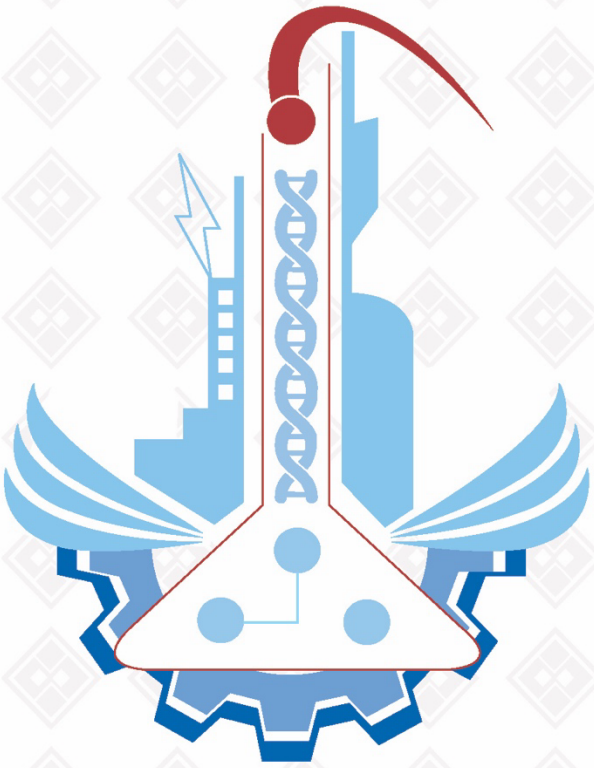
ISSN: 1308-9072

Cilt: 37 / Sayı: 1 / 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:1, 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)
37-1, 2025

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

1. **Metalurjik Cüruflardan Altın ve Gümüşün Endüstriyel Ölçekli Sallantılı Masalar ile Geri Kazanımı**
Recovery of Gold and Silver from Metallurgical Slags Using Industrial Scale Shaking Tables
Mohamed Saleh Mohamed Aıta, Hasan Hacıfazlıoğlu 1-14

2. **Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Elektrik Şebekesine Entegrasyonu: OYF, LHÖ ve YSA ile Karabük Üniversitesi Yerleşkesi Durum Çalışması**
Integration of Electric Vehicle Charging Stations into the Electricity Grid: Karabük University Campus Case Study Using PDF, LHS and ANN
Hüseyin Altınkaya 15-36

3. **Uydu Görüntüleri Kullanarak Makine Öğrenme Yöntemleri ile Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsünün Belirlenmesi**
Determination of Land Use and Land Cover by Machine Learning Methods Using Satellite Images
Sevim Yasemin Oturanç 37-48

4. **Development of Numerical Models to Predict the Compressive Strength of High Strength Concretes Based on Maturity Method**
Yüksek Dayanımlı Betonların Basınç Dayanımını Olgunluk Yöntemi Tabanlı Tahmin Eden Sayısal Modellerin Geliştirilmesi
Tuba Demir, Kürşat Esat Alyamaç 49-60

5. **Otizm Spektrum Bozukluğu Tanısında Öznitelik Seçimi Yoluyla Farklı Sınıflandırıcıların Karşılaştırılması**
Comparison of Different Classifiers Through Feature Selection in The Diagnosis of Autism Spectrum Disorder
Sinem Koç, Onur Sevli 61-74

6. **Aloe Vera Yüklü Kitosan/Fibroin Filmlerin Hazırlanması, Karakterizasyonu ve İlaç Salım Özelliklerinin Araştırılması**
Preparation, Characterization and Investigation of Drug Release Properties of Aloe Vera Loaded Chitosan/Fibroin Films
Pınar Demir, Hasan Yetik 75-82

7. **Creating a Clinical Psychology Dataset with Synthetic Data: Automatic Detection of Cognitive Distortions Classified with NLP**
Sentetik Verilerle Klinik Psikoloji Veri Seti Oluşturma: Bilişsel Çarpıtmaların NLP ile Sınıflandırılarak Otomatik Tespiti
Hakkı Halil Babacan, Ramazan Oğuz, Yahya Kemal Beyitoğlu 83-92

8. **Üçgenleme ile Konumlandırmanın Hassasiyetinin Hata Yayılma Kanunu ile Belirlenmesi**
Determination of Precision of Triangulation by Error Propagation Law
Nezir Doğan, Önder Halis Bettemir 93-110

9. **RPA ile Pazaryeri Siparişlerinde Otomatik Faturalandırma Süreci**
Automated Billing Process for Marketplace Orders with RPA
Hediye Bıyık, Erhan Akın 111-124

10. **Bulanık Çok Kriterli Yöntemlerin Karşılaştırılması: Mobilya İşletmelerinin Web Siteleri Örneği**
Comparison of Fuzzy Multi-Criteria Methods: Case of Furniture Firms Websites
Murat Yeşilkaya 125-150

11. **Comprehensive Performance Analysis and Evaluation of Various Maze Solving Algorithms for Optimized Autonomous Navigation and Pathfinding**
Çeşitli Labirent Çözme Algoritmalarının Optimum Otonom Navigasyon ve Yol Bulma için Kapsamlı Performans Analizi ve Değerlendirilmesi
Mustafa Emre Erbil, Merdan Özkahraman, Hilmi Cenk Bayrakçı 151-166

12. **Sinir Ağı Dil Modelleri ve Evrensel Cümle Kodlayıcı Kullanarak Havayolu Müşteri Yorumlarının Duygu Analizi**
Sentiment Analysis of Airline Customer Reviews Using Neural Network Language Models and Universal Sentence Encoder
Semih Osman Saka, Zafer Cömert 167-182

13. **Elazığ İli Örneğine Ait On-Grid Çatı Üstü Güneş Enerji Santralinin Yıllık Gerçek Üretim Verilerinin PV*SOL Simülasyon Değerleri ile Karşılaştırılması**
*Comparison of Annual Real Production Data of the On-Grid Rooftop Solar Power Plant in Elazığ Province Example with PV*SOL Simulation Values*
Osman Özdemir, Ertuğrul Çelik 183-198

14. **Hava Ön Isıtma ve Hava Hızının Havalı Güneş Kollektörünün Isıl Performansına Etkisi**
The Effect of Air Preheating and Air Velocity on Thermal Performance of Solar Air Collector
Nergiz Ülker, Hüsamettin Bulut 199-209

15. **Matematiksel Yöntemlerle Güçlendirilmiş Yeni Bir Yüksek Güvenlikli Metin Şifreleme Algoritmasının Tasarımı ve Uygulanması**
Design and Implementation of a New High Security Text Encryption Algorithm Strengthened by Mathematical Methods
Hüseyin Demir, Hünkar Acar 211-222

16. **Effect of Infill Density and Infill Pattern on Mechanical Properties of 3D-printed PLA Produced by FFF**
FFF Kullanılarak Üretilen 3D Baskılı PLA'nın Mekanik Özellikleri Üzerinde Dolgu Yoğunluğu ve Dolgu Deseninin Etkisi
Özlem Akçay, Ali Arı 223-232

17. **Ti6Al4V Alaşımının Delme ve Frezeleme Proseslerinde İşleme Parametrelerinin Talaş Formları, Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesici Takımların Aşınması Üzerine Etkileri**
Effects of Processing Parameters on Chip Forms, Surface Roughness and Wear of Cutting Tools in Drilling and Milling Processes of Ti6Al4V Alloy
Şakir Altınsoy, Nuray Beköz Üllen 233-249

18. **Efektif Kendiliğinden Yerleşen Hafif Beton Dayanımı Tahmini için Farklı Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Karşılıklı Değerlendirilmesi**
Mutual Evaluation of Different Machine Learning Algorithms for Effective Self-Compacting Lightweight Concrete Strength Prediction
Hakan Güler, Mustafa Ulaş, Merve Açıkgenç Ulaş 251-261

19. **Nohut Özütünden Platin Nano Parçacık Sentezinin Araştırılması**
Investigation of Platinum Nanoparticle Synthesis from Chickpea Extract
Umur Üstünoğlu, Selin Yetim, Yusuf Mert Sarı, Burcu Nilgün Çetiner 263-273

20. **Akademik Verilerin Neo4j Çizge Veritabanı ile Modellenmesi**
Modeling Academic Data with Neo4j Graph Database
Berna Çengiz, Faysal Elbeg, Mehmet Özdem, Resul Daş 275-291

21. **Evaluation of the Effects of Installation Faults in the Outdoor Unit of Air Conditioners Using Exergy Analysis**
Klima Dış Ünitelerindeki Montaj Hatalarının Etkilerinin Ekserji Analizi Kullanılarak Değerlendirilmesi
Ruveyda Ergen, Mert Gürtürk 293-301

22. **The Impact of Balancing Techniques and Feature Selection on Machine Learning Models for Diabetes Detection**
Dengeleme Tekniklerinin ve Özellik Seçiminin Diyabet Tespitinde Makine Öğrenmesi Modelleri Üzerindeki Etkisi
Vahid Sinap 303-320

23. **Alzheimer Hastalığının Manyetik Rezonans Görüntülerden Hibrit Derin Öğrenme Yaklaşımı ile Otomatik Tespiti**
Automatic Detection of Alzheimer's Disease from Magnetic Resonance Images Using a Hybrid Deep Learning Approach
Öznur Özaltın, Sezgi Çobanbaş, Yasemin Sırakaya, Yuşa Güneş 321-339

24. **Deep Analysis of Patella caerulea Calcined Shells for Microwave Applications**
Patella caerulea Kalsine Kabuklarının Mikrodalga Uygulamaları İçin Derinlemesine Analizi
Erkan Uğurlu, Muharrem Karaaslan, Fatih. Ö. Alkurt, K. E. Öksüz, Ö. Duysak .. 341-350

25. **Impact of Airfoil Type and Placement on Aerodynamic Performance of Blended Wing Body Aircraft**
Kanat Profili ve Yerleşiminin Gövde Kanat Harmanlı Uçakların Aerodinamik Performansına Etkisi
Seyhun Durmuş 351-361

26. **6306 Sayılı Kanun Kapsamında Sunulan Riskli Yapı Tespit Yöntemiyle Az Katlı Betonarme Binaların Değerlendirilmesi: Elazığ-Sivrice (2020) Depremi Sonrasında Hasar Görmüş Bina Örneği**
An Evaluation of Low-Rise Reinforced Concrete Buildings Using Detection of Risky Buildings Declaring Within The Scope of Law No: 6306. The Case of Damaged Building In Elazığ-Sivrice (2020)
Nurbanu Demirbaş, Ayşe Çelik, Fatma Oran 363-376

27. **Plentmiks Temel Tabakası Yapımında Krom Pasa Malzemesi Kullanımı ve Ekonomik Analizi**
Financial Analysis of the Use of Chrome Waste Material in the Construction of Plant mix Base Layer
Mehmet Tevfik Seferoğlu, Elif Nur Acı 377-386

28. **Stroke Classification in Brain Computed Tomography Images Using Vision Transformers and GAN-based Data Augmentation**
Beyin Bilgisayarlı Tomografi Görüntülerinde Görü Dönüştürücüler ve GAN Tabanlı Veri Artırma Kullanılarak İnme Sınıflandırması
Erdem Yelken, Murat Ceylan 387-400

29. **Hikâye Kitapları için Transformatör Tabanlı Bir Özetleme Modeli**
Transformer-Based Summarization Model for Story Books
Mehtap Ülker, Ahmet Bedri Özer 401-410

30. **Stereotaktik Girişimlerde Trajeksiyon Oluşturmak için Vasküler Risk Haritasının Otomatik Üretilmesi**
Automatic Generation of Vascular Risk Maps for Trajectory Planning in Stereotactic Interventions
Mustafa Şahin, Muhammed Fatih Talu, Sait Öztürk 411-421

31. **Electricity Consumption of Electric Vehicles in Türkiye and its Share in Total Electricity Consumption: 2030 Projection**
Türkiye'de Elektrikli Araçların Elektrik Tüketimi ve Toplam Elektrik Tüketiminde Payı: 2030 Projeksiyonu
Habip Şahin 423-432

32. **The Statistical Methods for Precipitation Prediction with Trend Analysis**
Trend Analizi ile Yağış Tahmini için İstatistiksel Yöntemler
Fatih Şevgin 433-441

33. **Bitümlü Sıcak Karışımların Lineer Olmayan Kırılma Analizi**
Non-linear Fracture Analysis of Hot Mix Asphalts
Ragip İnce, Buğrahan Fatih Furtana 443-452

34. **TÜİK Mikro Verileri ile Çocuk İşgücü Tahmini: Makine Öğrenimi Modellerinin Performans Analizleri**
Child Labor Forecasting with TurkStat Micro Data: Performance Analysis of Machine Learning Models
Kamil Abdullah Eşidir 453-466

35. **Turba Ortamında Titanyumun Korozyonunun Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi ile İncelenmesi**
Investigation of Corrosion of Titanium in Peat Environment by Electrochemical Impedance Spectroscopy
Ayhan Orhan, Nurettin Çek 467-474

36. **Üstyapı Sayısı Değişmeyen AASHTO-93 Kesitlerinin Mekanistik-Ampirik Yöntemler ile Yol Ömrü Analizi**
Road Life Analysis of AASHTO-93 Sections with Fixed Structural Number Using Mechanistic-Empirical Methods
Betül Köse, Murat Bostancıoğlu 475-486

37. **Medicinal Vascular Plants Traditionally Used for Treating Respiratory Ailments in Dereboğazı Village (Erzurum, Türkiye)**
Dereboğazı Köyünde (Erzurum, Türkiye) Solunum Rahatsızlıklarının Tedavisinde Geleneksel Olarak Kullanılan Damarlı Tıbbi Bitkiler
Arzu Ergül Bozkurt 487-508

38. **Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Performansını Artırmak için Metasezgisel Algoritma Tabanlı Öznitelik Seçimi**
Metaheuristic Algorithm Based Feature Selection for Improving the Performance of Machine Learning Algorithms
Sinan Balıbey, Feyza Altunbey Özbay, Erkan Tanyıldızı 509-522

39. **Comparative Analysis of GAN-based Segmentation Models on Dental Panoramic Radiography Dataset**
Dental Panoramik Radyografi Veri Setinde GAN Tabanlı Segmentasyon Modellerinin Karşılaştırmalı Analizi
Hakan Öcal, Gürdal Altundağ 523-532

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 1-14, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1429416

Metalurjik Cüruflardan Altın ve Gümüşün Endüstriyel Ölçekli Sallantılı Masalar ile Geri Kazanımı

Mohamed Saleh Mohamed AITA[1], Hasan HACIFAZLIOĞLU[2*]
[1,2] Maden Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye
[1] mohamedsaleh2306@gmail.com, [*2] hasanh@iuc.edu.tr

(Geliş/Received: 01/02/2024; Kabul/Accepted: 10/09/2024)

Öz: Bu çalışmada, metalurjik cüruf içerisinde kalan altın ve gümüşün çevre dostu bir yöntem olan gravite yöntemi ile geri kazanımı araştırılmıştır. Bu amaçla, endüstriyel ölçekli iki farklı gravite cihazı kullanılmıştır. Klasik sallantılı masa ile kaba zenginleştirme, Gemini masası ile konsantreye temizleme işlemi uygulanmıştır. Ayrıca, altın ve gümüşün optimum düzeyde geri kazanımı için klasik sallantılı masada çeşitli çalışma parametreleri optimize edilmiştir. En ideal koşullar; masa eğimi, masa hızı, besleme katı oranı ve yıkama suyu hızının uygun bir kombinasyonunu içermektedir. Deneyler, 7,80 ppm Au ve 131 ppm Ag içeren cüruf numunesi ile yapılmıştır. Cüruflar, bilyalı değirmende 150 µm tane boyutunun altına öğütülmüş ve ardından gravite cihazlarına beslenmiştir. Elde edilen nihai konsantrede Au tenörü 109,24 ppm, Ag tenörü ise 1692,71 ppm bulunmuştur. Nihai sonuçlara göre, cüruf içerisindeki altının %56,16'sı, gümüşün ise %51,82'si geri kazanılmıştır.

Anahtar kelimeler: Cüruf, Sallantılı masa, Altın, Gümüş.

Recovery of Gold and Silver from Metallurgical Slags Using Industrial Scale Shaking Tables

Abstract: In this study, the recovery of gold and silver remaining in the metallurgical slag using the gravity method, which is an environmentally friendly method, was investigated. For this purpose, two different industrial-scale gravity devices were used. Coarse enrichment was applied with the classic shaking table, and the concentrate was cleaned with the Gemini table. Additionally, various operating parameters have been optimized in the classic shaking table for optimum recovery of gold and silver. The most ideal conditions include an appropriate combination of table inclination, table speed, feed solids rate and wash water speed. Experiments were carried out with slag sample containing 7.80 ppm Au and 131 ppm Ag. The slags were ground to below 150 µm grain size in the ball mill and then fed into the gravity devices. In the final concentrate obtained, the Au grade was found to be 109.24 ppm and the Ag grade was 1692.71 ppm. According to the final results, 56.16% of the gold and 51.82% of the silver in the slag were recovered.

Key words: Slag, Shaking table, Gold, Silver.

1. Giriş

Son yüzyılda, altın ve gümüş üretimi, doğal cevherlerden, yani birincil kaynaklardan hızla artmıştır. Bu metaller, elektronik sektöründe önemli bir rol oynamakta olup, bu paslanmaz metallerin talebi her geçen gün artmaktadır. Ayrıca, altın fiyatlarının son dönemdeki dramatik yükselişleri altını daha da değerli hale getirmiştir. Bu bağlamda, özellikle elektronik ve kuyumculuk faaliyetlerinden kaynaklanan altın ve gümüş artıkları büyük bir inceleme konusu haline gelmiştir. Bununla birlikte, yüksek kaliteli altın ve gümüş madenlerinin azalması ve üretim maliyetlerinin artması gibi nedenler, insanları altın ve gümüşü ikincil kaynaklardan (hurda, cüruf vb. gibi) üretmeye yönlendirmiştir [1-4]. Dünya genelinde, altın ve gümüşün birincil kaynaklardan üretiminde yaygın olarak siyanürle liç yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, kullanılan siyanürün zehirli olması nedeniyle çevreciler tarafından büyük eleştirilerine maruz kalmaktadır. Ancak, çok ince boyutta serbestleşen ve düşük tenörlü cevherler için siyanürle liç işlemi kaçınılmaz bir gereklilik olarak kabul edilmektedir, çünkü bu durumda en etkili yöntem budur. Diğer yandan, yüksek tenörlü (> 5 ppm) ve büyük boyutta (> 38 µm) serbestleşen altın ve gümüş cevherleri için çevre dostu yöntemler (örneğin sallantılı masa, spiral, santrifüjlü cihazlar) uygulanabilmektedir. Burada temel seçim kriteri, serbestleşme tane boyutunun mümkün olduğunca büyük ve tenörün yüksek olmasıdır. Aksi takdirde, siyanürle liç işlemi en etkili yöntem olarak kabul edilmektedir. Siyanüre alternatif olarak bazı diğer kimyasallar bulunsa da (örneğin tiyoüre, tiyosülfat, iyot-iyodür, klor, amonyak vb.) bunların verimliliği henüz tam olarak kanıtlanmamış veya yüksek miktarlarda kullanılmaları çeşitli çevresel sorunlara yol açmaktadır [1,3,5].

Kuyumculuk sektöründe, takı tasarımları, kolye, bilezik, yüzük ve gerdanlık üreten atölyelerde önemli miktarda toz artığı altın ve gümüş oluşmaktadır. Ülkemizde takı üretiminde tonlarca altın ve gümüş kullanılmakta ve bunun %1 ila %5'i arasında toz artık olarak ortaya çıkmaktadır. Bu altın ve gümüş artıkları önce atölyenin

[*] Sorumlu yazar: hasanh@iuc.edu.tr Yazarların ORCID Numarası: [1]0009-0001-7706-3195, [2] 0000-0003-1651-7779

zemini süpürülerek toplanır ve daha sonra ramatçılara gönderilir. Ramatçılar, bu tozları önce yakar, sonra kimyasal işlemlerden geçirir ve son olarak eritme fırınında eriterek dore altın olarak dökmektedirler. Artıklardan elde edilen külçedeki altın içeriği %90'lara kadar ulaşabilir. Eritme fırınında alınan artık tozun içeriğine bağlı olarak, altının içinde gümüş, bakır, demir, platin ve paladyum gibi diğer metaller de bulunabilir. Bu metalleri ayrı olarak uzaklaştırmak için altın cevheri rafinasyona gönderilir. Rafinasyon, en verimli koşullar altında altın ve gümüşün %99,99'unu geri kazanabilen bir pirometalurjik işlemdir. Ancak yine de cürufta az miktarda altın ve gümüş kalabilmektedir. Cüruflar, ergitme sırasında flaks maddesi olarak kullanılan kurşun, soda ve boraks artıklarını da içerebilir [6,7]. Bu makaleye konu olan metalurjik cüruflar flaks maddeleriyle kuru karıştırma işleminden geçirilmiş ve düşük seviyelerde altın ve gümüş içeren cüruflardır. Ortalama tane boyutları 20 cm ile birkaç mm arasında değişmektedir. Bu cüruflar içerisindeki altın ve gümüş, yoğunluk farkına dayalı bir yöntem olan sallantılı masalar ile geri kazanılmaya çalışılmıştır. Bu cüruflar içerisindeki altın ve gümüş, yoğunluk farkına dayalı bir yöntem olan sallantılı masalar ile geri kazanılmaya çalışılmıştır. Bu yöntemde herhangi bir kimyasal kullanılmamış ve sadece su kullanılarak tamamen çevre dostu bir yöntemle ayrıştırma sağlanmıştır.

2. Altın ve Gümüş Zenginleştirme Yöntemleri

Altının yoğunluğu çok yüksek olup, 18 gr/cm³'dür. Benzer şekilde gümüş de yoğun bir element olup, yoğunluğu 10,49 gr/cm³'dür. Bu değerli metallerin yanında gang olarak bulunan mineraller (oksitler, silikatlar ve çeşitli sülfürlü mineraller) genellikle 1,5 ile 6,5 gr/cm³ yoğunluklarındadır. Dolayısıyla, özgül ağırlık farkıyla altın ve gümüşü gang minerallerimden ayırmak oldukça kolay bir yöntemdir. Bu amaç için cevher zenginleştirmede kullanılan başlıca makinalar; sallantılı masalar, spiraller, falkon ve knelson gravite konsantratörleridir. Jigler, daha çok iri (>500 μm) cevherlerin zenginleştirilmesinde kullanılan makinelerdir. Gravite yöntemlerinde mineraller arasındaki yoğunluk farkı önemlidir ancak altının fiziksel şekli de ayırmada büyük rol oynar. Özellikle küresel tanecikli altınlar daha kolay ayrıştırılır. Ancak, plaka şekilli altın yüksek yüzey alanına sahiptir ve küçük boyutlarda su ile sürüklenerek atık gibi davranabilir [1,4,8-16].

Flotasyon yönteminde ise hidrofob ve hidrofil mineraller yüzdürülerek birbirinden ayrıştırılır. Gang ve altın hidrofil yapıda olduğu için altının ya da gangın yüzdürülmesi reaktif maliyetleri açısından zordur. Bu bakımdan altın cevherine direk flotasyon (altını yüzdürme) ya da ters flotasyon (gangı yüzdürme) uygulamaları endüstriyel ölçekte yok denecek kadar azdır. Ancak sülfür bakımından zengin olan altın cevherleri için flotasyon uygulaması mevcuttur. Başka bir deyişle, sülfürlü minerale bağlı bulunan altın, sülfürlü mineralin yüzdürülmesiyle gangdan ayrıştırılır. Sülfürlü cevherler içerisinde altın bulunduğunda toplayıcı olarak genellikle ksantatlar (KEX, PEX vb.) ve ditiyosülfatlar kullanılır. Köpürtücü olarak ise krezelik asit, çam yağı ve bazı alkoller kullanılabilir. Genel olarak, flotasyonla zenginleştirmede Au kazanım verimi %80'lere kadar çıkabilir. Ayrıca altının aglomerasyonla zenginleştirildiği çalışmalar da mevcuttur [4,6,7,17,18].

Birincil ve ikincil kaynaklardan altın üretiminde en yaygın kullanılan yöntem siyanürlemedir. Altın ve gümüş siyanür ile çok kolay bir şekilde çözündürülebilir. Siyanürleme işlemi genellikle tanklar içerisinde çevreye zarar vermeyecek şekilde yapılır. Bu işleme "tank liçi" ya da "karıştırma liçi" denir. İnce öğütülen cevher bu tanklar içerisinde siyanür ile karıştırılır ve altın çözündürülerek gangdan ayrılır. Siyanür kullanım oranı ton başına cevherin işlenmesi için genellikle 1 kg civarındadır. Kullanılan siyanür NaCN formundadır. Son yıllarda, siyanüre alternatif içerisinde az miktarda siyanür bulunan "Jin Chan" adlı ürün yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu ürünün çevreci olduğu iddia edilmektedir [2,4,19-22].

3. 3. Son Yıllarda Yapılmış Olan Çalışmalar

Sevgül ve ark. tarafından yapılan araştırmada, oksitlenmiş altın cevheri Knelson konsantratörü ile zenginleştirilmiştir. Knelson konsantratörü çalışma parametreleri olan santrifüj kuvvet, besleme hızı, yıkama suyu ve katı içeriğinin ayrım performansı üzerindeki etkileri bir dizi deneyle araştırılmıştır. Deney çalışmalarının sonucunda, besleme hızı ve yıkama suyunun Au geri kazanımı ve kalitesi için en etkili parametreler olduğu belirlenmiştir. Au kalitesini önceliklendirmek suretiyle, optimal parametrelerin sırasıyla g kuvveti, besleme hızı, yıkama suyu ve katı oranı için 60 g, 250 rpm, 3 L/dk ve %40 olduğu belirlenmiştir. Bu koşullarda, %70,8 geri kazanımla 44,4 g/t Au tenöre sahip bir konsantre elde edilmiştir [23].

Bıyıklı tarafından yapılan araştırmada, altın madeni atıklarından altının kazanımı araştırılmıştır. İnce ve ultra ince öğütülen atıklar liç işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan çalışmada, atık tane boyutunun incelmesiyle birlikte artan yüzey alanına bağlı olarak belirgin bir liç verimi artışı gözlemlenmiştir. Ekonomik bir değerlendirme yapılmamış olup, çalışma, altın verimine olan etkiyi incelemiştir. Atık numunesinin temin edildiği dönemde, tesis beslemesinin ortalama 3,81 ppm Au içeriğine sahip olduğu ve yapılan testler sonucunda Au veriminin ortalama %87,1, atık Au içeriğinin ise ortalama 0,49 ppm olduğu belirtilmiştir. Atık numunesinin 6 μm'nin altına

öğütülmesinin ardından yapılan liç deneyleri sonucunda nihai atık tenörü 0,07 ppm'e düşmüştür. Böylelikle tesisin genel altın kazanımı toplamda %98,2'ye çıkarılmıştır [24].

Koizhanova ve ark. tarafından yapılan araştırmada, altının siyanür liçinde ön oksidasyonun etkisi araştırılmıştır. Ön oksidasyon işleminde trichloroisocyanuric acid ve sulfanol sürfaktan kullanılmıştır. Tüm deneyler hidrojen peroksit veya diğer reaktif oksijen bileşikleri kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. Doğrudan siyanürleme ile -10 µm boyutundaki numuneden %77,12 Au verimine ulaşılmıştır. ''Sulfanol'' kullanıldığında altının %83,71'i (oksijensiz olarak) kazanılırken, doğrudan siyanürlemeye göre %6,59'luk bir artış görülmüştür. Trichloroisocyanuric asit (oksijensiz ortamda) ile ön işlem doğrudan siyanürlemeye göre %8,49'luk bir artışla %85,61 altın kazanımı gerçekleşmiştir [25].

Erkan tarafından yapılan araştırmada, gravite ve flaş flotasyonun birlikte kullanımının altın kazanımına etkisi araştırılmıştır. Flaş flotasyonun gravite işlemine göre altın kazanımında %7 daha yüksek performans gösterdiği saptanmıştır. Ancak gravite ile zenginleştirmede elde edilen konsantrenin tenörü daha yüksek bulunmuştur. Bu nedenle, cevherin karakterine bağlı olarak altın kazanımı için bu proseslerden biri veya birden fazlasının seçilmesi gerektiğine kanaat getirilmiştir [26].

Sabah ve ark. tarafından yapılan araştırmada, kuyumcu ramatından altını geri kazanmak için gravite yöntemleri ile zenginleştirme yapılmıştır. Gravite ile zenginleştirme işlemlerde Knelson konsantratörü kullanılmıştır. Au tenörü 7 ppm olan soda-boraks esaslı ramatın bileşiminde yüksek oranda Fe_2O_3 (%13,25) ve PbO (%11,38) olduğu, boyuta göre yapılan sınıflandırma sonucu altının -500 +212 µm fraksiyonunda yoğunlaştığı görülmüştür. 7 ppm Au tenörüne sahip ramattan en uygun şartlarda %72,40 verimle 16 ppm Au içeren bir konsantre (artığın Au tenörü: 3 ppm) elde edilmiştir. Altının fraksiyonel bazda en yüksek dağılım gösterdiği -212 µm boyutunda besleme ile çalışıldığında, ağır metallerin Au tenörü kayda değer bir artış göstererek yaklaşık 30 ppm'e ulaşmıştır. Verim ise oldukça düşük olup %40 seviyelerinde kalmıştır [27].

Ulucan ve ark. tarafından yapılan araştırmada, kuyumcu atölyelerinde yapılan işlemler sonucunda ortaya çıkan, yüksek miktarda Au ve Ag içeriklerine sahip zemin süpürme artıklarından altın ve gümüşün geri kazanılması için gravite yöntemleri kullanılmıştır. Ayrıca bu artıkların içerisinde bulunan değerli metalleri ısıl işlemler ile geri kazanırken açığa çıkan ve cüruf içerisinde kalan Au ve Ag'yi geri kazanma amacıyla santrifüjlü ayırıcı cihazı kullanılmıştır. Yüksek metal içeriğine sahip olan zemin süpürme artıkları ile sallantılı masa, MGS ve Knelson konsantratörü kullanılarak yapılan zenginleştirme işlemleri sonucunda, ağırlıkça %24,20 oranında bir ağır ürün 638 ppm Au ve 6227 ppm Ag içerikleri ile kazanılmış, metal kazanma verimleri ise sırasıyla %84,40 ve %82,20 bulunmuştur. Cüruf içerisinde ince boyutlarda hapsolmuş altın ve gümüşün kazanılması amacıyla numune ilk olarak 100 µm'nin altına öğütülmüş ve daha sonra Knelson cihazı ile zenginleştirilmiştir. Ağırlıkça %13,80 oranında bir ağır ürün, 30 ppm Au ve 52 ppm Ag içerikleri ile kazanılmıştır. Metal kazanma verimleri sırasıyla Au ve Ag için sırasıyla %64,60 ve %44,40 olarak bulunmuştur [28].

Burat ve ark. tarafından yapılan araştırmada, flotasyon ve ardından uygulanan liç yöntemi ile mücevher atölyelerindeki zemin süpürme artıklarından altın ve gümüşün geri kazanımı hedeflenmiştir. Flotasyon yönteminin artık fraksiyonunun büyük bir kısmını azaltmada çok başarılı olduğunu görülmüştür. 174 g/t Au ve 1834 g/t Ag içeren bir beslemede yaklaşık %87 Au ve %82 Ag kazanımı ile 280 g/t'den fazla Au ve 2800 g/t'den fazla Ag içeren bir flotasyon konsantresi elde edilmiştir. Altın ve gümüşün çözünme davranışlarını araştırmak için siyanür liçi testleri doğrudan besleme ve köpük üzerinde gerçekleştirilmiştir. 40°C'de ve 1/5 katı/sıvı oranında, 12 g/L NaCN ilavesinde 48 saatlik liçten sonra doğrudan besleme ile elde edilen %68 Au ve %75 Ag, flotasyon ürünü aynı koşullar altında liçi tabi tutulduğunda ise %79 Au ve %84 Ag kazanımı elde edilmiştir [6].

Burat ve ark. tarafından yapılan araştırmada, kuyumculuk artıklarından (zemin süpürme, parlatmada kullanılan tüm zımpara türler vb.) Au ve Ag'nin geri kazanımı hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, sallantılı masa, MGS, Knelson ve Falcon gibi gravite cihazlarının yanında flotasyon yönteminden de faydalanılmıştır. Gravite yöntemleri ile 183 g/t Au ve 1835 g/t Ag içeren bir numuneden 701 g/t Au ve 6017 g/t Ag içeren bir konsantre elde edilmiştir. Santrifujlu gravite ayırıcısı ile Ag tenörü 848 g/t'den 7812 g/t'a yükseltilmiştir. Gravite ve santrifujlü ayırıcılardan gelen ara üründeki Au ve Ag fraksiyonları başarılı bir şekilde flotasyon ile geri kazanılmış ve her iki metal için toplamda yaklaşık %92'lik bir geri kazanım verimi elde edilmiştir [29].

Aydın ve ark. tarafından yapılan araştırmada, kuyumcu cüruflarından liç ile altın ve gümüşün geri kazanımı için optimum koşullar araştırılmıştır. Cüruf 28,30 ppm Au ve 42,00 ppm Ag içermekte ve ayrıca yüksek miktarlarda Ca ve Na içermektedir. İncelenen parametreler liç süresi, siyanür konsantrasyonu, partikül boyutu ve katı oranıdır. Optimum koşullarda Au ve Ag geri kazanımları sırasıyla %87,80 ve %81,50 olarak bulunmuştur. Optimum koşullar; %10 katı oranı, 4 gr/L NaCN, -53 µm tane boyutu, 24 saat siyanürleme süresi ve atmosferik ortamda 450 rpm karıştırma hızıdır [30].

