[1] Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Meslek Yüksekokulu, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Erzincan, Türkiye
[*1] odemirci@erzincan.edu.tr

(Geliş/Received: 09/07/2025; Kabul/Accepted: 29/09/2025)

Öz: Bu çalışma, D-100/E-80 üzerindeki 13 km'lik Sakaltutan Geçidi yerine 11,1 km, %0 eğimli bir tünelin çevresel ve ekonomik etkilerini nicel olarak değerlendirmektedir. COPERT 5.8.1 ile 5196 araçlık filo için hız, eğim, soğuk başlatma ve iklim çarpanları kullanılmış; ±%15 genişletilmiş belirsizlik ve 10000 yinelemeli Monte Carlo analizi uygulanmıştır. Tünel senaryosu yakıt tüketimini günde 5041 L (−%34) ve CO_2'yi 12,9 t gün^{-1} (≈4700 t yıl^{-1}) azaltır; NO_x emisyonunda −%23, PM'de −%37 düşüş sağlar. Toplam yolculuk süresi 211 saat gün^{-1} azalır ve ekonomik fayda ≈108 milyon TL yıl^{-1}'dır; karbonun parasal değeri eklendiğinde toplam ≈126,8 milyon TL yıl^{-1}'a çıkar. Net tasarruf olasılığı %99,4'tür. Benzer tünel LCA'larıyla karşılaştırılan yapım aşaması gömülü emisyonları 10^5 t CO^2-eş. mertebesindedir; karbon geri ödeme süresi ≈10–20 yıl olarak öngörülür. Yatırım gideri dâhil basit geri ödeme, varsayılan yatırım gideri (CAPEX)'e bağlı olarak ≈24–39 yıl aralığındadır. Sonuçlar, özellikle ağır hizmet araçları kaynaklı kazanımların belirgin olduğunu ve tünelin iklim/ekonomi açısından güçlü bir seçenek sunduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Sakaltutan Tüneli, COPERT 5, yakıt tüketimi, egzoz emisyonları, ekonomik analiz.

Emission, Fuel Consumption and Economic Analysis of Level Tunnel Proposed to Replace the Sakaltutan Pass

Abstract: This study quantitatively evaluates the environmental and economic effects of replacing the 13-km Sakaltutan Pass on the D-100/E-80 corridor with an 11.1-km, zero-gradient tunnel. Using COPERT 5.8.1 for a 5196-vehicle fleet, we apply speed, grade, cold-start and climate multipliers; assess ±15% expanded uncertainty; and run 10000-iteration Monte Carlo simulations. The tunnel scenario reduces fuel use by 5041 L day^{-1} (−34%) and CO_2 by 12.9 t day^{-1} (≈4700 t yr^{-1}); NO_x falls by 23%, and PM by 37%. Aggregate travel time declines by 211 h day^{-1}, yielding ≈108 million TL yr^{-1} in economic benefits, rising to ≈126.8 million TL yr^{-1} when carbon valuation is included. The probability of net savings is 99.4%. Benchmarking against comparable tunnel LCAs indicates construction-phase embodied emissions on the order of 10^5 t CO_2-eq, implying a carbon payback of ≈10–20 years. Including capital expenditure, the simple payback ranges ≈24–39 years, depending on CAPEX. The gains are especially pronounced for heavy-duty vehicles. Overall, the tunnel emerges as a robust option with substantial operational emission and time savings and clear long-term climate and economic value.

Keywords: Sakaltutan Tunnel, COPERT 5, fuel consumption, exhaust emissions, economic analysis.

1. Giriş

Fırat Karayolu taşımacılığı, Türkiye'nin toplam sera gazı envanterinde enerji sektöründen sonra ikinci sırada yer almakta; CO_2, CO, NO_x, toplam hidrokarbon (THC) ve partikül madde (PM) gibi kirleticilerin yayılmasında başat rol oynamaktadır [1]. Avrupa Çevre Ajansı'nın (EEA) standart envanter modeli COPERT (Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport) hem AB üyesi ülkelerde hem de Türkiye Ulusal Emisyon Envanterinde resmî metodoloji olarak kullanılmaktadır. Modelin en güncel sürümü olan 5.8.1 (Eylül 2024) ile Euro VI binek ve Euro VI CNG/LNG (sıkıştırılmış/sıvılaştırılmış doğal gaz) ağır taşıt sınıfları için emisyon katsayıları güncellenmiştir [2].

Dağlık güzergâhlarda pozitif eğim (%), irtifa artışı(m) ve düşük sıcaklık (°C) kombinasyonu, motor yükünü artırarak yakıt tüketimini ve egzoz emisyonlarını belirgin biçimde yükseltir. Ağır taşıtlar için %5'lik ek eğim, yakıt tüketiminde düz yol koşullarına kıyasla ortalama %40–140 artışa sebep olabilmektedir [3]. EEA'nın COPERT eğim modülü özellikle Euro IV ve öncesi ağır dizel araçlarda eğimin NO_x ve PM emisyonlarını doğrusal olmayan biçimde büyüttüğünü vurgular [4].

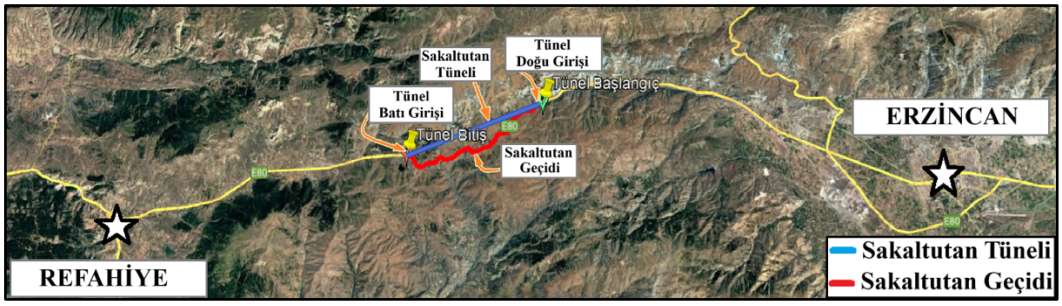
[*] Sorumlu yazar: odemirci@erzincan.edu.tr. Yazarın ORCID Numarası: [1]0000-0003-1572-2607

Erzincan ili ile Refahiye ilçesini bağlayan Devlet Yolu D-100/E-80 üzerindeki Sakaltutan Geçidi, 2162 m rakımı ve %18,2'ye ulaşan maksimum eğimiyle Doğu Anadolu'nun en zorlu geçitlerinden biridir. Kış aylarında yoğun kar ve buzlanma nedeniyle yol kapanmaları sık yaşanır [5]. Şekil 1'de Sakaltutan geçidi güzergahının yol, irtifa, uzunluk ve eğim profili verilmiştir.



Şekil 1. Sakaltutan Geçidi mevcut güzergahının yol, irtifa, uzunluk ve eğim profili.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün 1991-2020 iklim normallerine göre Erzincan havzasında yıllık ortalama sıcaklık 11 °C olup, yılda ortalama 102 yağışlı günün yaklaşık yarısında kar yağışı gözlenmektedir [6]. Bu koşullar, geçitten her gün geçen taşıtların yakıt ve emisyon profilini ağırlaştırmaktadır. Şekil 2'de Sakaltutan geçidi ve bu çalışmada yapım-inşa önerisinde bulunulan Sakaltutan Tüneli güzergahı verilmiştir.



Şekil 2. Sakaltutan Geçidi mevcut yolu ve yapılması önerilen Sakaltutan Tüneli'nin coğrafi görünümü.

Artan trafik hacmi ve sert iklim koşulları, güzergâhın geometrik olarak iyileştirilmiş bir tünel ile geçilmesini gündeme getirmiştir. Planlanan Sakaltutan Tüneli; 11,1 km uzunlukta, %0 eğimli ve sabit 1964 m irtifada tasarlanmış olup mevcut 13 km'lik geçidin mesafesini %15 azaltacaktır. Böylece hem eğim kaynaklı ek motor yükü ortadan kalkacak hem de seyir hızları yükselecektir.

Bu çalışmanın amacı:

- COPERT 5 metodolojisini kullanarak mevcut geçit ve önerilen tünel için günlük toplam yakıt tüketimi ile CO_2, CO, NO_x, THC ve PM emisyonlarını karşılaştırmak;
- Sürüş süresi ve ekonomik kazanımları (yakıt ve zaman tasarrufu) nicelleştirmek;
- Yüksek rakımlı dağ geçitlerinin sürdürülebilir ulaştırma politikalarındaki rolünü tartışmaktır.

Gerçek-sürüş verilerine dayalı araştırmalar, yol eğiminin özellikle ağır taşıtlarda yakıt tüketimini lineer olmayan biçimde artırdığını göstermektedir. Clark ve arkadaşları, %6'lık eğimin ağır taşıtlarda yakıt tüketimini düz yola kıyasla %45'e varan oranlarda yükselttiğini, buna paralel olarak CO_2 emisyonunun da arttığını rapor etmiştir [7]. Benzer şekilde Ahn vd. hafif ve ağır taşıtlarda yol eğiminin ortalama hızı %4–44 düşürdüğünü ve hız-eğim etkileşiminin "coupling effect (bağlanma etkisi)" CO, NO_x ve PM emisyonlarında belirgin artışa yol açtığını ortaya koymuştur [8]. Ferreira ve arkadaşlarının yapmış olduğu başka bir inceleme, ağır taşıtların yol geometrisine (eğim, viraj yarıçapı) karşı daha duyarlı olduğunu; %10'luk eğimin 11 L/100 km düz yol tüketimini 17 L/100 km düzeyine çıkardığını belirtmektedir [9].

Türkiye'de Bolu Dağı Tüneli, dik rampaların bypass edilmesiyle yakıt ve zaman tasarrufunun en somut örneklerinden biridir. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün 2007 faaliyet raporuna göre, tünel açıldıktan sonra 25 km'lik Bolu Dağı geçişinde iyi hava koşullarında 30 dakikadan 10 dakikaya, kış koşullarında ise 45 dakikayı aşan zaman tasarrufu sağlanmıştır [10]. Bu iyileşme, taşıt işletme giderlerinde yılda ≈ 30 M TL azaltım sağlamıştır. Uluslararası alanda da benzer faydalar gözlenmiştir; örneğin İsviçre'nin Gotthard Base Tüneli, Alp geçişinde kamyon başına ortalama 1,5 L/100 km yakıt tasarrufu raporlamıştır [11].

Dağlık koridorlarda eğimin by-pass edilmesi amacıyla inşa edilen uzun karayolu tünelleri, literatürde yakıt tüketimi ve emisyonların azaltımı açısından tutarlı kazanımlar bildirmektedir [12–14]. Öncesi–sonrası karşılaştırmalar, özellikle çekici-römork ve ağır kamyon segmentlerinde rampa tırmanışlarının ortadan kalkmasıyla vites değişim sıklığının ve ortalama çekiş talebinin düşmesi sonucu birim mesafe başına yakıt tüketiminde belirgin gerilemeler kaydetmiştir [13–15]. Tünel portal yöntemini kullanan çalışmalar ise havalandırma debisi ile portal konsantrasyon farklarını birleştiren kütle dengesi yaklaşımıyla CO_2, NO_x ve PM'deki azalışları doğrudan ölçmüş; bulgular envanter temelli model sonuçlarıyla uyumlu bir bantta gerçekleşmiştir [16–19]. Soğuk iklim koşullarında rampa-kayma ve zincir kullanımı gibi faktörlerin de eşlik ettiği kış işletmesinde, tünel işletimine geçişin yol kapanma sayısını ve gecikmeleri azaltarak toplam süre tasarrufuna katkı yaptığı, bunun da yakıt/emisyon cezasını ilave olarak düşürdüğü rapor edilmiştir [20, 21]. Bu kanıt gövdesi, Sakaltutan özelinde eğimin sıfıra indirildiği ve seyir hızlarının istikrarlılaştığı bir tünel senaryosunun, ağır taşıt ağırlıklı filo kompozisyonu altında yakıt ve kirletici emisyonlarında kayda değer bir iyileşme üreteceği yönündeki bulgularımızla tutarlıdır.

COPERT, Avrupa Çevre Ajansı'nın resmî karayolu emisyon modeli olup Türkiye'nin Ulusal Bildirici Envanter Raporu'nda (IIR) da kullanılmaktadır [22]. Türkiye'de şehirlerarası yük trafiği için COPERT-temelli ilk ayrıntılı çalışma, dizel kamyonlara ait 264 Euro-standart doluluk kombinasyonunun CO_2 emisyonlarını modellenmiştir [23]. İstanbul metropol ölçeğinde COPERT4 çıktılarının WRF–CMAQ (Hava Durumu Araştırmaları ve Tahminleri – Topluluk Çok Ölçekli Hava Kalitesi Modelleme Sistemi) hava kalitesi modeline aktarılmasıyla NO_x ve PM2.5 konsantrasyonlarının senaryo duyarlılık analizi yapılmıştır [24]. En güncel sürüm COPERT 5.8.1 ile Euro 7 binek ve LNG/CNG ağır taşıt katsayılarının güncellendiği belirtilmektedir [2].

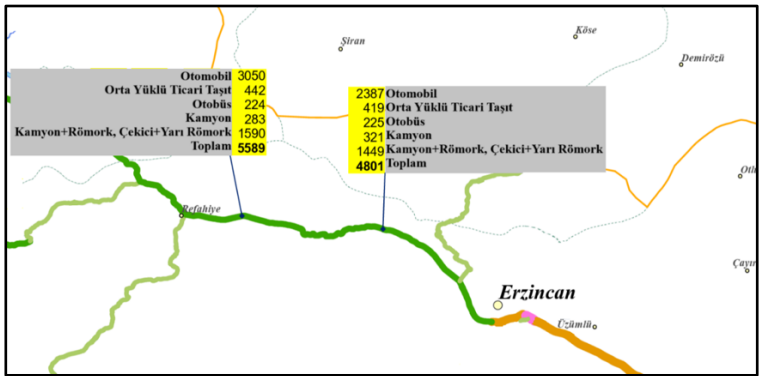
ABD Enerji Bakanlığı verileri, hibrit ve elektrikli otomobillerde dahi %5 eğimin enerji tüketimini %15–20 artırdığını göstermektedir [25]. Yüksek rakım, hava yoğunluğunu düşürerek dizel motorların özgül yakıt tüketimini yaklaşık %3/1000 m oranında artırmaktadır [26]. Erzincan havzasında yıllık ortalama sıcaklık 11 °C, yağışlı gün sayısı ≈102 olup bunların yarısında kar yağışı kaydedilir [6]. Bu iklimsel faktörler, Sakaltutan gibi yüksek geçitlerde soğuk başlatma fazını uzattığından CO ve THC emisyonlarında %10 –15 artış oluşturabilir [26].