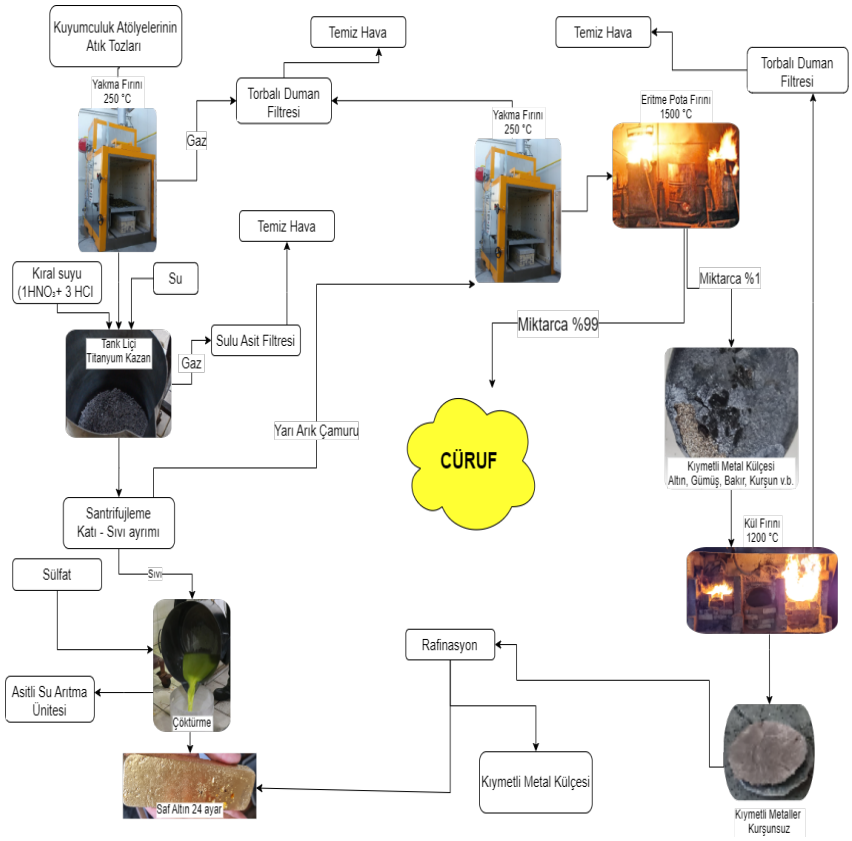
Aydın ve ark. tarafından yapılan araştırmada, birincil ve ikincil kaynaklardan altın ve gümüş kazanımı için flotasyon ve liç yöntemlerini araştırmıştır. Cürufunun flotasyonu ile ilgili çalışmalar sonucunda, -74 µm tane boyutunda, kaba devrede 600+600 ppm miktarında Aerophine 3418 A+Aerofloat 242 kullanımı ile malzemenin doğal pH'sı olan 10,8'de ve 4 kademeli temizleme devresi sonucunda %89 verim ile 614,60 ppm altın içeren ağır

metaller elde edilmiştir. Liç deneylerinde ise %10 pülpte katı oranı, 450 devir/dk karıştırma hızında, -53 µm tane boyutunda, 4 gr/L NaCN konsantrasyonunda ve 24 saat liç süresinde %87,80 altın çözünme verimleri elde edilmiştir [31].

4. Materyal ve Metot

4.1. Deneyde kullanılan cürufun oluşumu ve yapısı

Deneysel çalışmalarda kullanılan cüruf numunesi, İstanbul İkitelli OSB'de faaliyet gösteren bir ramat firmasından tedarik edilmiştir. Tesiste cüruf oluşumu Şekil 1'de şematik olarak özetlenmiştir. Şekil 1'e göre, kuyumcu atıkları; yakma fırını, kral suyu işlemi ve ergitme fırınlarından geçerek oluşmaktadır. Cürufların tane boyutu 20 cm'ye kadar çıkabilmektedir. Ancak içinde birkaç milimetrelik parçalar da bulunabilmektedir. Yani, tane boyutlarının dağılımı homojen değildir ve farklı boyutlardadır. Tesis stoğundan konileme-dörtleme yöntemi ile alınan cüruf numunesi, kırma, öğütme ve eleme işlemlerinden geçirilerek homojen hale getirilmiş ve konileme-dörtleme yöntemi ile tekrar azaltılmıştır. Ardından, TS EN 15309:2008 standardına göre X-ışını floresans spektrometresi (XRF) ve Perkin Elmer tarafından üretilen İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometresi (ICP) cihazında kimyasal analize tabi tutulmuştur. Bu cihazlardan elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, cürufun içindeki altın miktarı 7,80 ppm, gümüş miktarı ise 131 ppm olarak saptanmıştır. Cüruflar, ergitme esnasında kullanılan flaks yapıcılar nedeniyle ağırlıklı olarak oksit ve silikatlardan oluşmaktadır.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan cürufun ramatta oluşumunun şematik gösterimi.

Tablo 1. Deneylerde Kullanılan Cürufun kimyasal analiz sonuçları.

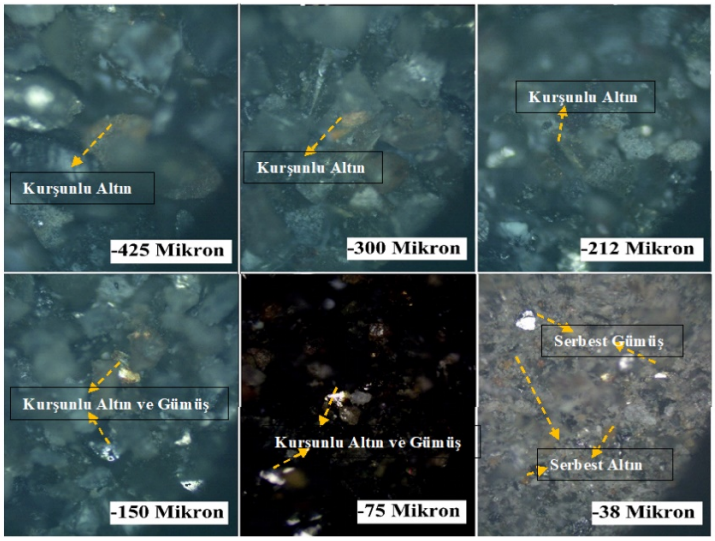
Element	İçerik (ppm)	Bileşik	İçerik %
Au	7,80	SiO_2	28,85
Ag	131,00	PbO	21,41
As	135,50	Fe_2O_3	15,25
Bi	509,00	Na_2O	11,90
Zn	77,00	CaO	9,93
Co	39,80	Al_2O_3	5,03
Cu	179,00	CuO	3,78
Se	53,00	MgO	0,92
Si	39,00	TiO_2	0,69
-	-	SO_3	0,56
-	-	K_2O	0,34
-	-	Diğer	1,34

4.2. Serbestleşme boyutunun belirlenmesi

Cevher hazırlamada serbestleşme tane boyutunun belirlenmesi için başlıca 2 yöntem vardır. Bunlardan birincisi cevherin belirli boyutlara öğütülmesi ve seçilmiş olan bir zenginleştirme cihazında zenginleştirilmesidir. Hangi boyut grubunda en yüksek verim elde edilirse, o boyut grubu serbestleşme boyutu olarak kabul edilir. Diğer yöntem ise mikroskop altında tane sayımı yöntemidir. Bu yöntemde, değerli mineral, değersiz mineral ve bağlı taneler tek tek sayılarak serbestleşme derecesi yüzde olarak hesaplanır. Bu çalışmada her iki yöntemden de kısmen faydalanılmıştır. Endüstriyel ölçekli sallantılı masaların, altın kazanımı için etkin çalışma tane boyutları genellikle -500+38 µm aralığındadır. Daha ince boyutlarda, verimlilik önemli ölçüde azalır. Bu nedenle, cüruf numunesi -425+0 µm, -300+0 µm, -212+0 µm, -150+0 µm ve -75+0 µm boyutlarında öğütülerek ayrı ayrı ön deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucunda Tablo 2'de verilen sonuçlara ulaşılmıştır. Tablo 2'ye göre, kaba sallantılı masa deneyleri, en yüksek altın (Au) ve gümüş (Ag) kazanım verimini -150+0 µm tane boyutunda elde etmiştir. Bu boyut aralığında elde edilen altın kazanım verimi %48,90, gümüş kazanım verimi ise %56,80'dir. Bu nedenle, cüruf numunesinin sallantılı masa zenginleştirmesi için serbestleşme boyutunun 150 µm tane boyutunun altında olduğu söylenebilir. Ayrıca, öğütülmüş cüruf numunesinin mikroskop altındaki görüntüleri incelendiğinde, özellikle 150 µm'nin altındaki boyutlarda altın ve gümüş içeren parlak metalik parçacıkların bulunduğu görülmüştür (Şekil 2). Ancak, bu tanelerin sayısı toplam tane sayısının %5'ini bile geçmemektedir. Yani, altın ve gümüş içeren taneler çoğunlukla cüruf içerisinde görünmez bir halde bulunur ve tane sayımı sağlıklı sonuçlar vermez. Sadece nadiren görünen birkaç metalik parça mikroskop altında gözlemlenmiştir, ancak büyük çoğunluğu camsı homojen malzemeden oluşmaktadır. Dolayısıyla, cürufun 38 µm tane boyutunun daha da altında serbestleştiği tahmin edilmektedir. Ancak daha küçük boyutlarda sallantılı masa kullanmak mümkün olmadığı için, -150 µm tane boyutunun en uygun serbestleşme boyutu olduğu kabul edilmiş ve çalışmalara bu boyutta devam edilmiştir.

Tablo 2. Sallantılı masa ile ön zenginleştirme deney sonuçları.

Tane boyutu (µm)	Konsantre Miktarı (%)	Konsantre Au İçeriği (ppm)	Konsantre Ag İçeriği (ppm)	Au Kazanım Verimi (%)	Ag Kazanım Verimi (%)
-425 +300	7,55	26,04	610,89	25,20	35,20
-300 +212	9,21	32,35	571,76	38,20	40,20
-212 +150	8,60	50,34	765,48	55,50	50,25
-150 +75	4,29	125,20	1733,45	68,90	56,80
-75+0	3,92	55,00	1097,04	47,70	56,65
Besleme	100	7,80	131,00	-	-



Şekil 2. Farklı boyutlardaki cüruf numunelerinin mikroskop altındaki görüntüleri.

4.3. Deneylerde izlenen yöntem

Deneylerde 2x4 m boyutlarında endüstriyel ölçekli Çin yapımı dikdörtgen şekilli sallantılı masa kullanılmıştır. Bu masanın eşiklerinin yüksekliği 3 mm, eşikler arası mesafe ise 6 mm'dir. Optimum Au ve Ag kazanımının sağlanabilmesi için aşağıda verilen çalışma parametreleri ile sallantılı masada bir dizi deneyler yürütülmüştür. İncelenen sallantılı masa parametreleri:

- Masa eğimi (0,50, 2,00, 4,00, 7,00 derece).
- Masa hızı (200, 240, 280, 320, 360 dev./dk).
- Katı oranı (%15, %25, %35, %45).
- Yıkama suyu miktarı (10, 20, 30, 40 lt/dk).

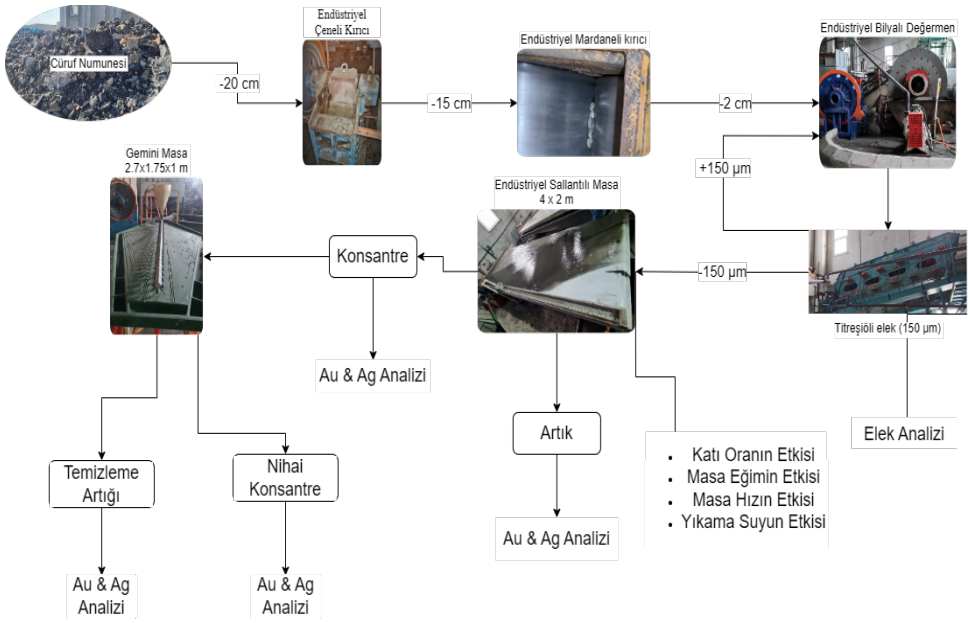
Yukarıdaki parametreler optimize edildikten sonra, elde edilen konsantre temizlenmek üzere 0,75 kW ile 1,1 kW arasında değişen güçlere sahip Gemini masasına verilmiştir. Gemini masası, 2,70x1,75x1,00 m ölçülerindedir ve saatlik zenginleştirme kapasitesi 0,120 tondur. Gemini masası, altın ayrışmasında daha hassas olduğu için temizleme aşamasında tercih edilmiştir. Gemini masası kullanılarak Au ve Ag kazanımını artırmak için 4 farklı temizleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde kullanılan parametreler aşağıdaki gibidir:

- Masa eğimi: 3 derece
- Masa hızı: 300 devir/dk
- Besleme katı oranı: %20
- Yıkama suyu miktarları: 16 lt/dk

Şekil 3'te deneylerde izlenen yöntemin akım şeması verilmiştir. Şekil 3'e göre, cüruf numunesi önce geleneksel endüstriyel ölçekli sallantılı masalarda zenginleştirilmekte ve ardından temizleme işlemi için Gemini masasına verilmekte ve bu işlemlerin sonucunda nihai konsantre elde edilmektedir. Au ve Ag kazanım verimleri Denklem 1 ile hesaplanmıştır.

Bu eşitlikte; V: Zenginleştirme verimi (%), B: Besleme miktarı (%), b: Besleme tenörü (ppm), K: Konsantre miktarı (%), k: Konsantre tenörü (ppm)'dür.

$$V = [(K \times k)/(B \times b)] \times 100 \quad (1)$$



Şekil 3. Deneylerde izlenen yöntemin özet akım şeması.

5. Bulgular ve Tartışma

5.1. Masa eğiminin verim üzerine etkisi

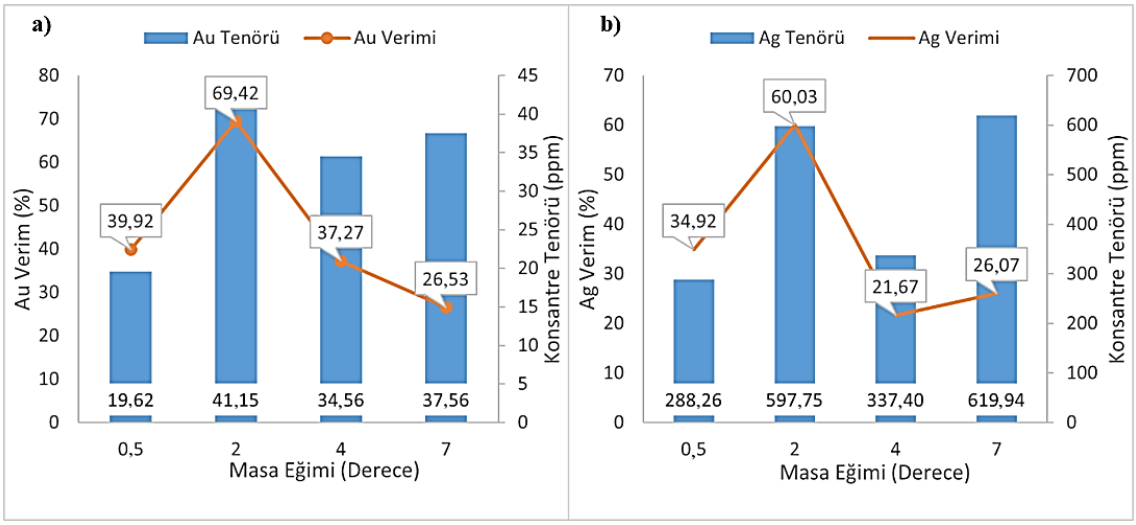
Sallantılı masalardaki eğim, cüruftan Au ve Ag'nin geri kazanımda önemli bir etkiye sahiptir ve zenginleştirmesinde önemli bir faktör olduğu bilinmektedir. Test edilen eğimler 0,50, 2,00, 4,00 ve 7,00 derecedir. Bu deneylerde, besleme tane boyutu -150 µm, besleme hızı 1 t/h, masa hızı 320 devir/dk, katı oranı %25 ve yıkama suyu miktarı 30 lt/dk olarak sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Tablo 3'te ve grafiksel olarak Şekil 4a ve 4b'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, genel olarak eğim arttıkça Au ve Ag kazanım miktarlarının da arttığı görülmektedir. Ancak 2 derecelik eğimden sonraki denemelerde verim düşmüştür. Bu yüzden optimum eğim 2 derece olarak belirlenmiştir.

5.2. Masa hızının verim üzerine etkisi

Masa hızı ayırma verimini etkileyen önemli bir parametredir. Bu bağlamda; 200, 240, 280, 320 ve 360 devir/dk masa hızlarında ayrı ayrı deneyler yürütülmüştür. Bu deneylerde, besleme tane boyutu -150 µm, besleme hızı 1 t/h, eğim 2 derece, katı oranı %25 ve yıkama suyu miktarı 30 lt/dk'dır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4 ve grafiksel olarak Şekil 5a ve 5b'de gösterilmiştir. Masa hızı 320 devir/dk'dan sonra verimde düşmeler meydana gelmiştir.

Tablo 3. Masa eğimi etkisinin incelendiği deneylerin sonuçları.

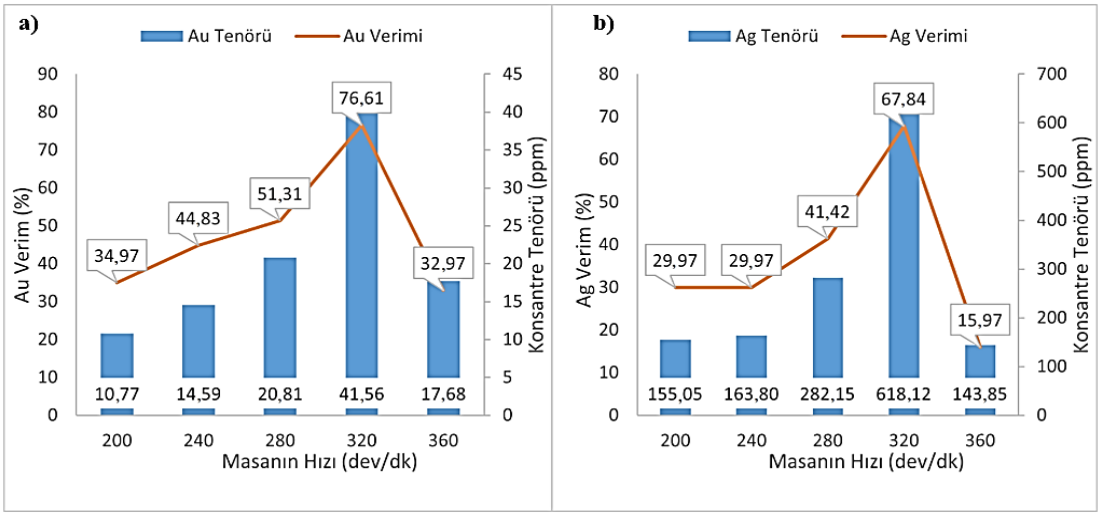
Masa Eğimi (°)	Ürünler	Miktar (%)	Au İçerik (ppm)	Ag İçerik (ppm)	Au Kazanma Verimi (%)	Ag Kazanma Verimi (%)
0,50	Konsantre	15,87	19,62	288,26	39,92	34,92
	Artık	84,13	5,57	101,34	60,08	65,08
2,00	Konsantre	13,16	41,15	597,75	69,42	60,03
	Artık	86,84	3,47	66,32	38,58	43,97
4,00	Konsantre	8,41	34,56	337,40	37,27	21,67
	Artık	91,59	5,34	112,04	62,73	78,33
7,00	Konsantre	5,51	37,56	619,94	26,53	26,07
	Artık	94,49	6,06	102,49	73,47	73,93
	Besleme	100,00	7,80	131,00	100,00	100,00



Şekil 4. Masa eğimine bağlı olarak a) Au, b) Ag verimi ve tenörünün değişimi.

Tablo 4. Masa hızının etkisinin incelendiği deneylerin sonuçları.

Masa Hızı (devir/dk)	Ürünler	Miktar (%)	Au İçerik (ppm)	Ag İçerik (ppm)	Au Kazanma Verimi (%)	Ag Kazanma Verimi (%)
200	Konsantre	25,32	10,77	155,05	34,97	29,97
	Artık	74,68	6,79	122,85	65,03	70,03
240	Konsantre	23,97	14,59	163,80	44,83	29,97
	Artık	76,03	5,66	120,66	55,17	70,03
280	Konsantre	19,23	20,81	282,15	51,31	41,42
	Artık	80,77	4,70	95,01	48,69	58,58
320	Konsantre	14,38	41,56	618,12	76,61	67,84
	Artık	84,62	2,16	55,98	23,39	36,16
360	Konsantre	14,54	17,68	143,85	32,97	15,97
	Artık	85,46	6,12	128,81	67,03	84,03
	Besleme	100,00	7,80	131,00	100,00	100,00



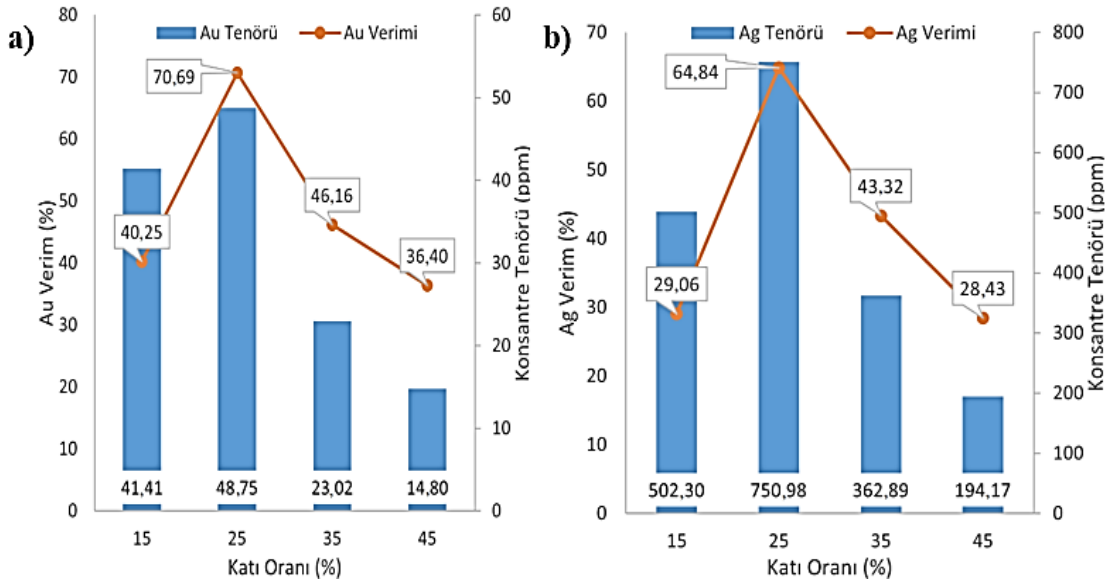
Şekil 5. Masa hızına bağlı olarak a) Au, b) Ag verimi ve tenörünün değişimi.

5.3. Katı oranın verim üzerine etkisi

Yoğunluğa dayalı zenginleştirme yöntemlerinde, suyun dengesini sağlayan en önemli faktörlerden biri de katı oranıdır. Besleme haznesinde hazırlanan katı oranı; %15, %25, %35 ve %45 olacak şekilde deneyler yürütülmüştür. Bu deneylerde; besleme tane boyutu -150+0 µm, besleme hızı 1 t/h, eğim 2 derece, masa hızı 320 devir/dk ve yıkama suyu miktarı 30 lt/dk'dır. Elde edilen sonuçlar grafiksel olarak Tablo 5 ve grafiksel olarak Şekil 6a ve 6b'de verilmiştir. %25 katı oranı en yüksek verim ve tenör elde edildiği için seçilmiştir.

Tablo 5. Katı oranının etkisinin incelendiği deneylerin sonuçları.

Katı Oranı (%)	Ürünler	Miktar (%)	Au İçerik (ppm)	Ag İçerik (ppm)	Au Kazanma Verimi (%)	Ag Kazanma Verimi (%)
15	Konsantre	7,58	41,41	502,30	40,25	29,06
	Artık	90,42	5,15	102,77	59,75	70,94
25	Konsantre	11,31	48,75	750,98	70,69	64,84
	Artık	88,69	2,58	51,94	29,31	35,16
35	Konsantre	15,64	23,02	362,89	46,16	43,32
	Artık	84,36	4,98	88,02	53,84	56,68
45	Konsantre	19,18	14,80	194,17	36,40	28,43
	Artık	80,82	6,14	116,00	63,60	71,57
	Besleme	100,00	7,80	131,00	100,00	100,00



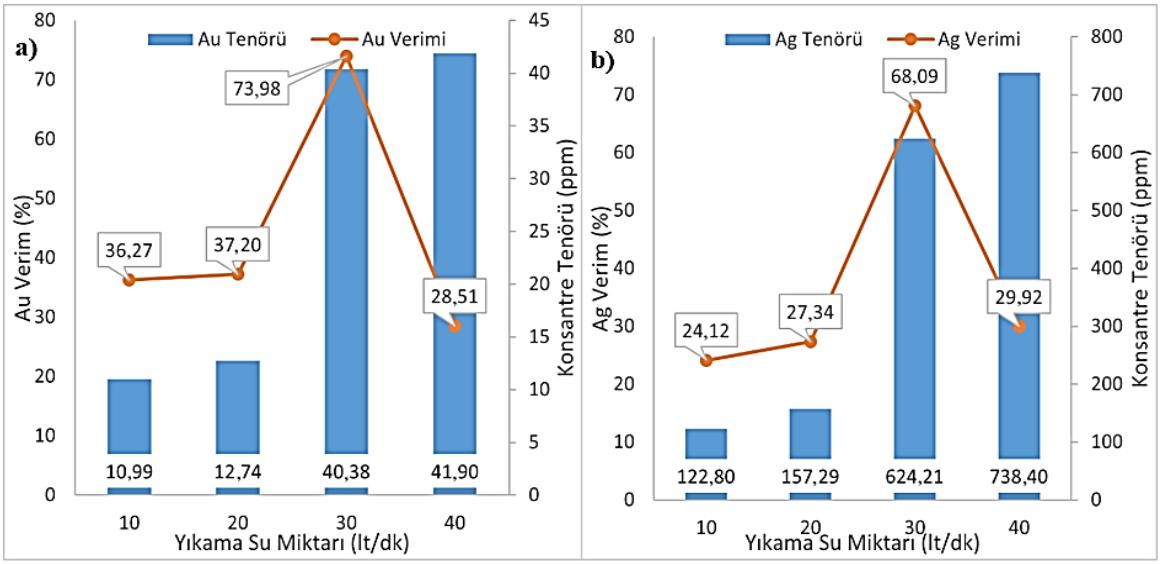
Şekil 6. Katı oranına bağlı olarak a) Au, b) Ag verimi ve tenörünün değişimi.

5.3. Yıkama suyunun verim üzerine etkisi

Sallantılı masalardaki bir diğer önemli parametre yıkama suyu miktarıdır. Eğer yıkama suyu gereğinden fazla kullanılırsa, yüksek yoğunluklu kıymetli metaller düşük yoğunluklu artığa doğru kayabilir ve bu kayıplara neden olabilir. Diğer yandan, yetersiz yıkama suyu kullanıldığında, yüksek yoğunluklu kıymetli mineraller düşük yoğunluklu minerallerle karışabilir ve konsantre bölgesinden uzaklaştırılması zorlaşabilir ve bu da konsantrenin tenörünün düşük olmasına yol açar. Deneylerde test edilen yıkama suyu miktarları10, 20, 30 ve 40 L/dk.'dır. Diğer parametreler; besleme tane boyutu -150+0 µm, besleme hızı 1 t/h, masa eğimi 2 derece, masanın hızı 320 devir/dk ve katı oranı %25'tir. Elde edilen sonuçlar Tablo 6 ve Şekil 7a ve 7b'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Su miktarı arttıkça konsantre Au tenöründe artış olmuştur. 30 L/dk en uygun yıkama suyu miktarı olarak belirlenmiştir.

Tablo 6. Yıkama suyu etkisinin incelendiği deneylerin sonuçları.

Yıkama Suyu Miktarı (L/dk)	Ürünler	Miktar (%)	Au İçerik (ppm)	Ag İçerik (ppm)	Au Kazanma Verimi (%)	Ag Kazanma Verimi (%)
10	Konsantre	25,73	10,99	122,80	36,27	24,12
	Artık	74,27	6,69	133,84	63,73	75,88
20	Konsantre	22,77	12,74	157,29	37,20	27,34
	Artık	77,23	6,34	123,25	62,80	72,66
30	Konsantre	14,29	40,38	624,21	73,98	68,09
	Artık	85,71	2,37	48,77	26,02	31,91
40	Konsantre	5,31	41,90	738,40	28,51	29,92
	Artık	94,69	5,89	96,95	71,49	70,08
	Besleme	100	7,80	131,00	100,00	100,00



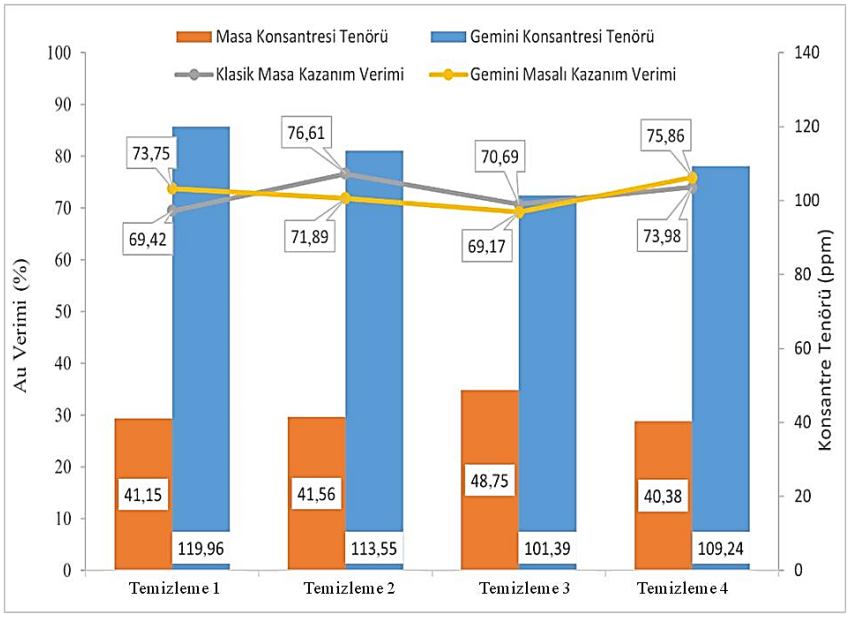
Şekil 7. Yıkama suyu miktarına bağlı olarak a) Au, b) Ag verimi ve tenörünün değişimi.

5.4. Gemini masası temizleme deney sonuçları

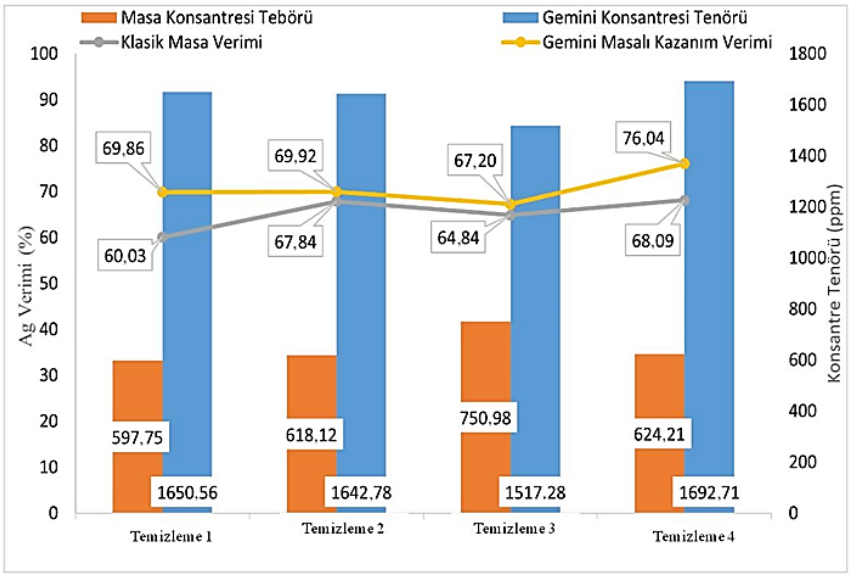
Gemini masası, kompakt bir yapıya sahiptir ve daha hassas bir ayrım yapabilme yeteneğine sahiptir. Genellikle literatür çalışmalarında temizleme aşamalarında kullanılmıştır ve etkin bir şekilde 45 mikrona kadar ayrım yapabildiği belirtilmiştir. Bu nedenle, klasik sallantılı masalardan elde edilen konsantrelerin kalitesini **(tenörünü)** artırmak amacıyla gemini masasına beslenmiş ve tekrar zenginleştirilmiştir. Gemini masası, 2,70x1,75x1,00 m ölçülerinde ve 0,120 ton kapasitelidir. Deneyler; masa eğimi 3 derece, masa hızı 300 devir/dk, besleme katı oranı %20 ve yıkama suyu hızı 16 L/dk olacak şekilde yapılmıştır. Gemini masasına beslenen klasik sallantılı masa ürünlerinin altın tenörleri sırasıyla; 41,15 ppm, 41,56 ppm, 48,75 ppm ve 40,38 ppm ve gümüş tenörleri ise sırasıyla; 597,75 ppm, 618,12 ppm, 750,98 ppm ve 624,21 ppm olarak bulunmuştur. Deney sonuçları Tablo 7'de sunulup, grafiklerle Au için Şekil 8 ve Ag için Şekil 9'da gösterilmiştir. Genel olarak, Gemini masası konsantredeki altın ve gümüşün tenörünü arttırmaktadır. Ancak, genel bir kazanım verim değeri hesaplandığında, Gemini masasından sonra bir miktar azalma gözlemlenmiştir, bu azalma %17 ile %22 arasındadır. Bu durumu daha iyi anlamak için, Au için Şekil 8 ve Ag için Şekil 9'daki lineer grafikler incelenebilir.

Tablo 7. Gemini masası ile temizleme deney sonuçları.

	Ürünler	Miktar (%)	Au İçerik (ppm)	Ag İçerik (ppm)	Au Kazanma Verimi (%)	Ag Kazanma Verimi (%)
Temizleme Deneyi 1	Konsantre	25,30	119,96	1650,56	73,75	69,86
	Artık	74,70	14,46	241,18	26,25	30,14
	Besleme	100,00	41,15	597,75	100,00	100,00
Temizleme Deneyi 2	Konsantre	26,31	113,55	1642,78	71,89	69,92
	Artık	73,69	15,85	252,28	28,11	30,08
	Besleme	100,00	41,56	618,12	100,00	100,00
Temizleme Deneyi 3	Konsantre	33,26	101,39	1517,28	69,17	67,20
	Artık	66,74	22,52	369,10	30,83	32,80
	Besleme	100,00	48,75	750,98	100,00	100,00
Temizleme Deneyi 4	Konsantre	28,04	109,24	1692,71	75,86	76,04
	Artık	71,96	13,55	207,86	24,14	23,96
	Besleme	100,00	40,38	624,21	100,00	100,00



Şekil 8. Gemini masası ile temizleme sonucunda Au verimi ve tenörü.



Şekil 9. Gemini masası ile temizleme sonucunda Ag verimi ve tenörü.

6. Tartışma ve Sonuç

Cürufların ilk halinin eriyik olduğu göz önünde bulundurulduğunda, tüm elementler birbiri içerisinde ergimiş ve yayılmış bir formda bulunur. Bu nedenle altın ve gümüşün tamamen serbest olduğu belli bir tane boyutu aralığı yoktur. Ayrıca bu metaller çok ince boyutlarda (<20 mikron) dahi diğer elementlere (flaks yapıcı maddelere) bağlı olarak bulunabilirler. Dolayısıyla, yeterince serbestleşmemiş tanelerin gravite yöntemiyle verimli bir şekilde zenginleştirilmesi oldukça zordur. Bu çalışmada, metalurjik cüruflar gravite yöntemi ile zenginleştirilmiş ve endüstriyel ölçekli masaların performansı ortaya konmuştur.

Klasik sallantılı masada eğim, masa hızı, katı oranı ve yıkama suyu miktarı gibi faktörler incelenmiştir. En uygun masa eğimi 2 derece olarak belirlenmiş ve yüksek eğimin verim üzerinde olumsuz etkisi olduğu görülmüştür. Masa hızı arttıkça, ağırlıkça kazanım azalırken, konsantrelerdeki altın ve gümüş içeriği artmıştır. Optimum masa hızı 320 devir/dk olarak bulunmuştur. Katı oranının artması ağırlıkça kazanımı artırmış ancak altın ve gümüş içeriği azalmıştır. Optimum katı oranı %25 olarak belirlenmiştir. Yıkama suyu miktarının artması ağırlıkça kazanımı azaltırken, altın ve gümüş içeriğini arttırmıştır. Optimum yıkama suyu miktarı 30 lt/dk olarak belirlenmiştir. Optimum koşullarda, cüruf numunesinin altın içeriği, klasik sallantılı masa ile 7,80 ppm seviyesinden 40,38 ppm seviyesine çıkarılmıştır. Benzer şekilde, konsantredeki gümüş içeriği de artmış ve 131 ppm seviyesinden 624,21 ppm seviyesine yükselmiştir. Ancak, bu konsantreler hala metalurjik fırına beslenip, ekonomik altın üretimi için, yeterince yüksek tenörde değillerdir. Bu nedenle, klasik sallantılı masalardan gelen cüruf konsantreleri, daha hassas bir ayrım yapabilen Gemini masasına beslenmiştir. Gemini masasında klasik masanının konsantresi temizlenmiş ve nihai sonuçlar Tablo 8'de verilmiştir. Tablo 8'de verilen nihai sonuçlara göre, konsantrede Au tenörü 109,24 ppm, Ag tenörü ise 1692,71 ppm bulunmuştur. Ayrıca, 2 kademeli zenginleştirme işlemi sonucunda 13,55 ppm Au ve 207,86 ppm Ag içeren bir ara ürün elde edilmiştir. Nihai konsantredeki altın kazanım oranı %56,16, Ag kazanım oranı ise %51,82 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar ışığında, sallantılı masaların cüruflardan altın ve gümüşün yüksek verimlilikle kazanımında tek başına yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır. Ancak, sallantılı masalar ile zenginleştirme çevre dostudur ve diğer yöntemlere (liç ve flotasyon) göre çok daha ekonomiktir. Bu bakımdan, cüruflardan değerli metallerin geri kazanımı amacıyla ön zenginleştirici olarak kullanılabilir. Sallantılı masalarla cüruftaki gangın önemli miktarı uzaklaştırılarak, akabinde uygulanacak olan liç ve flotasyon prosesleri rahatlatılabilir. Bu yolla hem işletim maliyetleri düşer hem de kimyasal tüketimi (siyanür ya da kral suyu) azaltılmış olur.

Tablo 8. Klasik sallantılı masa ve akabinde Gemini masası ile temizleme nihai verim sonuçları.

Ürünler	Miktar (%)	Au İçerik (ppm)	Ag İçerik (ppm)	Au Kazanma Verimi (%)	Ag Kazanma Verimi (%)
Nihai Konsantre	4,01	109,24	1692,71	56,16	51,82
Ara Ürün (Gemini Masanın Artığı)	10,28	13,55	207,86	17,80	16,29
Artık	85,71	2,37	48,77	26,04	31,89
Besleme	100	7,8	131	100	100

Teşekkür

Yazarlar, test ve analiz çalışmalarının yürütülmesinde kolaylık sağlayan İstanbul'daki Mısırlı Ramat firmasına ve İstanbul Üniversitesi Kimya Bölümünden Prof. Dr. Musa Şahin'e teşekkürü bir borç bilirler. Ayrıca, makalenin değerlendirilmesi aşamasında katkıda bulunan hakemlere çok teşekkür ederler.

Kaynaklar

[1] Şahin E. Ramat işleme ve geri kazanım tesisleri için atık yönetimi uygulamalarının değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Su Bilimleri Anabilim Dalı, 2021.
[2] Qin H, Guo X, Tian Q, Zhang L. Pyrite enhanced chlorination roasting and Its efficacy In gold and silver recovery from gold tailing. Sep Purif Technol, 2020; 250.
[3] Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Madencilik Politikaları, On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023), 2018.
[4] Ünal İH, Tuncel S, Yoleri B, Arslan M. Türkiye ve Dünyada Altın, Mta Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Dairesi Başkanlığı, 2016; Erişme adresi: Altin.pdf (mta.gov.tr)
[5] Syed S. Recovery of gold from secondary sources – a review. Hydrometallurgy. 2012; 115-116: 30-51.
[6] Burat F, Demirağ A, Demirağ M C. Recovery of noble metals from foor sweeping jewelry waste by fotation-cyanide leaching. Mater Cycles Waste Manag, 2020; 22: 907–915.
[7] Durmaz C. Kuyumculuk kökenli curuflardan fiziksel zenginleştirme yöntemleri ile altın geri kazanımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 2012.
[8] Yıldız N. Altın Madenciliği. 2022, https://www.researchgate.net/publication/284186106_Altin_Madenciligi.
[9] Al Sultan MSA. Development of a new centrifugal separator. Yüksek Lisans Tezi, Istanbul Technical University Department of Mineral Processing Engineering, 2021.
[10] Osmanlı O. Knelson santrifüj ayırıcısı ile kop (Erzurum) kromit cevherinin zenginleştirilmesinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2019.
[11] Tanrıverdi M, Uygun C. Cevher Zenginleştirmede son yıllarda geliştirilmiş gravite yöntemleri. Aydın'da Madencilik: Potansiyeli ve Değerlendirilmesi. TMMOB. 2019; 120 – 122.
[12] İzerdem D. Yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarında tane boyunun etkisinin incelenmesi. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2018.
[13] Yamantaş A Y, Can N M. Yer çekimi ile zenginleştirme yöntemleri kullanılarak Cu-Au cevherinden altın kazanımı çalışmaları. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni. Yerbilimleri. 2018; 39 (1): 65-77.
[14] Korkmaz AA. Zenginleştirme yöntemlerinin değişik linyitlerin piroliz ürün verimleri üzerine etkisi. Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2017.
[15] Güçbilmez D. Spiral zenginleştiricilerde tane boyunun performansa etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2013.
[16] Önel Ö. Altın cevherinin zenginleştirilmesinde kullanılan yoğunluğa dayalı zenginleştirme yöntemleri ve örnek bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Anabilim Dalı, 2011.
[17] Liu R, Qin W, Jiao F, Wang X, Gong M, Yang Y, Pei B, Lai C. Enhanced flotation of refractory gold ore by using sulfur-oil agglomeration with (NH4)2S2O3 as regulator in weak acidic pulp. Miner Eng, 2016; 93: 24-31.
[18] Agorhom E, Skinner W, Zanin M. Influence of gold mineralogy on its flotation recovery inaporphyry copper–gold ore. Chem Eng Sci, 2013; 99: 127-138.
[19] Li H, Yin S, Li S, Zhang L, Peng J, Yang K. Investigation on the recovery of gold from pretreated cyanide tailings using chlorination leaching process. Shep Sci Technol, 2019; 56 (1): 45-43.
[20] Fu P, Li Z, Feng J, Bian Z. Recovery of gold and ıron from cyanide tailings with a combined direct reduction roasting and leaching process. Metals. 2018.
[21] Çelik H, Mordoğan H, İpekoğlu Ü. Siyanürlü altın üretim tesisi atıklarını arıtma yöntemleri. Madencilik. 1997; 1.

[22] Yılmaz H. Jin chan ve sodyum siyanür kimyasallarının altın kazanımında liç verimlerinin karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, AKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2022.
[23] Sevgül S, Oluklulu S, Bozkurt V. Concentration of an oxidized gold ore by the knelson concentrator. 17'h Imps-2022; 15-17 December 2022 Istanbul-Türkiye.
[24] Bıyıklı B. İnce öğütmenin karıştırmalı tank liçi atığından altın geri kazanımı üzerindeki etkilerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2022.
[25] Koizhanova AK, Berkinbayeva A N, Magomedov D R, Azlan M N, Atanova O V, Kamalov E M, Erdenova M B. Study of the technology for gold recovery from gravity flotation concentrate from ore beneficiation with the use of oxidizing reagents. J Inst Eng Indıa: D, 2022; 103(2):663–672.
[26] Erkan E, Altın kazanımında flaş flotasyon ve gravite ile zenginleştirme proseslerinin performanslarının karşılaştırılması. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2022.
[27] Sabah E, Oruç Şapçı F. Ramat geri kazanım prosesinde açığa çıkan curuflardan gravite ayırması ile altın kazanımı. Politeknik Dergisi. 2021.
[28] Ulucan T, Özer M, Baştürkcü H, Burat F. Kuyumculuk kökenli artıklardan altın ve gümüşün geri kazanımı. Bilimsel Madencilik Dergisi. 2021; 60(1): 51-61.
[29] Burat F, Baştürkcü H, Özer M. Gold&Silver recovery from jewelry waste with combination of physical and physicochemical methods. Waste Management. 2019; 89: 10–20.
[30] Aydın B, Gül A. Recycling of gold and silver by leaching from jewellery slags. 15th International Mineral Processing Symposium. Istanbul-Turkey, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı, 2016.
[31] Aydın ŞB. Birincil ve ikincil kaynaklardan farklı yöntemlerle altın ve gümüş kazanımı. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı, 2015.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 15-36, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1462820

Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Elektrik Şebekesine Entegrasyonu: OYF, LHÖ ve YSA ile Karabük Üniversitesi Yerleşkesi Durum Çalışması

Hüseyin ALTINKAYA[1*]
[1] Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye
[*1] haltinkaya@karabuk.edu.tr

(Geliş/Received: 03/04/2024; Kabul/Accepted: 31/10/2024)

Öz: Elektrikli araçların (EA) toplam araç sayısındaki oranı ülkemizde ve dünyada giderek yükselen bir ivmeyle artmaktadır. Elektrikli araçların ve şarj istasyonlarının elektrik şebekelerine olan etkileri, şebekelere ne kadar ilave yük getireceği ve mevcut elektrik şebekelerinin alt yapılarının elektrikli araçlar ve şarj istasyonları için kısa, orta ve uzun vadede yeterli olup olmadığı ile yapılan çalışmalar bu bağlamda önem kazanmaktadır. Bu çalışmada Karabük Üniversitesi Demir Çelik (merkez) yerleşkesinde 2025, 2030 ve 2040 yılları için üç farklı durum çalışması gerçekleştirilmiştir. Karabük Üniversitesi Demir Çelik kampüsü elektrik dağıtım şebekesi için TOGG (Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu) marka elektrikli araç parametreleri esas alınarak vaka çalışmaları yapılmıştır. Elektrikli araç şarj istasyonlarının (EAŞİ), şebekeye ne kadar ilave yük ekleyeceğini tahmin etmek için Weibull dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu (OYF), latin hiperküp örnekleme (LHÖ) yaklaşımları ve yapay sinir ağı (YSA) kullanılmıştır. ETAP Electrical Power System Analysis arayüzü kullanılarak elde edilen sonuçların benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Kampüs içindeki şebekeye 2025, 2030 ve 2040 senaryolarına göre kaç adet ve hangi tür elektrikli araç şarj istasyonunun bağlanabileceği ve bu istasyonların sayısının artmasının mevcut şebekeye ne kadar ek yük getireceği ve ilave yatırımlara gerek olup olmadığı öngörülmüştür.

Anahtar kelimeler: Elektrikli araçlar, şarj istasyonları, elektrik şebekeleri, OYF, YSA.

Integration of Electric Vehicle Charging Stations into the Electricity Grid: Karabük University Campus Case Study Using PDF, LHS and ANN

Abstract: The proportion of electric vehicles (EVs) within the total number of vehicles is increasing at an accelerating pace both in our country and globally. In this context, studies on the impacts of electric vehicles and charging stations on electrical grids, how much additional load they will place on the grids, and whether the existing electrical infrastructure will be sufficient for electric vehicles and charging stations in the short, medium, and long term are gaining importance. In this study, three different case studies were conducted at Karabük University Demir Çelik (central) Campus for the years 2025, 2030 and 2040. Case studies based on TOGG (Turkey's Automobile Venture Group) brand electric vehicle parameters for Karabük University Demir Çelik campus electricity distribution network were examined. In order to estimate how much additional load electric vehicle charging stations (EVCS) will add to the grid, the Weibull distribution probability density function (PDF), latin hypercube sampling (LHS) approaches, and artificial neural networks (ANN) were used. The simulations of the obtained results were carried out using the ETAP Electrical Power System Analysis interface. It has been preicted that how many and what type of electric vehicle charging stations could be connected to the network within the campus according to 2025, 2030 and 2040 scenarios, and how much additional load the increase in the number of these stations will load the existing grid and whether additional investments are required.

Key words: Electric vehicles, charging stations, electrical grids, PDF, ANN.

1. Giriş

Elektrikli araçlar (EA), esas olarak karbon yoğun yakıtlara bağımlı olan ulaştırma sektörünün sera gazlarını ve diğer kirletici emisyonlarını azaltmak için bir fırsat olarak görülmektedir. Fakat elektrik enerjisinin depolanmasının güçlüğü sebebiyle elektrikli araç teknolojisi akaryakıtlı araç teknolojisinin gerisinde kalmıştır. Ancak batarya ve güç elektroniği alanındaki gelişmeler sayesinde piyasada görülen elektrikli araç sayısı özellikle son beş yılda hızla artmaya başlamıştır.

Ülkemizde ve dünyada birçok hükümet tarafından elektrikli araç kullanımı teşvik edilmektedir. Dünyanın bazı ülkeleri orta vadede içten yanmalı motorlu araçların satışını veya kullanımını yasaklamayı bile planlamaktadır. Örneğin Norveç'te 2025'e kadar, Almanya, İngiltere ve Hollanda'da 2030'a kadar, Fransa'da

[*] Sorumlu yazar: haltinkaya@karabuk.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0003-1956-1695

2040 yılına kadar. Ayrıca batarya maliyetlerinin önümüzdeki yıllarda azalması öngörülmektedir. Bu nedenle, elektrikli araçların ulaşım sektöründeki payının önümüzdeki birkaç yıl içinde ciddi oranlarda artması beklenmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı, 2030 yılına kadar Avrupa'daki tüm araç satışlarının yarısının EA olabileceğini öngörmektedir. Yine Uluslararası Enerji Ajansının hazırladığı bir rapora göre dünya çapında EA sayısının 2030'da 230 milyon adete yükselme ihtimalinin olduğu belirtilmiştir. [1,2]. Kuruluşun değerlendirmesinde EA sayısının 145 milyona yükselmesi durumunda günlük petrol talebinde iki milyon varil azalma olacağı tahmin edilmektedir.
TEHAD'ın (Türkiye Elektrikli ve Hibrid Araçlar Derneği) verilerine göre Türkiyede'ki EA satış sayısı 2021 yılında 2849, 2022 yılında 8210, 2023 yılında ise 65604 olarak gerçekleşmiştir [3].

EA satış sayısında 2023 yılındaki çarpıcı artışın TOGG marka elektrikli aracın piyasa girmiş olmasının önemli bir etkisi olmuştur. EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu) verilerine göre 2023 yılı sonunda Türkiye'de elektrikli araç kullanıcılarına 8492 yavaş şarj istasyonu (AC) ve 3575 hızlı şarj istasyonu (DC) hizmet vermektedir. 2030 yılında Türkiye'de EA sayısının 2,5 milyona, şarj istasyonu sayısının ise 1 milyona ulaşması beklenmektedir [4].

Elektrikli araçların bataryalarını şarj amacıyla kullanılan şarj istasyonlarının sayısının artmasının neden olacağı enerji talebi nedeniyle elektrik dağıtım şirketlerinin altyapıları etkilenecektir. Bu nedenle elektrikli taşıtların ve şarj sistemlerinin şebekeye entegrasyonu büyük önem taşımaktadır. Çünkü elektrik şebekelerinin gereken güç talebini karşılaması ve şebekede bulunan elektrik kalitesini etkilememesi gerekmektedir. Bu nedenle ulusal elektrik şebekesinin yüksek gerilim (YG), orta gerilim (OG) ve alçak gerilim (AG) kısımlarındaki 10-20 yıllık planlamalarının bu yeni duruma göre güncellenmesi ve gerekli ise ilave yatırımların yapılması gerekmektedir.

EA'ların elektrik şebekelerine olan etkileri ve şebekeye entegrasyonu ile ilgili literatüdeki çalışmalardan bazıları şu şekilde özetlenebilir: Elektrikli araçların elektrik şebekeleri üzerindeki ek yükleme etkisini azaltmak için, elektrikli araçların minimum yükleme saatlerinde şarj edilmesini teşvik etmek gibi akıllı mekanizmaların düşünüldüğü değerlendirilmektedir. Bu amaçla, Türkiye'deki bir dizi pilot dağıtım şebekesi için elektrikli araçlar üzerindeki etkisi simüle edilmiştir [5]. Türkiye'de bir dağıtım sistemi işletmecisi tarafından işletilen ve EA şarj istasyonu kurulması planlanan park alanları için DIgSILENT PowerFactory V15.1 programında detaylı analizler yapılmıştır [6]. Elektrikli araç sayısının giderek artması nedeniyle, şarj istasyonunun maksimum kayıp ve voltaj dengesizliği olmadan optimize edilmiş şekilde konuşlandırılması gerekmektedir. Optimum şarj istasyonu dağıtımı için üzerinde çalışılan mevcut stratejilerin çoğu, daha yüksek güç kullanımı, güç kaybı, harmonik bozulma ve voltaj dengesizliği ile sonuçlanır. Bu nedenle yeni bir güvercin tabanlı özyinelemeli derin ağın (DbRDN) uygulanması planlanmıştır. Ayrıca geliştirilen sistemin verimliliği hem dengeli hem de dengesiz koşullarda değerlendirilmiş ve sonuçlar güç kaybı, harmonik bozulma, gerilim dengesizliği, hata ve doğruluk açısından hesaplanmıştır [7]. EA şarj talebinin mekansal-zamansal dağılımlarını tahmin etmek, şarj altyapısı düzenini optimize etmek ve akıllı şarj planlama şemalarını uygulamak zorunludur. Uygun EA davranış modellemesi bu hedeflerin gerçekleştirilmesinde temel bir rol oynar. EA davranış modellemesi ve EA-şebeke entegrasyon algoritması geliştirmedeki uygulamaları hakkında kapsamlı bir inceleme sunulmuştur [8]. Dağıtım şebekesi mimarileri, şebeke bağlantı altyapıları ve standartları ile tipik uygulamaların kapsamlı bir incelemesi, EA-şebeke entegrasyonu ve V2G işletimi perspektifinden gerçekleştirilmiştir. Aktif dağıtım şebekelerinin kritik bileşenleri olan nano şebeke, mikro şebeke ve küme mimarilerinin tümü müzakere edilmiştir [9]. Bir araştırmada, yük akışını incelemek ve Ruanda'nın güç sisteminin EA şarj yükü kapasitesini belirlemek için IPSA+ Power arayüzünde simülasyonlar yapılmıştır [10]. Çok terminalli bir DC-bağlantı düzenlemesine dayalı, ancak geleneksel olanlarla aynı güç elektroniği cihazlarını kullanan yeni bir elektrikli araç hızlı şarj istasyonu topolojisi önermektedir. Önerilen topoloji gerçek bir AG dağıtım sisteminin ana özelliklerini taklit eden, küçültülmüş bir sistem üzerinde deneysel olarak doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen çözümün, şarj etkisinin en aza indirilmesi ve mevcut varlıkların kullanımının maksimuma çıkarılması nedeniyle bir e-mobilite sağlayıcı olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir [11]. Elektrikli araç şarj istasyonlarının optimum performansına ulaşmayı amaçlayan tipik koordineli kontrol teknikleri ve enerji yönetimi stratejileri ayrıntılı olarak incelenmiştir [12]. Elektrikli araçların iletim şebekelerine entegrasyonu ile ilgili 2040 yılında Avrupa'da üretim yeterliliği üzerine bir örnek olay çalışması yapılmıştır [13]. Birçok elektrikli aracın aynı anda veya öngörülemeyen zaman dilimlerinde şarj edilmesi, elektrik arz ve talebinde büyük farklılıklara neden olabilir. Şarj istasyonları bu farklılıklar dikkate alınmadan kurulduğunda, yüksek hızlarda şarj olan araçlar voltaj dengesizliğine ve güç kayıplarına neden olarak enerji ağını olumsuz etkileyebilir. Şebekeye olası olumsuz etkileri nedeniyle hem şebekede alınacak önlemlerin hem de yatırım kararlarının ve hızlı şarj istasyonlarının doğru yerde konumlandırılması büyük önem taşır. Yapılan bir çalışmada elektrikli araç şarj sistemleri üzerine son on yılda öne çıkan çalışmalar ve bu sistemlerin enerji şebekesine etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir [14]. Elektrikli araç şarj istasyonunun örnek bir tesisata entegrasyonu durumunda gerçekleşebilecek elektrik tesisatının revizyon ihtiyaçları Simaris arayüzünde simülasyon sonuçlarıyla birlikte incelenmiştir [15]. Şarj istasyonlarının konumlandırılması ile ilgili kapsamlı bir

çalışma yapılmıştır [16]. DC hızlı şarj ünitelerinin şebeke altyapsına etkileri incelenmiştir [17]. Ayrık kontrolör sentezi kullanılarak, elektrikli araçların şarj edilmesiyle elektrik şebekesinin aşırı yüklenmesini önlemek için bir modelleme çerçevesi önerilmiştir [18]. EA şarj istasyonlarının elektrik şebekelerine etkisini gözlemlemek ve ortaya çıkabilecek sorunlara çözüm önerileri sunmak amacıyla bir yıllık süre esas alınarak MATLAB ortamında bir modelleme yapılmış ve Sancaktepe'deki (Sancaktepe, İstanbul) şebeke bölgesi modellenmiştir. Modellemeye uygun olarak şebeke ve transformatörün farklı koşullardaki davranışları gözlemlenmiştir [19]. Elektrikli araçların evlerde, alışveriş merkezlerinde ve şarj istasyonlarında aynı anda şarj edilmesinin şebeke üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Digsilent Powerfactory yazılımı kullanılarak Kırıkkale ilindeki hat durumu ve trafo kapasiteleri araştırılmıştır [20]. Konut bölgelerinde gerçek verilere dayalı olarak EAŞİ'ların elektrik şebekesine entegrasyonunun analizi yapılmıştır [21]. Sivas ili özelinde elektrikli araç şarj istasyonlarının elektrik şebekelerine etkisinin değerlendirilmesi için bir çalışma gerçekleştirilmiştir [22]. Monte Carlo metodu kullanılarak elektrikli araçların yük tahminleri yapılmıştır [23-25]. Elektrikli araç şarj istasyonlarının dağıtım şebekelerinin güvenilirlik indislerine olan etkileri olasılık yoğunluk fonksiyonu (OYF) ve latin hiperküp rnekleme (LHÖ) yöntemi gibi olasılıksal modelleme yöntemlerinden faydalanılarak tahmin edilmiştir [26]. Latin hiperküp örneklemesinin performansını iyileştirmek için teknikler önerilmiştir [27]. Konut tipi elektrikli araç şarj profilindeki olasılık yoğunluk fonksiyonu tahmin yaklaşımının ilkeleri sunularak uçtan uca derin öğrenme yapısı tasarlanmış ve çekirdek yoğunluk tahmini (ÇYT) ile entegre edilmiştir [28].

Bu çalışmada Karabük Üniversitesi Demir-Çelik kampüsü AG dağıtım şebekesine bağlanacak elektrikli araç şarj istasyonlarının geleceğe dönük farklı senaryolar için mevcut trafolara ne kadar ek yük getireceği ve trafoların hangi oranlarda yükleneceği olasılıksal yoğunluk fonksiyonu (OYF), latin hiperküp örnekleme (LHÖ) ve yapay sinir ağı (YSA) kullanılarak tahmin edilmiştir. Literatürde bir il veya bölge için yapılan benzer çalışmalar olsa da spesifik olarak bir üniversite kampüsü için yapılan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Olasılıksal tahmin yöntemleriyle birlikte yapay sinir ağının kullanılması bu makalenin öne çıkan yönü olarak sayılabilir. Makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2'de elektrikli araç şarj istasyonları tipleri hakkında özet bilgiler verilmiştir. Bölüm 3'te elektrik şebekesinin OG ve AG tarafının örnek tek hat şemaları ve mevcut trafoların güçleri ve besledikleri bölgeler ayrıntılı şekilde gösterilmiştir. Bölüm 4'te kullanılan yöntem açıklanmış, farklı senaryolara göre 2025, 2030 ve 2040 yılları için trafoların nominal yüklerinin ne kadar artabileceği ve şarj istasyonlarının elektrik dağıtım şebekesine ne kadar ek yük getireceği gerçek verilere dayalı olarak tahmin edilmiştir. Son olarak bölüm 5'te sonuç ve öneriler verilmiştir.

2. EA Şarj İstasyonları

Bu bölümde elektrik şarj istasyonları için kullanılan terminoloji ve şarj istasyonları tipleri hakkında ayrıntıya girilmeden bu makalenin konusuna uygun olarak temel bilgiler verilecektir.

Elektrikli araçların bataryaları, evlerde bulunan şarj ekipmanları veya şarj istasyonları aracılığıyla düzenli olarak şarj edilmelidir. Elektrikli araçların şarj işlemi için farklı sınıf şarj üniteleri ve tipleri kullanılabilir. Temel olarak, şarj ekipmanları arasındaki farklılıklar, araca aktarılan besleme akımı değerleri ve şarj için kullanılan besleme gerilimi tipleri (AC veya DC besleme kaynakları) ile belirlenir. Elektrikli araç şarj işlemleri genellikle üç farklı akım ve voltaj seviyesinde gerçekleştirilir: AC Seviye 1, AC Seviye 2 ve DC Seviye. Farklı kıta, bölge ve ülkelerde kabul edilen standartlarda benzerlikler olduğu gibi bazı farklılıklar da bulunmaktadır. Bu çalışmada TOGG elektrikli araçlar ve şarj üniteleri üzerinde durulduğu için bu şarj ünitelerinin özellikleri sunulacaktır.

2.1. AC Seviye 1 Şarj Ekipmanı

Seviye 1 şarj üniteleri genellikle araçlarla birlikte sağlanan temel şarj ekipmanlarıdır. Bu üniteler, düşük güç aktarım kapasitesine sahip oldukları için genellikle yavaş şarj olarak bilinirler.

2.2. AC Seviye 2 Şarj İstasyonu

Seviye 2 elektrikli araç şarj istasyonları, daha hızlı şarj ihtiyaçlarını karşılamak için tasarlanmış ve yüksek güç aktarım kapasitelerine sahip istasyonlardır.

2.3. DC Seviye 3 Şarj İstasyonu

Elektrikli araçların şarj edilmesinde kullanılan en gelişmiş yöntemdir. Seviye 3 şarj istasyonları, DC ile şarj edilebilen araçlar için hizmet verirken, AC ile şarj edilen araçlar için uygun değildir.

2.4. TOGG-GERSAN Şarj İstasyonları

Dünya genelinde elektrikli otomobillerle ilgili çalışmalar devam ederken, Türkiye'de yerli otomobil geliştirilmiştir. TOGG'un çalışmaları sonucunda, 5 farklı modelde yerli elektrikli otomobil üretilecektir. Bu modeller sırasıyla C-SUV, C-Sedan, C-Hatchback, B-SUV ve C-MPV olacaktır.

TOGG'un belirttiğine göre, yerli otomobil, EuroNCAP'in standartlarını tam olarak karşılayacak güvenlik özelliklerine sahip olacaktır. Ayrıca, otomobil sürekli olarak internete bağlı olacak, ileri seviye otonom sürüşe imkân verecek, hızlı şarj olabilecek, sıfır emisyonla çevreyi koruyacak ve küresel pazara hitap edecek ileri teknolojik özelliklere sahip olacaktır. TOGG, araçlar için iki farklı motor seçeneği sunmaktadır. Birinci seçenekte 200 beygir gücünde bir motor bulunurken, ikinci seçenekte 400 beygir gücünde iki motor bulunmaktadır. Her iki model de Türkiye'de bulunan fosil yakıtlı muadillerinden daha hızlı olacaktır. Yerli otomobilin maksimum hızı güvenlik nedeniyle 180 km/s ile sınırlı olacaktır. TOGG otomobilin bataryası da iki farklı seçenek sunmaktadır. Birinci seçenekte tek şarjla 300 kilometre gidilebilirken, ikinci seçenekte menzil 500 kilometreye kadar çıkabilmektedir. Ayrıca, araç içerisindeki rejeneratif frenleme teknolojisi sayesinde frenleme sırasında enerji geri kazanılabilir. TOGG otomobilin bataryasının %80'i şarj olması için 30 dakikadan az bir süre yeterlidir [29].

2.4.1. Normal tip (ödeme sistemsiz) AC şarj istasyonu

Normal tip AC şarj istasyonları, tek fazlı 16 A (3,7 kW) seviyesinden üç fazlı 63 A (44 kW) seviyesine kadar şarj akımlarına sahiptir. Şarj süreleri araç kapasitesine göre değişmektedir. İstasyonlar, tüm araçlara uyumlu standart özellik ve korumaları içerir. Opsiyonel olarak, aynı anda 4 aracı şarj edebilen 4 priz bulunabilir.

2.4.2. Smart tip AC şarj istasyonu

Zeki tip (ödeme sistemli) Akıllı Tip AC Şarj İstasyonu (Ödeme Sistemli) Akıllı tip AC şarj istasyonları, tek fazlı 16 A (3,7 kW) seviyesinden üç fazlı 63 A (44 kW) seviyesine kadar şarj akımlarına sahiptir. Bu istasyonlar, enerji ölçümü, RFID kart okuyucu, dokunmatik ekran gibi özellikler içerir. Opsiyonel olarak, aynı anda 4 aracı şarj edebilen 4 priz bulunabilir. İstasyon, IEC 62196 standartlarında 1 adet Mod-3 Tip-2 şarj prizine sahiptir.

2.4.3. DC tip şarj istasyonu

DC (hızlı) şarj istasyonları, 15 kW seviyesinden 350 kW ve daha fazlasına kadar şarj gücüne sahiptir. Araç kapasitesine göre değişen sürelerde şarj edebilirler. İstasyonlar, CCS / Chademo standartlarına uygun fiş ve prizlere sahiptir. Opsiyonel olarak, aynı anda AC veya DC şarj edebilen fişler bulunabilir. Üniteler, IEC standartlarına ve CE belgelerine uygun olarak tasarlanmıştır. Tablo 1'de tabloda şarj istasyonlarının standart değerleri (faz sayısı, akım, güç değerleri) verilmiştir [30].

Tablo 1. Şarj istasyonları standart değerleri.

Faz Sayısı	Akım (A)	Güç (kW)
1	16	3,7
1	32	7,4
3	16	11
3	32	22
3	63	44
DC	-	25-50

3. Demir Çelik Kampüsü Elektrik Şebekesi

Karabük Üniversitesi Demir Çelik kampüsü elektrik şebekesinde yedisi 1000 KVA ve ikisi 800 KVA gücünde olmak üzere toplam dokuz tarafo bulunmaktadır. Kurulu güç 8600 KVA dır. Bütün trafoların primeri (girişi) 34,5 kV OG şehir şebekesine bağlıdır. Trafoların sekonderi (çıkışı) 0,4/0,231 kV tur. Karabük Üniversitesi Demir Çelik kampüsü elektrik dağıtım şebekesi BEDAŞ firmasına ait olan orta gerilim şebekesi üzerinden beslenmektedir. Orta gerilim hattı üniversite içerisine girdikten sonra orta gerilim dağıtım binasına içerisinde bulunan baralar vasıtası ile orta gerilim dağıtım hatlarına iletilir ve üniversite içerisinde bulunan alçak gerilim şebekesine geçişi yapılır. Tablo 2'de trafolar, güçleri ve besledikleri alanlar verilmiştir.

Tablo 2. Trafo güçleri ve besledikleri bölgeler.