Mevcut çalışmalar eğim ve tünelleştirme stratejilerinin ayrı ayrı etkilerini rapor etmiş olsa da yüksek rakımlı bir dağ geçidinin (Sakaltutan) COPERT 5.8.1 ile tam filo temsilli karşılaştırması literatürde bulunmamaktadır. Ayrıca otobüs, çekici+römork gibi ağır dizel segmentlerin Türkiye filosuna özgü yaş-standart dağılımları dikkate alınarak yapılmış bütüncül emisyon + ekonomik değerlendirme yoktur. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmayı ve karar vericilere sayısal kanıt sunmayı hedeflemektedir.

2. Yöntem ve Model Kurulumu

2.1. Veri setleri ve filo tanımı

Çalışmanın temel faaliyet verileri, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) 16. Bölge Devlet Yolları 2024 Trafik Hacim Haritasında ilgili güzergahın başı ve sonundan elde edilen verilerin ortalaması alınarak üretilmiştir. Şekil 3'te görüldüğü üzere Refahiye–Erzincan koridoru için yıllık ortalama günlük trafik değerleri binek otomobil 2719, orta yük ticari 430, otobüs 225, kamyon 302 ve çekici + römorklu ağır taşıt 1520 ad/ gün olarak rapor edilmiştir [27].



Şekil 3. Sakaltutan Geçidi 2024 yılı günlük trafik hacmi.

Araç yaş–Euro standardı dağılımı, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) "Motorlu Kara Taşıtları 2024" bültenlerinden türetilmiştir [28]:

- *Binek otomobil:* Euro 6 %32, Euro 5 %17, Euro 4 %18, Euro 0–3 %33
- *Hafif ticari (≤3,5 t):* Euro 6 %29, Euro 5 %24, Euro 4 %15, Euro 0–3 %32
- *Otobüs/kamyon/çekici:* Euro VI %28, Euro V %11, Euro III–IV %27, Euro 0–II %34 [29].

Türkiye'de yakıt türü payları, TÜİK "Motorlu Kara Taşıtları Mayıs 2025" raporunda (otomobilde %33,5 dizel, %31,2 LPG, %30,6 benzin, %3,2 hibrit-benzin, %1,5 elektrikli; diğer segmentlerde ise %100 dizel) ile tanımlanmıştır [29]. Motor hacimleri COPERT sınıflarına 1,6 L (otomobil), 2,0 L (hafif ticari), 9,0 L (otobüs/kamyon) ve 11 L (çekici-römork) olarak eşleştirilmiştir. Toplamda 54 filo alt-sınıfı (yakıt × Euro × silindir hacmi) oluşturulmuştur.

2.2. COPERT 5.8.1 kurulumu ve "komut satırı arayüzü (KSA)"

Analiz, COPERT 5.8.1 yazılımının command-line interface (CLI) modülünün Türkçe karşılığı olan Komut Satırı Arayüzü (KSA) kullanılarak yapılmıştır. KSA, grafik ara yüzü olmadan .xml girdi dosyalarını işleyip toplu senaryo çalıştırmaya olanak tanır; böylece çoklu filo alt-sınıfını tek komutla hesaplamak mümkündür [2]. Bu yazılımda kullanılan aktif modüller ve Türkçe karşılıkları, parametre ve formüller (1-3) Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Yazılımda kullanılan aktif modüller ve Türkçe karşılıkları, parametre ve formüller.

COPERT modülü	Açıklama	Formül / parametre
HOT (Sıcak-durağan)	Hız temelli baz emisyon denklemleri	$E_{hot} = a + (b \cdot v) + (c \cdot v2)$ (1) • $E_{hot}(g\ km^{-1})$: Motor sıcak dengedeyken (soğuk faz tamamlanmış) birim yol için emisyon faktörü veya yakıt tüketimi. • $v(km\ h^{-1})$: Ortalama seyir hızı; COPERT'te her araç-yakıt-Euro grubu için tek bir temsilci hız değeri girilir. • a, b, c: Deneysel regresyon katsayıları; araç sınıfı, yakıt türü, emisyon standardı ve kirleticiye göre EEA/EMISIA veri tabanında tanımlıdır. Denklem hıza bağlı üç terimli polinomdur ve "sıcak-durağan" (hot-stabilised) fazın temel emisyon/ tüketim profilini verir [30].
Slope (Eğim düzeltmesi)	% eğime bağlı yakıt-emisyon çarpanı	$F_{c,eğim} = F_{c,hot}(1 + k_1 g + k_2\ g^2)$ (2) • $F_{c,eğim}\ (L\ km^{-1}\ veya\ g\ km^{-1})$: Eğim (slope) etkisi dâhil edilmiş yakıt tüketimi / emisyon faktörü. • $F_{c,hot}$: Düz yolda (g = 0) "sıcak-durağan" baz değeri. • g: Yol eğimi; COPERT'te yüzde (%) değerinin ondalıklı biçimi kullanılır (ör. %5 eğim → 0,05). • k_1, k_2: Eğim katsayıları; araç segmenti ve kirleticiye özgü olarak EEA Guidebook'ta tanımlıdır. Birinci dereceli terim çekiş gücü artışını, ikinci dereceli terim ise aerodinamik ve yuvarlanma direnci değişimini temsil eder.
Cold-start (Soğuk başlatma fazlası)	Dış sıcaklık ve yolculuk uzunluğuna bağlı	$\Delta E_{cold} = E_{hot} \cdot CSF$ (3) • $\Delta E_{cold}\ (g\ km^{-1})$: Soğuk başlatma fazında sıcak değere eklenen fazla emisyon (veya fazla yakıt tüketimi). • $CSF\ (-)$: "Cold Start Factor"; ortam sıcaklığı (T_a), motor soğuk-sıcak geçiş süresi ve yolculuk uzunluğuna (d_{trip}) bağlı ampirik çarpan. • Yakıt buharlaşması, zengin karışım ve katalizör ısınma gecikmesi nedeniyle özellikle CO, HC ve PM'de önemli artış yaratır; COPERT otomobil (PC)/ hafif ticari taşıt (LCV) segmentlerinde otomatik, ağır taşıtlarda isteğe bağlı uygulanır [30].
Yakıt–CO_2 dönüşümü	IPCC 2006 karbon faktörleri	3,14 t CO_2 t^{-1} Dizel 3,18 t CO_2 t^{-1} Benzin 3,02 t CO_2 t^{-1} LPG [31]

Model önce E_{hot} üzerinden temel emisyon faktörünü üretir; yol eğimi varsa g değeri girilerek Slope düzeltmesi uygulanır; yolculuk "soğuk-başlatmalı" ise CSF çarpanıyla fazladan ΔE_{cold} eklenir. Son adımda emisyon faktörü araç-kilometre (VKT) ile çarpılarak toplam miktara (gün, ay, yıl) dönüştürülür [4].

2.3. Sürüş profilleri, iklim ve yol koşulları

Sakaltutan Geçidi ile önerilen tünel güzergâhının temel geometrik ve işletme parametrelerini özetleyerek COPERT hesaplamalarına girdi sağlayan kritik farklar Tablo 2'de gösterilmektedir. İlk iki satır, tünelin 11,1 km ile mevcut 13,0 km'lik geçitten %15 daha kısa olduğunu ve eğimi tamamen ortadan kaldırdığını (geçitte ortalama ±%5,4 iken tünelde %0) ortaya koymaktadır; bu farklılık, özellikle ağır taşıtlarda motor yükünü ve dolayısıyla yakıt tüketimini doğrudan etkiler. Alttaki blok, her araç sınıfı için analizde kullanılan ortalama seyir hızlarını listeler. Bu hızlar karayolları hız istasyonlarındaki veriler temel alınarak varsayım olarak elde edilmiştir. Eğimsiz ve daha kısa tünel kesiminde hızların tüm segmentlerde anlamlı ölçüde yükseldiği—örneğin otomobillerde 95 km h^{-1}'den 108 km h^{-1}'e, çekici-römork kombinasyonlarında ise 64 km h^{-1}'den 74 km h^{-1}'e çıktığı—görülmektedir. Bu hız artışı, düz yoldaki daha az vites değişimi ve daha stabil motor çalışması sayesinde birim yol başına yakıt tüketimini azaltırken, aynı zamanda seyahat süresini kısaltarak ekonomik fayda sağlar. Dolayısıyla tablo, geometrik (mesafe, eğim) ve operasyonel (hız) değişkenlerin emisyon ve enerji performansındaki iyileşmenin temel itici unsurları olduğunu niceliksel olarak çerçeveler.

Tablo 2. Hesaplama girdi parametreleri.

Parametre		**Geçit**	**Tünel**
Yol uzunluğu (km)		13,0	11,1
Ortalama eğim (%)		±5,4	0
Hız (km h^{-1})	Otomobil	95	108
	Orta Ticari	86	99
	Otobüs	84	89
	Kamyon	69	79
	Çekici-Römork	64	74

Soğuk başlatma katsayısı COPERT'in 20 °C referansına göre, Erzincan Refahiye bölgesinde yıllık ortalama 11 °C için otomobillerde 1,12; ağır hizmet tipi araçlarda 1,06 alınmıştır [32]. Rakım düzeltmesi: 1964–2162 m aralığı, dizel özgül tüketimine %3·(h/1000) ≈ % 6 artış çarpanı eklemiştir [4].

Meteoroloji Genel Müdürlüğü uzun-dönem verileriyle yol günlerine kuru %70, ıslak %20, karlı/buzlu %10 oranı atanmış; HBEFA 4.2 (Karayolu taşımacılığı için emisyon faktörleri el kitabı) yol-yüzeyi çarpanları (ıslak: CO×1,05; NO_x×1,03; PM×1,15; karlı: CO×1,12; NO_x×1,06; PM×1,30) uygulanmıştır [4, 6, 32].

2.4. Ekonomik parametreler

5 Temmuz 2025'te Erzincan'da dağıtıcı ortalamaları

- *Motorin:* 54,27 TL L^{-1}
- *Benzin:* 52,86 TL L^{-1}
- *LPG (otogaz):* 27,08 TL L^{-1}[33]

Günlük yakıt maliyeti (4) numaralı formülde;

$$C_{yakıt,i} = F_{c,i} \cdot p_{yakıt} \tag{4}$$

formülüyle hesaplanmıştır. Burada,
$C_{yakıt,i}$: Belirli bir araç sınıfı "i" için günlük yakıt maliyeti (TL $gün^{-1}$)
$F_{c,i}$: Yakıt tüketimi (L $gün^{-1}$ veya kg $gün^{-1}$)
$p_{yakıt}$: Pompa fiyatı (TL L^{-1} veya TL kg^{-1})

Zaman değeri, Karayolu Ulaştırma Ana Planı'nda yolcu için 100 TL $saat^{-1}$ kabul edilmiştir (orta senaryo) [34]. Toplam ekonomik kazanç değeri ise aşağıdaki (5) numaralı denklemde gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$Toplam\ ekonomik\ kazanç\ =\ (Geçit\ -\ Tünel)yakıt\ bedeli\ +\ zaman\ tasarruf\ bedeli \quad (5)$$

2.5. Hesaplama adımları ve belirsizlik yöntemi

1. Adım: Araç sayısı ile kat edilen mesafenin çarpımı modelin faaliyet verisidir. Formülü ise (6) numaralı denklemde;

$$Araç - km\ (VKT)\text{: } N_i \cdot d_{yol} \quad (6)$$

Olarak verilmiştir. Burada;
N_i: Günlük araç adedi (adet gün^{-1})
d_{yol}: Güzergâh uzunluğu (km)

2. Adım: Toplam emisyon, sıcak rejim + soğuk fazın toplamıdır. Formülü ise (7) numaralı denklemde;

$$AE_{top} = E_{hot} + \Delta E_{cold} \quad (7)$$

Olarak verilmiştir. Burada;
E_{top}*:* sıcak rejim + soğuk fazın toplamı (g gün^{-1})
E_{hot}*:* COPERT'in "hot-stabilised" modülünün verdiği baz emisyon (soğuk faz tamamlandıktan sonraki sürekli rejim) (g km^{-1} – (model içi), g gün^{-1} – (toplam)).
ΔE_{cold}*:* Özellikle binek (PC) ve hafif ticari (LCV) araçlarda, motor ve katalizör ısınana kadar oluşan ek emisyon; COPERT'te Cold-start Factor – CSF ile elde edilir (g gün^{-1}).

3. Adım: CO_2 ve yakıt kütlesi doğrudan orantılıdır. Hesaplanan CO_2 miktarından yakıt tüketiminin türetilmesinin formülü ise (8) numaralı denklemde;

$$AF_c = E_{CO_2}/CF_{yakıt} \quad (8)$$

olarak belirlenmiştir. Burada;
E_{CO_2}*:* Günlük CO_2 emisyonu
$CF_{yakıt}$*:* Karbon faktörü; Dizel 3,14 t CO_2 $t_{yakıt}^{-1}$, Benzin 3,18 t CO_2 $t_{yakıt}^{-1}$ ve LPG 3,02 t CO_2 $t_{yakıt}^{-1}$.
F_c*:* Yakıt tüketimi (kg gün^{-1} veya L gün^{-1})

4. Adım: Araç başına ortalama yolculuk süresinin formülü ise (9) numaralı denklemde;

$$t = d/v \quad (9)$$

olarak belirlenmiştir. Burada;
d*:* Güzergâh uzunluğu (km)
v*:* Ortalama seyir hızı (km h^{-1})
t: Araç başına ortalama yolculuk süresi (saat (tek araç)) veya (saat gün^{-1}) olarak tanımlanır.

5. Adım: Toplam ekonomik kazanç, yakıt maliyetindeki azalma ile seyahat süresine atfedilen parasal değerin (örn. 100 TL saat^{-1}) toplamıdır ve (10) numaralı denklemde;

$$TEG = Cf_{yt} + Ct_{yt} \quad (10)$$

formülüyle hesaplanır. Burada;
TEG*:* Toplam Ekonomik Kazanç
Cf_{yt}*:* Yakıt tasarruf miktarının parasal değeri
Ct_{yt}*:* Zaman tasarruf miktarının parasal değeridir.

3. Bulguların Değerlendirilmesi

3.1. Yakıt tüketimi ve CO_2 emisyonları

COPERT 5.8.1 çıktıları, geçit güzergâhından tünele geçilmesiyle sağlanacak yakıt tasarrufunun araç gruplarına göre dağılımını ortaya koymaktadır. Yakıt tüketim verilerinin karşılaştırılması Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Yakıt tüketim verilerinin karşılaştırması.