Trafo	Güç (KVA)	Besleme Bölgesi
TR1-A	1000	Teknoloji Fak., Yab. Diller
TR1-B	800	Rektörlük, Tıp Fak
TR2	1000	B3, B4 binası, Isı Merkezi, Spor Salonu
TR3	1000	Cami, İktisat Fak., Sosyal Tesisler
TR4	1000	İlahiyat Fak., Öğrenci İşleri
TR5	1000	Kütüphane, Yeni Spor Salonu
TR6	800	Mühendislik Fak.
TR7	1000	Stadyum
TR8	1000	AR-GE binası

Kampüste bazı binalarda güneş enerji sistemleri de kurulmuştur. Bu binalarda yükler gündüz saatlerinde güneş enerjisi sisteminden beslenmekte, güneş enerjisi sistemi yetersiz kalırsa yükler şebeke tarafından beslenmektedir. Tablo 3'te güneş enerjisinin kurulu olduğu binalar ve güçleri verilmiştir.

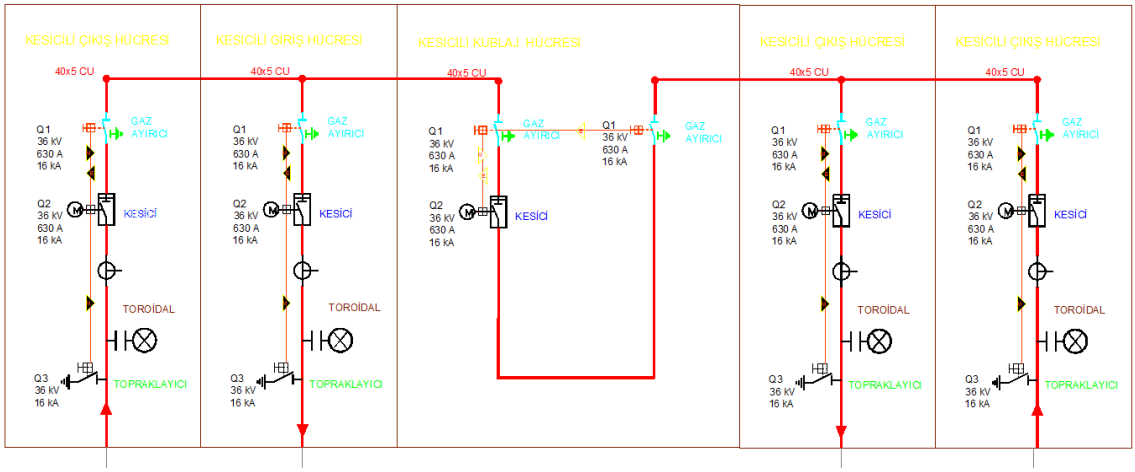
Tablo 3. Güneş enerjisi kurulu yerleri ve güçleri.

Yer (Bina)	Güç (kW)
Spor Salonu	50
Yabancı Diller MYO	250
Teknoloji Fakültesi	300
İlahiyat Fakültesi	100
İİBF	300
Mühendislik Fakültesi	100

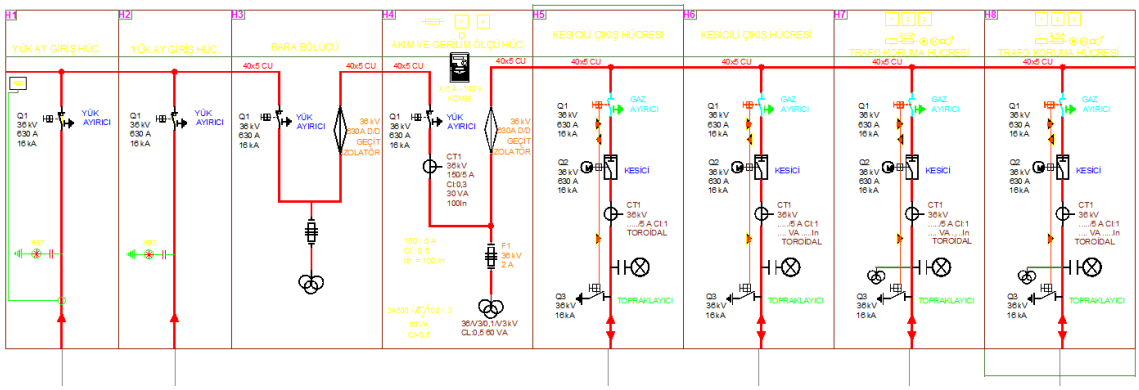
Karabük Üniversitesini besleyen UNI-1 ve UNI-2 olmak üzere iki ayrı OG hattı bulunmaktadır. TEDAŞ (enerji dağıtım firması) feeder hücresi ile üniversitenin MV giriş hücresi arasındaki kablo uzunluğu 438 m dir. Bu iki hat için de 3x(1x95+16) mm^2 kesitinde XLPE kablolar kullanılmıştır. Şekil 1'de Karabük Üniversitesini besleyen TEDAS çıkış feeder leri görülmektedir. Şekil 2'de ise üniversiteye giriş OG hücreleri (UNI-1 and UNI-2) verilmiştir.

OG şebekesine bağlanan her trafonun AG tarafında kendi besleme alanları vardır. Transformatörlerin çıkışı 0,4/0,231 kV'dir. Her trafoya ait kompanzasyon panoları bulunmaktadır. Örnek olarak TR6'nın AG tek hat şeması Şekil 3'de verilmiştir.

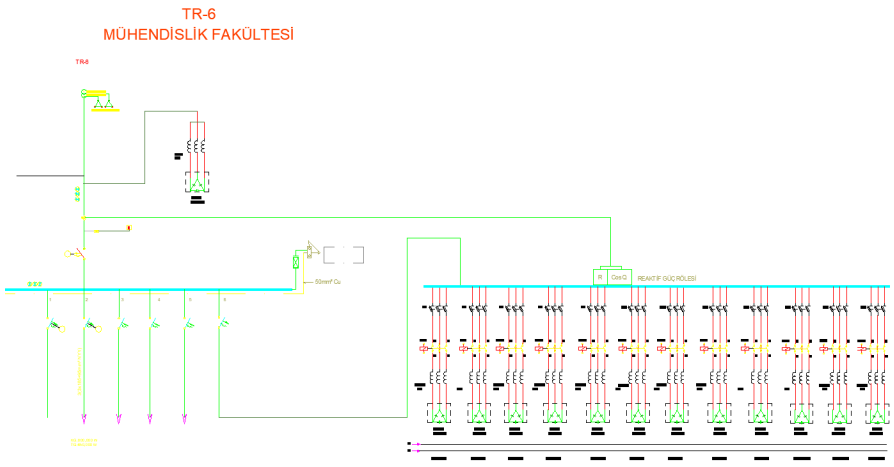
Demir Çelik yerleşkesinde trafolardan çekilen enerji SCADA sistemi ile aylık ve günlük olarak takip edilebilmektedir. Çizilen güç grafiklerinin analizi, transformatörlere bağlanacak şarj istasyonlarının transformatörlerin yükleme oranını nasıl etkileyeceğini analiz etmek açısından önemlidir. Demir Çelik kampüsünde 6 adet büyük otopark bulunmaktadır. Otoparkların yerleri ve şarj istasyonlarının bağlanacağı trafoların yerleri Tablo 4'te verilmiştir. Transformatörlerin seçiminde transformatörlerin yakınlığı (kablo uzunluğu) ve yük oranları dikkate alınmıştır.



Şekil 1. TEDAS OG UNI-1 and UNI-2 fiderleri.



Şekil 2. Üniversiteye giriş UNI-1 and UNI-2 fiderleri.

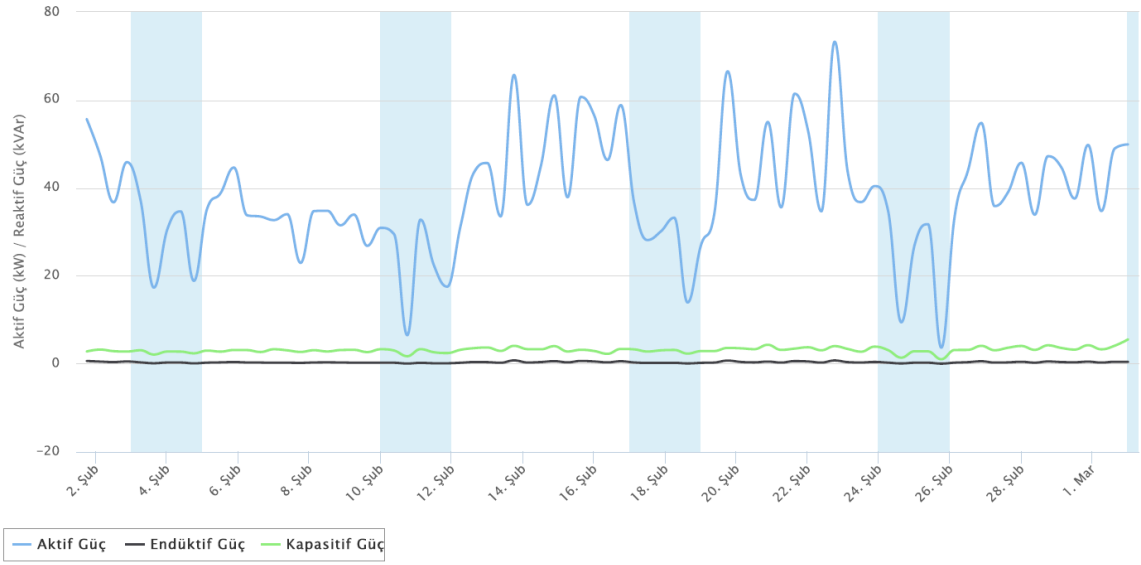


Şekil 3. TR6 AG tek hat şeması.

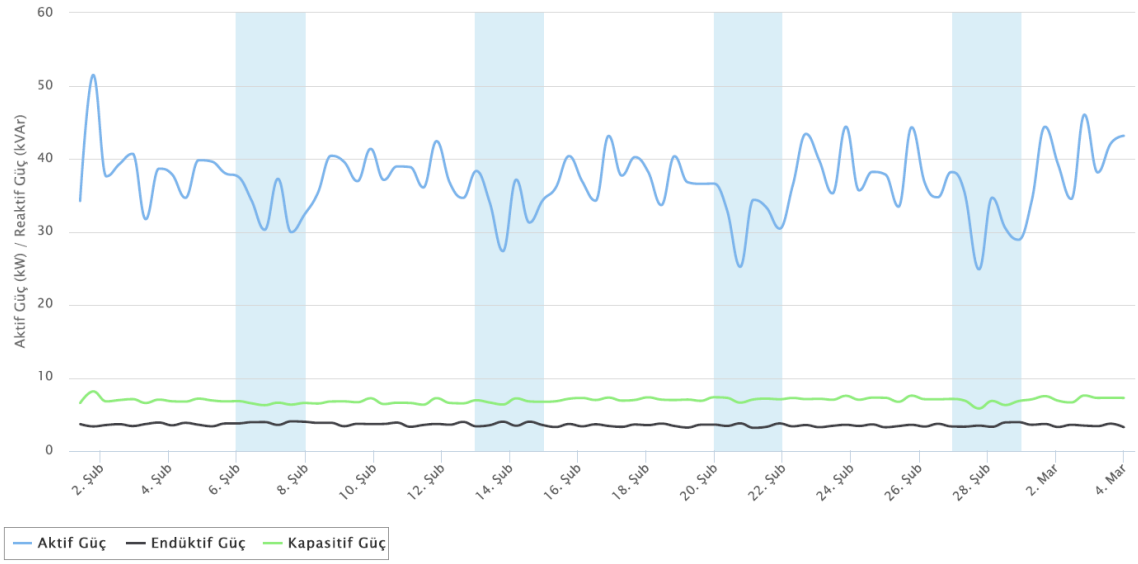
Tablo 4. Park alanları ve şarj istasyonlarının bağlanacağı trafolar.

Park Alanları	Bağlanılacak Trafo
Rektörlük Binası	TR1-B
İİBF	TR3
Öğrenci İşleri	TR3
Teknoloji Fakültesi	TR4
Mühendislik Fakültesi	TR6
Stadyum	TR7

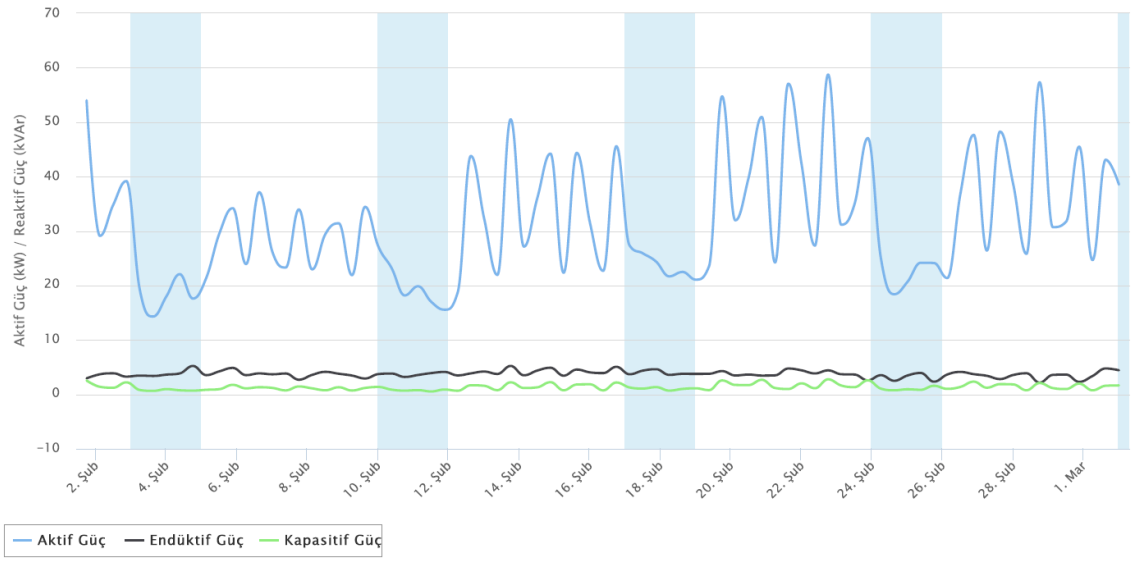
TR1-A, TR2, TR5 ve TR8'e şarj istasyonları bağlanmadığı için bu trafoların grafikleri burada verilmeyecektir. TR1-B, TR3, TR4, TR6 ve TR7 trafolarına ait son birkaç yıla ait aylık ve günlük grafikler incelenerek bu trafoların yüklenme durumları ve oranları tespit edilmiştir. Çok fazla grafik olduğu ve burada hepsinin gösterilme imkanı olmadığı için örnek olarak Şekil 4-5'te Mühendislik Fakültesinin, Şekil 6-7'de İİBF'nin şubat 2024 ve şubat 2021 güç grafikleri verilmiştir.



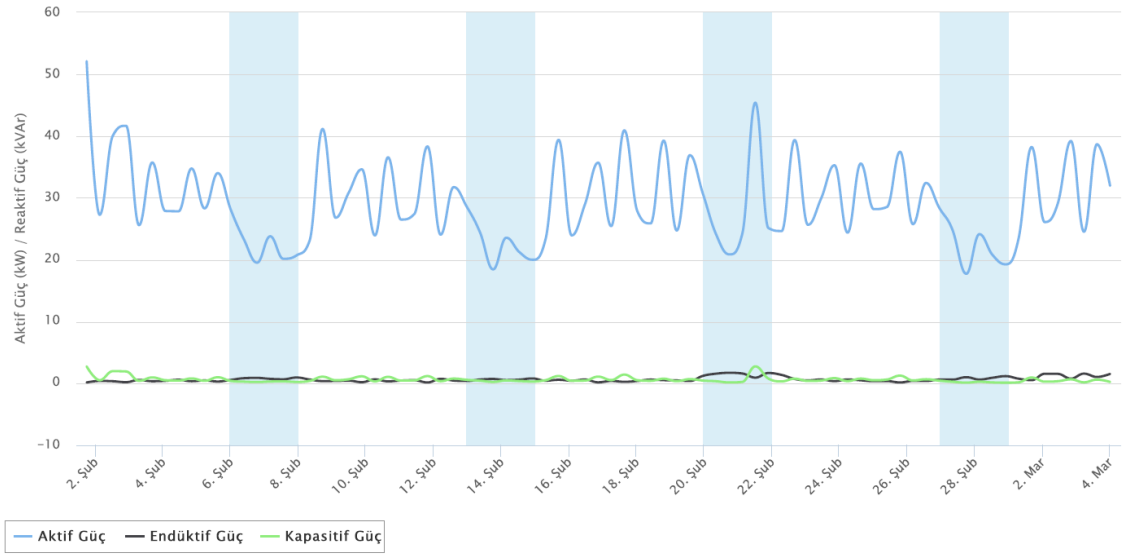
Şekil 4. Şubat 2024'te Mühendislik fakültesinden alınan güç grafiği.



Şekil 5. Şubat 2021'de Mühendislik fakültesinden alınan güç grafiği.



Şekil 6. Şubat 2024'te İİBF'den alınan güç grafiği.



Şekil 7. Şubat 2021'de İİBF'den alınan güç grafiği.

TR1-B'ye bağlı Rektörlük binası ve Tıp Fakültesi'nin grafikleri incelendiğinde toplam anlık veya günlük maksimum (tepe) gücün 150-200 KVA olduğu görülmektedir.

İİBF binasında 300 kW güneş enerji sistemi (GES) bulunmaktadır. Özellikle yaz aylarında ve güneşli havalarda gündüz saatlerinde binanın tüm ihtiyaçlarını GES tek başına karşılamaktadır. Bulutlu havalarda ve/veya gece GES'in yetersiz olduğu durumlarda bina şebekeden beslenir. TR3'e bağlı İİBF ve Sosyal Yaşam Merkezi'nin aylık ve günlük güç grafikleri incelendiğinde toplam çekilen gücün ortalama 50-60 KVA olduğu görülmektedir. İİBF'ne kurulan 300 kW GES sayesinde özellikle yaz aylarında ve gündüz saatlerinde trafodan çekilen güç oldukça azalmaktadır.

TR4'e bağlı İlahiyat Fakültesi ve Öğrenci İşleri binalarının aylık ve günlük güç grafikleri incelendiğinde toplam çekilen gücün ortalama 40-60 KVA olduğu görülmektedir. İlahiyat Fakültesi'ne kurulan 100 kW GES sayesinde özellikle yaz aylarında ve gündüz saatlerinde şebekeden çekilen güç oldukça azalmaktadır.

TR6'ya bağlı Mühendislik Fakültesi binasının aylık ve günlük güç grafikleri incelendiğinde toplam çekilen gücün ortalama 50-60 KVA olduğu görülmektedir. Mühendislik Fakültesi'ne kurulan 100 kW GES sayesinde özellikle yaz aylarında ve gündüz saatlerinde trafodan çekilen güç oldukça azalmaktadır.

TR7'ye bağlı olan stadyumu besleyen ana elektrik panosu henüz SCADA sistemine dahil edilmediğinden TR7'nin güç grafikleri alınamamıştır. Ancak günlük ve anlık ölçümlerde maksimum 15-20 KVA güç çekildiği tespit edilmiştir. Ayrıca gece maçlarında nadiren devreye giren 400 KVA'lık lambalar bulunmaktadır.

Trafoların günlük ve aylık yük grafikleri incelendiğinde maksimum %5-10 civarında yüklendiği tespit edilmiştir.

4. EA Şarj İstasyonu Durum Çalışmaları

Bu bölümde Karabük Üniversitesi Demir Çelik (Merkez) kampüsü için mevcut elektrik şebekesinin analizi yapıldıktan sonra 2025, 2030 ve 2040 yılları için üç farklı senaryoya göre üç farklı durum çalışması yapılmıştır. 2025, 2030 ve 2040 yıllarında trafoların nominal yüklerinin ne kadar artacağı ve kampüste bulunabilecek EA sayısı bu sayıya uygun şekilde gerekli EA şarj istasyonu sayısı senaryoları çalışılarak şarj istasyonlarının şebekeye ne kadar ek yük getireceği tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Elektrikli araç şarj istasyonları kullanıldıkları ülkelerin şebeke gerilim değerine, elektrik frekanslarına, güç aktarım kapasitelerine, güç aktarım sürelerine, şarj ettikleri araç tiplerine ve araç markalarına göre farklı tiplerde olabilmektedir. Aynı araç şarj istasyonlarının bile kullanıldıkları ülkelerin araç standartlarına göre versiyonları değişebilmektedir. Ancak yine de çoğu EA ve EA şarj istasyonları elektriksel özellikleri açısından (güçleri, şarj süreleri vb) birbiri ile aynı veya benzer özellikler göstermektedir. Bu çalışmada TOGG marka EA ve GERSAN şarj istasyonları baz alınmıştır. Şebeke modelleme ve simülasyonları için ETAP Electrical Power System Analysis arayüzü kullanılmıştır.

ETAP, elektrik güç sistemleri modelleme ve simülasyonu için en çok tercih edilen arayüzlerden birisidir. Yüzden fazla analiz modülüyle güç sistemleri ile ilgli hemen hemen her türlü simülasyon ve analiz yapılabilmektedir. ETAP Yük Akışı Analiz Yazılımı (Load Flow Analysis Software), elektrik sistemi boyunca bara gerilimlerini, branş güç faktörlerini, akımları ve güç akışlarını hesaplamak için kapsamlı bir güç akışı analizi ve simülasyon araçları seti sunmaktadır. ETAP Yük Akışı Yazılımı, otomatik çalıştırma yük akışı simülatörü, ekipman değerlendirmesi, uyarılar/uyarı özet raporları, yük akışı sonuç analizörü ve akıllı ve etkileşimli grafikler gibi yerleşik özellikler sunarak günümüzde mevcut olan en iyi ve en verimli elektrik güç akışı analiz yazılımlarından biri olduğu söylenebilir. Güç Akışı Simülasyonu (Power Flow Simulation), talep değerlendirmesi, güç akışı analizi, kayıplar, güç faktörü düzeltmesi ve voltaj düşüşü hesaplamaları için temel bir analiz modülüdür. Ayrıca ölçeklenebilir çözümler, çevrimdışı analizden gerçek zamanlı uygulamalara geçiş; modellemeden operasyona kadar tam entegre bir çözüm; izleme, tahmin, optimizasyon, kontrol ve otomasyon için gerçek zamanlı çözüm yaklaşımları öne çıkan özellikleri olarak sayılabilir.

Türkiye'de elektrikli araç şarj sistemleri tasarımı ve uygulaması yapmakta olan farklı firmalar mevcuttur. Genel olarak bakıldığında elektrikli araçların güçlerine göre bir sınıflandırma göze çarpmaktadır. Markaların ürünleri de bu açıdan incelendiğinde ürünlerin enerji güç seviyeleri 3,7 kW, 7,4 kW, 11 kW, 22 kW ve 44 kW olduğu görülmektedir. Bu çalışmada model olarak Gersan firmasının 22 kW, 3 fazlı, Smart tip şarj ünitesi modeli kullanılacaktır.

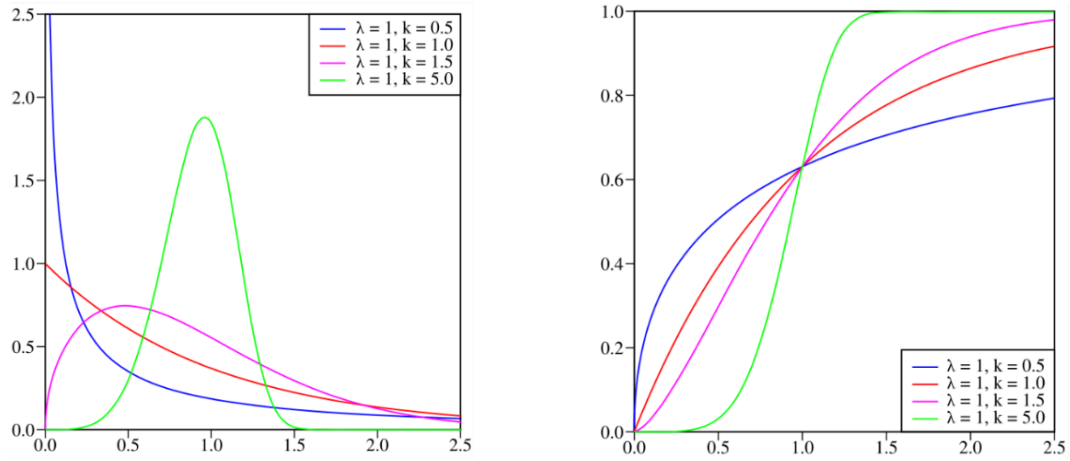
Karabük Üniversitesi Demir Çelik kampüsünde altı adet büyük otopark bulunmaktadır. Bu alanlar Rektörlük binası çevresi, İİBF binası çevresi, Öğrenci İşleri binası çevresi, Teknoloji Fakültesi binası çevresi, Mühendislik Fakültesi çevresi ve Stadyum çevresinde bulunmaktadır. En büyük park alanı Öğrenci İşleri binasının etrafındaki park alanıdır. Otoparkların trafolara yakınlığı (kablo mesafesi), trafoların yükleme oranları ve otoparkların büyüklüğü (araç sayısı) dikkate alınarak EA şarj istasyonlarının hangi trafolardan beslenebileceği belirlenmiştir. Bu Tablo 4'te verilmiştir. Bu bölümde Demir Çelik yerleşkesinde bulunabilecek elektrikli araç sayısına ve bu araçlar için gerekli olan şarj istasyonu sayısına göre 2025, 2030 ve 2040 yılları için yük analizi, ağ modellemesi ve simülasyonları yapılmıştır.

4.1. Kullanılan Yöntem

Trafoların gelecek yıllardaki (2025, 2030 ve 2040) nominal yüklenme oranlarını, kampüs içinde bulunabilecek günlük ortalama EA sayısı ve buna bağlı olarak EAŞİ sayısını ve tarafoya getirecekleri ilave yükleri tahmin edebilmek için olasılıksal yoğunluk fonksiyonu-probabilistic density function (OYF-PDF), latin hiperküp örneklemesi-latin hypercube sampling (LHÖ-LHS) ve yapay sinir ağı-artificial neural network (YSA-ANN) kullanılmıştır. Gelecek yıllarda trafoları yüklenme oranlarını tahmin etmek için çeşitli yüklenme senaryolarının oluşturulması gerekmektedir. Bu doğrultuda, çalışmada olasılık modellerine başvurulmuştur. Olasılıksal modelleme kapsamında, olasılık yoğunluk fonksiyonları (OYF) kullanılmış ve istatistiksel değişkenler arasındaki ilişkiler korelasyon katsayılarıyla belirlenmiştir. Bilinen değişkenler için ayrı olasılık dağılımları ve aralarındaki korelasyon değerleri göz önünde bulundurularak, uygun sayıda yüklenme senaryosu üretmek amacıyla olasılıksal örnekleme yöntemi uygulanmıştır. Hem mevcut transformatör yüklerinin hem de sisteme entegre edilmesi planlanan elektrikli araç şarj istasyonlarının olasılıksal modellemesi için Weibull dağılımı tercih edilmiştir [26-33]. Weibull dağılımı çeşitli problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. [31-33]. Bir Weibull rastgele değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu Denklem (1)'de verilmiştir.

$$f(x,\lambda,k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda}\left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k}}, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0, \end{cases} \tag{1}$$

Burada x rastsal değişken, λ ölçek parametresi, k şekil parametresidir. Tamamlayıcı kümülatif dağılım fonksiyonu, gerilmiş bir üstel fonksiyondur. Weibull dağılımı, bir dizi başka olasılık dağılımıyla ilişkilidir; özellikle, üstel dağılım (k = 1) ile Rayleigh dağılımı arasında interpole eder. Weibull dağılımı ile modellemesi yapılacak değişkenlerin her biri için bu iki parametrenin hesaplanması yeterli olacaktır. Tipik bir Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ve yığmalı dağılım fonksiyonu Şekil 8a ve Şekil 8b'de görülmektedir.



a **b**

Şekil 8. a) Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu **b)** yığmalı dağılım fonksiyonu [34].

Elde edilen olasılık yoğunluk fonksiyonları (OYF) ve hesaplanan korelasyon katsayıları, belirlenen sayıda olasılıksal örnekleme, yani senaryoların üretilmesinde kullanılmaktadır. Bu sayede, örneklemelerden elde edilen istatistiksel sonuçlar, sistemin tamamına dair daha gerçekçi değerlendirmeler yapılmasına olanak tanımaktadır. Bu çalışmada Latin Hiperküp Örneklemesi (LHÖ) yöntemiyle örneklemeler oluşturulmuştur. Latin hiperküp örneklemesi (LHS), çok boyutlu bir dağılımdan parametre değerlerinin neredeyse rastgele bir örneğini oluşturmak için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Çıktı değişkenlerinin fonksiyon tahminleri için giriş değerleri oluşturmak amacıyla kullanılan bir örnekleme metotudur. Monte Carlo örnekleme yönteminin gelişmiş bir formu olan LHS, ilgili asimptotik anlamda basit rastgele örneklemeye kıyasla varyansı azaltır. LHÖ çeşitli problemler için

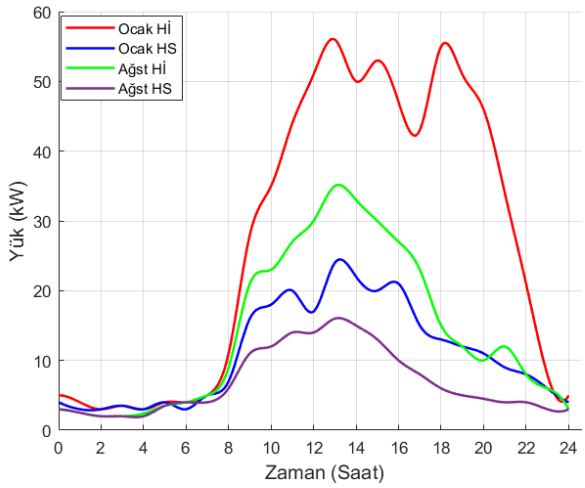
kullanılabilir [35-37]. [26] ve [27]'de açıklanan tekrar sıralama algoritması (TSA) ile bu örneklemeler arasındaki gerekli korelasyon yapısı sağlanmıştır. LHÖ yönteminde, daha önce hesaplanmış olan OYF'nin yanı sıra aynı dağılıma ait birikimli dağılım fonksiyonu (BDF) da hesaplanmaktadır.

Elde edilen OYF'ler ve hesaplanan korelasyon değerleri, istenilen sayıda olasılıksal örnekleme (senaryo) oluşturmak için kullanılmaktadır. Bu sayede, elde edilen örneklemelerin sunduğu istatistiksel çıkarımlar, sistemin genel yapısına dair gerçekçi yorumlar yapmayı mümkün kılmaktadır. Bu çalışmada Latin Hiperküp Örneklemesi (LHÖ) yöntemiyle örneklemeler elde edilmiş ve [26]ve [27] de açıklanan tekrar sıralama algoritması (TSA) ile örneklenmiş veriler arasındaki korelasyon yapısı oluşturulmuştur. LHÖ yönteminde, daha önce hesaplanan OYF'ye ek olarak, aynı dağılım için birikimli dağılım fonksiyonu (BDF) de hesaplanmaktadır. N sayıda örnek (senaryo) üretmek istendiğinde, öncelikle N adet tekdüze dağılmış rastgele değişken (u) oluşturulur ve bu değişkenler [23] de açıklandığı gibi hesaplanır.

Bölüm 3'te grafiksel olarak bazı örnekleri verilen, trafolara ait geçmiş yıllardaki gerçek yüklenme verileri kullanılarak, yukarıda açıklanan olasılıksal modellemeler uygulanmıştır. Hafta içi- hafta sonu ve yaz-kış (özellikle güneş paneli bulunan yerlerde trafoların yüklenme durumları farklılık gösterdiği için dört farklı duruma (yaz/kış - haftaiçi/haftasonu) göre ortalama yüklenme eğrileri çıkarılmıştır. Gerçek yüklenme eğrilerinden yararlanılarak Weibull Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (OYF) elde edilmiştir. Hesaplanan Weibull parametreleri olan şekil ve ölçek parametreleri, yaz/kış ve haftaiçi/haftasonu olmak üzere dört farklı durum için Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5'deki Weibull parametreleri kullanılarak OYF eğrileri oluşturulmuştur. Olasılıksal modellerin daha gerçekçi olabilmesi için, mevcut yük gruplarının olasılıksal ilişkileri ve birlikte bulunma durumları, yani korelasyonları dikkate alınmıştır. TR6 için elde edilen günlük ortalama yük dağılımı grafiği Şekil 9' da verilmiştir.

Tablo 5. Trafoların nominal yükler için Weibull fonnsiyonu parametreleri.

Periyot	λ/k	TR1-B	TR3	TR4	TR6	TR7
Ocak hafta içi	λ	1,4854	1,5320	1,2548	1,1788	0,2546
	k	5,2613	4,9547	4,2566	4,9254	2,1411
Ocak hafta sonu	λ	1,4325	1,2935	0,9236	1,1125	0,2236
	k	4,2845	4,1518	4,1123	4,7856	2,0853
Ağst hafta içi	λ	0,9811	0,9123	0,4558	1,2247	0,1896
	k	4,5670	4,4782	3,8547	4,8624	2,5487
Ağst hafta sonu	λ	1,0781	1,2454	0,4123	0,9547	0,1793
	k	3,8321	4,1948	3,6236	4,6345	2,4712



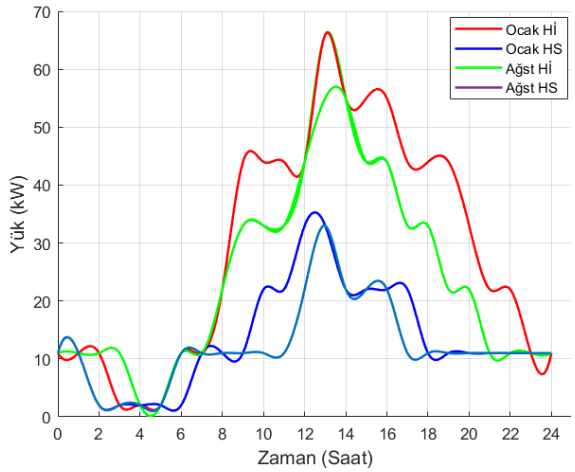
Şekil 9. TR6 günlük ortalama nominal yük dağılımı grafiği.

Elektrikli araç şarj istasyonlarının dağıtım şebekesine ne kadar ek yük getirebileceğini hesaplamak amacıyla, kampüs girişinde bulunan plaka tanıma sisteminden alınan gerçek araç giriş-çıkış verileri kullanılmıştır. Günlük ortalama elektrikli araç sayısı ve buna bağlı olarak kullanılacak şarj istasyonu sayısı ve bu şarj istasyonlarının yük

eğrileri yaz/kış ve haftaiçi/haftasonu olmak üzere her bir trafo için ayrrı ayrı oluşturulmuştur. Daha sonra, trafolara ait farklı yüklenme senaryoları oluşturmak amacıyla, mevcut yüklenme eğrilerinden yararlanılarak Weibull Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (OYF) elde edilmiş; Weibull parametreleri olan şekil ve ölçek parametreleri, yaz/kış ve haftaiçi/haftasonu için dört farklı durumda Tablo 6'daki gibi bulunmuştur. Tablo 6'da yer alan Weibull parametreleri kullanılarak, her bir trafo için oluşturulan elektrikli araç şarj istasyonu yük dağılım eğrilerinden örnek olarak TR 6 için Şekil 10'deki gibi elde edilmiştir.

Tablo 6. Trafoların EAŞİ için Weibull fonnsiyonu parametreleri.

Periyot	λ/k	TR1-B	TR3	TR4	TR6	TR7
Ocak hafta içi	λ	1,3567	1,6871	1,0636	1,0874	0,1855
	k	4,3254	4,7854	4,1126	4,3654	1,1411
Ocak hafta sonu	λ	0,6556	0,8965	0,7835	0,3654	0,1223
	k	1,1547	1,6987	1,2354	1,2647	1,2322
Ağst hafta içi	λ	0,9251	0,8724	0,8668	0,8654	0,3556
	k	3,2325	4,1134	3,6544	3,5325	1,4635
Ağst hafta sonu	λ	0,4958	0,6218	0,5134	0,4126	0,1832
	k	0,2875	1,1564	1,1237	1,2214	1,3623



Şekil 10. TR6 günlük ortalama EAŞİ yük dağılımı grafiği.

Yukarıda açıklanan transformatör ve elektrikli araç yük eğrilerinden yararlanılarak yüklenme senaryoları üretilmiştir. Bu senaryoları oluşturmak için, transformatör yük gruplarının Weibull dağılım eğrileri Latin Hiperküp Örneklemesi (LHÖ) yöntemi ile örneklenmiştir. LHÖ ile elde edilen olasılıksal dağılıma sahip örneklem sayısı fazla olduğunda, bu örnekler birleştirilerek veri grupları oluşturulabilir. Ancak bu veri grupları arasındaki korelasyonlar dikkate alınmazsa, sağlıklı sonuçlar elde edilemez. Bu nedenle, yük gruplarının korelasyonları belirlenip, örnekler bu değerlere uygun olacak şekilde sıralanmıştır. Bu amaçla, [26] ve [27]'de açıklanan tekrar sıralama algoritması ve eşitliklerle iki değişken arasındaki korelasyon hesaplanmıştır.

Yukarıda belirtilen modelleme adımları kullanılarak, transformatörlerin günlük yük profillerine yönelik senaryolar oluşturulmuş ve elektrikli araç şarj istasyonlarının sisteme eklenmesi durumunda bu yük profilleri güncellenmiştir. Mevcut trafoların ve elektrikli araç şarj istasyonu yüklerinin, uygun korelasyon değerlerini sağlamak amacıyla eşleştirmeler ve yeniden sıralama yapılmıştır. Oluşturulan senaryo gruplarının geleceğe yönelik tahminlerle desteklenmesi, ileriki yıllar için anlamlı çıkarımlar yapılmasına olanak tanımaktadır. Bu doğrultuda hem mevcut transformatör yükleri hem de elektrikli araç şarj istasyonu yükleri için ileriye dönük tahminler yapılmıştır. Mevcut transformatör yükleri için tahminler, son 6 yıla ait yüklenme verileri incelenerek yapılmış ve bu verilere uygun büyüme katsayıları belirlenmiştir. Bu katsayılar kullanılarak 2025, 2030 ve 2040 yıllarına ait öngörüler yapılmıştır.

Bahsedilen yöntem ile elde edilen olasılıksal modelin gelecek yıllar içerisinde de aynı kalacağı kabul edilmiştir. Bu nedenle OYF ve korelasyon hesapları tekrarlanmamıştır. Fakat gözlenecek en önemli değişimin

elektrikli araç yüklerinin miktarında yaşanacağı varsayımı yapılarak, ele alınan yıllara yönelik yeni senaryolar üretilmiştir. Bu senaryolara göre tahmin edilen EA sayıları bu araç sayılarına göre belirlenen elektrikli araç şarj istasyonlarının yük eğrileri güncellenmiştir. Son olarak EAŞİ ve diğer yükler için yeni yüklenme senaryoları aşağıdaki tablodaki gibi üretilmiştir. Üretilen 25 senaryodan örnek olarak altısı Tablo 7'de görülmektedir. Maksimum yüklenme değerlerinin elde edildiği 5 nolu senaryo dikkate alınmıştır.

Tablo 7. Farklı senaryolar için trafoların 2040 yılına ait hesaplanan yük değerleri (kW).

Senaryo No	TR1-B	TR3	TR4	TR6	TR7
1	281	426	154	235	146
2	270	420	158	242	148
3	243	382	147	227	126
4	264	415	154	238	143
5	290	459	170	258	162
25	258	411	163	241	153

Yukarıda açıklanan Weibull Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu ve Latin Hiperküp Örneklemesi yöntemleriyle elde edilen sonuçların yanında 2025, 2030 ve 2040 yıllarında yerleşkede bulunacak günlük ortalama EA sayısını tahmin etmek için yapay sinir ağı (YSA) da kullanılmıştır.

YSA uygulaması için yıl (aralık ayı baz alınarak), kampüste bulunan günlük ortalama araç sayısı, (GOAS), EPDK'nın (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu) Türkiyede'ki gelecek yıllara ait EA sayısı tahminleri, (EPDKT), IEA'nın (Uluslararası Enerji Ajansı) dünyadaki EA sayısı tahminleri (IEAT) YSA'nın giriş parametreleri olarak seçilirken, EA sayısı çıkış parametresi olak belirlenmiştir. YSA'nın eğitimi ve testi için 2018-2023 yıllarına ait veriler kullanılmıştır. Kampüs girişinde bulunan plaka tanıma sisteminden alınan gerçek dataların yanısıra yukarıda açıklanan yöntemlerle elde edilen senaryolardan elde edilen veriler de kullanılmıştır. Verilerin yaklaşık %75'i ağın eğitimi, %25'i test için kullanılmıştır.

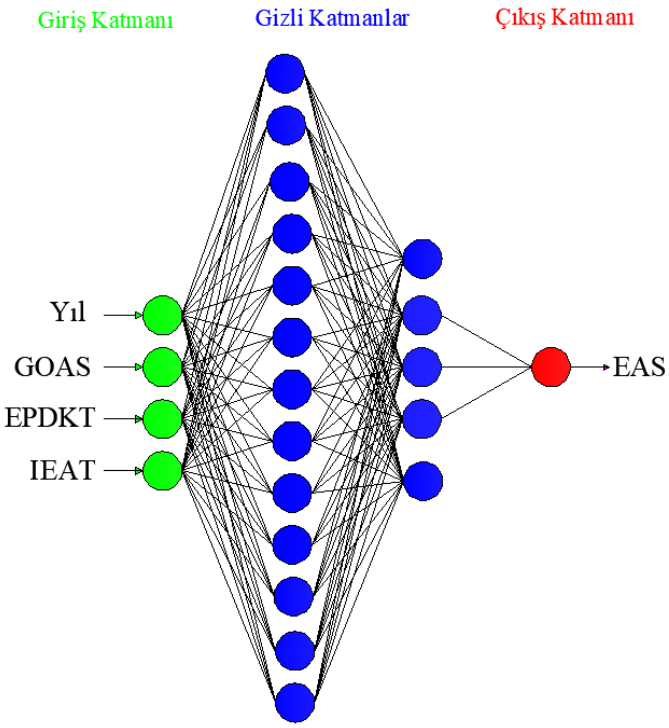
Elde edilen veriler 0,1 ile 0,9 arasında değerlere sahip olacak şekilde normalize edildmiştir. Normalizasyon için kullanılan formül Denklem (2)'deki gibidir.

$$V_N = 0.8 \times \left(\frac{V - V_{min}}{V_{max} - V_{min}}\right) + 0.1 \quad (2)$$

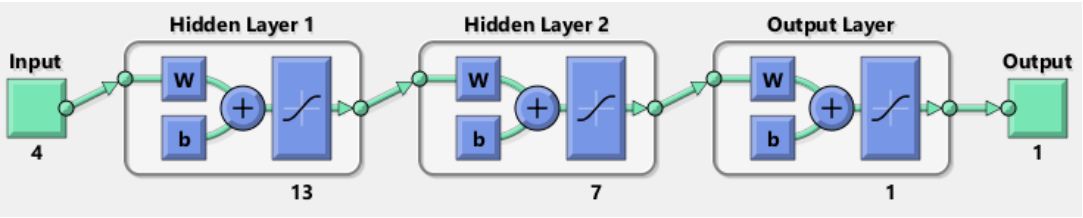
Burada; V_N normalize edilmiş değer, V_{min} minimum değer, V orijinal değer ve V_{max} maksimum değerdir. Normalize edilmiş değerden elde edilen orijinal değeri belirlemek için kullanılan formül Denklem (3)'teki gibidir.

$$V = \frac{V_N(V_{max} - V_{min}) - 0.1V_{max} + 0.9V_{min}}{0.8} \quad (3)$$

Farklı algoritmalar ve ara (gizli) katman sayıları arasında en iyi sonuçların iki ara katmana sahip Levenberg-Marquardt (LM) algoritmasından elde edildiği görülmüştür. Transfer fonksiyonları olarak Purelin (doğrusal transfer fonksiyonu) ve radbas (radyal bazlı transfer fonksiyonu) seçildi ve bu iki fonksiyondan benzer sonuçlar elde edildi. Yapay sinir ağı Matlab ortamında oluşturulmuştur. Değişik mimarilerle kurulan YSA'lardan en iyi sonuçları veren ve ilk katmanda 13 nöron ve ikinci katmanda 7 nöron olmak üzere iki gizli katmana sahip olan yapay sinir ağı mimarisi kullanıldı. Network tipi olarak feed-forward backpropagation seçilmiştir. İterasyon sayısı optimum 100 olarak belirlenmiştir. Şekil 11'de oluşturulan YSA'nın mimarisi, Şekil 12'de Matlab görüntüsü görülmektedir.



Şekil 11. Oluşturulan YSA mimarisi.



Şekil 12. Oluşturulan YSA'nın Matlab'deki görünümü.

YSA'ların eğitim ve test aşamalarında hataları güvenirlik oranlarının göstermede yaygın olarak kullanılan RMSE (Root Mean Squared Error-Kök Ortalama Kare Hatas), R^2 (Absolute fraction of variance-Mutlak varyans kesri) ve MAPE (Mean Absolute Percentage Error-Ortalama Mutlak Hata Yüzdesi) formülleri Denklem (4-6)'da verilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}(t_j - o_j)^2}{n}} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{j=1}^{n}(t_j - o_j)^2}{\sum_{j=1}^{n}(t_j)^2}\right) \quad (5)$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{|t_{j-o_j}|}{t_j} x100 \quad (6)$$

Burada, o çıktı değeri, t hedef değer ve n örnek sayısıdır. YSA'nın eğitim (training) RMSE, R^2 ve MAPE değerleri sırasıyla 0.027300, 0.997231, 5.262208; test için RMSE, R^2 ve MAPE değerleri sırasıyla 0.033300, 0.995880, 6.418720 olmuştur. YSA'dan elde edilen EA sayıları 2025, 2030 ve 2040 yılları için sırasıyla, 292, 688 ve 1800 olmuştur. Elde edilen yüklenme senaryolarına göre ETAP arayüzünde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

4.2. 2025 Şarj İstasyonu Senaryosu

Karabük Üniversitesi Demir-Çelik kampüsünde EA sayısı, elektrikli araç şarj istasyonu (EAŞİ) sayısı ve diğer yüklerin 2025, 2030 ve 2040 yıllarında ne kadar olabileceği Bölüm 4.1'de açıklanan yöntemlerle bulunduktan sonra ETAP arayüzünde bu yüklerin simülasyonu yapılmıştır. EAŞİ dışındaki yükler Bölüm 4.1'de açıklanan OYF ve LHÖ yöntemlerleriyle hesaplanan maksimum yükün bulunduğu senaryolardaki yük dikkate alınmıştır. EAŞİ yükleri için ise YSA tarafından bulunan EA sayısı ve buna bağlı olarak aşağıda açıklandığı şekilde bulunan EAŞİ sayısı dikkate alınmıştır.

2025 yılı için EA sayısı 292 olarak tahmin edilmiştir. Trafoların yüklenme durumları tahmin edilen EA sayısından %20 fazla alınarak değerlendirilmiştir. Bunun sebebi öngörülemeyen durumları ve mezuniyet törenleri gibi yoğunluğun çok fazla arttığı spesifik durumları da göz önüne alarak trafoların yüklenme durumlarını garanti altına almaktır. Bu nedenle 350 elektrikli araç üzerinden şarj istasyonu sayısı ve yerleştirileceği alan araştırılmıştır. Demir Çelik yerleşkesindeki otoparkların büyüklüğü ve o bölgedeki personel ve/veya araç yoğunluğu dikkate alındığında araçların %20'si Rektörlük otoparkında, %10'u İİBF otoparkında, %30'u Öğrenci İşleri otoparkında, %10'u Teknoloji Fakültesi otoparkında, %20'si Mühendislik Fakültesi otoparkında ve %10'u Stadyum otoparkında olacaktır. Tablo 8'de 2025 senaryosu EA sayıları ve bağlanacakları trafolar görülmektedir.

Tablo 8. 2025 senaryosuna göre park alanlarındaki EA sayısı.

Park Alanı	EA Sayısı	Bağlanılacak Trafo
Rektörlük Binası	70	TR1-B
İİBF	35	TR3
Öğrenci İşleri	105	TR3
Teknoloji Fakültesi	35	TR4
Mühendislik Fakültesi	70	TR6
Stadyum	35	TR7

Yönetmeliğe göre priz sayısının otoparktaki araç kapasitesinin (araç sayısı) %2 ila %5'i arasında olması gerekmektedir. Bu durum çalışmasında üst sınır olarak %5 alınacaktır. Kampüs içerisine konulacak 22 kW'lık şarj istasyonlarında 2 adet priz bulunacağından araç sayısı 40'a bölünerek şarj istasyonu sayısı hesaplanır. Buna göre otoparklar için öngörülen şarj istasyonu sayısı Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. 2025 senaryosuna göre par alanlarındaki EA şarj istasyonu sayısı.

Park Alanı	EAŞİ Sayısı	Bağlanılacak Trafo
Rektörlük Binası	2	TR1-B
İİBF	1	TR3
Öğrenci İşleri	3	TR3
Teknoloji Fakültesi	1	TR4
Mühendislik Fakültesi	2	TR6
Stadyum	1	TR7

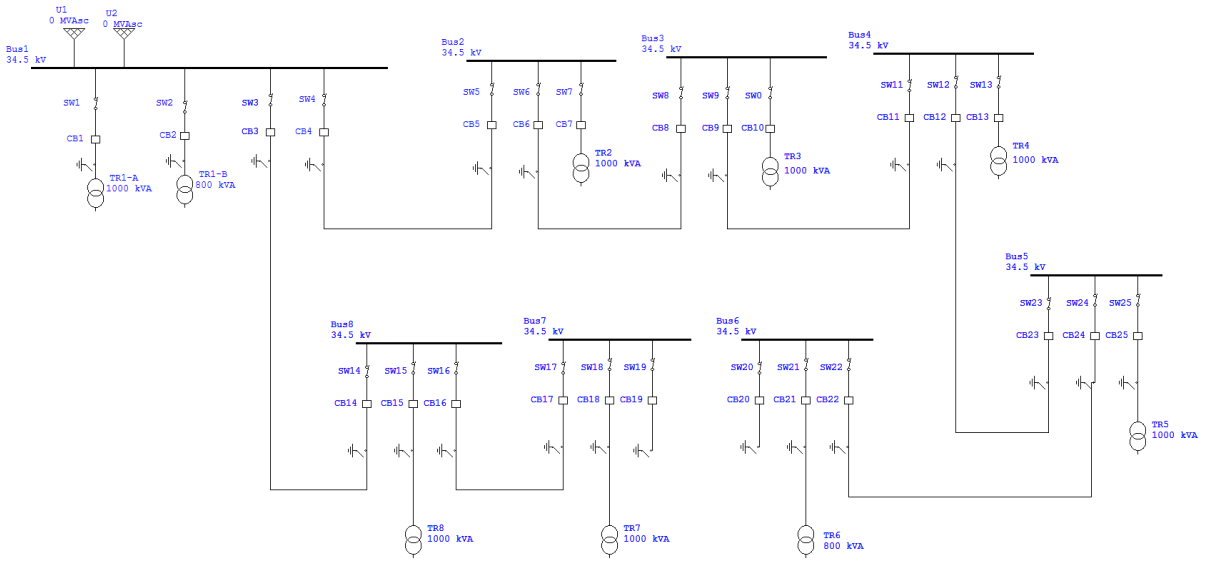
Bu tabloya göre TR1-B'ye 44 kW (%5,5), TR3'e 88 kW (%8,8), TR4'e 22 kW (%2,2), TR6'ya 44 kW (%5,5) ve TR7'ye 22 kW (%2,2) yük eklenir. Değerler Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. 2025 senaryosuna göre EA şarj istasyonlarının ilave yükü.

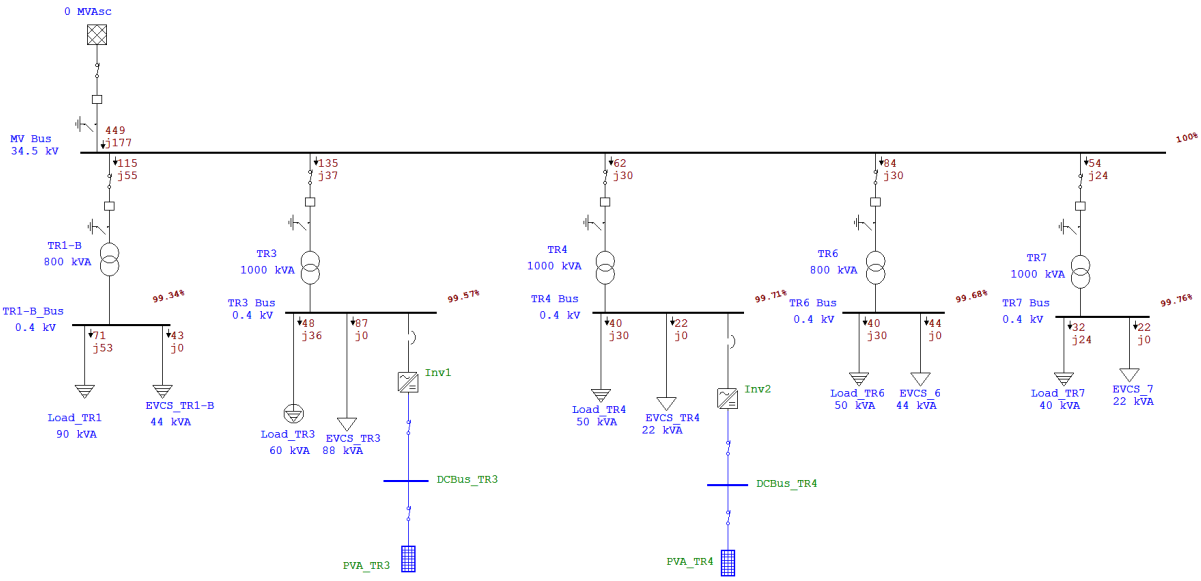
Park Alanı	EAŞİ Yükü (kW)	Bağlanılacak Trafo
Rektörlük Binası	44	TR1-B
İİBF	22	TR3
Öğrenci İşleri	66	TR3
Teknoloji Fakültesi	22	TR4
Mühendislik Fakültesi	44	TR6
Stadyum	22	TR7

Bölüm 3'te verilen grafik ve tablolarda yer alan verilere bakıldığında EA şarj istasyonlarının 2025 senaryosuna göre transformatörlere getireceği ek yük, transformatörlerin rahatlıkla karşılayabileceği düzeydedir. 2025 yılına kadar elektrik yüklerindeki genel artış dikkate alındığında transformatörlerin maksimum %10-15 civarında yükleneceği tahmin edilmektedir. Senaryolarda yalnızca hafif araçlar (kamyon, minibüs vb. değil) dikkate alınmıştır.

OG şebekenin ve 2025 senaryosunun ETAP tek hat şemaları Şekil 13 ve 14'te görülmektedir.



Şekil 13. OG şebekenin ETAP tek hat şeması.



Şekil 14. 2025 senaryosu ETAP tek hat şeması.

4.3. 2030 Şarj İstasyonu Senaryosu

Şarj istasyonlarının sayısı ve yerleştirileceği alanlar, 2030 yılı için YSA tarafından tahmin edilen 688 EA sayısının %20 fazlası olan araçların 826 EA üzerinden çalışılmıştır. 2030 senaryosu EA sayısı Tablo 11'de, şarj istasyon sayıları ise Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 11. 2030 senaryosuna göre park alanlarındaki EA sayısı.

Park Alanı	EA Sayısı	Bağlanılacak Trafo
Rektörlük Binası	165	TR1-B
İİBF	83	TR3
Öğrenci İşleri	248	TR3
Teknoloji Fakültesi	83	TR4
Mühendislik Fakültesi	165	TR6
Stadyum	83	TR7

Bu tabloya göre TR1-B 88 kW (%11), TR3 176 kW (%17,6), TR4 44 kW (%4,4), TR6 88 kW (%11) ve TR7 ise 44 kW (%4,4) yüklüdür. Değerler Tablo 13'te verilmiştir.

EA şarj istasyonlarının 2030 senaryosuna göre transformatörlere getireceği ek yük, transformatörlerin kolaylıkla karşılayabileceği düzeydedir. 2030 yılına kadar transformatörlerin maksimum %15-25 civarında yükleneceği tahmin edilmektedir.

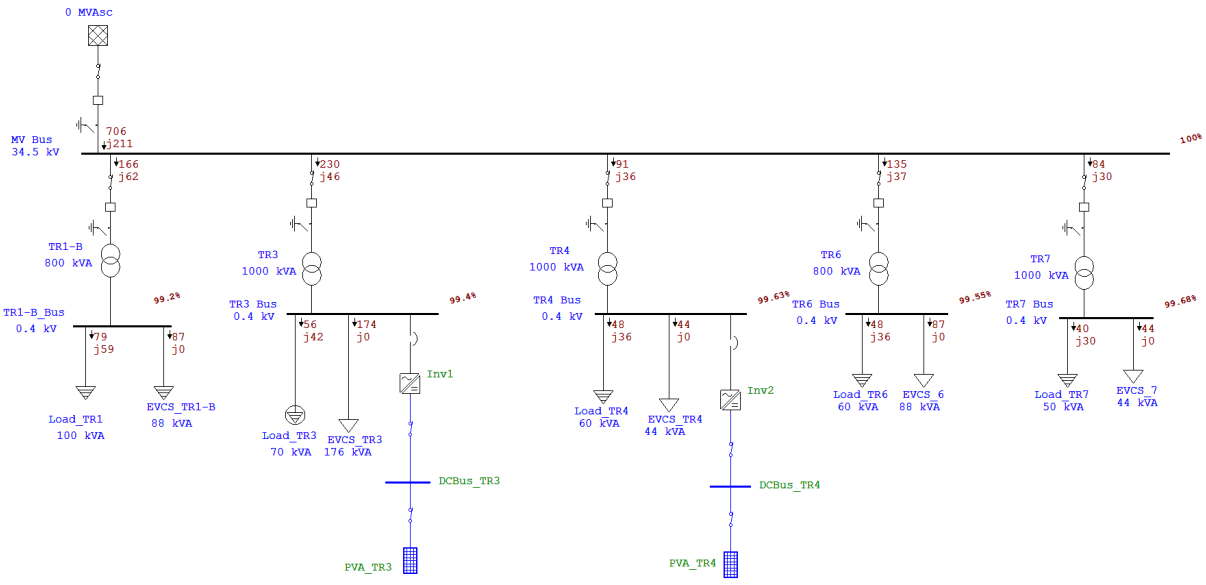
ETAP 2030 senaryosunun tek hat şeması Şekil 15'de gösterilmektedir.

Tablo 12. 2030 senaryosuna göre park alanlarındaki EA şarj istasyonu sayısı.

Park Alanı	EAŞİ Sayısı	Bağlanılacak Trafo
Rektörlük Binası	4	TR1-B
İİBF	2	TR3
Öğrenci İşleri	6	TR3
Teknoloji Fakültesi	2	TR4
Mühendislik Fakültesi	4	TR6
Stadyum	2	TR7

Tablo 13. 2030 senaryosuna göre EA şarj istasyonlarının ilave yükü.

Park Alanı	EAŞİ Yükü (kW)	Bağlanılacak Trafo
Rektörlük Binası	88	TR1-B
İİBF	44	TR3
Öğrenci İşleri	132	TR3
Teknoloji Fakültesi	44	TR4
Mühendislik Fakültesi	88	TR6
Stadyum	44	TR7



Şekil 15. 2030 senaryosu ETAP tek hat şeması.

4.4. 2040 Şarj İstasyonu Senaryosu

2040 yılı için YSA tarafından hesaplanan elektrikli olacağı varsayılarak şarj istasyon sayıları ve yerleştirilecekleri alanlar 1800 EA sayısının %20 fazlası olan 2160 sayısına göre çalışıldı. 2040 senaryosu EA sayısı Tablo 14'te, şarj istasyon sayıları ise Tablo 15'de verilmiştir.

Tablo 14. 2040 senaryosuna göre park alanlarındaki EA sayısı.

Park Alanı	EA Sayısı	Bağlanılacak Trafo
Rektörlük Binası	432	TR1-B
İİBF	216	TR3
Öğrenci İşleri	645	TR3
Teknoloji Fakültesi	216	TR4
Mühendislik Fakültesi	432	TR6
Stadyum	216	TR7

Tablo 15. 2040 senaryosuna göre park alanlarındaki EA şarj istasyonu sayısı.

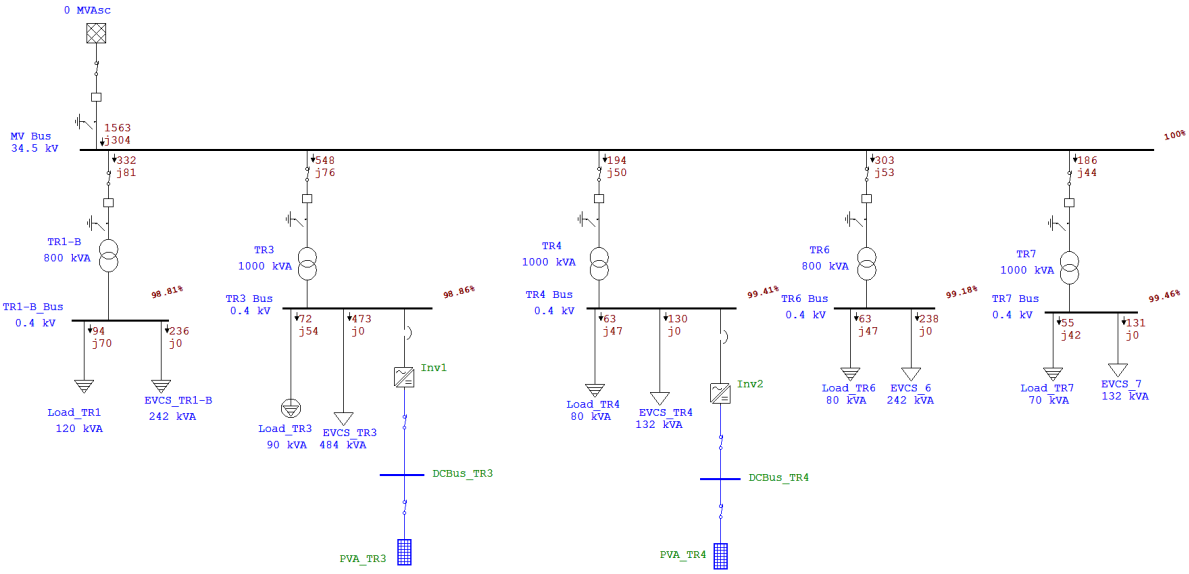
Park Alanı	EAŞİ Sayısı	Bağlanılacak Trafo
Rektörlük Binası	11	TR1-B
İİBF	6	TR3
Öğrenci İşleri	16	TR3
Teknoloji Fakültesi	6	TR4
Mühendislik Fakültesi	11	TR6
Stadyum	6	TR7

Bu tabloya göre TR1-B'ye 242 kW (%30,25), TR3'e 484 kW (%48,4), TR4'e 132 kW (%13,2), TR6'ya 242 kW (%30,25) ve TR7'ye 132 kW (%13,2) yük eklenmiştir. Değerler Tablo 16'da verilmiştir.

Tablo 16. 2040 senaryosuna göre EA şarj istasyonlarının ilave yükü.

Park Alanı	EAŞİ Yükü (kW)	Bağlanılacak Trafo
Rektörlük Binası	242	TR1-B
İİBF	132	TR3
Öğrenci İşleri	352	TR3
Teknoloji Fakültesi	132	TR4
Mühendislik Fakültesi	242	TR6
Stadyum	132	TR7

Bölüm 3'te verilen grafik ve tablolarda yer alan verilere bakıldığında EA şarj istasyonlarının 2040 senaryosuna göre transformatörlere getireceği ek yük, transformatörlerin karşılayabileceği düzeydedir. 2040 yılına kadar elektrik yüklerindeki artış göz önüne alındığında, transformatörlerin maksimum %40-60 civarında yükleneceği tahmin edilmektedir. ETAP 2040 senaryosunun tek hat şeması Şekil 16'da verilmiştir.



.

Şekil 16. 2040 senaryosu ETAP tek hat şeması.

Bu bölümde ayrıntılı olarak anlatılan kullanılan yöntem ve tekniklerle elde edilen sonuçların hata payı ihtimali vardır. Bu konu sadece teknik değil aynı zamanda ekonomik, sosyal, yönetimsel tarafları olan ve geleceğe yönelik bazı öngörülemeyen faktörlerin de devreye girebileceği bir konu olduğu için yapılan tahminlerin doğruluk oranının olumsuz etkileme olasılığı vardır. Bu hata payı önümüzdeki iki-üç yılda daha çok ve daha yeni verilerle yapılacak yeni çalışmalarla azaltılabilir.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada farklı üç senaryo için elektrikli araç şarj istasyonlarının elektrik şebekesine getirebileceği ilave yükler değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme, Karabük Üniversitesi Demir Çelik yerleşkesi dağıtım ağına yönelik TOGG marka elektrikli aracın parametreleri temel alınarak yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında Elektrikli araç şarj istasyonlarının şebekeye ne kadar ilave yük ekleyeceğini tahmin etmek için Weibull dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu (OYF), latin hiperküp örnekleme (LHÖ) yaklaşımları ve yapay sinir ağı (YSA) kullanılmıştır. Elektrikli araç şarj sistemlerinin dağıtım şebekesi üzerindeki yük dağılımının incelenmesi amacıyla ETAP Electrical Power System Analysis yazılımı kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır.

Karabük Üniversitesi Demir Çelik yerleşkesinin orta gerilim (OG) ve alçak gerilim (AG) elektrik şebekelerinin analizi yapıldıktan sonra 2025, 2030 ve 2040 yılları için üç farklı senaryo çalışılmıştır. 2025, 2030 ve 2040 yıllarında Demir Çelik yerleşkesindeki olası elektrikli araç sayısı ve elektrikli araç şarj istasyonu sayısı öngörülerek transformatörlerin yük oranları tahmin edildmiştir.

2025 senaryosuna göre 350 EA ve 10 EAŞİ bulunacaktır. Senaryoya göre TR1-B'ye 44 kW (%5,5), TR3'e 88 kW (%8,8), TR4'e 22 kW (%2,2), TR6'ya 44 kW (%5,5) ve TR7'ye 22 kW (%2,2) yük eklenecektir.

2030 senaryosunda 826 EA ve 20 EAŞİ bulunacaktır. Senaryoya göre TR1-B'ye 88 kW (%11), TR3'e 176 kW (%17,6), TR4'e 44 kW (%4,4), TR6'ya 88 kW (%11) ve TR7'ye 44 kW (%4,4) yük eklenecektir.

2040 senaryosunda 2160 EA ve 56 EAŞİ bulunacaktır. Buna göre TR1-B'ye 242 kW (%30,25), TR3'e 484 kW (%48,4), TR4'e 132 kW (%13,2), TR6'ya 242 kW (%30,25) ve TR7'ye 132 kW (%13,2) yük eklenecektir.

Elektrikli araç şarj istasyonlarının ilgili yıllardaki transformatör güçleri ve diğer elektrik yükleri dikkate alındığında 2025, 2030 ve 2040 yıllarında transformatörleri yükleme oranları açısından olumsuz etkilemesi olası görülmemektedir. Transformatörlerin 2025 yılında maksimum %10-15, 2030 yılında ise maksimum %15-25

oranında yüklenmesi beklenmektedir. 2040 yılında ise transformatörlerin maksimum %40-60 oranında yükleneceği tahmin edilmektedir.

Şarj istasyonlarının bağlanacağı trafoların seçiminde trafoların yükleme koşullarının yanı sıra park alanlarına yakınlığı da dikkate alınmştır. Öğrenci İşleri otoparkı en büyük otopark olup hem TR3 hem de TR4'e bağlanmaya uygundur. Ancak TR3'ün beslediği bölgede 300 KW GES (güneş enerji sistemi) bulunduğu için TR3'e bağlanması tercih edilmiştir.

Senaryolarda yeni GES'in Demir Çelik yerleşkesine kurulma olasılıkları değerlendirilmedi. Yeni GES kurulması halinde trafoların yük oranları daha da düşecektir. Tahmin edilen sonuçlara göre 2040 yılına kadar mevcut trafoların EAŞİ ve diğer yükleri karşılayabileceği öngörülmüştür.