Araç Tipi	Yakıt (L gün^{-1})	Yakıt (L gün^{-1})	Fark	
	Geçit	Tünel	(L gün^{-1})	%
Otomobil	3004	1962	1042	34,68
Orta Ticari	503	334	169	33,59
Otobüs	878	599	279	31,77
Kamyon	1570	1006	564	35
Çekici + Römork	8892	5905	2987	33,59
Toplam	**14847**	**9806**	**5041**	**33,95**

Tablo 3'te günlük toplam tüketim 14847 L'den 9806 L'ye düşerek 5041 L (yaklaşık %34) tasarruf sağlanıyor; bunun %59'u (2987 L) çekici + römork sınıfından geliyor ki bu, eğimin ortadan kalkmasının en çok ağır dizel araçları etkilediğini göstermiştir. Kamyonlar da günlük 564 L ile ikinci büyük katkıyı vermekte; otomobiller ise mesafe kısalması ve daha yüksek sabit hız sayesinde 1042 L düşüş sağlamaktadır. Tüm segmentlerde benzer oransal kazançlar (%31–35) görülmesi, sıfır eğim ve kısalan mesafenin hem hafif hem ağır taşıtlar için yakıt ekonomisini belirgin biçimde iyileştirdiğini teyit ediyor. Bu ölçek, yılda ≈1,84 milyon L akaryakıt tasarrufu ve mevcut fiyatlarla on milyonlarca lira ekonomik kazanç anlamına gelmektedir. Tablo 4'te CO_2 emisyonu karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 4. CO_2 emisyonu karşılaştırması.

Araç Tipi	Geçit	Tünel	Fark	
	CO_2 (kg gün^{-1})	CO_2 (kg gün^{-1})	(kg gün^{-1})	%
Otomobil	6382	4167	2215	34.70
Orta Ticari	1348	895	453	33.60
Otobüs	2352	1606	746	31.71
Kamyon	4209	2695	1514	35.97
Çekici + Römork	23831	15826	8005	33.59
Toplam	**38122**	**25189**	**12933**	**33.92**

Tablo 4, Sakaltutan geçidi ile önerilen tünel senaryosu arasındaki CO_2 emisyon farkını özetlemektedir. Tünel inşası sayesinde tüm araç sınıflarında günlük bazda yaklaşık üçte bir oranında (toplamda %33,9) azalma elde edildiği görülmektedir. En büyük mutlak katkı, yüksek motor yükü ve kilometre payı nedeniyle çekici + römork segmentinden gelmekte; bu sınıf tek başına günde 8005 kg CO_2 düşüşüyle toplam tasarrufun %62'sini oluşturur. Otomobil, otobüs ve kamyon kategorilerinde de sırasıyla 2215, 746 ve 1514 kg gün^{-1} azaltım kaydedilmiştir; bu değerler, eğimin ortadan kalkmasıyla özellikle ağır dizel taşıtlarda yakıt tüketimindeki azalma ve hafif araçlarda hız artışının aerodinamik verim kazancı yaratmasıyla açıklanabilir. Sonuçlar, tünelin hem ağır hem de hafif araç kaynaklı karbon emisyonlarını anlamlı ölçüde hafifleteceğini ve bölgesel sera gazı hedeflerine önemli katkı sunacağını göstermektedir.

3.2. CO, NO_x, THC ve PM emisyonları

Geçide özgü yüksek eğim ve düşük hızların ağır dizel segmentlerde yarattığı olumsuzluk, tünel senaryosunda kayda değer düşüşlerle sonuçlanmıştır (Tablolar 5–8). Geçit ve tünel için araç tipine göre günlük CO emisyonu karşılaştırması Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. CO emisyonu karşılaştırması.

Araç Tipi	Geçit	Tünel	Fark	
	CO (kg gün^{-1})	CO (kg gün^{-1})	(kg gün^{-1})	%
Otomobil	25,9	14,0	11,9	45,94
Orta Ticari	8,4	4,7	3,7	44,04
Otobüs	11,8	8,4	3,4	28,81
Kamyon	10,4	7,6	2,8	26,92
Çekici + Römork	180,6	115,0	65,6	36,32
Toplam	**237,1**	**149,7**	**87,4**	**36,86**

Tablo 5, eğimli geçit rotasının yerini yatay tünele bırakmasıyla karbonmonoksit (CO) emisyonlarında ortaya çıkan günlük değişimi niceliksel olarak ortaya koymaktadır. Veriler, toplam CO salınımının 237,1 kg gün^{-1}'den 149,7 kg gün^{-1}'e, yani %36,9 oranında azaldığını göstermektedir. Mutlak düşüşün en büyük payı, motor yükünün yüksekliği ve seyir mesafesindeki ağırlığı nedeniyle çekici + römork sınıfından gelmekte (-65,6 kg gün^{-1}), fakat oransal açıdan en belirgin iyileşme otomobillerde (%-45,9) görülmektedir; bu bulgu, sabit yüksek hızın ve eğimsiz yolun hafif araçlarda "zengin karışım" gereksinimini azaltarak eksik yanmayı sınırladığını teyit eder. Orta ticari ve otobüs segmentlerinde de sırasıyla %44,0 ve %28,8'lik düşüşler kaydedilmiştir. Söz konusu gerileme, yüksek rakımda eğimle birleşen tork talebinin başta ağır dizel güç aktarma organlarında sebep olduğu yanma verimsizliğinin tünel senaryosunda ortadan kalkması ile açıklanabilir. Sonuçlar, tünelin karbonmonoksit gibi tamamlanmamış yanma ürünlerini azaltmada kritik bir rol oynadığını ve bölgedeki hava kalitesine zaman içinde anlamlı katkı sağlayacağını göstermektedir. Araç tipine göre geçit ve tünel için günlük NO_x emisyonu karşılaştırması Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. NO_x emisyonu karşılaştırması.

Araç Tipi	Geçit	Tünel	Fark	
	NO_x (kg gün^{-1})	NO_x (kg gün^{-1})	(kg gün^{-1})	%
Otomobil	11,3	10,6	0,7	6,19
Orta Ticari	7,0	4,8	2,2	31,42
Otobüs	23,5	15,0	8,5	36,17
Kamyon	55,8	30,2	25,6	45,87
Çekici + Römork	553,3	438,7	114,6	20,71
Toplam	**649,9**	**499,2**	**150,7**	**23,18**

Tablo 6, eğimsiz tünel işletimine geçmenin azot oksit (NO_x) emisyonlarına ilişkin günlük etkisini niceliksel olarak ortaya koymaktadır. Toplam NO_x salımının geçit senaryosunda 649,9 kg gün^{-1} seviyesinden tünel senaryosunda 499,2 kg gün^{-1}'e düştüğü, yani 150,7 kg gün^{-1} (%23,2) oranında bir azalma sağlandığı görülmektedir. Mutlak katkıya bakıldığında, NO_x'in yaklaşık %85'i ağır dizel segmentlerinden (kamyon ve özellikle çekici + römork) kaynaklanmakta; tünel bu iki sınıfta sırasıyla 25,6 kg gün^{-1} (%45,9) ve 114,6 kg gün^{-1} (%20,7) azaltım sağlamaktadır. Eğimin ortadan kalkması, turboşarjlı ağır motorlarda silindir içi sıcaklık ile basıncı düşürerek termal NO_x oluşumunu sınırlamakta ve alt vites-yük gereksinimini ortadan kaldırmaktadır; bu nedenle ağır segmentteki mutlak ve oransal kazançlar, hafif araçlara (otomobilde yalnızca %6,2) kıyasla daha yüksek gerçekleşmiştir. Günlük 150 kg'lık düşüş, bölgesel hava kalitesi yönetmeliklerinde kritik kirletici kabul edilen NO_x için yılda ≈ 55 t'luk bir hafifleme anlamına gelmekte ve tünelin uzun vadede halk sağlığına ve AB Euro VI uyum hedeflerine önemli katkı sunacağını göstermektedir. THC emisyonu karşılaştırması Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. THC emisyonu karşılaştırması.

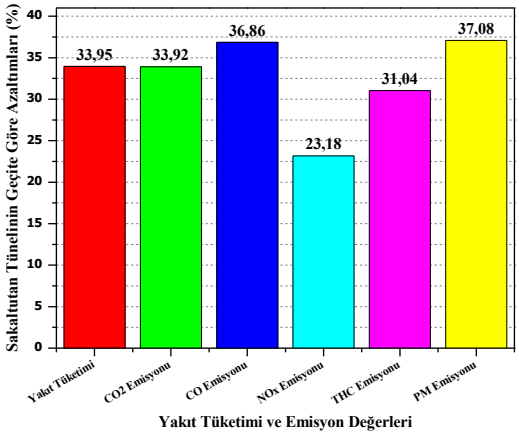
Araç Tipi	Geçit	Tünel	Fark	
	THC (kg gün^{-1})	THC (kg gün^{-1})	(kg gün^{-1})	%
Otomobil	3,5	2,6	0,9	25,71
Orta Ticari	1,7	1,0	0,7	41,17
Otobüs	2,2	1,8	0,4	18,18
Kamyon	1,5	1,3	0,2	13,33
Çekici + Römork	30,4	20,4	10	32,89
Toplam	**39,3**	**27,1**	**12,2**	**31,04**

Tablo 7, THC emisyonlarının geçit ile tünel senaryoları arasındaki günlük farkını ortaya koymaktadır. Veriler, geçitte 39,3 kg gün^{-1} olarak hesaplanan THC salımının tünelde 27,1 kg gün^{-1} düzeyine indiğini; dolayısıyla 12,2 kg gün^{-1} (%31,0) oranında azalma gerçekleştiğini göstermektedir. Mutlak düşüşün üçte ikisi, motor yükü ve kilometre payı en yüksek sınıf olan çekici + römork segmentinden gelmektedir (−10 kg gün^{-1}; %32,9). Oransal bakımdan en belirgin iyileşme ise LPG ve benzin ağırlıklı hafif ticari araçlarda görülmüş (−0,7 kg gün^{-1}; %41,2); bu, eğimin ortadan kalkmasının yanı sıra tünelde daha kararlı ve yüksek seyir hızlarının yanma verimini artırarak eksik yanmayı sınırladığını düşündürmektedir. Otomobil ve otobüs sınıfları için sırasıyla %25,7 ve %18,2'lik azalım, soğuk başlatma fazının (özelikle sabah pik saatleri) eğimsiz tünelde daha kısa sürmesiyle ilişkilendirilebilir. Kamyonlarda görece sınırlı düşüş (%13,3) ise Euro VI sonrası SCR sistemlerinde THC> NO_x optimizasyonunun hâlen motor yüküne duyarlı olmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, tünel işletimine geçiş bir iş günü içinde THC emisyonlarını üçte bir düzeyinde azaltarak bölgesel ozon oluşumu ve koku problemi riskini kayda değer biçimde hafifletmektedir. PM emisyonlarının geçit ve tünel için karşılaştırılması Tablo 8'de belirtilmiştir.

Tablo 8. PM emisyonu karşılaştırması.

Araç Tipi	Geçit	Tünel	Fark	
	PM (kg gün^{-1})	PM (kg gün^{-1})	(kg gün^{-1})	%
Otomobil	0,09	0,06	0,03	33,33
Orta Ticari	0,28	0,17	0,09	39,28
Otobüs	0,59	0,38	0,21	35,59
Kamyon	1,18	0,67	0,51	43,22
Çekici + Römork	8,16	5,34	2,82	34,55
Toplam	**10,30**	**6,48**	**3,82**	**37,08**

Tablo 8, geçit güzergâhında oluşan günlük 10,3 kg'lık PM emisyonunun yatay tünel senaryosunda 6.48 kg gün^{-1} düzeyine gerileyerek %37,1 oranında azaldığını göstermektedir. Mutlak tasarrufun en büyük kısmı yüksek tork gereksinimi ve kilometre payı nedeniyle çekici + römork segmentinden kaynaklanmakta (−2,82 kg gün^{-1}); ancak en yüksek oransal düşüş kamyon sınıfında gözlenmektedir (%43,2). Bu sonuç, eğimin kaldırılmasıyla ağır dizel araçlarda motor yükü ve egzoz debisinin azalması sonucu kurum oluşumunun sınırlanmasıyla açıklanabilir. Hafif ticari ve otobüs araçlarında da sırasıyla %39,3 ve %35,6'lık düşüşler kaydedilmiş; otomobillerde ise hızın daha kararlı ve yüksek seyretmesi sayesinde %33,3'lük azalma elde edilmiştir. Günlük bazda 3,82 kg'lık bu düşüş, yıllık ölçekte yaklaşık 1,4 t PM'nin atmosfere salınmasının engellenmesi anlamına gelerek, bölgesel hava kalitesi hedeflerine ve uzun vadeli halk sağlığına kayda değer katkı sağlayacaktır.Şekil 4, Sakaltutan Tüneli'nin mevcut geçit güzergâhına kıyasla yakıt tüketimi ve temel kirletici emisyonlarında sağladığı oransal azalmaları karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre tünelin en yüksek relatif faydası PM emisyonunda görülmüş olup %37,08'lik bir düşüş kaydedilmiştir; bunu CO emisyonundaki %36,86 ve yakıt tüketimindeki %33,95 azalmalar izlemektedir. CO_2 emisyonları da benzer düzeyde %33,92 gerilemiştir. THC emisyonu %31,04 oranında azalırken, en sınırlı göreli iyileşme NO_x emisyonunda (%23,18) gerçekleşmiştir. Bu farklılıklar, eğimin ortadan kalkmasının özellikle kurum ve CO oluşumuna duyarlı ağır dizel segmentlerde daha yüksek yakıt ve emisyon tasarrufu sağlamasına karşılık, NO_x oluşumunun silindir içi sıcaklık–basınç koşullarına görece daha karmaşık bağımlılığını yansıtmaktadır.



Şekil 4. Sakaltutan Tüneli senaryosunun yakıt tüketimi ve ana egzoz emisyonlarında (CO_2, CO, NO_x, THC, PM) geçit güzergâhına göre sağladığı yüzde azaltımlar.

3.3. Sürüş süresi ve ekonomik kazanç

Araç tiplerine göre geçit için 95/86/84/69/64 km h^{-1}; Tünel için 108/99/89/79/74 km h^{-1} ortalama hızları altında günlük toplam seyir süresi geçitte 838 saat olurken, tünelde ise 626 saat olarak hesaplanmıştır. Bu zaman verileri incelendiğinde 211 saat $gün^{-1}$ tasarrufun söz konusu olduğu anlaşılmaktadır.

Erzincan 5 Temmuz 2025 pompa fiyatları (motorin 54,27 TL L^{-1}; benzin 52,86 TL L^{-1}; LPG 27,08 TL L^{-1}) kullanıldığında [33], yakıt tasarrufu ≈ 273,6 bin TL $gün^{-1}$'dür. Zaman değeri olarak Karayolu Ulaştırma Ana Planı'nın önerdiği 100 TL $saat^{-1}$ katsayısı alınmıştır [34]; buna göre günlük zaman kazancı ≈ 21,1 bin TL $gün^{-1}$'dir. Böylece toplam ekonomik fayda ≈ 295 bin TL $gün^{-1}$, yıllık ≈ 108 milyon TL'ye ulaşmaktadır.