İleriki çalışmalarda elektrikli araçların şebekeye etkisinin sadece getirecekleri ilave yük açısından değil aynı zamanda harmonik analizi ve ekonomik etkileri gibi açılardan da değerlendirilmesi, daha yeni verilerle farklı olasılık modelleme yöntemleri ve yapay zeka teknikleri kullanılarak öngörülerde bulunulması planlanmaktadır.

Kaynaklar

[1] https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021.
[2] https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-vehicle-stock-in-the-ev3030-scenario-2018-2030.
[3] https://www.tehad.org/wp-content/uploads/2024/01/TR-2023-YILI-_-ELEKTRIKLI.jpg
[4] https://shura.org.tr/turkiye-ulastirma-sektorunun-donusumu-elektrikli-araclarin-turkiye-dagitim-sebekesine-etkileri/
[5] Koç M, Tör OB, Demirbaş Ş. Analysis the effects of electric vehicles on distribution networks with simulations based on probabilistic methods. GU J Sci Part C 2021; 9(1): 095-107.
[6] Yıldızhan D, Erenoğlu AK, Erdinç O. Elektrikli araç entegrasyonunun dağıtım sistemine etkilerinin incelenmesi ve şarj istasyonu altyapısının tayin edilmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2022 10(4), 1232 –1242.
[7] Polisetty SPR, Jayanthi R, Sai Veerraju M. An intelligent optimal charging stations placement on the grid system for the electric vehicle application. Energy 2023; 285, 129500.
[8] Li X, Wang Z, Zhang L, Sun F, Cui D, Hecht C, Figgener J, Sauer DU. Electric vehicle behavior modeling and applications in vehicle-grid integration: An overview. Energy 2023; 268, 126647
[9] Yu H, Niu S, Shang Y, Shao Z, Jia Y, Jian L. Electric vehicles integration and vehicle-to-grid operation in active distribution grids: A comprehensive review on power architectures, grid connection standards and typical applications. Renewable Sustainable Energy Rev 2022; 168, 112812.
[10] Mudaheranwa E, Sonder HB, Cipcigan L, Ugalde-Loo CE. Feasibility study and impacts mitigation with the integration of Electric Vehicles into Rwanda's power grid. Electr Power Syst Res 2023; 220, 109341.
[11] García LFP, Villarejo MB, Ortega JMM. Grid-friendly integration of electric vehicle fast charging station based on multiterminal DC link. Int J Electr Power Energy Syst 2020; 114, 105341.
[12] Wu Y, Wang Z, Huangfu Y, Ravey A, Chrenko D, Gao F. Hierarchical Operation of Electric Vehicle Charging Station in Smart Grid Integration Applications -An Overview. Int J Electr Power Energy Syst 2022; 139, 108005.
[13] Lauvergne R, Perez Y, Françon M, Tejeda Cruz AT. Integration of electric vehicles into transmission grids: A case study on generation adequacy in Europe in 2040. Appl Energy 326 (2022) 120030.
[14] Nurmuhammed M, Karadağ T. Elektrikli araç şarj istasyonlarının konumlandırılması ve enerji şebekesi üzerine etkisi konulu derleme çalışması. GU J Sci Part A 2021 8(2): 218-233.
[15] Çetin E. Elektrikli araç şarj istasyonu entegre edilen mevcut bir elektrik tesisatındaki revizyon ihtiyacının Simaris ortamında incelenmesi. Pamukkale Univ Muh Bilim Derg 2022; 28(2): 222-233.
[16] Demirtaş M, Yılmaz E, Ünal C, Küçükpehlivan T, Ağaçsapan B, Aksoy T. Elektrikli araçlar ve şarj istasyonlarının konumlandırılması GSI Journals Serie C: Advancements in Information Sciences and Technologies 2021; 4(1): 11-32.
[17] Güven AF, Akbaşak SB. Elektrikli araçlarda DA hızlı şarj ünitelerinin şebeke altyapısına etkilerinin incelenmesi. Sinop Uni J Nat Sci 2021 6(1): 42-54.
[18] Özbaltan M. Elektrikli araçların şarjı ile güç şebekesine aşırı yüklenilmesinin ayrık denetleyici sentezi ile önlenilmesi. OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2022; 5(3): 1626-1634.
[19] Gülkaya B, Ateş Y. Elektrikli taşıtların dağıtılmış üretim tabanlı şebekeler üzerindeki etkilerinin analizi ve çözüm önerileri. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2021; 9(4): 1174-1199.
[20] Ouach MK, Çam E. Investigation on the electrical vehicles effects on the electrical power grid. El-Cezerî Journal of Science and Engineering 2021; 8(1): 21-35.
[21] Mert RB, Umurkan N. Konut bölgelerinde elektrikli taşıt şarj istasyonlarının elektrik şebekesine entegrasyonunun analizi. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi 2023; 13(3): 965-980.
[22] Çakır M. T., Çakır M. F. Evaluating the effect of electric vehicle charging stations on power grids in sivas province. Politeknik Dergisi 2023; 26(3): 1215-1231.
[23] Yong C, YingDa J, Gang X, JiaJia C, DaYu Q ve XiMing Z. Load forecasting of electric vehicles based on Monte Carlo method. 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE), 25-27 December 2020, Harbin, China.
[24] Cheng J ve Liu N. Electric vehicles charging load prediction based on Monte Carlo method Publisher: IEEE. 2nd International Conference on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS) 16-18 December 2022, Nanjing, China.

[25] Liu D, Li Z, Jiang J, Cheng X ve Wu G. Electric Vehicle Load Forecast Based on Monte Carlo Algorithm. IEEE 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), 11-13 December 2020, Chongqing, China.
[26] Güneş D, Tekdemir İG, Karaarslan MŞ, Alboyacı B. Elektrikli araç şarj istasyonu yüklerinin güvenilirlik indisleri üzerine etkilerinin incelenmesi. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 2018; 33(3): 1073-1084.
[27] Huntington DE, Lyrintzis CS. Improvements to and limitations of latin hypercube sampling. Probabilistic Engineering Mechanics 1998; 13 (4): 245-253.
[28] Jahromi AJ, Mohammadi M, Afrasiabi S, Afrasiabi M, Aghaei J. Probability density function forecasting of residential electric vehicles charging profile. Applied Energy 2022; 323, 119616.
[29] https://www.togg.com.tr/content/otomobil
[30] https://gersan.com.tr/page/elektrikli-arac-sarj-istasyonu/
[31] M.G.M. Ghazal. A new extension of the modifiedWeibull distribution with applications for engineering data. Probabilistic Engineering Mechanics 2023; 74, 103523.
[32] Aljeddani SM ve Mohammed MA. An extensive mathematical approach for wind speed evaluation using inverse Weibull distribution. Alexandria Engineering Journal 2023; 76: 775-786.
[33] Xie S. Modelling auto insurance Size-of-Loss distributions using Exponentiated Weibull distribution and de-grouping methods. Expert Systems With Applications 2023; 231, 120763.
[34] https://tr.wikipedia.org/wiki/Weibull_da%C4%9F%C4%B1l%C4%B1m%C4%B1
[35] Zhang W, Liu Z, Song Y, Lu Y ve Feng Z. An investigation on implementation of generating adversarial network-based surrogate models for prediction of turbine endwall film cooling effectiveness. Engineering Applications of Artificial Intelligence 2024; 133, 108268.
[36] Pournoury M, Kim D. Optimized segmented cladding fiber for extreme large mode area using latin hypercube sampling. Optics Communications 2023; 542, 129593.
[37] Iordanis I, Koukouvinos C, Silou I. On the efficacy of conditioned and progressive Latin hypercube sampling in supervised machine learning. Applied Numerical Mathematics. Article in Press.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 37-48, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1469767

Uydu Görüntüleri Kullanarak Makine Öğrenme Yöntemleri ile Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsünün Belirlenmesi

Sevim Yasemin OTURANÇ[1*]
[1]Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye
[*1] s.y.cicekli@gmail.com

(Geliş/Received: 19/04/2024; Kabul/Accepted: 25/10/2024)

Öz: Uydu teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, arazi kullanımı ve arazi örtüsü belirlemek amacıyla uzaktan algılama teknikleri daha sık kullanılmaktadır. Nergizlik barajı önemli bir su kaynağı olup, çevresinde yerleşim alanları, tarım arazileri ve orman alanları bir arada bulunduğu için arazi örtüsünün düzenli olarak gözlemlenmesi gereklidir. Bu çalışmanın temel amacı Nergizlik Baraj Gölü çevresinde piksel tabanlı görüntü sınıflandırma yöntemleri ile sınıflama işlemi uygulayarak ve bant oranlama teknikleri kullanarak arazi kullanım ve arazi örtüsünü belirlemek, bu tekniklerin genel doğruluklarını karşılaştırmak ve çalışma alanına en uygun yöntemi tespit etmektir. Bu çalışmada Nergizlik Baraj Gölü'nün 3 Ocak 2024 tarihinde alınan Sentinel-2B uydu görüntüsü kullanılmıştır. Görüntü, kırmızı, mavi ve yeşil bantları kullanılarak, Support Vector Machines (SVM), Artificial Neural Networks (ANN) yöntemiyle piksel tabanlı sınıflandırma yöntemiyle sınıflandırılmıştır. Görüntüye Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Red Edge Index (NDRE) bant oranlama teknikleri de uygulanmıştır. Arazi kullanımı ve arazi örtüsü haritaları oluşturulmuştur. Bu çalışmada SVM %89, ANN %88, NDVI %81, NDRE %84 doğruluk sağlamıştır. Tüm yöntemler beklenen doğruluğu sağlamış olup, piksel tabanlı SVM sınıflama yönteminin diğer yöntemlere göre daha yüksek doğruluk sağladığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Destek Vektör Makineleri, Yapay Sinir Ağları, Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi, Normalize Edilmiş Fark Kırmızı Kenar İndeksi, Sentinel-2B.

Determination of Land Use and Land Cover by Machine Learning Methods Using Satellite Images

Abstract: With the development of satellite techniques, remote sensing techniques are used more frequently in remote sensing studies to determine land use and land cover. Nergizlik Reservoir is an important water source and since residential areas, agricultural lands and forest areas are located around it, regular observation of the land cover is necessary. The main purpose of this study is to determine land use and land cover around Nergizlik Reservoir by pixel-based image classification methods, band ratio techniques and to compare the general accuracy of these techniques and to determine the most appropriate method for the field of study. In this study, Sentinel-2B satellite image of Nergizlik Reservoir taken on January 3, 2024 was used. The image was classified by Support Vector Machines (SVM) and Artificial Neural Networks (ANN) pixel-based classification method using red, blue and green bands. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalized Difference Red Edge Index (NDRE) band ratio techniques were applied to the image. Land use and land cover maps were created. SVM provided 89% accuracy, ANN 88%, NDVI 81%, NDRE 84%. All methods provided the expected accuracy and the pixel-based SVM classification method provided higher accuracy than other methods.

Key words: Support Vector Machines, Artificial Neural Networks, Normalized Difference Vegetation Index, Normalized Difference Red Edge Index, Sentinel-2B.

1. Giriş

Uzaktan algılama teknolojilerindeki gelişmeler ile, Arazi Kullanımı, Arazi Kullanım Değişikliği ve Ormancılık (Land Use, Land-Use Change, and Forestry, LULUCF) haritaları oluşturmak, arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişikliklerini tespit etmek, sulak alan yönetimi, ekolojik çalışmalar ve doğal afetlerin izlenmesi için uydu tekniklerinin kullanımı yaygınlaşmıştır. Nüfus artışı ile birlikte su ve sulak alanların gözlemlenmesi ve su yönetimi büyük önem kazanmıştır. Su alanları ve çevresinde, LULUCF haritaları, gözlem ve takip açsından sınıflandırma algoritmaları ve bant oranlama teknikleri kullanılarak oluşturulabilir ve izlenebilir.

Literatürde Artificial Neural Networks (ANN), Support Vector Machines (SVM) piksel tabanlı sınıflama yöntemleri ve Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Red Edge Index (NDRE) bant oranlama teknikleri üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Pakhale ve Gupta, Karnal bölgesinde ANN ve SVM yöntemleri ile piksel tabanlı sınıflama için kullanmış, bu teknikleri obje tabanlı sınıflama yöntemi ile karşılaştırmıştır. Obje tabanlı sınıflama tekniklerinin daha yüksek genel doğruluk sağladığı tespit edilmiştir [1].

* Sorumlu yazar: s.y.cicekli@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-8140-1265

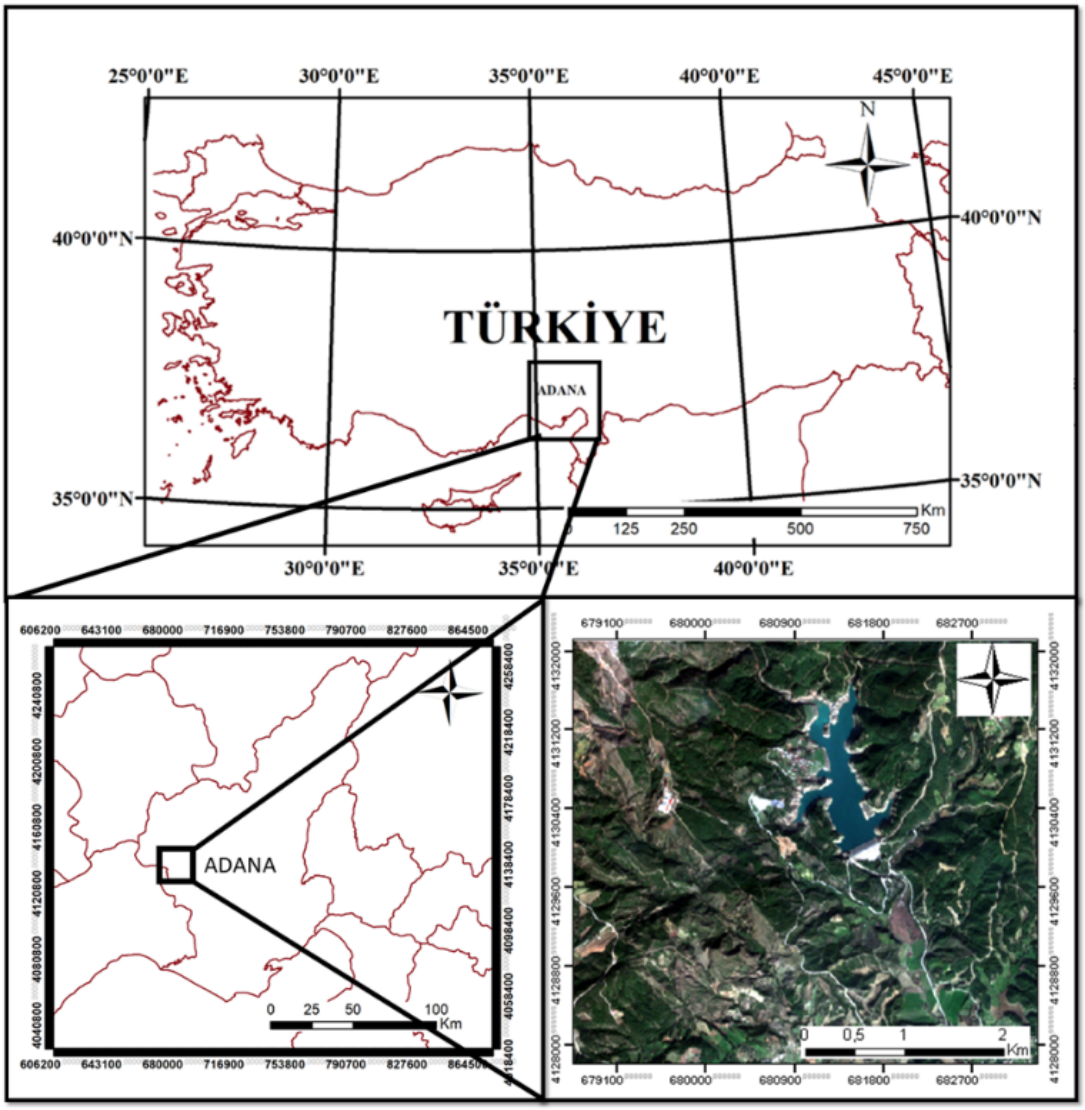
Deilmari ve ark., ANN ve Maximum Likelihood Classification (MLC) piksel tabanlı sınıflama yöntemlerinin doğruluklarını karşılaştırmış ve bu yöntemlerle Johar Malezya'da orman alanlarında değişimleri hesaplamıştır. ANN yöntemi MLC 'den daha yüksek doğruluk sağlamıştır. Her iki yöntemle de değişim miktarları tespit edilmiştir [2]. Pujari ve ark., SVM ve ANN piksel tabanlı sınıflama yöntemlerini bitki hastalıklarını sınıflamak için kullanmıştır. SVM yönteminin ANN yöntemine göre daha kullanışlı olduğu tespit edilmiştir [3]. Kuc ve Chormański, Warsaw bölgesine ait Sentinel-2 görüntüleri kullanarak Normalized Difference Built-up Index (NDBI) ve NDVI yöntemi ile şehir haritaları oluşturmuştur [4]. Özdarıcı Ok, Mersin bölgesinde GeoEye uydu görüntülerini kullanarak NDVI yöntemi ile ağaçları %65-%90 doğrulukla tespit etmiştir [5]. Ustuner ve ark., RapidEye uydu görüntülerine NDVI, Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), NDRE bant oranlama teknikleri ve SVM görüntü sınıflama yöntemi uygulamış ve ürün tipi sınıflaması yapmıştır, çalışma sonucunda NDRE yönteminin görüntü sınıflandırma doğruluğu konusunda diğer indekslere göre yüksek olduğu ve ürün sınıflandırmasında SVM yöntemi başarılı olduğu tespit edilmiştir [6]. Doğan ve Buğday, 1999-2016 yılları arasında LULUCF değişimini ANN ile tesmit etmiştir. 1999 yılı görüntüsü için %82, 2016 yılı için %84 doğruluk sağlamıştır [7]. Yuh ve ark., Random Forest (RF), ANN, SVM ve K- nearest neighbor (KNN) sınıflama yöntemlerini karşılaştırmıştır. KNN %89,7, SVM %89, ANN %84 ve RF %99 doğruluk sağlamıştır [8]. Çiçekli ve ark., Hirfanlı Baraj Gölü çevresinde LULUCF tespit etmek için ANN, SVM ve KNN kullanmıştır. ANN %94, SVM %89, KNN %88 doğruluk sağlamıştır [9]. Boiarskii ve Hasegawa, insansız hava aracı kullanılarak elde edilmiş görüntülere NDVI ve NDRE uygulamış, NDRE yönteminin bitki örtüsü tespitinde daha yüksek doğruluklu ve klorofil içeriğine daha hassas olduğunu tespit etmiştir [10]. Naguib ve Daliman, Malezya Kalentan bölgesine ait Sentinel-2A ve Landsat 8 uydu görüntülerine NDVI ve NDRE tekniklerini uygulamıştır. NDRE tekniğinin bitki örtüsü ile daha uyumlu sonuçlar verdiğini tespit etmiştir [11]. Çınar ve ark., Gölhisar, Burdur bölgesine ait Sentinel-2A görüntülerine NDVI, NDRE ve Plant Senescence Reflectance Index (PSRI) uygulayarak bitkilerde kök çürüklüğünü araştırmıştır. NDRE, %89, NDVI %87, PSRI %86 doğruluk sağlamıştır [12]. Borgogno-Mondino ve ark., nar bahçeleri üzerine yaptıkları çalışmada Sentinel-2 görüntülerine NDVI, NDRE ve Normalized Difference Water Index (NDWI) yöntemlerini uygulamış ve NDRE yönteminin daha çok bitki özelliği ayırt edebildiğini tespit etmiştir [13]. Nergizlik barajı ve çevresinde, su yapıları, yerleşim alanları, tarım arazileri ve orman alanları bir arada bulunduğu için çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bant oranlama teknikleri ve piksel tabanlı sınıflama teknikleri bir arada kullanılarak, çalışma alanına en uygun LULUCF belirleme yönteminin tespit edilmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı piksel tabanlı sınıflama yöntemleri ve bant oranlama tekniklerini bir arada kullanarak, su alanlarında ve çevresinde LULUCF belirlemek amacıyla kullanımında performanslarını araştırmak ve çalışma alanı için en uygun yöntemi tespit etmektir. Sentinel-2B görüntülerinin analizi ile Nergizlik Barajı yakınında LULUCF belirlenmesi amacıyla ANN, SVM algoritmaları ve NDVI, NDRE bant oranlama teknikleri seçilmiş, su alanı, bitki örtüsü ve diğer alanlar olmak üzere üç sınıf oluşturulmuş, bu yöntemlerin doğrulukları kontrol noktaları kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. İki farklı kontrollü sınıflama yöntemi ve iki farklı bant oranlama tekniğinin kullanılmış olması ile literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Çalışmanın "1. Giriş" bölümünde literatür çalışmalarına yer verilerek, çalışmanın temel amacı açıklanmıştır. "2. Materyal ve Metot" bölümünde, çalışma alanının konumu, kullanılan Sentinel-2B uydu görüntüsünün bantlarının ve özellikleri, çalışmada kullanılan görüntü sınıflama yöntemleri açıklanmıştır. "3. Bulgular" bölümünde, uydu görüntüsüne uygulanan ön işleme aşaması, sınıflama teknikleri kullanılarak oluşturulan sınıflama haritaları görüntüleri, her bir sınıf için hesaplanan piksel sayıları ve alanlar, belirlenen doğruluk değerleri yer almaktadır. "4. Tartışma" bölümünde, elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırılmıştır. "5. Sonuç" bölümünde çalışma sonunda elde edilen tüm sonuçlar açıklanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı

Çalışma Alanı Adana ili'nin kuzeyinde Karaisalı ilçesinde yer alan sulama ve taşkın önleme amaçlı inşa edilmiş Nergizlik Baraj Gölü ve çevresidir (Şekil 1). Adana il merkezine 58 km, Karaisalı ilçe merkezine 8 km uzaklıktadır. Nergizlik barajı ve çevresinde, yerleşim alanları, tarım arazileri ve orman alanları bir arada bulunmakta olup, hem önemli bir su kaynağı olup, hem de çevresinde bitki örtüsü bulunduğu için çalışma alanı olarak seçilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı [14][15].

2.2 Materyal

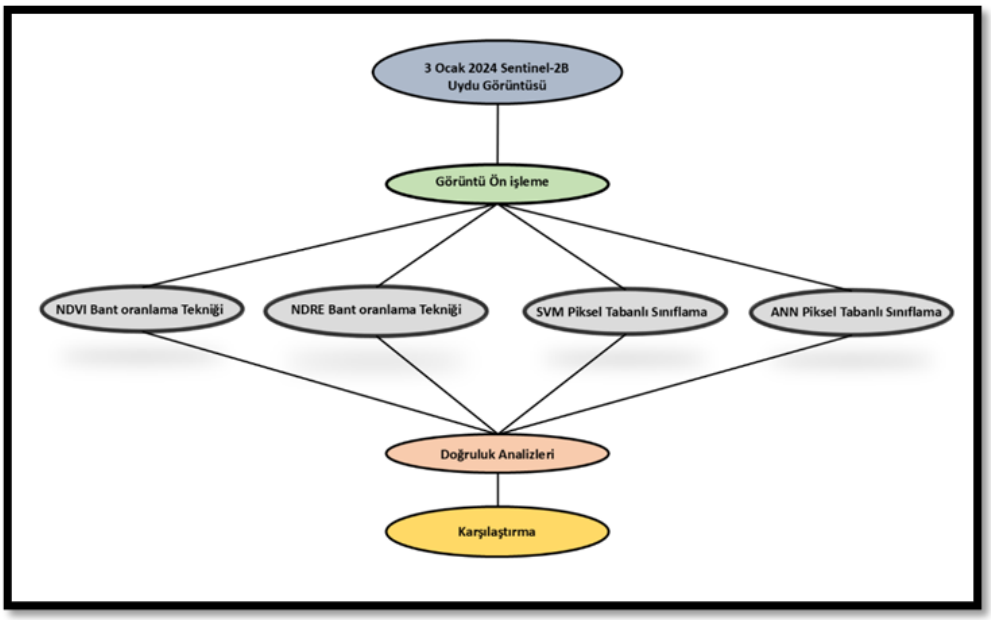
Bu çalışmada Karaisalı İlçesi Nergizlik Baraj gölü çevresine ait European Space Agency (ESA) web sayfasından temin edilen 3 Ocak 2024 tarihinde algılanmış Sentinel-2B uydu görüntüsü kullanılmıştır [14]. Uydu görüntüsü seçiminde bulutluluk durumu dikkate alınmıştır. Sentinel-2B uydusunun bantlarının özellikleri aşağıdaki gibidir (Tablo 1).

2.3 Yöntem

Sentinel-2B görüntüleri, ESA web sayfasından temin edilmiştir [14]. Kullanılan görüntüler, L1C serisi olduğundan ve atmosferik düzeltmeleri yapılmış halde sunulmuş olduğundan ön işleme aşamasında yalnızca görüntüler kesilmiştir. Ayrıca kırmızı kenar bandı 20 metre çözünürlüğe sahip olduğu için NDRE bant oranlama tekniği uygulanırken NIR bandı 20 metreye yeniden örneklenerek kullanılmıştır (Şekil 2). Yeniden örnekleme, nearest neighbor, biliner enterpolasyon ve kübik yöntemlerle yapılabilir. Optik uydu görüntülerinin bantlarının yeniden örneklenmesinde en çok kullanılan yöntem nearest neighbor yöntemidir [16]. Bu nedenle nearest neighbor yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 1. Sentinel-2 bantları ve özellikleri.

Sentinel-2 Uydu Bantları	Özellikler	
	Dalgaboyu (micrometre)	Çözünürlük(m)
Bant-1 (Kıyı Aerosol)	0,442	60
Bant-2 Mavi	0,492	10
Bant-3 Yeşil	0,559	10
Bant-4 Kırmızı	0,665	10
Bant-5 Bitki örtüsü Kırmızı Kenar	0,703	20
Bant-6 Bitki örtüsü Kırmızı Kenar	0,739	20
Bant-7 Bitki örtüsü Kırmızı Kenar	0,779	20
Bant-8 NIR	0,833	10
Bant-8A Bitki örtüsü Kırmızı Kenar	0,864	20
Bant-9 Su Buharı	0,943	60
Bant-10 SWIR Cirrus	1,376	60
Bant-11 SWIR	1,610	20
Bant-12 SWIR	2,185	20



Şekil 2. İş akış diyagramı.

Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI); bitki örtüsü tespit etmek için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir [17]. NIR ve kırmızı bantları kullanır [18-19]. NDVI, -1 ve +1 arasında değer alır [10]. Yüksek değerler sağlıklı bitki örtüsünü temsil eder. Formülü Denklem1'deki gibidir.

$$NDVI = \frac{BANT_{NIR} - BANT_{KIRMIZI}}{BANT_{NIR} + BANT_{KIRMIZI}} \quad (1)$$

Bitki örtüsü tespit etmek için Normalize Edilmiş Fark Kırmızı Kenar İndeksi (Normalized Difference Red Edge Index, NDRE) sıklıkla kullanılan bir yöntem olup, NIR ve kırmızı kenar bantları kullanır [20]. Formülü Denklem 2'deki gibidir.

$$NDRE = \frac{BANDT_{NIR} - BANT_{KIRMIZI\ KENAR}}{BANT_{NIR} + BANT_{KIRMIZI\ KENAR}} \quad (2)$$

NDRE, -1 ve +1 arasında değer alır. Yüksek değerler daha sağlıklı ve daha klorofil düzeyi yüksek bitki örtüsünü temsil eder [21].

Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines, SVM) bir öğrenme tekniğidir ve aynı zamanda kontrollü bir sınıflandırma tekniği olarak da kullanılır. Bu algoritma, veri setini, bir dizi etiketli veri örneği ile kullanılan, önceden tanımlanmış ayrı bir sayıda sınıfa ayıran bir hiper düzlem bulmayı amaçlar [22].

x∈R^N N boyutlu bir uzay ve y∈{-1+1} olduğu için veri kümeleri {x_i y_i } (i=1,…..k)'dir. X, hiper düzlemde bir nokta olduğundan, bu hiper düzlem Denklem 3'de tanımlanmıştır.

$$w \times x_i + b = 0 \quad (3)$$

İki sınıf için ayırıcı bir hiper düzlem tanımlanması Denklem 4 ve Denklem 5'de sunulmuştur.

$$y = 1\ için\ \ w \times x_i + b \geq 1 \quad (4)$$
$$y = -1\ için\ w \times x_i + b \leq 1 \quad (5)$$

Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks, ANN) karmaşık ortamlarda tahmin etme ve tahmin için yararlı olan matematiksel modelleme araçlarıdır [23]. ANN'nın temel bileşeni nörondur [24].

x1,x2,x3....xn girdiler, w1,w2,w3....wn bu girdilerin ağırlıklarıdır. Ağırlıklar girdilerin hücre üzerindeki etkisini belirler. Toplama fonksiyonu hücreye giren net girdiyi hesaplar (Denklem 6) [25].

$$Net\ Veri = \sum x_i\, w_i \quad (6)$$

ANN, üç ana bölümden oluşur: Giriş katmanı dışarıdan gelen verileri alır ve gizli katmana aktarır. Gizli katman, giriş katmanından gelen verileri ağırlıkla çarparak verileri çıkış katmanına aktarır. Bundan sonra çıktı katmanı sonucu gönderir [25].

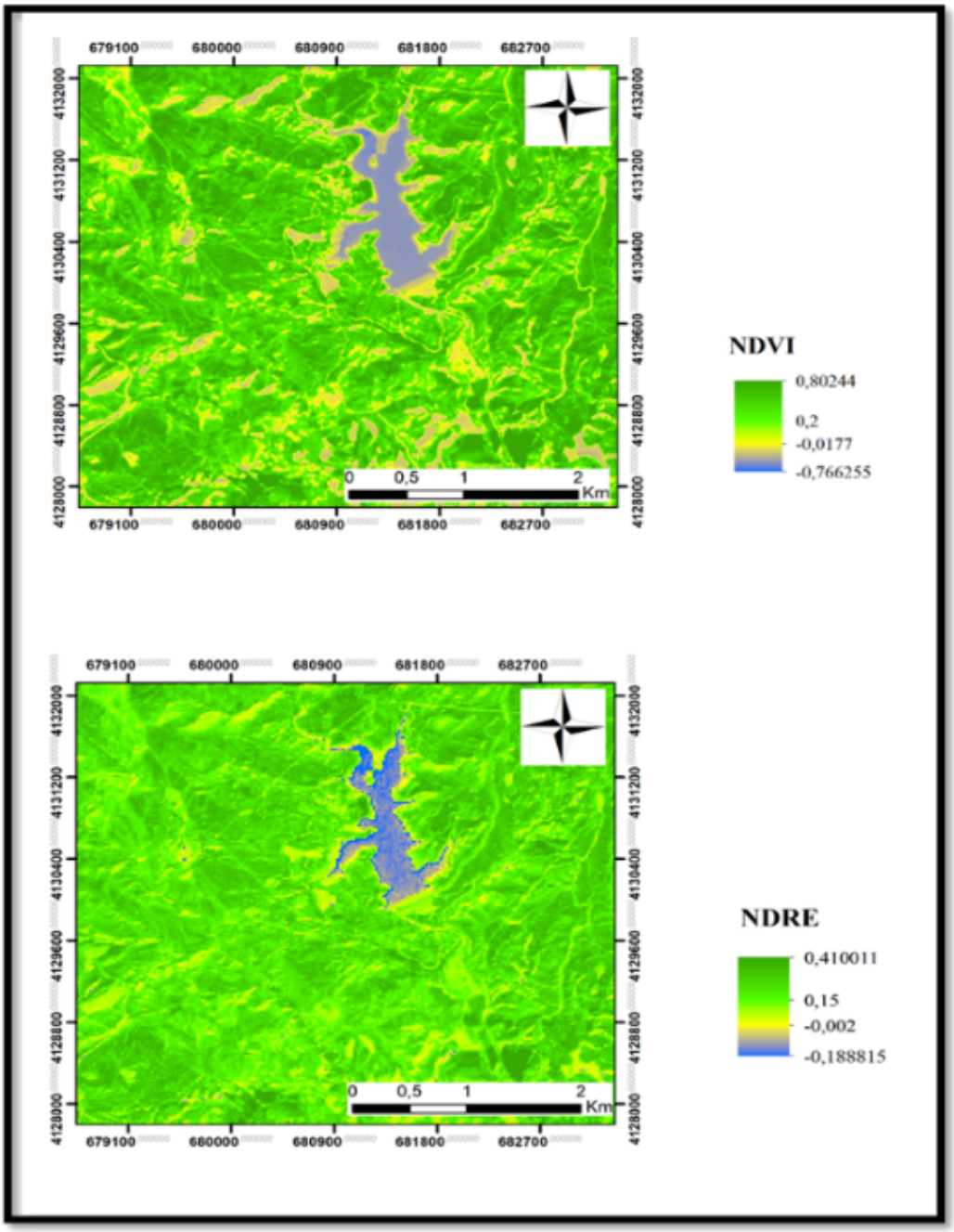
Otsu yöntemi, bir görüntü için gri seviyeleri kullanarak sınıf içi varyanslar ile eşik değerini otomatik olarak belirleyen bir tekniktir [26]. Çalışmada NDRE ve NDVI uygulanmış görüntülerin sınıflarının eşik değerlerinin tespit edilmesinde kullanılmıştır.

10 metre çözünürlüğe sahip kırmızı ve NIR bantları kullanılarak NDVI bant oranlama tekniği ve 20 metre çözünürlüğe sahip kımızı kenar bandı (Bant 5) ve 20 metreye yeniden örneklenmiş NIR kullanılarak NDRE uygulanmıştır (Şekil 3).

10 metre çözünürlüğe sahip kırmızı, yeşil ve mavi bantlar kullanılarak, uygulanan SVM yönteminde, Kernel radyal tabanlı fonksiyon kullanılarak eşik değeri 0, gamma değeri 0,333 seçilmiştir. Üç sınıf oluşturulmuştur (Şekil 5). 10 metre çözünürlüğe sahip kırmızı, yeşil ve mavi bantlar kullanılarak, ANN yöntemi uygulanırken bir adet gizli katman kullanılmış ve 100 iterasyon ile sınıflama işlemi gerçekleşmiştir (Şekil 5). Çalışma alanında 100 adet kontrol noktası random olarak seçilmiştir (Şekil 6). Arazi üzerinde yapılan gözlemler ve Google Earth Engine [27] yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Nokta sayısı literatürdeki çalışmalara göre tespit edilmiştir. Makineci ve Akosman [28] kontrollü sınıflandırma tekniklerinin doğruluk analizi için rastgele üretilmiş 100 nokta kullanmıştır. Çiçekli [29] nesne tabanlı sınıflama tekniğinin doğruluk analizi için arazi üzerinde 300 nokta üretip, bu noktaların %30 unu test verisi olarak kullanmıştır.