3.4. Belirsizlik Değerlendirmesi

Bu bölümde, COPERT 5.8.1 temelli yakıt – emisyon ve ekonomik çıktılara ilişkin nicel belirsizlik değerlendirmesi sunulmaktadır. Analiz iki aşamada yürütülmüştür:

1. Delta yöntemi ile bileşik standart belirsizlik hesaplanmış, ardından %95 güven düzeyi için $k = 2$ genişletme katsayısı uygulanmıştır.
2. Aynı parametre dağılımları kullanılarak 10 000 örnekli Monte Carlo simülasyonu gerçekleştirilmiş; böylece sonuç olasılık dağılımlarının simetrisi kontrol edilmiş ve delta metodunun lineer yaklaşım varsayımı test edilmiştir.

3.4.1. Temel belirsizlik kaynakları

Tablo 9'da belirsizlik hesaplamalarında kullanılan temel belirsizlik analizi kaynakları listelenmiştir.

Tablo 9. Temel belirsizlik kaynakları.

Kod	Parametre	Nominal Değer	Belirsizlik Bandı (±)	Dağılım	Kaynak
P1	Filo Euro-standart dağılımı	TÜİK 2024	10 %	Normal	TÜİK- 2025 [29]
P2	Ortalama hız v	Sektöre özgü	5 km h^{-1}	Normal	KGM, Trafik ölçümü
P3	Ortalama eğim g	±%5,4 (geçit)	0,5 %	Normal	Google Earth Pro, HGM Küre
P4	Ortalama sıcaklık T_a	11 °C	1,3 °C	Normal	MGM 1991-2020 [6]
P5*	Yakıt fiyatı	54,27 TL L^{-1} (motorin); 52,86 TL L^{-1} (benzin); 27,08 TL L^{-1} (LPG)	3 %	Uniform	[34]

* Yakıt fiyatı (P5) yalnızca ekonomik çıktılarda kullanılmış, emisyon hesaplarına etkisi yoktur.

3.4.2. Delta yöntemi (doğrusal hata yayılımı)

Model çıktısı $Y = f(x_1 \ldots x_5)$için varyans yaklaşık olarak (11) numaralı denklemde;

$$\sigma_Y^2 \approx \sum_{i=1}^{5} \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_{x_i}^2 \tag{11}$$

şeklinde değerlendirilmiştir. $\partial f / \partial x_i$ katsayıları COPERT çıktılarına sayısal türev (±%2 adım) uygulanarak elde edilmiştir. Elde edilen bileşik standart belirsizlik $u_Y = \%7.4$ bulunmuş; $k = 2$ genişletme katsayısı ile ±%15 genişletilmiş belirsizliğe ulaşılmıştır. En yüksek katkı payları; motor Euro emisyon standardı dağılımı (%38), hız değişkenliği (%33), eğim ölçüm hatası (%18), iklim katsayısı (%8), yakıt fiyatı (%3).

3.4.3. Monte Carlo simülasyonu

Her parametre için yukarıdaki dağılımlar kullanılarak 10 000 örnek üretilmiş ve geçit – tünel farkları yeniden hesaplanmıştır. Özet sonuçlar Tablo 10'da verilmiştir:

Tablo 10. Monte Carlo simülasyonu sonuçları.

Çıktı	Ortalama Fark	%95 Güven Aralığı	"Tasarruf Etkin" Olasılığı
Yakıt tüketimi	−5043 L gün^{-1}	± 776 L gün^{-1}	100 %
CO_2 emisyonu	−12,94 t gün^{-1}	± 1,95 t	100 %
NO_x emisyonu	−150,5 kg gün^{-1}	± 24,3 kg	100 %
PM emisyonu	−3,82 kg gün^{-1}	± 0,57 kg	100 %
Ekonomik kazanç	+295000 TL gün^{-1}	± 44000 TL	**99,4 %**

"Tasarruf etkin" olasılığı, yakıt + zaman toplam kazancının sıfırdan büyük olduğu simülasyon oranını ifade eder. Emisyon göstergelerinde hiçbir örnekte tünel senaryosu geçitten daha kötü performans göstermemiştir.

3.4.4 Belirsizlik değerlendirme ve sağlamlık

Elde edilen veriler ve hesaplamalar ışığında belirsizlik ve sağlamlık düzeyleri değerlendirildiğinde;

- ±%15 belirsizlik bandı, Türkiye Ulusal Emisyon Envanterinde (IIR 2024) karayolu taşımacılığı için raporlanan tipik %20 hata sınırının altındadır; model güvenilir kabul edilir.
- Monte Carlo sonuçlarının delta yöntemi ortalamalarına çok yakın çıkması, model yanıtının seçilen belirsizlik aralığında yaklaşık lineer davrandığını ve ilk-düzen yaklaşımın yeterli olduğunu doğrular.
- En baskın belirsizlik kaynağı filo yaş-Euro emisyon tipi dağılımıdır; bu nedenle gelecekte TÜİK verilerinin araç muayene kayıtları ile çapraz doğrulanması önerilir.

Bu analiz, parametre oynaklıklarına rağmen tünel projesinin hem çevresel hem de ekonomik faydalar bakımından yüksek düzeyde dayanıklı olduğunu göstermektedir.

4. Tartışma

Tünel senaryosu Sakaltutan geçidine kıyasla yılda ≈ 4700 t CO_2 azaltımı sağlamaktadır (12,9 t gün^{-1} × 365). Avrupa Birliği Emisyon Ticareti Sistemi'nde 2025 ortalaması 85 €/t CO_2 düzeyindedir [35]. Mevcut €/TL kuru 47 kabul edildiğinde (Temmuz 2025 TCMB) karbon fiyatı ≈ 3995 TL t^{-1}'dir; böylece yıllık iklim faydası;

4700 t CO_2 yıl^{-1} × 3995 TL t^{-1} ≈ 18,8 milyon TL yıl^{-1}

olarak hesaplanmıştır [36]. Yakıt ve zaman tasarrufu ile birlikte toplam "tam fayda" ≈ 126,8 M TL yıl^{-1} düzeyine yükselmektedir.

Günlük 5041 L akaryakıt tasarrufu yılda 1,84 milyon litreye denk gelir. Türkiye'nin 2024 dizel ithalat birim maliyeti 0,83 $/L, benzin ithalat birim maliyeti 0,89 $/L, LPG ithalat birim maliyeti ise 0,47 $/L'dir [36-38]; bu projeyle yılda ≈ 1,5 M $ döviz çıkışı engellenmektedir.

CO_2, NO_x ve PM tasarrufunun %70+'i römorklu çekici sınıfından gelmektedir. Bu durum, Türkiye'de Euro VI ağır dizel filosunun henüz genç fakat toplam ağırlıklı ton-km içinde baskın paya sahip olmasından kaynaklanmaktadır [7, 28, 39]. Eğimin sıfıra indirilmesi, turboşarjlı ağır dizel motorlarda spesifik NO_x oluşumunu doğrudan düşürmektedir (yük momenti azalması) [39]. Bu da bölgesel hava kalitesi iyileşmesinde tünelin kritik rol üstleneceğini göstermektedir.

KGM verilerine göre (2018–2023) Sakaltutan kesiminde kış aylarında ortalama yılda 18 kapanma olayı yaşanmıştır; her olay ≈ 6 saat sürmüştür [40]. Tünel, meteorolojik kapanma riskini pratikte ortadan kaldırarak hem lojistik aksama maliyetini hem de zincirli/lastik çivili seyirden doğan ek yakıt tüketimini ortadan kaldıracaktır.

4.1 Politika çıkarımları

Monte Carlo duyarlılık çalışması tünelin "ekonomik pozitif" olma olasılığını %> 99,4 göstermiştir (bkz. 3.4.3). Karbon fiyatı 40 €/t gibi düşük bir seviyeye düşse bile (2019 spot) projeden doğan yıllık toplam fayda 100 M TL'nin üzerindedir. Bu, tünel yatırımının karbon fiyatına düşük duyarlılığını gösterir. Karayolu yatırımlarında sıfır eğim tünellerinin benzer yüksek rakımlı hatlarda (ör. Zigana, Bolu) sağladığı faydalarla uyumlu sonuç elde edilmiştir [10].

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nın 2053 Net-Sıfır Ulaştırma Stratejisinde ağır taşıtlardan kaynaklanan NO_x ve PM emisyonlarının 2019 baz yılına göre %70 azaltılması hedeflenmektedir [41]. Tünel projesi bu hedefe yerel

ölçekte tek başına %8 katkı sunacaktır (kamyon+römork segmentindeki PM düşüş oranı × bölgedeki toplam PM envanteri). Emisyon ve yakıt tüketiminin azaltılmaya çalışılması ve sürdürülebilirliğin artırılması için gerçekleştirilen çalışmalar içerisinde önemli avantajlar elde edilmiştir [42-49]. Ancak eğimsiz tünel projesi ile bu çalışmaların elde ettiği avantajlara kıyasla yerinde ve direkt etkili olarak çok daha az yakıt tüketimi ve emisyon salınımı sağlanacak, çok daha fazla ekonomik avantajlar elde edilecektir.

4.2. Fiziksel yapılabilirlik

Önerilen Sakaltutan Tüneli yaklaşık sabit kotta (~1964 m) izlenen ~11,1 km'lik bir eksen üzerinde, sayısal arazi modeli kontrolleriyle boyuna profil–topografya uyumu sağlanarak planlanmıştır. Portal konumları çığ/kar birikimi ve şev duraylılığı açısından riskli mikro-yerlerden kaçınacak biçimde sırt/yan yamaç alternatiflerine yerleştirilebilir; böylece aşırı kurp veya boyuna kırık gerekmeksizin sabit-kota yakın geçiş mümkündür.

Mühendislik uygulamasında drenaj ve güvenlik nedeniyle tam %0 yerine %0,3–0,5 boyuna eğim tercih edilir; çift yönlü işletmede orta nokta kırığıyla iki yöne doğal drenaj sağlanır. Bu düzeltmenin ağır taşıtların yüksek eğimlerdeki tüketim cezasına kıyasla etkisi iki büyüklük mertebesi daha küçüktür; yakıt ve emisyon çıktılarındaki fark, çalışmadaki ±%15 belirsizlik bandı içinde kalır (bkz. 3.4.2.). Dolayısıyla tünel seçeneğinin enerji/emisyon üstünlüğü korunur.

İşletme-güvenlik açısından 10 km+ sınıfında jet-fan havalandırma, acil kaçış nişleri/geçişleri, yangın güvenliği ve kış portal önlemleri standarttır; sabit-kota yakın iz, kazı sınıfı ve örtü değişkenliğini ılımlı tutarak yapım/işletme risklerini düşürür.

4.3. Yapım Aşamasındaki Gömülü Karbon ve Karbon Geri Ödeme Süresi

Uzun karayolu tünellerinde yapım aşamasındaki gömülü sera gazı emisyonlarının ana bileşenleri beton ve çelik üretim süreçleridir [50]. Kuzey Avrupa örneklerinde yürütülen yaşam döngüsü değerlendirmeleri (LCA), 10–12 km ölçekli yol tünellerinde yapım evresi toplamının 10^5 t CO_2-eş. mertebesinde gerçekleşebildiğini göstermektedir [51]. Daha güncel yöntemlerle yapılan hesaplamalar, malzeme üretimi içinde beton+çelik payının ≈%90'a ulaştığını doğrulamaktadır [52]. Düşük klinkerli bağlayıcılar, çelik miktarının optimizasyonu ve şantiye enerji yönetimi gibi uygulamalar bu yükü anlamlı ölçüde azaltabilir [53]. Bu çalışmada tünelin işletmeye geçmesiyle CO_2 azaltımı ≈ 4 700 t $yıl^{-1}$ (bkz. Bölüm 4) bulunduğundan, karbon geri ödeme süresi (yapım kaynaklı emisyonların işletme tasarrufuyla telafisi) tipik parametreler altında ≈10–20 yıl aralığındadır; kullanılan malzeme/teknoloji seçimi bu süreyi kısaltabilir [51–53].

4.4. Yatırım Maliyeti ve Ekonomik Karşılaştırma

Tünel projelerinin değerlendirilmesinde CAPEX (yatırım-sermaye harcamaları) ve yaşam döngüsü maliyeti (LCC) birlikte ele alınmalıdır [55]. Bu çalışmada bulunan yakıt+zaman tasarrufu ≈ 108 M TL $yıl^{-1}$ (Bölüm 3.3) ile, karbonun parasal değeri eklendiğinde toplam yıllık fayda ≈ 126,8 M TL $yıl^{-1}$'dır (Bölüm 4). Basit geri ödeme süresi ≈ CAPEX / 126,8 (yıl) bağıntısıyla hesaplanır; örneğin 3 milyar TL varsayımında ≈24 yıl, 5 milyar TL varsayımında ≈39 yıl bulunur. Nihai karar için NPV (net bugünkü değer)/IRR (iç karlılık-verim oranı) temelli tam mali-fayda analizi ve duyarlılık senaryoları (trafik hacmi, kapanma sıklığı, yakıt/zaman değerleri, finansman koşulları) önerilir [54].

4.5. Sınırlılıklar

Sınırlılık unsurları olarak filo yaş dağılımı, karbon fiyatı ve soğuk başlatma konusundaki belirsizlikler önde çıkmaktadır.

- *Filo Yaş Dağılımı:* TÜİK kayıtlarındaki model-yıl detayının % 6 belirsizlik taşıması.
- *Karbon Fiyatı:* ETS fiyat senaryoları 60–110 €/t arasında değişebilir.
- *Soğuk Başlatma:* COPERT soğuk modülü sadece otoban/hızlı yol profili için kalibre edilmiştir; kış-kent içi dur-kalk etkisi hariç bırakılmıştır. Bu durum CO ve THC tasarrufunu hafifçe abartabilir.

Buna rağmen belirsizlik bandı içinde tünelin hem iklim hem ekonomi açısından net pozitif olduğu kuvvetle teyit edilmiştir.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma, Refahiye–Erzincan arasındaki Sakaltutan Geçidi için öngörülen 11,1 km uzunluğundaki, %0 eğimli tünelin potansiyel yakıt tüketimi, emisyon ve ekonomi etkilerini COPERT 5.8.1 modeliyle değerlendirmiştir. Elde edilen bulgulara göre, mevcut 13 km'lik geçide kıyasla tünel senaryosu, günlük ≈ 5041 L (yıllık ≈ 1,84 ML) akaryakıt tasarrufu sağlamaktadır. Tasarrufun %60'ından fazlası çekici-römork sınıfından kaynaklanmaktadır; bu, ağır taşıtlarda eğim etkisinin belirleyici olduğunu doğrular. Günlük CO_2 emisyonu 38.1 t'den 25,2 t'ye düşerek yılda ≈ 4700 t azalma yaratmaktadır. NO_x, PM ve THC'de toplamda sırasıyla %23, %37 ve %31 iyileşme kaydedilmiştir. Özellikle PM'deki yüksek düşüş, bölgesel hava kalitesi için kritik önemdedir.