3. Bulgular

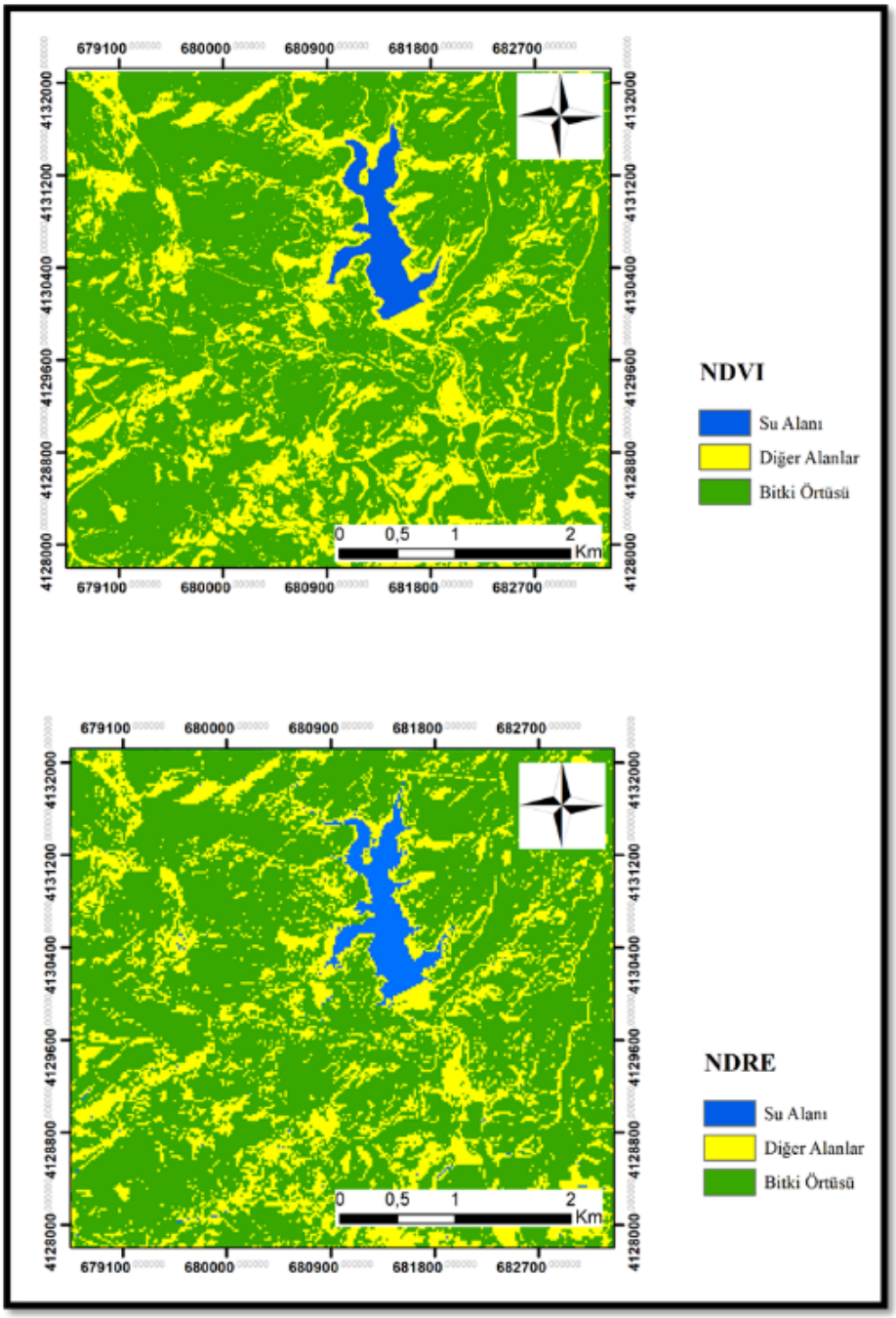
Bant 4 ve Bant 8 kullanılarak elde edilen NDVI, Bant 5 ve Bant 8 kullanılarak elde edilen NDRE haritaları Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. NDVI görüntüsü ve NDRE görüntüsü.

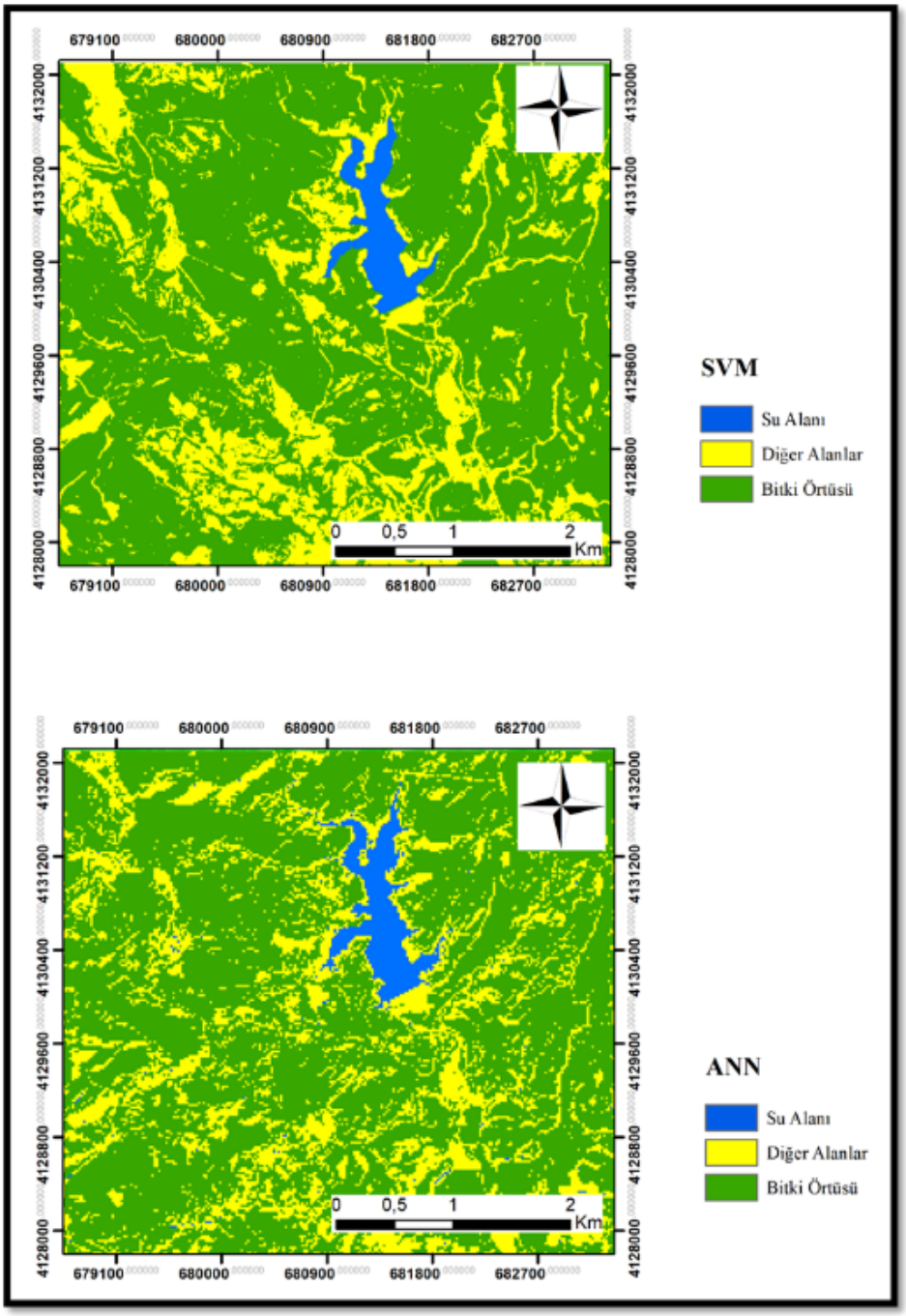
NDVI haritasında en düşük değer -0,766255, en yüksek değer 0,80244 olmuştur. NDVI değerleri, 0,80244' e yaklaştıkça yoğun ve sağlıklı bitki örtüsünü temsil etmektedir. NDRE haritasında en düşük değer -0,188815, en yüksek değer 0,410011 olmuştur. NDRE değerleri, 0,410011' e yaklaştıkça yoğun ve sağlıklı bitki örtüsünü temsil etmektedir (Şekil 3).

NDVI ve NDRE sınıflarını belirlemek için eşik değerleri Otsu yöntemi ile tespit edilmiştir. Eşik değerleri NDVI yöntemi için -0,0177 ve 0,2; NDRE yöntemi için-0,002 ve 0,15 olarak belirlenerek NDVI ve NDRE sınıfları oluşturulmuştur (Şekil 4).



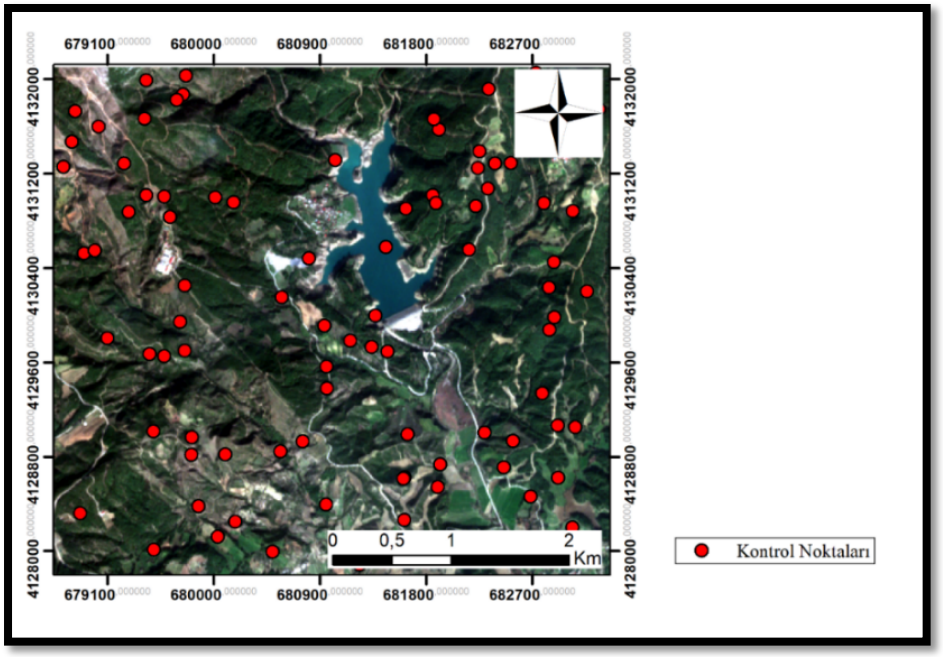
Şekil 4. NDVI ve NDRE sınıfları.

Bant 2, Bant 3 ve Bant 4 kullanılarak ANN ve SVM uygulanmış görüntüler Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. ANN ve SVM sınıfları.

100 adet kontrol noktası ile oluşturulmuş hata matrisleri üzerinden yapılan doğruluk analizleri Tablo 2'de sunulmuştur.



Şekil 6. Kontrol noktaları.

Tablo 2. Genel doğruluklar ve kappa değerleri.

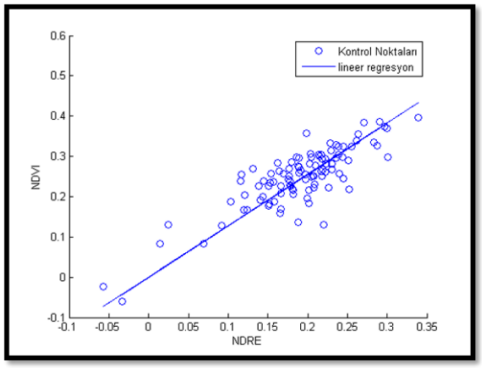
Yöntem	Genel doğruluk	Kappa değeri
NDVI	%81	0,51
NDRE	%84	0,61
ANN	%88	0,71
SVM	%89	0,73

Uygulanan bant oranlama teknikleri ve piksel tabanlı sınıflama yöntemlerinin hesaplanan genel doğrulukları incelendiğinde, en yüksek doğruluğu SVM yönteminin sağladığı görülmektedir. Hesaplanan kappa değerleri, genel doğruluk değerleri ile uyumludur. Her bir yöntem için hesaplanan sınıfların piksel sayıları ve alanlar Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Sınıfların piksel sayıları ve alanlar.

Yöntem	Su Alanı		Boş Alanlar ve Yerleşim Alanları		Bitki Örtüsü	
	Piksel Sayısı	Alan (km²)	Piksel Sayısı	Alan (km²)	Piksel Sayısı	Alan (km²)
NDVI	5411	0,54	60292	6,03	154689	15,4
NDRE	1598	0,6	15612	6,2	38125	15,2
ANN	5470	0,54	69890	6,98	145037	14,5
SVM	4949	0,49	58431	5,84	157017	15,7

Doğruluk analizi için kullanılan 100 adet kontrol noktasının dağılım grafiği ve lineer regresyon doğrusu üretilmiştir. NDVI ve NDRE değerleri birbiri ile uyumlu olup korelasyon katsayısı (R) 0,837'dir (Şekil 7).

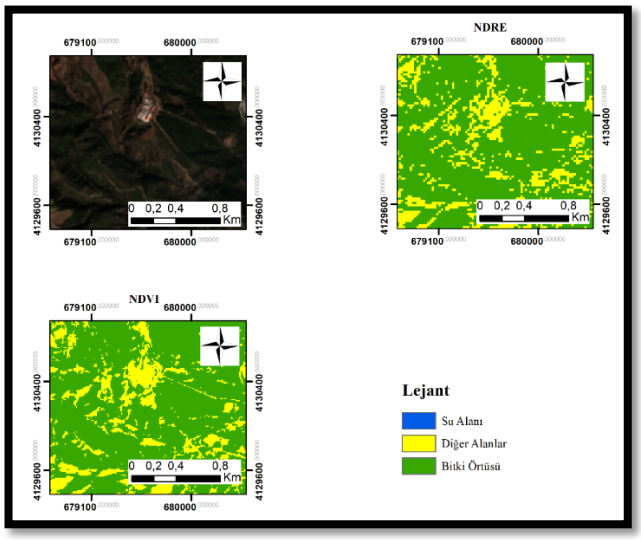


Şekil 7. Kontrol noktalarının NDVI ve NDRE dağılım grafiği.

4. Tartışma

NDRE, NDVI yönteminden farklı olarak kırmızı bant yerine Kırmızı kenar bandını kullanmakta olup, kırmızı kenar bandı bitkilerdeki klorofile karşı daha duyarlıdır. Bu nedenle NDRE yöntemi, NDVI yöntemine göre daha yüksek doğruluk vermiştir. Bu durum literatürdeki çalışmalarla uyum sağlamaktadır [6-10-11-12-13]. Çınar ve ark. Sentinel-2A uydu görüntülerine farklı bitki örtüsü indeksleri uygulayarak, bitkiler üzerindeki hastalıkları araştırmıştır. NDRE yönteminin %89 ile en yüksek doğruluğu verdiğini, NDVI ve PSRI yönteminin yüksek doğruluk sağlayanlar yöntemler olduğunu tespit etmiştir [12]. Zhang ve ark. pirinç ekili alanlarda erken ve orta büyüme evresinde verim tahmini çalışmasında NDRE, NDVI indekslerinin kullanımını karşılaştırmıştır ve NDRE yönteminin, diğer yöntemlere göre daha uygun olduğunu tespit etmiştir [30]. Barboza ve ark. fasulye bitkisi yetişme aşamalarında yeşil biyokütleyi araştırmak için NDVI ve NDRE indekslerini kullanmış, NDVI yönteminin NDRE yönteminden daha yüksek doğruluk verdiğini tespit etmiştir [31]. Literatürde NDVI tekniğinin, NDRE tekniğinden daha yüksek doğruluk verdiği çalışmalar da bulunmaktadır [31]. Bu durum çalışma alanına uygun yöntem seçiminin önemini göstermekte olup, çalışma alanı için NDRE yöntemi, NDVI yöntemine göre daha uygundur.

Kullanılan tüm teknikler yüksek doğruluk sağlamasına rağmen çalışmada kullanılan kırmızı kenar bandı, 20 metre çözünürlüğe sahip olduğu için, NDRE yöntemi kullanılırken NIR bandı da 20 metreye yeniden örneklenerek kullanılmıştır. NDRE görüntüsünün 20 metre çözünürlükle üretilmiş olması bir dezavantajdır. Bu durum çalışma alanı içerisinde bitki örtüsü içeren ve bitki örtüsünden yoksun alanları bir arada bulunduran bir alan seçilerek Şekil 8'de açıklanmıştır. NDRE tekniği, NDVI yönteminden daha yüksek doğruluk sağlamış olmasına rağmen, NDRE görüntüsünün daha düşük bir çözünürlüğe sahip olduğu ve çalışma alanına dair detayları daha az bilgi verdiği görülmektedir.



Şekil 8. Çalışma alanı içerisinde NDVI ve NDRE örneği.

ANN ve SVM piksel tabanlı sınıflama yöntemleri literatürde yer alan çalışmalarda olduğu gibi NDVI ve NDRE bant oranlama tekniklerine göre daha yüksek doğruluk sağlamıştır [6]. SVM ve ANN piksel tabanlı sınıflandırma yöntemlerinin doğrulukları birbirine çok yakındır. En yüksek doğruluğu SVM yöntemi sağlamıştır. Literatürde SVM yönteminin ANN yönteminden daha yüksek doğruluk sağladığı [3-8] çalışmalar yer almaktadır. Khurana ve Gupta, Hindistan'da Sentinel-2A görüntülerine SVM, ANN ve MLC piksel tabanlı sınıflama yöntemleri uygulayarak arazi örtüsünü araştırmıştır. En yüksek doğruluğu SVM yöntemin sağladığı belirlenmiştir. SVM yöntemi %98,1 doğruluk, ANN yöntemi %95,6 ve MLC yöntemi %96,5 genel doğruluk sağlamıştır [32]. Soni ve ark., Delhi bölgesinde Sentinel-2 görüntülerine SVM, ANN ve MLC uygulayarak yerleşim alanlarında arazi örtüsünü tespit etmiş ve yöntemlerin doğruluğunu araştırmıştır. Tüm yöntemlerin %90'ın üzerinde genel doğrulukla arazi örtüsünü tespit ettiğini ve en yüksek doğruluğu %98,05 ile SVM yönteminin sağladığını tespit etmiştir [33]. Ayrıca literatürde ANN yönteminin SVM yönteminden daha yüksek doğruluk sağladığı [9] çalışmalar da yer almaktadır. Bu durum çalışma alanına uygun yöntem seçiminin gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Çalışma alanı için en uygun yöntemin SVM kontrollü sınıflama yöntemi olduğu tespit edilmiştir.

Nergizlik Baraj Gölü, bölgedeki sulama faaliyetleri açısından önemli bir konumda olduğundan düzenli olarak gözlemlenmesi gereken bir su kaynağıdır. Seyhan Sağ Sahil Sulama Birliği, Nergizlik Barajı sulamasında temizlik çalışmalarını gerçekleştirmektedir [34]. Baraj Gölünün su seviyesinin tespiti [35] ve barajın jeoteknik olarak incelenmesi [36] literatürdeki çalışmalara konu olmuştur. Ancak literatürde baraj gölünün çevresine ait Sentinel-2 uydu görüntülerini kullanılarak LULUCF tespit eden bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma ile bölgeye ait LULUCF tespit etmek ve ilerleyen zamanlarda LULUCF değişiminin analizini gerçekleştirmek için en uygun yöntemin SVM yöntemi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

5. Sonuç

Bu çalışmada, Sentinel-2B uydu verileri kullanılarak Nergizlik Baraj Gölü ve çevresinde LULUCF'nin belirlenmesi için piksel tabanlı (SVM, ANN) sınıflandırma yöntemleri ve NDVI, NDRE bant oranlama teknikleri kullanılmış, bu yöntemlerin doğruluk analizi yapılmıştır.

SVM ve ANN sonuçları birbirine yakın çıkmış olup, en yüksek doğruluğu SVM piksek tabanlı sınıflama tekniği olmuştur. NDVI yöntemi beklenen doğruluğu karşılaşmış ancak en düşük doğruluğu sağlayan teknik olmuştur. NDRE klorofile daha duyarlı olduğu için NDVI yöntemine göre daha yüksek doğruluk sağlamıştır.

Doğruluk sonuçları göz önüne alındığında, tüm teknikler tatmin edici sonuçlar sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, su alanları ve çevresinde LULUCF çalışmalarında hem piksel tabanlı sınıflandırma yöntemlerinin hem de bant oranlama yöntemlerinin yüksek doğruluk sağladığını, çalışma alanına en uygun LULUCF belirleme yönteminin SVM piksel tabanlı sınıflama yöntemi olduğunu göstermektedir.

Sonraki çalışmalarda çalışma alanına ait arazi örtüsünün mevsimsel değişimin incelenmesi hedeflenmektedir.

Teşekkür

S.Y.O., fikir sahibi olup deneyleri gerçekleştirdi, sonuçları yorumladı ve makaleyi yazdı.

Kaynaklar

[1] Pakhale GK, Gupta PK. Comparison of advanced pixel based (ANN and SVM) and object-oriented classification approaches using landsat-7 Etm+ data. Int J Eng Technol 2010; 2(4): 245-251.

[2] Deilmai BR, Kanniah KD, Rasib AW, Ariffin A. Comparison of pixel-based and artificial neural networks classification methods for detecting forest cover changes in Malaysia. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2014.

[3] Pujari D, Yakkundimath R, Byadgi AS. SVM and ANN based classification of plant diseases using feature reduction technique. Int J Interact Multimed Artif Intell 2016;3(7): 6-14.

[4] Kuc G, Chormański J. Sentinel-2 imagery for mapping and monitoring imperviousness in urban areas. Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci 2019; 42: 43-47.

[5] Özdarıcı OA. Yüksek Mekânsal çözünürlüklü uydu görüntülerinden otomatik ağaç tespiti: yeni bir yaklaşım. 5. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu, İstanbul, Türkiye, 2014.

[6] Ustuner M, Sanli FB., Abdikan S, Esetlili MT, Kurucu Y. Crop type classification using vegetation indices of rapideye imagery. Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci 2014; 40: 195-198.

[7] Doğan S, Buğday E. Modeling of temporal and spatial changes of land cover and land use by artificial neural networks: Kastamonu sample. Bartın Orman Fak Derg 2023; 20(3): 653-663.

[8] Yuh YG, Tracz W, Matthews HD, Turner SE. Application of machine learning approaches for land cover monitoring in northern Cameroon. Ecol Inf 2023; 74: 1-15.

[9] Çiçekli SY, Sekertekin A, Arslan N, Donmez C. Comparison of pixel and object-based classification methods in Wetlands using sentinel-2 Data. In 3rd International Mediterranean Science and Engineering Congress, 2018. pp. 298-302.

[10] Boiarskii B, Hasegawa, H. Comparison of NDVI and NDRE indices to detect differences in vegetation and chlorophyll content. J Mech Contin Math Sci 2019; 4: 20-29.
[11] Naguib NS, Daliman S. Analysis of NDVI and NDRE indices using satellite images for crop identification at Kelantan. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2022, 1102: 1-7.
[12] Çınar T, Beram RC, Aydın A, Akyol S, Tashigul N, Lehtijärvi HT, Woodward S. Detection of heterobasidion root rot on pinus brutia ten. using different vegetation indices generated from Sentinel-2 A satellite imagery. J Indian Soc Remote Sens 2024; 52: 1805–1817.
[13] Borgogno-Mondino E, Farbo A, Novello V and Palma LD. A fast regression-based approach to map water status of pomegranate orchards with Sentinel 2 data. Horticulturae 2022; 8(9); 759:1-17.
[14] ESA. https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home/ Accessed 20 March 2024.
[15] T.C. Milli Savunma Bakanlığı Harita Genel Müdürlüğü. https://www.harita.gov.tr/urunler/ Accessed 07 June 2024.
[16] Bayram B, Ustuner M. Yeniden Örneklemenin Sınıflandırma Sonucuna Etkisi. Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği VII. Teknik Sempozyumu, 2013. pp. 1-4.
[17] Pettorelli N, Ryan, S, Mueller T, Bunnefeld N, Jędrzejewska B, Lima M, Kausrud K. The normalized difference vegetation index (NDVI): unforeseen successes in animal ecology. Clim Res 2011; 46(1): 15-27.
[18] Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW, Harlan JC. Monitoring the vernal advancements and retrogradation (greenwave effect) of nature vegetation; NASA/GSFC Final Report; NASA: Greenbelt, MD, USA,1974.
[19] Tucker CJ. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sens Environ 1979; 8(2): 127-150.
[20] Barnes, EM, Clarke TR, Richards SE, Colaizzi PD, Haberland J, Kostrzewski M, Waller P, Choi C, Riley E, Thompson T, Lascano RJ, Li H, Moran MS. Coincident Detection of Crop Water Stress, Nitrogen Status and Canopy Density Using Ground Based Multi- Spectral Data. 5th International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, MN, USA,2000
[21] Gündoğdu KS, Bantchina BB. Landsat uydu görüntülerinden NDVI değer dağılımının parsel bazlı değerlendirilmesi, Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi çiftlik arazisi örneği. Bursa Uludağ Üniv Ziraat Fak Derg 2018, 32(2): 45-53.
[22] Mountrakis G, Im J, Ogole C. Support vector machines in remote sensing: A review. ISPRS J Photogramm Remote Sens 2011; 66: 247–259.
[23] Hamed MM, Khalafallah MG, Hassanien EA. Prediction of wastewater treatment plant performance using artificial neural networks. Environ Modell Software 2004; 19(10): 919-928.
[24] Nasr MS, Moustafa MA, A.-Seif H, El Kobrosy G. Application of Artificial Neural Network (ANN) for the prediction of EL-AGAMY wastewater treatment plant performance-EGYPT. Alexandria Eng J 2012; 51(1):37-43.
[25] Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Macmillan College Publishing Company,1994.
[26] Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. IEEE Trans. Syst. Man. Cybern 1979; 9: 62–66.
[27] Google LLC. Google Earth Engine (Computer software) https://earthengine.google.com/ Accessed 06.05.2024.
[28] Makineci HB, Akosman EN. Sentinel-2A verileriyle Trabzon İli 2019-2020 yılları arasında ortaya çıkan sınıflandırma farklarının çeşitli algoritmalarla değerlendirilmesi. Türkiye Uzaktan Algılama Derg 2023; 5(2): 78–88.
[29] Çiçekli SY. Otomatize edilmiş nesne tabanlı arazi örtüsü sınıflandırma modeli: Aşağı Seyhan Ovası örneği. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2022.
[30] Zhang K, Ge X, Shen P, Li W, Liu X, Cao Q, Zhu Y, Cao W, Tian, Y. Predicting rice grain yield based on dynamic changes in vegetation indexes during early to mid-growth stages. Remote Sens 2019; 11(4); 387: 1-24.
[31] Barboza TOC, Ardigueri M, Souza GFC, Ferraz MAJ, Gaudencio JRF, Santos AFD. Performance of vegetation indices to estimate green biomass accumulation in Common Bean. AgriEngineering 2023; 5(2):840-854.
[32] Khurana Y, Gupta S. LCLU Classification using SVM, MLC and ANN of multispectral imagery from Sentinel-2. Int J Eng Res Tech (IJERT) 2022;11(10):1-8.
[33] Soni PK, Rajpal N, Mehta R, Mishra VK. Urban land cover and land use classification using multispectral sentinal-2 imagery. Multimedia Tools Appl 2022; 81(26): 36853-36867.
[34] T.C. Seyhan Sağ Sahil Sulama Birliği. https://seyhansagsahilsulama.gov.tr/proje/karaisali-nergizlik-baraji-sulamasinda-temizlik-calismalari/ Accessed 05 October 2024.
[35] Akgül MA, Çetin M. Baraj gölü su kotunun Landsat 8 uydu görüntüleri kullanılarak tahmin edilmesi. DÜMF Mühendislik Derg 2018; 9(1): 493-502.
[36] Kılıç M, Çetin H. Nergizlik Barajı (Adana) kil çekirdek malzemesinin jeoteknik incelemesi. Ç.Ü Fen ve Mühendislik Bilimleri Derg 2011; 26(3): 118-128.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 49-60, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1464418

Development of Numerical Models to Predict the Compressive Strength of High Strength Concretes Based on Maturity Method

Tuba DEMİR[1*], Kürşat Esat ALYAMAÇ[2]
[1] Civil Engineering, Faculty of Technology, Fırat University, Elazig, Türkiye
[2] Civil Engineering, Faculty of Engineering, Fırat University, Elazig, Türkiye
[*1] t.demir@firat.edu.tr, [2] kealyamac@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 03/04/2024; Kabul/Accepted: 04/10/2024)

Abstract: The aim of this study was to develop numerical models to predict the compressive strength of HSCs using Nurse-Saul and Arrhenius (NS-Arr) maturity functions. For this purpose, 9 concrete series with different concrete mix ratios of 400-450-500 kg/m3 binder dosage were produced. Silica fume was used instead of cement at the rate of 5-10-15% by volume and marble powder was used instead of fine aggregate at the rate of 8-10-12% by volume. While the specimens were kept in standard water curing, the temperature values were measured every 5 minutes at the end of the 1st, 3rd, 7th, 14th and 28th days to be used in the maturity test and the results were transferred to the computer. The compressive strength test was also performed in the same time periods. The data obtained from the test results were analyzed and a separate numerical model was developed for each maturity function applied. In addition, with the use of these models, it is thought that concrete compressive strength will be predicted with high accuracy in a short time, the project-work plan will be carried out without loss of time and environmental sustainability will be contributed.

Key words: High strength concrete, compressive strength, maturity, silica fume, marble powder.

Yüksek Dayanımlı Betonların Basınç Dayanımını Olgunluk Yöntemi Tabanlı Tahmin Eden Sayısal Modellerin Geliştirilmesi

Öz: Bu çalışmanın amacı, Nurse-Saul ve Arrhenius (NS-Arr) olgunluk fonksiyonlarını kullanarak yüksek dayanımlı beton (YDB)'lerin basınç dayanımını tahmin etmek için sayısal modeller geliştirmektir. Bu amaçla, 400-450-500 kg/m^3 dozajlı farklı beton karışım oranlarına sahip 9 beton serisi üretilmiştir. Çimento yerine hacimce %5-10-15 oranında silis dumanı ve ince agrega yerine hacimce %8-10-12 oranında mermer tozu kullanılmıştır. Numuneler standart kürde bekletilirken, olgunluk testinde kullanılmak üzere 1., 3., 7., 14. ve 28. günlerin sonunda her 5 dakikada bir sıcaklık değerleri ölçülmüş ve sonuçlar bilgisayara aktarılmıştır. Basınç dayanımı testi de aynı zaman dilimlerinde gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarından elde edilen veriler analiz edilmiş ve uygulanan her olgunluk fonksiyonu için ayrı bir sayısal model geliştirilmiştir. Ayrıca bu modellerin kullanımı ile beton basınç dayanımının kısa sürede yüksek doğrulukla tahmin edileceği, proje-iş planının zaman kaybı olmadan yürütüleceği ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Yüksek dayanımlı beton, basınç dayanımı, olgunluk, silis dumanı, mermer tozu.

1. Introduction

In the concrete industry, determining the compressive strength at the construction site with non-destructive tests is of great importance in terms of knowing the project durations. For example, in order to remove the moulding as soon as possible after pouring the concrete in place, it is of great benefit to take advantage of knowing the strength gain time of the concrete depending on the temperature increase in the concrete. The maturity method, which is one of the non-destructive testing methods, is also a method that helps the progress of constructions to be made safely. This method provides a simple approach to the determination of concrete compressive strength [1, 2]. The maturity method is related to the temperature sensitivity of early strength development and there is no single maturity function applicable to all concrete mixes. The applicable maturity function for a given concrete can be obtained by measuring the variation of the rate constant with the curing temperature [1].

Numerous studies and standards recommend the evaluation of the initial strength development of concrete according to the temperature history of the sample using the maturity method [3]. The maturity curves available in different concrete mixtures, developed based on the temperature increase, are used to estimate the early age strength of concrete [4,5]. In other words, this approach is based on the correlation between the compressive strength of cement, which is directly related to the internal temperature, and the rate of hydration [6]. Frequently

* Corresponding author: t.demir@firat.edu.tr. ORCID Information: [1] 0000-0003-2092-1029, [2] 0000-0002-3226-4073,

used functions to calculate the maturity index of concrete from the measured temperature history are described in ASTM C1074 [5]. ASTM C1074 includes two different maturity functions: The first is the Nurse-Saul equation, which estimates the compressive strength of concrete depending on the temperature change [7]. The second one is the Arrhenius (Freiesleben Hansen and Pedersen) equation developed depending on the activation energy [8]. Apart from these equations, different maturity equations have also been proposed, but they are not explained in detail due to the lack of in-depth analysis of their reliability and limitations [9].

Although the maturity method is generally used in conventional concretes, no study has been found in the literature regarding its use in high strength concrete (HSCs). In this study, the applicability of maturity functions in determining the compressive strength of HSCs was investigated and numerical models were developed to predict concrete compressive strength. HSCs are special types of concrete with low water/cement (W/C) ratio, extremely durable and advanced mechanical properties [9,10]. Many HSC applications in the United States, Germany, Canada, France and Turkey have demonstrated the advantages of this concrete type [11,12]. Determining the project duration is one of the most important conditions when constructing these high-strength structures. It is very important that the project is completed in the targeted time before the start of production. When the project period is exceeded, significant additional costs come and financial problems are experienced. One of the most important issues affecting this period is the duration of the concrete to gain strength. The speed of the project depends on the demoulding removal and moulding advancement speed. The parameter that directly affects this speed is the concrete compressive strength. Methods for determining the compressive strength of concrete are explained in the standards of many countries such as European Standard, ACI and TSE [13, 14]. These methods are destructive test (DT) and non-destructive test methods (NDT) [15]. Evaluation with the coring method in the DT method is quite expensive and time consuming. It is also difficult and impractical in some cases [16]. The application of the NDT method provides many conveniences in terms of time, cost and labor. The NDT method provides the opportunity to evaluate the durability, homogeneity and internal structure of the concrete as well as the strength property of the concrete [17,18,19].