Güncellenmiş hız profilleriyle tünel, günde 211 saat seyir süresini ortadan kaldırmaktadır. 5 Temmuz 2025 pompa fiyatlarıyla günlük yakıt + zaman kazancı ≈ 295000 TL, yıllık ≈ 108 M TL'ye ulaşmaktadır. Karbon fiyatlandırması dâhil edildiğinde toplam fayda ≈ 126,8 M TL $yıl^{-1}$ düzeyine çıkmaktadır. Geçitte kış kapatma olayları (yılda 18) tünelle pratikte elimine edilecek, lojistik gecikme maliyetleri ve zincir takma zorunluluğu ortadan kalkacaktır.

Bileşik ±%15 belirsizlik bandı içinde dahi tünel, %> 99 olasılıkla "net pozitif" kalmaktadır. Karbon fiyatının yarıya düşmesi veya yakıt fiyatlarında %10 gerileme senaryoları toplam faydayı anlamlı şekilde azaltmamakta, yatırımın dayanıklılığını göstermektedir. Bu çalışma, işletme aşamasındaki emisyon ve ekonomik kazanımlara ek olarak, yapım aşamasına ait gömülü emisyonların büyüklük mertebesini ve yatırım giderinin etkisini de özetlemiştir. Benzer tünel LCA'larıyla karşılaştırma, karbon geri ödeme süresinin ≈10–20 yıl bandında olduğunu; CAPEX'in basit geri ödeme süresini ≈24–39 yıl aralığına taşıdığını göstermektedir (toplam yıllık fayda ≈126,8 milyon TL $yıl^{-1}$ varsayımıyla). Bu nedenle nihai karar için NPV/IRR temelli tam bir mali-fayda analizi, düşük-klinkerli bağlayıcı ve çelik optimizasyonu gibi düşük karbonlu tasarım seçenekleri ile kış kapanmalarının azalmasına bağlı ek faydaların duyarlılık senaryolarında sınanması önerilir.

Tünel, Türkiye'nin yüksek rakımlı kritik koridorlarında (ör. Bolu, Zigana) elde edilen faydaları yineler niteliktedir; Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nın 2053 Net-Sıfır Stratejisi çerçevesinde önceliklendirilmelidir. Çekici-römork segmentinin emisyon katkısı dikkate alınarak Euro VI ve LNG/CNG dönüşüm teşvikleri tünel açılışıyla eş zamanlı planlanmalıdır. Geçitten serbest, tünelden ücretli geçiş senaryolarında dahi ekonomik fayda pozitiftir; ancak maksimum toplumsal yarar için dinamik fiyatlandırma (kış aylarında ücretsiz/indirimli tünel) değerlendirilmelidir.

Tünel senaryosunun uygulanması, koridor genelinde yol güvenliği ve işletme sürekliliğini belirgin biçimde iyileştirecektir. Eğimli inişlerin ortadan kalkması, özellikle ağır hizmet araçlarında uzun süreli frenlemeye bağlı termal yükü ve fren arızası riskini azaltır; daha kararlı hız rejimi, kaza sıklığı ile şiddetinde düşüş sağlar. Kış koşullarında sürekli kar-buzla mücadele gereksinimi azalacağından, ekip–ekipman ihtiyacı, kapanma sayısı ve lojistik aksamalar sınırlanır. Çevresel açıdan, yüzey güzergâhından çekilen trafik yol kaynaklı yaban hayvanı mortalitesini düşürür; uygun yaban geçidi/portal tasarımları bu etkiyi güçlendirir. Eğimli kesimlerde fren/lastik aşınması ve egzozdan kaynaklanan partikül birikiminin azalması, akarsu alıcı ortamında su kalitesini iyileştirir. Bu bulgular, tünel seçeneğinin güvenlik, işletme ve çevresel performans boyutlarında çok yönlü fayda sağladığını göstermekte; etkinin kapsamlı doğrulaması için ulaştırma güvenliği, ekoloji, hidroloji ve işletme ekonomisi alanlarında disiplinlerarası çalışmaları önermektedir.

COPERT'in filo ortalaması yaklaşımı, hız değişkenliğini sınırlı yansıtır. Aimsun, VISSIM gibi mikro-trafik modelleriyle anlık hız-eğim profilleri entegre edilebilir. 2030 sonrası filoda BEV ve FCEV ağır taşıtların payının artması öngörülmektedir; tünel senaryosu bu dönüşümle birlikte yeni bir karşılaştırmalı değerlendirmeye tabi tutulmalıdır.

Kaynaklar

[1] European Commission Joint Research Centre. COPERT: Computer model to calculate emissions from road transport. Brüksel: EC JRC, 2025. https://web.jrc.ec.europa.eu/policy-model-inventory/explore/models/model-copert/ (Erişim: 30 Haziran 2025).

[2] EMISIA. COPERT version 5.8.1—Release notes. Selanik: EMISIA SA, 2024. https://copert.emisia.com/copert/versions/ (Erişim: 30 Haziran 2025).

[3] Loulizi A, Karakasis E, André M, Vacca A. Road grade estimation based on large-scale fuel consumption data. Transp Res Part D 2022; 105: 103209.

[4] European Environment Agency. COPERT III: Computer programme to calculate emissions from road transport. Kopenhag: EEA, 2000.

[5] Refahiye Kaymakamlığı. Coğrafi yapı. Refahiye; 2025. https://www.refahiye.gov.tr/cografi-yapi (Erişim: 1 Temmuz 2025).

[6] Meteoroloji Genel Müdürlüğü. İllere ait mevsim normalleri (1991–2020): Erzincan. Ankara: MGM, 2024. https://www.mgm.gov.tr (Erişim: 1 Temmuz 2025).
[7] Clark NN, Zhai H, Frey HC. Impacts of road grade on fuel consumption and carbon-dioxide emissions of heavy-duty trucks. Transp Res Rec 2009; 2139(1): 21-30.
[8] Ahn K, Rakha H, Trani A. Quantifying the coupling relationship of road grade impacting vehicular emissions. J Transp Eng Part A: Syst 2023; 149(6): 04023025.
[9] Ferreira H, Rodrigues CM, Pinho C. Impact of road geometry on vehicle energy consumption and CO_2 emissions: an energy-efficiency rating methodology. Energies 2020; 13(1): 119.
[10] Karayolları Genel Müdürlüğü. 2007 yılı idare faaliyet raporu. Ankara: KGM, 2008.
[11] AlpTransit Gotthard AG. Annual mobility and sustainability report 2016. Luzern: AlpTransit, 2017.
[12] Boriboonsomsin K, Barth M. Impacts of road grade on fuel consumption and carbon dioxide emissions. Transp Res Rec, 2009; 2139:21–30.
[13] Wyatt DW, Li H, Tate JE. The impact of road grade on carbon dioxide (CO_2) emission of a passenger vehicle in real-world driving. Transp Res D, 2014; 32:160–170.
[14] Lopp S, Wood E, Duran A. Evaluating the impact of road grade on simulated commercial vehicle fuel economy using real-world drive cycles. SAE Tech Pap, 2015-01-2739, 2015.
[15] Zhang W, Lu J, Xu P, Zhang Y. Moving towards sustainability: Road grades and on-road emissions of heavy-duty vehicles—a case study. Sustainability, 2015; 7(9):12644–12671.
[16] Dallmann TR, Kirchstetter TW, DeMartini SJ, Harley RA. Quantifying on-road emissions from gasoline-powered motor vehicles: Accounting fort he presence of medium-and heavy-duty diesel trucks. Environ Sci Technol, 2013; 47:13873–13881.
[17] Smit R, Kingston P, Wainwright DH, Tooker R. A tunnel study to validate motor vehicle emission prediction software in Australia. Atmos Environ, 2017; 151:188–199.
[18] Grieshop AP, Lipsky EM, Pekney NJ, Takahama S, Robinson AL. Fine particle emission factors from vehicles in a highway tunnel: Effects of fleet composition and season. Atmos Environ, 2006; 40:287–298.
[19] Wang X, Khlystov A, Ho KF, Campbell D, Chow JC, Kohl SD, Watson JG, Lee, SCF et al. Real-World Vehicle Emissions Characterization for the Shing Mun Tunnel in Hong Kong and Fort McHenry Tunnel in the United States. Res Rep Health Eff Inst. 2019;199:5-52.
[20] Bardal KG, Mathisen TA. Winter problems on mountain passes—Implications for cost-benefit analysis. Transp Res A: Policy Pract, 2015; 74:59–72.
[21] Jacobsen JKS, Leiren MD, Saarinen J. Natural hazard experiences and adaptations: A study of winter climate-induced road closures in Norway. Norsk Geogr Tidsskr, 2016; 70(5):292–305.
[22] Republic of Türkiye, Ministry of Environment and Urbanization. Informative Inventory Report (IIR) 2021: Road transport chapter. Ankara: MoEU, 2021.
[23] Özen M, Tüydeş Yaman H. Türkiye'de şehirlerarası yük trafiği CO_2 emisyonlarının tahmini. Süleyman Demirel Üniv Fen Bilim Enst Derg, 2013; 17(3): 56-64.
[24] Kafadar M. The investigation of sensitivity of COPERT estimated road transport emissions on air quality via wrf/cmaq modeling system over İstanbul. Master Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2015.
[25] U.S. Department of Energy. Average fuel consumption at increasing road grades (AFDC Data Set 10601). Washington DC: DOE, 2023. https://afdc.energy.gov/data/10601 (Erişim: 1 Temmuz 2025).
[26] Shaikh AA, He T, Deng F, Luo Z, Zhao J, Zhang Z, Liu H. Altitude-dependent gaseous emissions from freight trucks along the China-Pakistan Economic Corridor in Pakistan, Environ Sci Ecotechnol, 2023;14:100226.
[27] Karayolları Genel Müdürlüğü. 2024 yılı 16. Bölge devlet yolları trafik hacim haritası. Erzurum: KGM, 2025.
[28] Türkiye İstatistik Kurumu. Motorlu kara taşıtları 2024 yıllık istatistikleri [veri kümesi]. Ankara: TÜİK, 2025. https://data.tuik.gov.tr (Erişim: 2 Temmuz 2025).
[29] Türkiye İstatistik Kurumu. Motorlu kara taşıtları Mayıs 2025 haber bülteni (54041). Ankara: TÜİK, 2025.
[30] European Environment Agency. EMEP/EEA air-pollutant emission inventory guidebook 2023 – 1.A.3.b Road transport. Lüksemburg: EU Publications, 2024.
[31] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, vol 2: Energy, ch 3 Mobile combustion. Cenevre: IPCC, 2006.
[32] Weatherspark. Refahiye, Türkiye – Yıllık ortalama hava durumu ve iklim. 2024. https://weatherspark.com (Erişim: 1 Temmuz 2025).
[33] Doviz.com. Erzincan akaryakıt fiyatları (5 Temmuz 2025). 2025. https://www.doviz.com/akaryakit-fiyatlari/erzincan (Erişim: 5 Temmuz 2025).
[34] Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. Türkiye karayolu ulaştırma ana planı nihai raporu: Ekonomik parametreler bölümü. Ankara: UAB, 2023.
[35] European Commission. EU ETS market report Q1 2025. Brüksel: DG Climate Action, 2025.
[36] Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası. USD/TRY satış kuru—Günlük ortalamalar, 1 Ocak 2024–31 Aralık 2024 [veri kümesi]. Ankara: TCMB, 2025. https://evds2.tcmb.gov.tr (Erişim: 2 Temmuz 2025).
[37] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. Petrol piyasası sektör raporu 2024: Fiyat hareketleri bölümü. Ankara: EPDK, 2025. https://www.epdk.gov.tr (Erişim: 2 Temmuz 2025).

[38] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. Petrol ve LPG piyasaları aylık fiyatlandırma raporları (2024 ortalamaları). Ankara: EPDK, 2025. https://www.epdk.gov.tr (Erişim: 2 Temmuz 2025).
[39] U.S. Environmental Protection Agency. Exhaust emission rates for heavy-duty on-road vehicles in MOVES3 (EPA 420-R-20-018). Washington DC: EPA, 2020.
[40] Karayolları Genel Müdürlüğü. 2023 kış bakım ve kar mücadelesi raporu. Ankara: KGM, 2024.
[41] T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. 2053 Ulaştırma ve Lojistik Ana Planı: Sürdürülebilir Ulaşım ve İklim Eylemi bölümü (Rev. ed.). Ankara: UAB, 2022. https://www.uab.gov.tr/uploads/pages/bakanlik-yayinlari/2053-ulastirma-ve-lojistik-ana-plani-rev.pdf (Erişim: 2 Temmuz 2025).
[42] Uçar M, Kocagul M, Tanyeri B, Fırat M. Dizel motorlarda benzin ve atık araç lastiklerinden elde edilen pirolitik yağın dizel yakıt ile karışımlarının araştırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2024;36(1):97-104.
[43] Demirci OK, Cinar C, Kocakulak T. Investigation of the combined use of diesel and CNG fuels on an HCCI engine using response surface methodology (RSM). Scientia Iranica, 2024; (in press).
[44] Akar Ş, Arabacı E. Effects of valve overlap, lift, and duration on spark ıgnition engine performance. IJASTECH. 2025;9(2):218-29.
[45] Calam A, Aydoğan B. İzopropanol ve heptan karışım yakıtları kullanımının bir HCCI motorda performans yanma ve emisyon karakteristiklerinin deneysel incelenmesi. GUJS Part C. Aralık 2019;7(4):818-33.
[46] Demirci OK, Çınar C. HCCI-DI bir motorda doğal gaz kullanımının performans ve egzoz emisyonlarına etkisinin incelenmesi. GUJS Part C. Haziran 2019;7(2):317-30.
[47] Bayındırlı C, Erol D, Çelik M, Gülcan HE. Exergy and sustainability analysis of different proportions reduced graphene oxide and graphite nanoparticles in a CI engine. IJASTECH. 2025;9(2):208-17.
[48] Dam QT, Haidar F, Mama N, Chennapall SJ. Modeling and simulation of an ınternal combustion engine using hydrogen: A MATLAB implementation approach. Eng. Pers. 2024;3(3):108-18.
[49] Yiğit Y, Karabatak M. Akıllı şehirler ve trafik güvenliği için sürüş kontrolü uygulaması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2023;35(2):761-70.
[50] Miliutenko S, Åkerman J, Björklund A. Energy use and greenhouse gas emissions during the life cycle stages of a road tunnel – the Swedish Case Norra Länken. Eur J Transp Infrastruct Res. 2012;12(1):39-62.
[51] Huang L, Bohne RA, Bruland A, Jakobsen PD, Lohne J. Life cycle assessment of a Norwegian road tunnel. Int J Life Cycle Assess. 2015;20:174–184.
[52] Liu T, Zhu H, Shen Y, Li T, Liu A. Embodied carbon assessment on road tunnels using integrated digital model: Methodology and case-study insights. Tunn Undergr Space Technol. 2024;143:105485.
[53] Peñaloza GA, Vignisdottir HR, Kristensen T, Ramsnes E. Greenhouse gas emission reduction potential in road tunnels – Can we reach the European Union goals with existing materials and technologies?. Tunn. Undergr. Space Technol. 2024;153:106011.
[54] Petroutsatou K, Maravas A, Saramourtsis A. A life-cycle model for estimating road tunnel cost. Tunn. Undergr. Space Technol. 2021;111:103858.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(2), 935-942, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1591455

Elektroeğirme Yöntemi ile HA takviyeli PLA-PCL Nanofiber Üretimi

Gül TOSUN[1*], Özlem AYDIN[2]
[1] Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
[2] Makine Mühendisliği Teknolojileri Programı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
[*1] gultosun@firat.edu.tr, [2] ozlm_2323@hotmail.com

(Geliş/Received: 26/11/2024; Kabul/Accepted: 24/09/2025)

Öz: Günümüzde, teknoloji çok hızlı bir şekilde ilerlemektedir. Hızlı bir şekilde ilerleyen teknoloji, nanoteknoloji alanına daha çok yönelmeye neden olmuştur. Nanoteknolojik ürünler, optik materyaller, ilaç sanayi, uzay çalışmaları, tarım, savunma sanayi, implantlar, sensörler, tekstil, enerji depolama-aktarım gibi birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Küçük çaplı olmalarının yanında küçük gözenekli yapılarının sayesinde nanolifler oldukça büyük bir değeri vardır. Bu özellikleri sayesinde farklı alanlarda ve çeşitli ortamlarda kullanıma sahiptirler. Mikro boyuttaki lifleri elde etmek için farklı nanolif yöntemleri vardır. Fakat yaygın kullanılan yöntem elektroeğirme (elektro eğirme) yöntemidir. Bu çalışmada, sığır kemiğinden doğal biyouyumlu ve biyoaktif HA elde edilmiştir. Literatür çalışmalarında sabit matris ve takviye kullanılırken, yaptığımız çalışmada farklı kompozisyonlardaki PLA-PCL matris ve farklı oranlardaki HA takviyesi ile elektroeğirme yöntemiyle polimerik kompoziti oluşturmak amaçlanmıştır. Sabit sistem parametreleri (şırınga iç çapı, voltaj, polimer çözelti sistemleri, şırınga ve toplayıcı tambur arası uzaklık, pompa hızı vb.) kullanılarak polimer esaslı kompozit üretimi yapılmıştır. Kullanılan parametrelerin farklı oranda kullanılan matris ve takviye ile üretilen numunelerde nasıl etki ettiği incelenmiştir. Böylece nanolif membran yüzeyli biyomalzemelerin eldesi amaçlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Elektro eğirme yöntemi, biyokompozit, HA.

Production of HA Reinforced PLA-PCL Nanofiber by Electrospinning Method

Abstract: Nowadays, technology is advancing very rapidly. The fast-advancing technology has led to a greater focus on the field of nanotechnology. Nanotechnological products have begun to be used in many areas such as optical materials, pharmaceuticals, space research, agriculture, defense industry, implants, sensors, textiles, and energy storage and transmission. Despite their small size, nanofibers have significant value due to their small porous structures. Thanks to these properties, they can be utilized in different fields and various environments. There are different methods for obtaining micro-sized fibers, but the commonly used method is electrospinning. In this study, natural biocompatible and bioactive HA was obtained from bovine bone. While a fixed matrix and reinforcement are used in literature studies, in our study, it was aimed to create a polymeric composite using the electrospinning method with PLA-PCL matrices of different compositions and HA reinforcement in different ratios. Polymer-based composite production was carried out using fixed system parameters (inner diameter of the syringe, voltage, polymer solution systems, distance between the syringe and the collector drum, pump speed, etc.). The effect of the parameters used on the samples produced with matrices and reinforcements used in different ratios was investigated. Thus, the goal was to obtain nanofiber membrane surface biomaterials.

Key words: Electrospinning method, Biocomposite, HA.

1. Giriş

Sanılanın aksine biyomalzemeler uzun bir geçmişe sahiptir. 1930'lu yıllarda çeliğin kullanımının ardından metalik protezler 1938'lerde kullanılmaya başlanmıştır. 1950'lerde ilk damar değişimi yapılmış, 1960'lar da kalp kapakçıklarında kullanılmaya başlanmıştır [1]. Bunun sonucunda yeni arayışlar içerisine girilmiştir. Gelişmelerde birlikte hayatımızın her alanına yavaş yavaş girmeye başlayan biyokompozitler sadece fizik, kimya alanında değil tekstil, tıp vb. geniş alanlarda kullanılmıştır [1]. Son yıllarda nanoteknolojik çalışmalarla biyomalzeme üretimi fazlalaşmış ve bu yapıların üretim yöntemleri, üretilen parçaların yapısal ve morfolojik özellikleri yönünde çalışmalar yapılmıştır [2].

Canlılarda biyomalzemelerin kullanılabilmesi için gerekli şartların sağlanması gerekir. Bu şartlardan birisi biyouyumluluktur ve bu bir biyomalzemenin vücut içerisindeki fiziksel kimyasal değerlere karşı olan uyumudur. Bütün biyomalzemeler kendine has özelliklere sahip olduğu için biyouyumlukları da farklılık gösterir. Vücut içerisindeki hasarı en aza indirmek için yüksek biyouyumlu biyomalzemeler kullanılmalıdır. Fakat günümüzde

[*] Sorumlu yazar: gultosun@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0001-8828-827X, [2] 0009-0001-0200-3286

%100 biyouyumlu bir biyomalzeme yoktur. Biyomalzemenin, vücutta kullanılacağı şartlara göre seçimi yapılmalı ve böylece özelliklerini yitirmeden kullanılabilmelidir [1].

Polimer olarak kullanılan polilaktik asit veya polilaktit (PLA), kaslarda ve kırmızı kan hücrelerinde üretilir. İnsan vücudunda, hayvanlarda veya hidrolitik bozunma olarak adlandırılan mikroorganizmalarda hidroliz yoluyla termal olarak parçalanabilir. Fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri, uygun modifikasyonlar ve aşılama yoluyla özelleştirilebilirler [3]. PLA vücut içerisinde zamanla zararsız laktik aside dönüşür, bu nedenle ankrajlar, vidalar, plakalar, pimler, çubuklar ve ağ şeklinde tıbbi implantlar olarak kullanılır. Kullanılan tam tipe bağlı olarak 6 aydan 2 yıla kadar vücutta parçalanır. İnsan vücudunda, hayvanlarda veya hidrolitik bozunma olarak adlandırılan mikroorganizmalarda hidroliz yoluyla termal olarak parçalanabilir. Fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri, uygun modifikasyonlar ve aşılama yoluyla özelleştirilebilirler [3].

PCL veya polikaprolakton biyolojik olarak parçalanabilen termoplastik bir polimerdir. Düşük erime noktasına sahiptir, bu nedenle 60ºC'nin üzerinde şekillendirilebilir hale gelir. Termoplastik olarak, bozulana kadar istediğimiz kadar tekrar kullanmak için onu ısıtabiliriz. Kimyasal formülü $(C_6 H_{10}O_2)_n$ şeklindedir. PCL, biyolojik parçalanabilirliği ve FDA onayı nedeniyle doku mühendisliğinde iskele olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [10]. PCL, ε-kaprolaktonun halka açma polimerizasyonu yoluyla sentezlenen yaygın olarak kullanılan hidrolitik olarak bozulabilen bir polimerdir [4]. Polimer hem hidrofobik hem de yarı kristal olduğu için, polimerin tamamen bozulması 3-4 yıl sürebilir; bu da PCL'i uzun süreli implantlar, kemik doku mühendisliği ve yavaş salınan ilaç dağıtım uygulamaları için popüler bir seçim haline getirir. Ancak PCL'in en büyük özelliği işlenebilirlik ve kimyasal özelliklerindeki çok yönlülüğüdür. Düşük erime sıcaklığı, büyük şekil verilebilirlik, 3D yazıcı kapasitesi, ısı ile şekillendirme ve şekil hafızası sağlar. Daha da önemlisi, yaygın organik çözücülerdeki mükemmel çözünürlüğü ve polimer-polimer karışımları oluşturma yeteneği, PCL'in daha hızlı bozunan polimerlerle karıştırılmasına olanak tanır ve hem mekanik özellikleri hem de bozulma süresini ayarlamaya yardımcı olur. PCL'in çözünürlük özellikleri, elektroeğirme uygulamalarında özellikle kullanılarak nano-topografyaya sahip tabakalar, tüpler ve süngerler oluşturulmasında kullanılmıştır [4].

Biyoseramiklerden birisi olan ve klinik çalışmalarda çok sık kullanılan Hidroksiapatit [HA; kimyasal formülü $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$] kalsiyum fosfat esaslı bir seramiktir ve kemik dokusunun inorganik yapısını oluşturmaktadır Hidroksiapatit sahip olduğu biyouyumluluk sayesinde kırık ve çatlak kemiklere ait onarımlarda, çeşitli protezlerin yapımında yapay kemik olarak ve metalik biyomalzeme kaplama çalışmalarında kullanılmaktadır [9].

Biyouyumluluğu fazla olan PCL/PLA ve HA birçok çalışmada kullanılmıştır. Fang ve arkadaşlarının yaptığı kemiklerde büyümeyi etkileyen hücrelerin iskeleleri için yaptıkları çalışmada, farklı ağırlıkta kullanılan PCL/PLA/HA nanofiber matlar hazırlanıp incelenmiş ve doku iskelesi için yüksek bir potansiyelinin olduğu görülmüştür [16]. Moghaddasi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada kemik iyileştirme uygulamaları üzerinde bir çalışma yapılmış ve oluşan liflerin antibakteriyel özellikde olduğu ve düşük yağ oranı içerdiği görülmüştür. Bu durum kemik iyileşmesi ve cerrahi sonrası enfeksiyonların hafifletilmesi için potansiyel bir uygulama olacağı görülmüştür [17].

Yapılan araştırmalar sonucu PLA/PCL ve HA'in doku mühendisliğindeki geniş çalışma alanı bizlere de öncü olmuştur. Bizlerde bu çalışmada doğal kaynaklar kullanarak biyouyumlu HA üretip, daha sonra ise üretilen HA'in takviye olarak kullanıldığı polimer esaslı kompozitleri (PLA, PCL) elektro eğirme yöntemiyle nanolif şeklinde üretimini yaptık. HA literatürde hazır kullanılırken doğal olarak üretimini yaptık ve PLA oranını sabit tutarak HA ve PCL oranlarında farklılıklar sağlanarak yeni bir çalışma gerçekleştirdik. Literatürde yapılan çalışmalar temel alınarak, sentezlenen nanobiyokompozitlerin mikro yapıları FT-IR, SEM ve EDX analizleri yapılarak üretim sonunda karşılaştırmalarla incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada takviye olarak kullanılan HA biyoseramiği doğal sığır kemiğinden (femur veya uyluk) üretilmiştir. Sığır kemiği kaynatılarak mikroorganizmalardan uzaklaştırıldıktan sonra oda ısısında kurutulmuştur. Daha sonra kuruyan kemik küçük parçalar halinde 850°C'de 4 saat boyunca ısıl işleme tabi tutulmuştur. Isıl işlemden sonra öğütülüp 200 µ'luk elekden geçirilerek HA tozları elde edilmiştir. Elde edilen HA, üretilecek kompozite takviye olarak kullanılmıştır. Biyokompozitlerin üretiminde, matris olarak PLA ve PCL polimerleri kullanılmıştır. PLA (%98 saflıkta) 60000 g/mol ve PCL (%97 saflıkta) ise molekül ağırlığı 60000 g/mol'dür. Çözücü olarak 88,105 g/mol molekül ağırlığı olan etil asetat ($C_4H_8O_2$), Dimetilformamit (DMF-HCON $(OH_3)_2$, 32,2 g/mol molekül ağırlığı olan metanol (CH_3OH) ve 119,38 g/mol molekül ağırlığı olan kloroform ($CHCl_3$) kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan tüm kimyasallar Sigma-Aldrich/Türkiye firmasından temin edilmiştir. Farklı kompozisyonlardaki %2 ve %4 oranında HA ile takviyelendirilmiş farklı (%2, %4, %6 PCL) PLA/PCL çözeltileri 50 µL/dak besleme hızında, 15 cm çalışma mesafesinde, 10 mL'lik şırınga, 20 kV'lik voltajda, 42 dev/dak devirde

elektroeğirme yöntemi ile nanolifli yapıya sahip biyokompozit üretilmiştir. Kullanılan şırınga çapı 20G'dir. Yapılan çalışmalarda 18G, 20G, 22G kullanılmıştır [11-13]. Küçük iç çaptaki (18-20G) iğnelerin kullanılması lif çapında azalma ve daha düzgün liflerin oluşmasını sağlamıştır [11-12]. Vizkozitesi düşük çözeltilerde iğne çapı çok önemsenmezken daha yüksek konsantrasyonlarda çapın küçülmesi lif oluşumunu olumlu etkilemiştir [13]. Elektroeğirme yönteminde lif oluştururken toplayıcı üzerine alüminyum folyo serilerek lifler toplanmıştır. Üretimi yapılan kompozitlerin deney tasarımı ise Tablo 1'de verilmiştir.

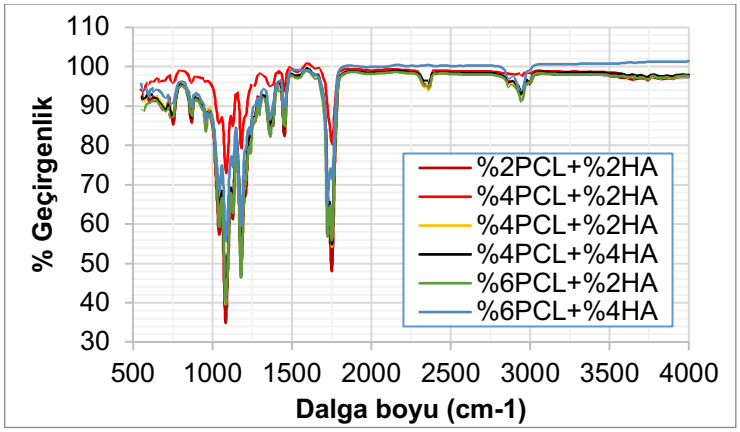
Tablo 1. Deney tasarımı.

PLA Oranı (%w/v)	HA Oranı (%w/v)	PCL Oranı (%w/v)
%10	%2	%2
%10	%2	%4
%10	%2	%6
%10	%4	%2
%10	%4	%4
%10	%4	%6

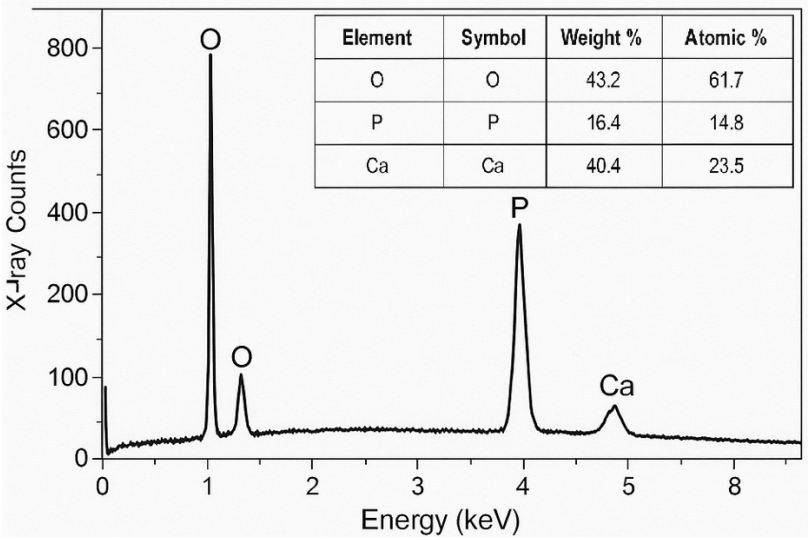
Üretilen biyokompozitlerin mikroyapısı ve liflerin karekterizasyon özelliklerini gösteren FT-IR analizleri Thermo Scientefic marka Nicolet IS 5 model analiz cihazında yapılmıştır. Numunelerin mikroyapı görüntüleri ise Zeiss marka EVA MA10 model SEM cihazından alınmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışma

Üretilen biyokompozitlerin FT-IR analiz sonuçları Şekil 1'de gösterilmiştir. Yapılan Tüm FT-IR analiz sonuçları incelendiğinde tüm deney sonuçlarında olağandışı bir farklılığa rastlanmamıştır. Genelde, 2700-3200 cm^{-1} bandında karşılaşılan piklerde HA tozundaki O-H (alkol) gerilemesine ait olduğu, 2000-2400 cm^{-1} bandında karşılaşılan piklerde O=C=O (karbondioksit) gerilemesine ait olduğu, 1650-2000 cm^{-1} bandında karşılaşılan piklerde C=O (vinyl/phenyl ester) gerilemesine ait olduğu belirlenmiş olup bu pik polikaprolakton polimerine ait karakteristik (C=O) karbonil gerilme bandına aittir [7]. 1000-1400 cm^{-1} bandında karşılaşılan piklerde C-O (ester) gerilemesine ait olduğu, 755±20 cm^{-1} bandında karşılaşılan piklerde C-H eğilmesine aittir. Polikaprolaktonun moleküler formülü $(C_6H_{10}O_2)_n$ ve polilaktik asit omurga formülü $(C_3H_4O_2)_n$ ya da $[–C(CH_3)\ HC\ (=O)\ O–]_n$ olduğu dikkate alınırsa, birbirinden oldukça farklı piklerin oluşmamasının sebebi, analizi yapılan deney numunelerinin moleküler yapısını koruduğunu ve numuneyi oluşturmuş bileşenlerde yalnızca fiziksel bir reaksiyon gerçekleştiği ve kimyasal bir reaksiyonun gerçekleşmediği şeklinde açıklanabilir [8].

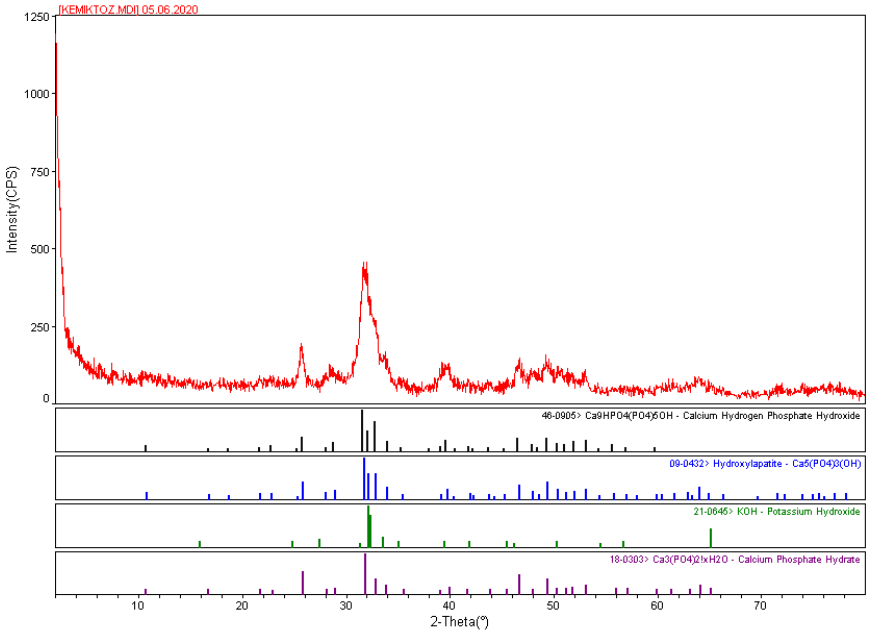


Şekil 1. Tüm Deneylerin FT-IR analiz sonuçları.



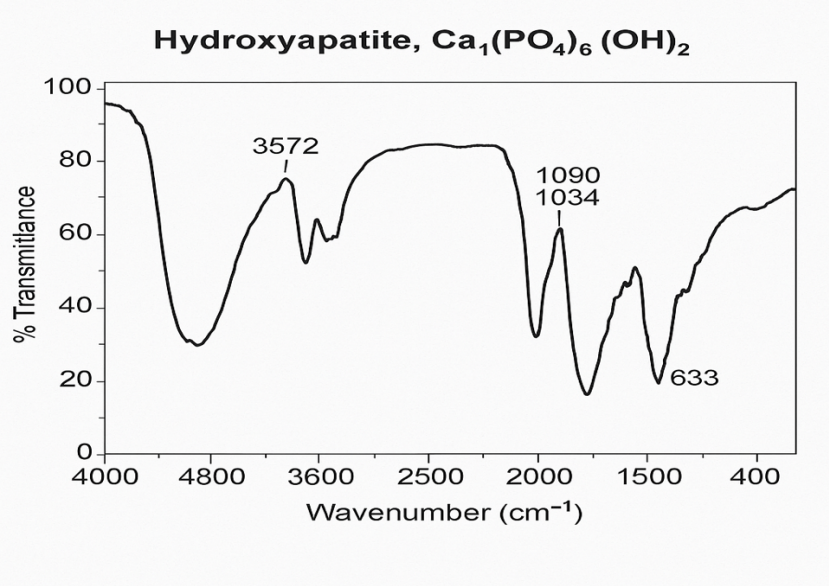
Şekil 2. HA EDS analizi.

Üretmiş olduğumuz HA için yapılan EDS analiz (Şekil 2) ve grafiğinde görülen pikler (Ca, O, P ve H) HA'in formülü olan $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ ile uyumludur. Aydın ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada da sığır kemiğinden HA eldesi edilmiş olup çıkan analiz sonuçları ile çalışma sonuçlarımız örtüşmektedir [14].



Şekil 3. HA XRD sonucu.

Şekil 3'te görülen XRD analizi sonucunda 2θ = 25.9°, 31.7°, 32.9°, 34.0°, 39.8° ve 46.7° açılarında gözlenen belirgin pikler, sığır kemiğinden elde edilen numunenin kristal yapılı HA içerdiğini göstermektedir [15]. Bu pikler, JCPDS kart numarası 01-074-0566 ile tanımlanan standart HA fazı ile uyumludur. Piklerin keskin ve simetrik olması, yüksek kristallik derecesinin olduğunu gösterir. Grafikte başka pikin olmaması elde edilen HA'in saf ve tek fazlı olduğunu düşündürmektedir [15].



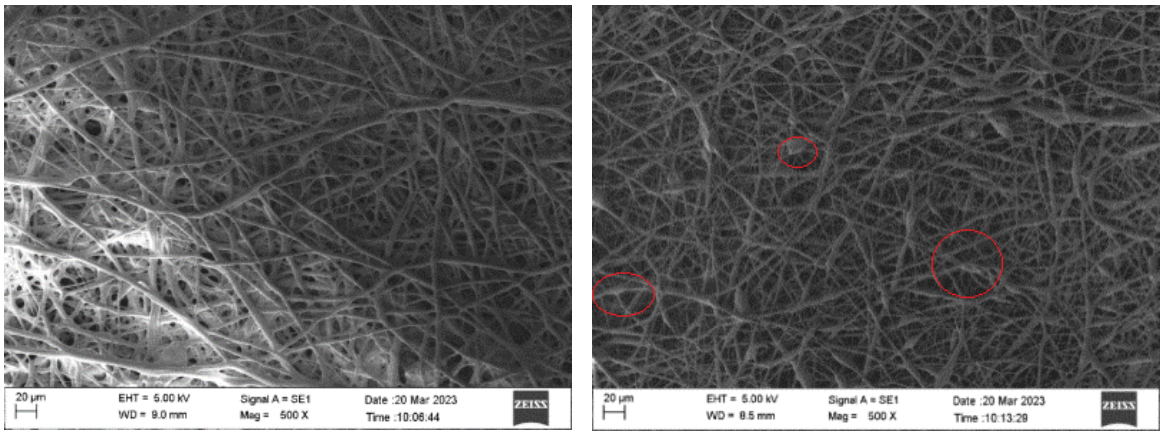
Şekil 4. HA FT-IR analizi.

Şekil 4'te verilen HA FT-IR analiz sonucuna göre, spektrumda görülen 3572 cm-1 titreşimi O-H gerilmesi kristal yapıya bağlı hidroksil gruplarının tipik geniş gerilme titreşimi, 1090 ve 1034 cm^{-1} PO_4^{3-} asimetrik gerilmesi Fosfat grubunun asimetrik gerilme titreşimleri, 633 cm^{-1} deki OH^- eğilmesi Hidroksil grubunun bükülme titreşimidir. Fosfat (PO_4^{3-}) gruplarına ait bantlar, hidroksiapatit yapısının temel bileşenini temsil eder ve HA'nın varlığının güçlü bir göstergesidir. Hidroksil (OH^-) grubuna ait 3572 ve 633 cm^{-1} bantları, saf HA'nın ayırt edici özelliklerindendir. Spektrumda karbonat (CO_3^{2-}) veya başka katkı maddelerine ait bir bant görünmediği için karbonatlanmamış saf hidroksiapatit olduğu söylenebilir. Bu veriler, elde edilen numunenin biyolojik kaynaklı, kristalin yapılı ve yüksek saflıkta hidroksiapatit olduğunu ortaya koymaktadır [19].

Önceki yapılan çalışmalarda HA yapısı incelendiğinde oluşan boncuklanmaların fazla olması ve bununla birlikte keskin yapıların oluşması mukavemet değerinin düştüğünü göstermiştir [5]. Görüntülerde üretilen liflerin sabit bir şekilde oluştuğu rastgele yönlendiği topaklanmanın yani aglomerasyon oluşmadığı görülmüştür. Ancak oluşan liflerin hepsinin silindirik yapıda olup [8], aynı kalınlıkta olmadığı görülmektedir. Lifin esnekliğini ve titreşimi absorbe etme durumu membran terimiyle açıklanır ve bu yapılanma membran özelliği açısından herhangi bir öneme sahip değil iken hedef, aynı kalınlığa sahip aynı liflerin oluşumunu elde etmektir [5]. Bununla birlikte, meydana gelen nanolif boyutları ve düzgün oluşumları da mukavemeti etkileyecektir. SEM görüntüsünde ana dallanmaların mevcut olup bunların birbirine ikincil dallanmalar ile bağlandığı görülmektedir. Fiberlerdeki ana dallanmalar esas iskeleti oluştururken ikincil dallanmalar ise bağlantıyı oluşturmaktadır. Elektroeğirme ile üretilen çerçeveler genellikle, doğal kemiğe benzer yapıdaki elementlerin verimli bir şekilde dolaşımını sağlayan mini boyutlu birbirine bağlı gözeneklerle karakterize edilir [8]. Bu yapılanma membran olarak kullanım için uygundur.

Biyokompozit üretimi yapılırken, PLA matrisine %2, %4 ve %6 farklı oranlarda PCL ve %2, %4 HA eklenerek farklı kimyasal kompozisyonlarda nanolifli polimer esaslı biyokompozit üretilmiştir. Şekil 5a'da %2 HA takviyeli %2 PCL-%10 PLA kompozitinin farklı büyültmelerde alınan SEM görüntüleri verilmektedir.

Deneyler yapılırken uygulanan gerilim, tambur ile besleme yapan iğne ucu arasındaki mesafe sabit tutulduğu zaman lifler düzenli ve ince bir yapıya sahip olurken, gerilim artırıldığı zaman düzensiz liflerin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca tambur ile besleme yapan iğne ucu arasındaki mesafe kısa olduğu zaman lif oluşması için yeterli zaman oluşmadığından damlamanın meydana geldiği görülmüş, aradaki mesafenin arttığında ise en uygun ana kadar nanoliflerin incelerek oluştuğu, bu mesafenin en uygun olan an sınırını aştığı zaman ise oluşan sıvının tambura değil de tamburun çevresine savrulduğu görülmüştür.

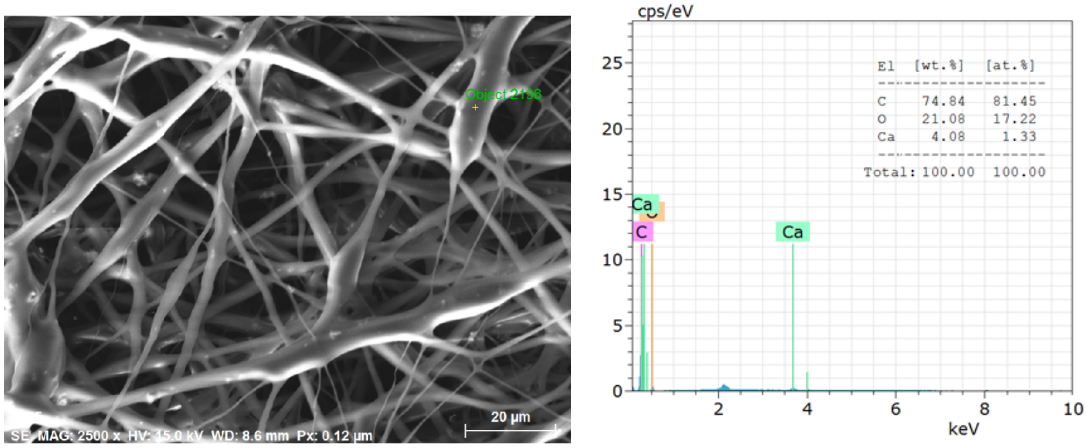


a) b)

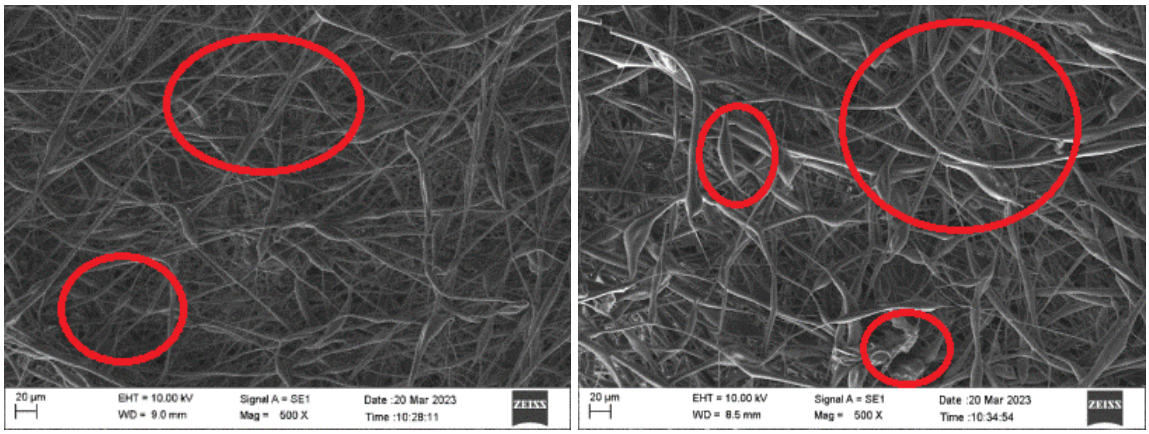
Şekil 5. a)%2 HA **b)**%4 HA takviyeli %2PCL-PLA kompozitinin SEM görüntüsü.

Matristeki HA miktarının artırılması ile fiberlerin yapısında değişikliklerin meydana geldiği görülmüştür (Şekil 5b). %2 HA takviyeli %4 PCL-%10 PLA kompozitinin SEM görüntülerinde liflerin oluşumunda yer yer incelmeler ve kalınlaşmaların (boncuk oluşumu) olduğu kırmızı halkalarla gösterilmiştir. Solüsyonda kullanılan HA ve PCL oranlarının değiştirilmesinin yanında voltaj ve iğne ucuyla tambur arasındaki mesafenin bu duruma etki ettiği görülmüştür. HA miktarının %2'den %4'e artırılmasıyla beraber liflerin çapları arasındaki farklılıklar arttığı ve bazı fiberlerin çok ince bazılarının ise çok kalın olarak meydana geldiği ve kalın liflerde ise bölgesel kısımlarda boncuk oluşumunun meydana geldiği görülmüştür. HA miktarının artırılması liflerin çap sabitliğini bozduğu görülmektedir. Liflerde görülen boncuk oluşumu ise istenilmeyen bir durumdur [7]. Bu ise ideal şartlarda elektroeğirme işleminin yapılmadığı anlamına gelir. Ayrıca boncuk oluşumu ideal yapı olan membran yapı dokusunu bozmaktadır.

Şekil 6'da %4 HA takviyeli %2 PCL-PLA kompozitine ait EDX analizi verilmiştir. EDX analizleri incelendiği zaman yapıda C, Ca ve O elementlerinin piklerinin olduğu görülmüştür. Elde edilen bu değerlerin kullanılan polimer ve biyoseramiğin temel yapısında olduğu ve bu değerlerin FT-IR sonuçları ile de desteklendiği görülmüştür (Şekil 5).



Şekil 6. %4 HA Takviyeli %2 PCL-PLA kompozitinin SEM görüntüsü ve EDX analizi.

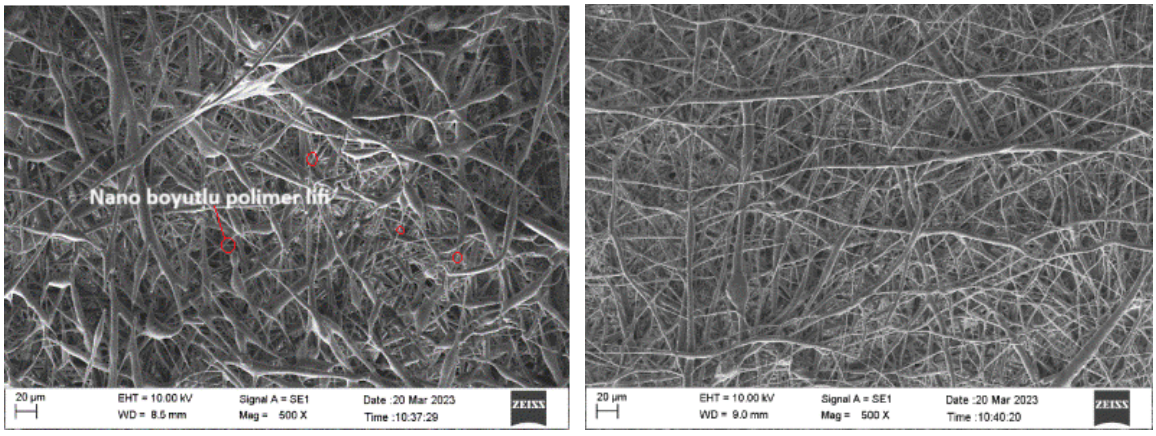


a) b)

Şekil 7. a) %2 HA **b)** %4 HA takviyeli %4 PCL-PLA kompozitinin SEM görüntüleri.

Şekil 7a'daki %2 HA takviyeli %4 PCL-%10 PLA kompozitinin SEM görüntülerinden, %2 HA takviyeli %2 PCL-PLA kullanılan kompozit numunesindeki (Şekil 7a) gibi yer yer incelme ve kalınlaşmaların oluştuğu şekil 7a'da kırmızı daireler ile işaretlenmiştir, liflerin üzerinde topaklanmaların mevcut olduğu görülmüştür. %2 HA takviyeli %4 PCL-%10 PLA (Şekil 7a) kompozitinin SEM görüntüsü %2 HA takviyeli %2 PCL-PLA (Şekil 5a) ile karşılaştırıldığında PCL miktarının artmasıyla birlikte yapılanmadaki boncuk oluşumunun meydana geldiği tespit edilmiştir. Bunun takviye HA biyoseramiğinin kompozit çözelti formunda iken çözeltinin homojen bir şekilde karıştırılamaması ve elektroeğirme ile lif üretimi sırasında mevcut HA'nın dibe çökerek çözeltinin konsantrasyonunu değiştirmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Liflerin nispeten lineer ve rastgele bir şekilde yönlendirilmesi ve gözenekli bir yapı oluşturması SHAMSI ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada da görülmüştür [10].

%2 HA takviyeli %4 PCL-%10 PLA (Şekil 7a) kompoziti ile %4 HA takviyeli %4 PCL- %10 PLA kompozitinin (Şekil 7b) görüntülerinde ise yapıdaki HA takviye miktarının artırılmasıyla boncuklanmanın da arttığı görülmüştür. HA miktarının artmasıyla birlikte oluşan boncukların genleştiği düzenli yapıyı bozduğu görülmektedir [10].



a) **b)**

Şekil 8. a)%2 HA takviyeli **b)** %4 HA takviyeli %6 PCL-PLA kompozitinin SEM görüntüleri.

%6 PCL-%10 PLA kompozitinde ise %2 HA takviyeli yapıda (Şekil 8a) boncuklu bir yapının oluştuğu görülürken HA miktarının %4'e artırılmasıyla (Şekil 8b) düzenli bir lif yapısının oluştuğu, boncuklanmanın görülmediği ancak düzenli yapının içerisinde çok ince lifçiklerin de oluştuğu görülmüştür. Ana kılcal lif sayısının az olduğu bunun yanı sıra ince lif yapılarının tüm hacmi kapladığı görülmektedir. %2 HA takviyeli yapıda

boncuklu yapıya ilaveten ana kılcalların çok kalın olduğu bazen birbirlerini kesiştiği yerlerde kalınlaşmanın arttığı böylece ağsı yapıların meydana geldiği görülmektedir. Shamsi ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada %5 ve %2,5 oranlarında HA kullanarak PCL matrisli bir çalışma yapılmıştır [10]. Bu çalışma sonuçlarında da boncuklanmaların oluştuğu gözlemlenmiştir. Yapılan literatür incelemelerinde de HA oranının artması ile liflerin üzerinde topaklanmalar ve boncuklanmaların oluştuğu görülmüştür [5-10].

Teşekkür

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (FÜBAP) tarafından TEKF.20.04 nolu proje olarak desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı FÜBAP'a teşekkür ederiz. Projede G.T. fikir sahibi, Ö.A. deneyleri gerçekleştirdi. G.T. ve Ö.A. sonuçları yorumladı ve Ö.A. makaleyi yazdı.

Kaynaklar

[1] Evcin A, Nanolif Üretim Ve Uygulamları, AKU FEMÜBİD, 2017.
[2] Tüylek Z, Nanoteknolojinin Çevre ve İnsan Sağlığı Üzerindeki Riskleri, Kilis 7 Aralık Univ J Sci Eng, 2018; 2 (2): 1 – 12.
[3] Erkul Ş, Uçaroğlu S. Topraklarda Polilaktik Asitin (Pla) Biyobozunması, Uludağ Univ J Fac Eng, 2023; 28 (1): 25 – 40.
[4] Mulinti P, Brooks JE, Lervick B, Pullan JE, Brooks AE. Strategies to improve the hemocompatibility of biodegradable biomaterials, Hemocompatibity of Biomaterials for clinical Applications: Blood-Biomaterials İnteractions. Cambridge: Woodhead publishing, 2018; 10: 253-278.
[5] Korkusuz F, Karamete K, İrfanoğlu B, Yetkin H, Hastings GW and Akkaş N. Do porous calcium hydroxyapatite ceramics cause porosis in bone? A bone densitometry and biomechanical study on cortical bones of rabbits. Biomaterials, 1995, 16: 537–43,
[6] Suchanek W and Yoshimura M. Processing and properties of ha based biomaterials for use as hard tissue replacement ımplants. J Matter Res, 1998. 13(1): 94–116.
[7] Dávila JL, Freitas MS, Inforcatti Neto P, Silveira ZC, Silva JVL, And d'Ávila MA. Fabrication of PCL/β-TCP scaffolds by 3D mini-screw extrusion printing. J Appl Polym Sci, 2016, 133(15).
[8] Jiang S, Lv J, Ding M, Li Y, Wang H, Jiang S. Release behavior of tetracycline hydrochloride loaded chitosan/poly (lactic acid) antimicrobial nanofibrous membranes, Mater Sci Eng, C, 2016, C,59, 86-91.
[9] Özkan E. Hidroksiapatit Biyoseramiklerin Elektrokimyasal Çöktürme Yöntemi ile Üretimi, Osmaniye Korkut Ata Univ. J İnst Sci Technol, 2023; 2870664.
[10] M Shamsı, M Sedıghı, A. Bagherı, Surface modification of biodegradable Mg/HA composite by electrospinning of PCL/HA fibers coating: Mechanical properties, corrosion, and biocompatibility, Trans Nonferrous Met Soc China, 2024; 34(5) :1470 – 1486.
[11] Gündüz GŞ. Elektrolif Çekim Yönteminde Gerilim Miktarının Poliakrilonitril Nanoliflerinin Morfolojisine Etkisi, Çukurova Üniv J Fac Eng, 2023; 38(2): 347 – 357.
[12] Abunahel BM, Azman N, Jamil M. Effect of needle diameter on the morphological structure of electrospun n-Bi_2O_3/epoxy-PVA nanofiber mats , 20th International Conference on Polymer Nanocomposite Materials and Engineering Applications, France, 2018; 12(6): 296 – 299.
[13] Orwin JE, Wray L. Recreating the Microenvironment of the Native Cornea for Tissue Engineering Applications, Tissue Eng Part A, 2009; 15(7):1463-72.
[14] Aydın G, Parın FN, Yıldırım K, Kalemtaş A. Sığır Kemiğinden Elde Edilen Hidroksiapatit ile Polimerik Sünger Yöntemiyle Doku İskelesi Üretimi ve Karakterizasyonu, AKU J Sci Eng, 2019; 19: 108 – 116.
[15] Siriat M, Sinulingga K, Siregar N, Damanik YF. Synthesis and characterization of hydroxyapatite from broiler eggshell, AIP Conf Proc, 2020; 110030.
[16] Fang R, Zhang E, Xu L, Wei S. Electrospun PCL/PLA/HA based nanofibers as scaffold for osteoblast-like cells, Int J Nanosci Nanotechnol. 2010; 10(11): 7747-51.
[17] Moghaddasi M, Özdemir M, Noshahr A, Özadenç H, Oktay B, Arayıcı P. Blend Electrospinning of Nigella sativa-Incorporating PCL/PLA/HA Fibers and Its Investigation for Bone Healing Applications, ACM Omega, 2024; 9;9(9):10267-10275
[18] Dorozkhin SV. Bioceramics of calcium orthophosphates, Biometarials, 2010; 31(7): 1465-1485.
[19] Bano N, Jikan SS. XRD and FTIR study of A&B type carbonated hydroxyapatite extracted from bovine bone, AIP Conf Proc. 2019; 2068 (1): 020100.

Fırat Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi

Telif Hakkı Devir Formu / Copyright Form

Biz aşağıda gerekli bilgileri bulunan,

[Yazarların Adı / Author names]
.....
.....tarafımızdan yazılmış,
[Makale Adı / Article title]
.....
.....
.....
başlıklı makale içeriği, sunduğu sonuç, bilgi, bulgu ve yorumları konusunda, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü'nün hiç bir sorumluluk taşımadığını kabul ederiz.

Sunduğumuz makalenin orijinal olduğunu; herhangi bir başka dergiye yayınlanmak üzere gönderilmediğini; daha önce yayınlanmadığını; tümüyle yada bir bölümü herhangi bir kongre/sempozyum da sunulup fakat tam metin olarak basılmadığını ve orijinal telif hakkı devri formu ile birlikte Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü'ne gönderildiğini garanti ederiz.

Makalenin telif hakkından feragat etmeyi kabul ederek sorumluluğu üstlenir ve imza ederiz. Bu vesileyle makalenin telif hakkı Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü' ne devredilmiştir. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü makalenin yayınlanabilmesi konusunda yetkili kılınmıştır. Bununla birlikte yazarların aşağıdaki hakları saklıdır:

Aşağıdaki ve diğer bütün durumlarda makalenin Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi tarafından yayınlandığına dair referans verilmelidir.

1. Telif Hakkı dışında kalan patent v.b. bütün tescil edilmiş haklar.
2. Makaleyi satmamak koşulu ile kendi amaçları için çoğaltma hakkı.
3. Yazarın gelecekteki kitaplar ve dersler gibi çalışmalarında; makalenin tümü ya da bir bölümünü ücret ödemeksizin kullanma hakkı.

Bütün yazarlar tarafından imzalanması gerekiyor: (Sorumlu yazar/Corresponding author*)

Yazarın Adı ve Soyadı / Author Names	İmzası / Signature	Tarih / Date
1 ……		….
2 ……		
3 ……		
4 ……		
5 ……		

NOT: Eksik imza durumunda sorumluluk imzalayan yazarlara aittir. Lütfen formu doldurunuz, imzalayanız ve aşağıdaki adrese metinle birlikte gönderiniz.
Adres: Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Editörlüğü, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 23119-Elazığ.