Real-time evaluation of concrete compressive strength by maturity method, which is one of the non-destructive test methods, is of great importance for the construction industry. The maturity method provides a simple and applicable approach to evaluate the compressive strength of concrete. Although this method is currently used in conventional concretes, no study has been found in the literature regarding its application in HSCs. The aim of this study is to develop numerical models that predict the compressive strength of concrete using Nurse-Saul and Arrhenius (NS-Arr) maturity functions for HSCs. Accordingly, 9 concrete series with different concrete mixing ratios with cement dosage of 400-450-500 kg/m^3 were prepared. In the prepared concrete mixtures, silica fume was used by replacing the cement at 5-10-15% by volume, and marble powder by replacing 8-10-12% by volume with fine aggregate. The produced samples were kept in the standard cure. According to the C1074 standard, the temperature values were measured every 5 minutes at the end of the 1st, 3rd, 7th, 14th and 28th days for the maturity test and the results were transferred to the computer [20]. A multi-channel temperature measuring device was used for temperature measurement. Compressive strength test was also applied in the same time periods. The data obtained from the test results were analyzed and a separate numerical model was developed for each maturity function applied. As a result, by estimating the compressive strength of concrete with high accuracy with the obtained numerical models, it was ensured that the production times were determined during the design phase and accurate determinations were made during the manufacturing phase in special projects using HSC. In Figure 1, the experimental procedure is presented schematically.

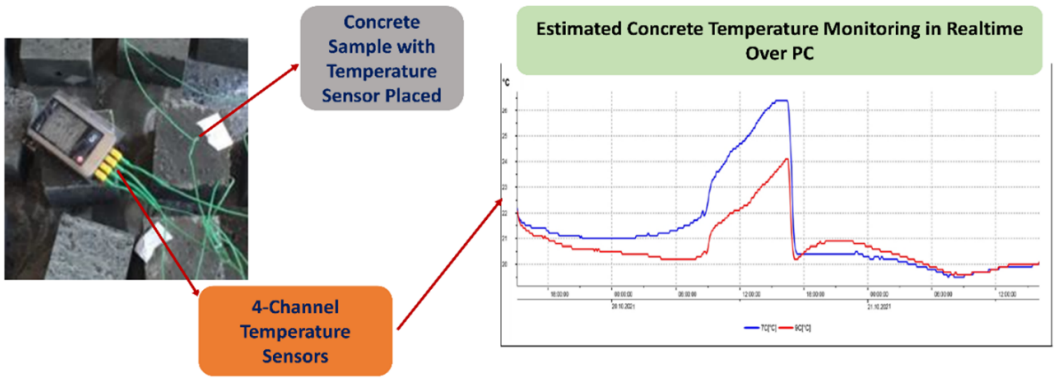


Figure 1. Experiment Procedure.

2. Materials and Methods

Within the scope of the study, CEM I 42.5 R portland cement produced in accordance with TS EN 197-1 standards and supplied from the Elazig Seza cement factory was used as the binder in the production of HSC [21]. Andesite aggregate, silica fume from Antalya Eti metallurgy and marble powder from Elazig organized industrial zone were used. The physical and chemical properties of the HSC components are presented in Table 1.

Table 1. Physical and chemical properties of using materials (%).

Chemical Properties	**Cement (C)**	**Silica Fume (SF)**	**Marble Powder (MP)**
CaO	63.19	0.40	40.45
SiO_2	19.07	94.10	28.35
Fe_2O_3	3.72	1.50	9.70
Al_2O_3	4.82	0.90	0.17
SiO_3	2.94	94.10	0.02
Na_2O	0.39	0.40	0.05
K_2O	0.62	0.90	0.01
MgO	1.83	0.10	16.25
Cl	0.0101	-	-
Insoluble residue	0.56	-	-
Loss of ignition	3.43	-	4.84
Physical Properties			
Specific surface cm^2/g	3838		3920
Specific gravity g/cm^3	3.13	2.20	2.71
Initial setting time (min)	135	-	-
Final setting time(min)	215	-	-
Total volume exp. (mm)	1	-	-

The suitability of andesite aggregate for use in HSC was determined by performing aggregate tests at the first stage (Table 2) [22]. Andesite aggregate is a material containing 52-63% quartz [23]. It is suitable for use in high-strength concretes due to its dark-colored, non-water-absorbing, water-dispersible and dense texture [24]. The maximum aggregate particle diameter used in the experimental study was 16 mm, and the aggregates were divided into 4 different groups as 0-2 mm, 2-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm (Table 3). Sieve analysis graph of the aggregate is presented in Figure 2.

Table 2. Los Angeles experiment results.

Number of marbles	Interval class	Load of marbles	Initial Weight	Weight after 500 cycles	Weight loss after 500 cycles
12	8-16 mm	5030 gr	5000 gr	4569.5	430.5
Aggregate Abrasion Resistance = L_A = 8.61					

Table 3. Mixing ratios of aggregate used (Saturated dry surface, gr/cm^3.

Aggregate size	Andesite	Mixing ratio (%)
0-2 mm	2.74	30
2-4 mm	2.71	20
4-8 mm	2.69	20
8-16 mm	2.69	30

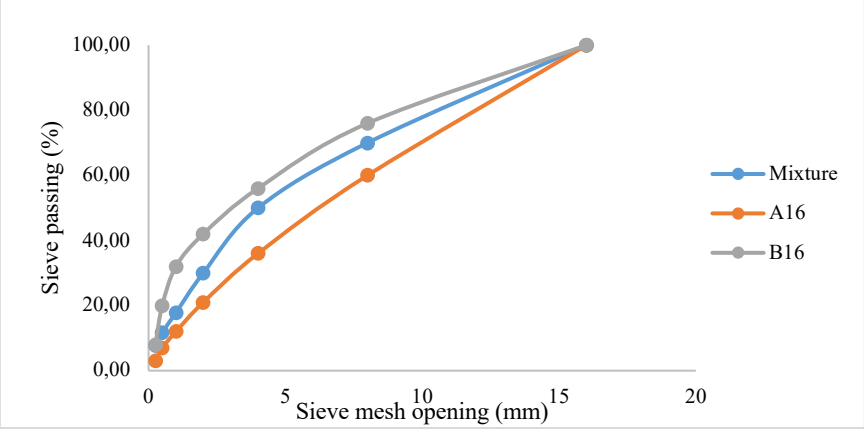


Figure 2. Aggregate granulometry curve.

After the aggregate tests, a pozzolanic activity test was performed for the mineral additive silica fume (Table 4). Pozzolan is a material that does not have a binding property on its own, but gains binding properties when it is finely ground and combined with calcium hydroxide in an aqueous medium. Silica fume is one of the most commonly used mineral additives with fine grain properties in materials science [25, 26]. In order to determine the adequate pozzolanic activity of silica fume, which is a pozzolanic material, pozzolanic activity tests are carried out in accordance with TS EN 196-2 standards [27]. In the same way, pozzolanic activity test was performed for silica fume and the pozzolanic activity index was determined with the help of the equation given in Equation 1 [28]. The P.A.I values obtained as a result of the experiment provided the relevant standard.

Pozzolanic Activity Index (P.A.I) = ((A)/B)*100 (1)
A : Average compressive strength of mortar samples with pozzolan
B : Average compressive strength of control mortar samples

The marble powder used in the concrete mixture was used to create a filling effect. In order to determine the usage rate of marble powder in concrete, many trial mixtures were poured and the optimum usage rate was determined [29, 30].

Table 4. Pozzolanic activity test results.

Control Sample (CS)			Pozzolan Sample (PS)		
	$f_c(7)$	$f_c(28)$		$f_c(7)$	$f_c(28)$
CS-1	27.6	40.6	PS-1	29.3	39.2
CS-2	28.1	37.1	PS-2	27.2	45.5
CS-3	25.8	39.4	PS-3	25.9	46.4
CS-ORT	27.2	39.0	PS-ORT	27.5	43.7

2.1. Preparation of Test Samples

Within the scope of the study, a wide range of trial mixes were poured in the first stage. As a result of these castings, 9 reference concrete mixes with dimensions of 100x100x100 mm were prepared with a W/C ratio of 0.20-0.25-0.30 and a binding material (cement + silica fume) dosage of 400-450-500 kg/m^3. (Table 5). In the series names in the table, the M value represents maturity and in the HSC400-25 expression, the value 400 represents the dosage and the value 25 represents the W/C ratio. Silica fume cement and marble powder were used as mineral additives in the prepared concrete mixtures by volume substituting with fine aggregate. The total amount of binder was kept constant. In all mixtures, CHRYSO Fluid 518 hyperplasticizer was used as a chemical additive at the rate of 3% of the cement amount.

Table 5. Mixture amounts of M-HSC (kg/m^3).

Serial Name	Cement	Water	Silica Fume	Marble Powder	Fine Aggregate (0-2) mm	Fine Aggregate (2-4) mm	Medium Aggregate (4-8) mm	Coarse Aggregate (8-16) mm
M-HSC400-1	400	80	28.1	103	559	368	406	609
M-HSC400-2	400	100	14.1	101	550	362	400	599
M-HSC400-3	400	120	14.1	79	547	360	389	583
M-HSC450-1	450	90	47.4	78	544	358	387	580
M-HSC450-2	450	113	47.4	114	504	332	374	562
M-HSC450-3	450	135	31.6	74	516	340	367	550
M-HSC500-1	500	100	17.6	116	513	338	381	572
M-HSC500-2	500	125	35.1	95	517	341	376	564
M-HSC500-3	500	150	52.7	87	473	312	344	516

2.2. Application of Maturity Tests

This study was carried out to develop numerical models that predict concrete compressive strength with high accuracy by using Nurse-Saul and Arrhenius maturity functions separately. With these maturity functions, the compressive strength of early age concretes can be estimated and the demoulding time can be determined. Thus, advantages are provided in terms of project duration, time and cost [31]. In the study, firstly, the Nurse-Saul method given in Equation 2, in which the compressive strength of the concrete is estimated by looking at the temperature history, was used.

$$M = \sum_0^t (T - T_0) * \Delta t \quad (2)$$

Here;
M = Maturity index (°C-hours or °C-days)
T = Average concrete temperature (°C)
T_0 = Reference temperature
t = Elapsed time (day or hour)
Δt = Time range (day or hour)

Copeland et al. in 1960 suggested that the effects of cement hydration on the strength gain rate of concrete can be described by the Arrhenius equation. In 1977, Freisleben Hansen and Pedersen proposed the following equation for equivalent age based on the Arrhenius equation (Equation 3) [7]. The application and numerical values related to the experiment are explained in ASTM C1074 [20].

$$t_e = \sum_0^t e^{-\frac{E}{R}\left(\frac{1}{273+T}-\frac{1}{273+T_r}\right)}\Delta t \quad (3)$$

Here;
t_e = Equivalent age at reference temperature
E = Apparent activation energy
R = Universal gas constant
T = Average absolute temperature of concrete
T_r = Reference temperature

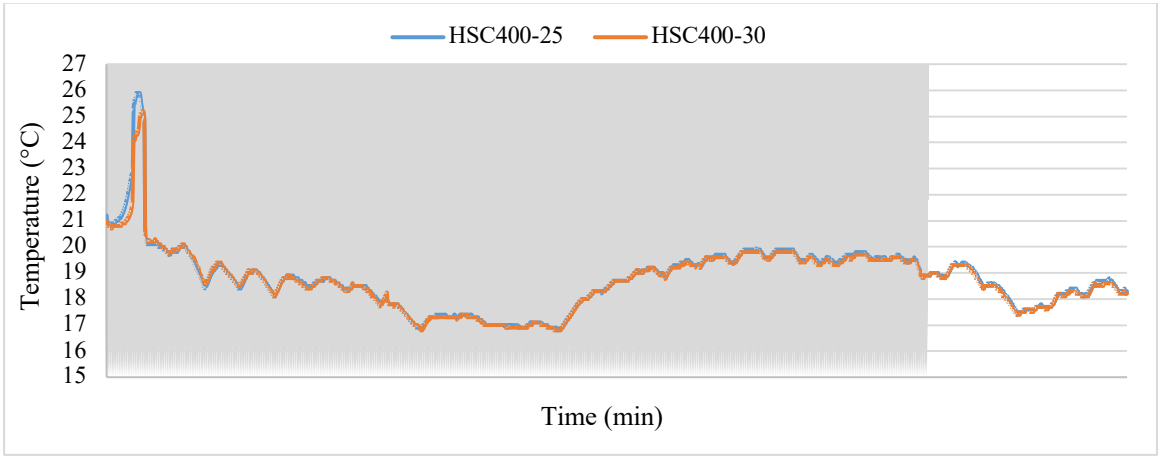
A multi-channel temperature measuring device was used to determine the concrete temperatures in the maturity calculations. The device was set up to take measurements every 5 minutes after the concrete was poured and placed in the mold and placed in the samples (Figure 3).



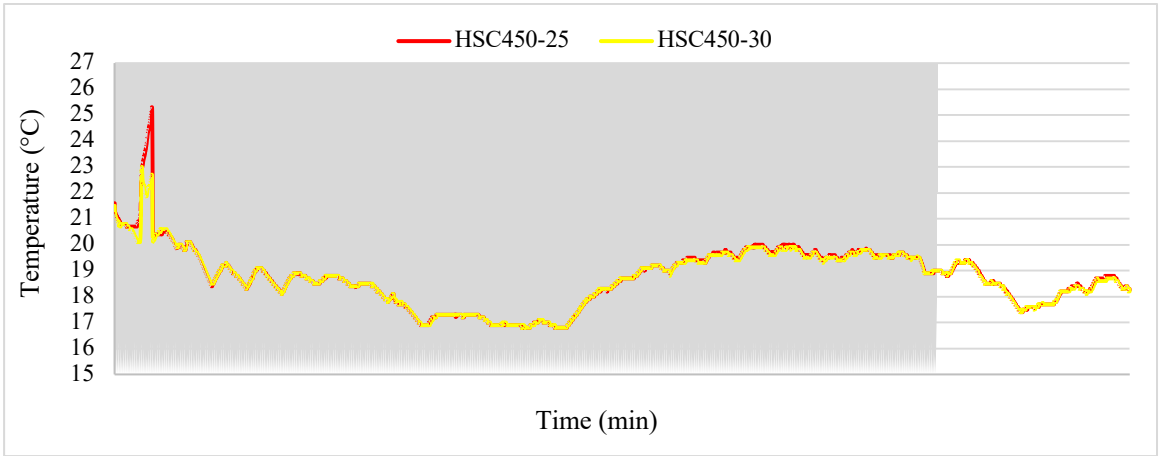
Figure 3. Placement of the temperature measuring device.

2.3. Measurements on Concrete Samples

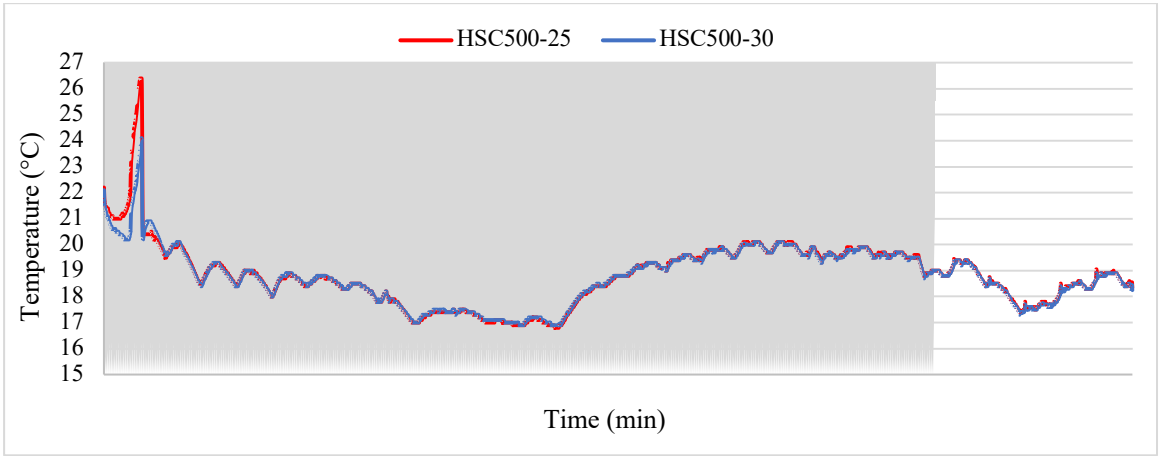
Temperatures were measured from the beginning of the concrete casting and the temperature results taken every 5 minutes at the end of the 1st, 3rd, 7th, 14th and 28th days within the scope of the C1074 standard were transferred to the computer. The time-dependent graph of these temperatures is given in Figure 4. Figure 4 shows the time-dependent variation of the temperatures forty-eight, ninety-six hours after the concrete is placed in the mold, and the average temperatures of one hundred and ninety-two, three hundred and sixty-six hours after it is placed in the mold.



(a)



(b)



(c)

Figure 4. (a) Temperature values of 400-dose series (b) Temperature values of 450-dose series (c) Temperature values of 500-dose series.

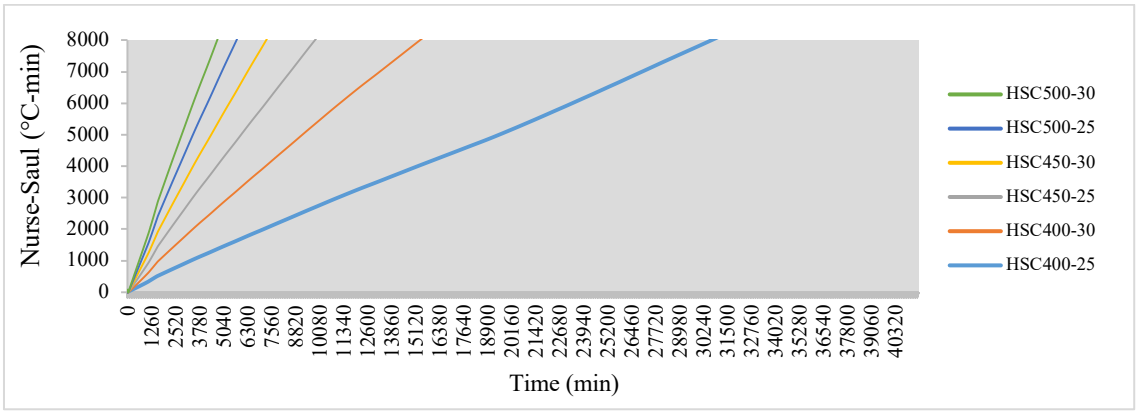
When Figure 4 is examined, the temperature values of the series in which the W/C ratio is 0.25 and 0.30 are given. Since there is not enough water in the environment as specified in the C1074 standard in the series with a W/C ratio of 0.20 and proper hydration has not occurred, the data of these series were not evaluated.

3. Evaluation of Experimental Results

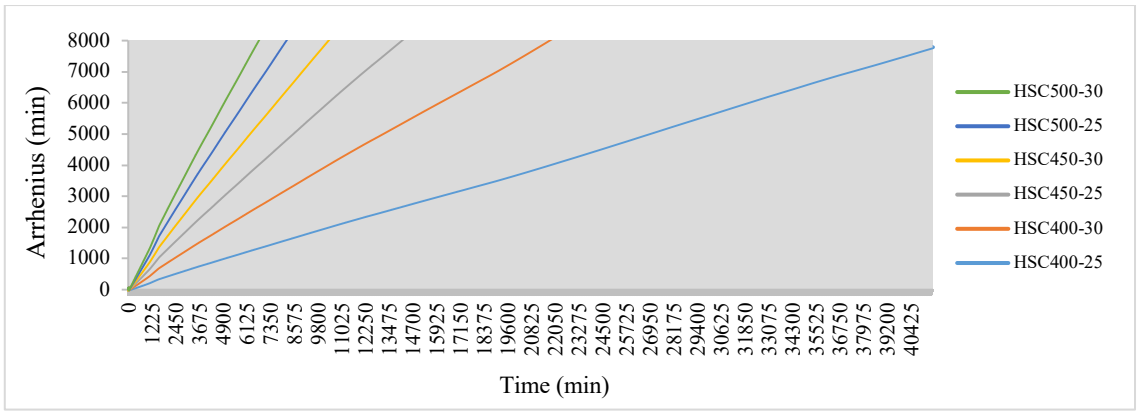
3.1. Concrete Temperature Values and Evaluation

Concrete temperatures were obtained using a multi-channel temperature measuring device. This temperature measurement started from the placement of the concrete in the mold (Figure 5.) When Figure 5 is examined, it is seen that the temperature change varies according to the usage rate of the materials in the concrete composition. For example, it is clearly seen that the temperature value of the series with a binder dosage of 500 and a W/C ratio of 25% is higher than the temperature value of a series with a binder dosage of 400 and a W/C ratio of 25%.

The temperature values in Figure 2 and the maturity functions in Equation 2 and Equation 3 were calculated separately and the Nurse-Saul-Zaman and Arrhenius-Zaman graphs given in Figure 4 were obtained.



(a)

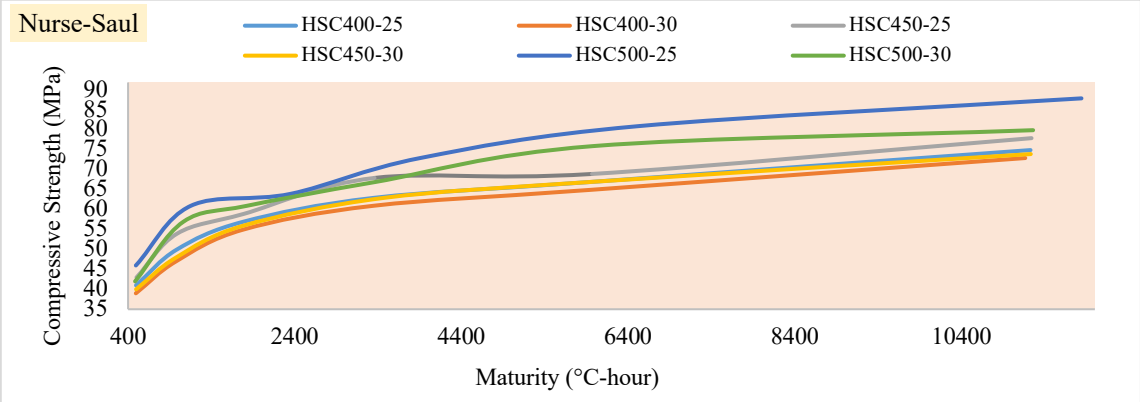


(b)

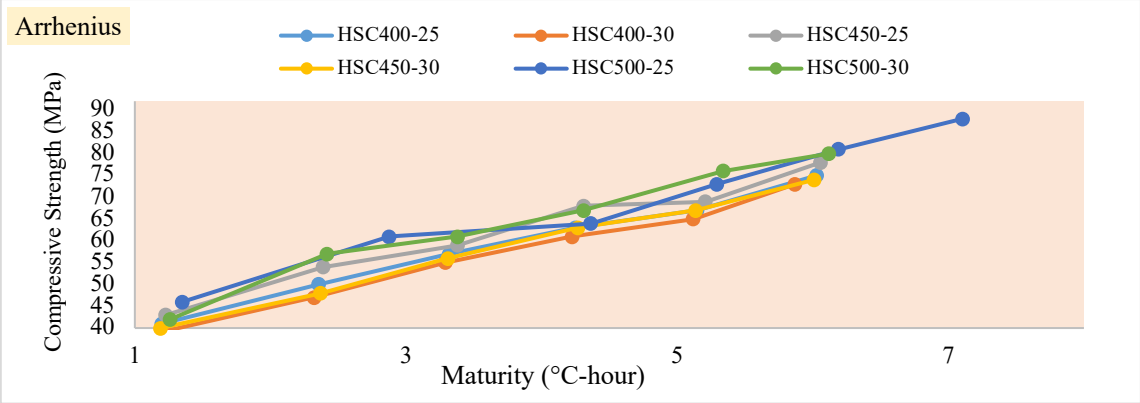
Figure 5. (a) Nurse-Saul values-Time (b) Arrhenius values-Time comparisons.

In the Figure 5 showing the time-dependent variation of the maturity function, it is seen that the binder dosage and maturity values are directly proportional. As the dosage value increases, the hydration increases, so the maturity value also increases. When evaluated in terms of W/C ratio, the maturity value was found to be higher in the 400 and 450-dose series in which the W/C ratio was 30%. This indicates that sufficient water for hydration is found in series with a 30% W/C ratio. In the 500-dose series, the maturity value of the series in which the W/C ratio was 25% was high.

The relationship between maturity values calculated by Nurse-Saul and Arrhenius equations and compressive strength is shown in Figure 6.



(a)



(b)

Figure 6. Comparison of (a) Compressive strength-Nurse-Saul values (b) Compressive strength-Arrhenius maturity values

In Figure 6, it is seen that there is a linear relationship between maturity and compressive strength depending on the change in concrete temperature. In accordance with the C1074 standard, the compressive strength value of the concrete increases with the increase of the maturity value [20].

3.2. Numerical Models

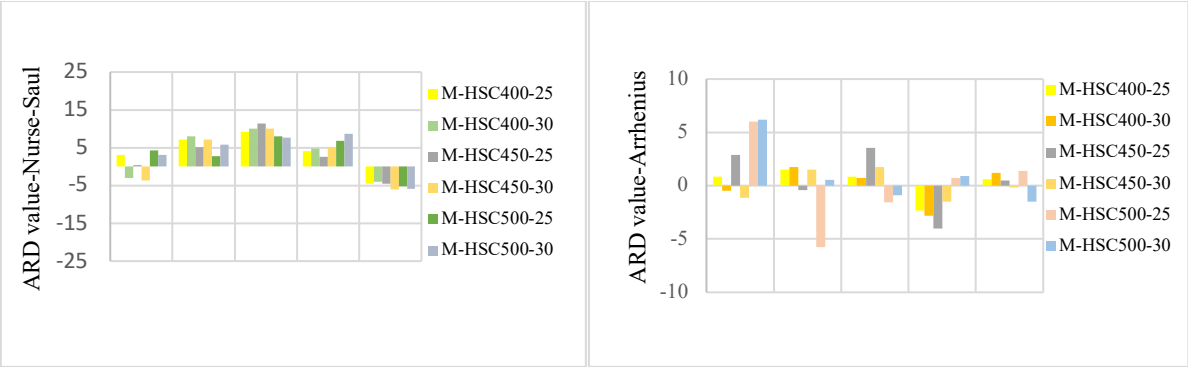
In this study, NS and Arr results were used in the design phase of the numerical models. The numerical models developed to predict the compressive strength values in the equations with high accuracy are given in the equation below. The parameters used in the equations refers to M is the maturity and fc is the compressive strength value (Table 6).

In Figure 7, the estimation results and ARD values obtained by the numerical models developed with the experimentally calculated compressive strength values are given. When the experimental values and predicted values are compared, it is seen that the ARD values of the developed models are below 10%. It was noteworthy that all these values were below 5%, especially for early age strength. When the ARD values of the Arrhenius maturity function were examined, it was noted that it was the maturity function that predicted fc with the highest accuracy. Especially in fc-1 daily strength values, highly accurate predictions were made and ARD values were below 1% for almost all other days.

Although the ARD results estimated by the Nurse-Saul equation are higher than the ARD results obtained by the Arrhenius equation, the compressive strength values obtained with this function also have high accuracy.

Table 6. Numerical models developed with NS and Arr maturity methods.

Serial Name	NS	Arr
M-HSC400-25	f_c = 0.0027M + 48.131	f_c = 6.7943M + 33.573
M-HSC400-30	f_c = 0.0027M + 45.805	f_c = 7.0137M + 30.937
M-HSC450-25	f_c = 0.0027M + 51.143	f_c = 6.8513M + 36.05
M-HSC450-30	f_c = 0.0028M + 46.995	f_c = 7.0219M + 31.914
M-HSC500-25	f_c = 0.0032M + 54.705	f_c = 6.9625M + 37.284
M-HSC500-30	f_c = 0.0029M + 52.118	f_c = 7.4902M + 35.333



	M-HSC400-25			M-HSC400-30			M-HSC450-25			M-HSC450-30			M-HSC500-25			M-HSC500-30		
Days	fc	fc-NS	fc-Arr	fc	fc-NS	fc-Arr	fc	fc-NS	fc-Arr	fc	fc-NS	fc-Arr	fc	fc-NS	fc-Arr	fc	fc-NS	fc-Arr
1.	50	48.4	49.6	47	48.4	47.2	54	53.8	52.4	48	49.7	48.6	61	58.4	57.3	57	55.2	53.5
3.	57	52.9	56.1	55	50.6	54.0	59	56.0	59.2	56	52.0	55.2	64	62.2	67.7	61	57.4	60.6
7.	63	57.2	62.5	61	54.8	60.6	68	60.2	65.6	63	56.7	61.9	73	67.2	74.2	67	61.9	67.6
14.	67	64.2	68.6	65	61.9	66.8	69	67.3	71.8	67	63.7	68.0	81	75.5	80.4	76	69.5	75.3
28.	75	78.4	74.5	73	76.0	72.1	78	81.5	77.6	74	78.4	74.1	88	92.6	86.8	80	84.8	81.2

Figure 7. Experimental and predicted results.

4. Conclusions

In this study, numerical models were developed to predict the compressive strength of HSCs using NS and Arr maturity functions. In particular, to verify the validity of the maturity functions proposed so far, compressive strength-Nurse-Saul maturity function and compressive strength-Arrhenius maturity functions were compared and their suitability was determined. As a result of the study, the following conclusions were drawn:

1- The strength-maturity curve in each series of concrete mixtures followed the literature.
2- It has been determined that the maturity method can be used for HSCs, and it has been observed that the Arr method gives higher accuracy results in estimating the compressive strength of HSCs.
3- The average relative error percentage in estimating the compressive strengths of concrete varies between 0.1% and 10.1%. Mixtures producing the highest errors were generally found in the calculation made by the Nurse-Saul method. The compressive strength values obtained by the Arhenius method were closer to the experimental results.
4- In series with low W/C ratio, strength losses occurred due to insufficient hydration. Therefore, it is recommended to be more careful in the estimations to be made with the maturity method as the W/C ratio decreases in practice.
5- By using the maturity method and determining the strength gaining time of the concrete, the demoulding times can be determined. Thus, the problem of getting molds early is eliminated and an advantage is provided in determining the project durations.

6- In the current maturity functions, the concrete temperature is taken according to the standards. Concrete compressive strength can also be determined more accurately and with higher accuracy by obtaining the temperatures with high accuracy by using a temperature measuring device in concrete.
7- Verification of proposed modifications for in situ concrete strength estimation should also be done, especially for concretes made with different types of cement and additives.

As a result, the places where HSCs are used in practice are special productions. Therefore, the duration of the project is of great importance in such productions. The most important parameter for the construction to progress in accordance with the project period is the molding time. Since this period cannot be calculated correctly, the maturity method has emerged as a sensitive, fast and practical method. The use of this method will ensure that the concrete compressive strength is correctly estimated and the construction will continue in a healthy way in terms of strength and will proceed without loss of time in the project-work plan.

Acknowledgments
This study is supported by the Scientific Research Project Fund of Fırat University under the project number MF.21.51

References

[1] Belykh I, Sopov V, Butska L, Pershina L, and Makarenko O. Predicting the strength and maturity of hardening concrete. In MATEC Web of Conferences 2018; 230:001.
[2] Tareen N, Kim J, Kim WK, and Park S. Comparative analysis and strength estimation of fresh concrete based on ultrasonic wave propagation and maturity using smart temperature and PZT sensors. Micromachines 2019; 10(9): 559.
[3] ACI Committee 318-19. Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute 2019; Farmington Hills, Michigan.
[4] Soutsos M, Kanavaris F, and Hatzitheodorou A. Critical analysis of strength estimates from maturity functions. Case Stud Constr Materials 2018; 9: p. 00183.
[5] Miller D, Ho NM, and Talebian N. Monitoring of in-place strength in concrete structures using maturity method–An overview. In Structures 2022; 44:1081–1104.
[6] Tekle BH, Al-Deen S, Anwar-Us-Saadat M, Willans N, Zhang Y, and Lee CK. Use of maturity method to estimate early age compressive strength of slab in cold weather. Structura Concrete 2022; 23(2):176–1190.
[7] Wood DA. Re-establishing the merits of thermal maturity and petroleum generation multi-dimensional modeling with an Arrhenius Equation using a single activation energy. Journal Earth Science 2017; 28(5): 804–834.
[8] Chengju G. Maturity of concrete: method for predicting early-stage strength. Materials Journal 1989; 86(4): 341–353.
[9] Demir T, Ulucan M, and Alyamac KE. Determination of Early Age Strength of High Strength Concretes Using RSM Method. Fırat Univ Journal Eng Science 2022; 34(1):105–114.
[10] Guo YB, Gao GF, Jing L, and Shim VPW. Response of high-strength concrete to dynamic compressive loading. Int J Impact Engineering 2017; 108:114–135.
[11] Demir T and Alyamaç KE. Investigation of the Use of Marble Powder in Production of High Strength Concretes. Open Journal of Nano 2022; 7(1):18–25.
[12] Kandiri A, Golafshani EM, and Behnood A. Estimation of the compressive strength of concretes containing ground granulated blast furnace slag using hybridized multi-objective ANN and salp swarm algorithm. Construction Build Materials 2020; 248:18676.
[13] TS EN 12504-2. Test. Concr. Struct. part-2 non-destructive testing, Determ rebound number. Standard 2004; Turkish Standards Institute, Turkey.
[14] B. Standard. Structural Use of Concrete: Code of Practice for Design and Construction, Part 1, BS 8110 British Standard Institution 1997; UK.
[15] Malhotra VM. Testing hardened concrete: nondestructive methods. Iowa State University Press, 1976.
[16] Malek J, and Kaouther M. Destructive and non-destructive testing of concrete structures. Jordan J Civil Engineering 2014; 8(4):432–441.
[17] Tsioulou O, Lampropoulos A, and Paschalis S. Combined non-destructive testing (NDT) method for the evaluation of the mechanical characteristics of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). Construction Build Materials 2017; 131:66–77.
[18] Shah AA, and Ribakov Y. Non-destructive evaluation of concrete in damaged and undamaged states. Materials Design 2009; 30(9):3504–351.
[19] Demir T. Development of Combined Methods to Estimate the in-Place Strength of High Strength Concrete Using Non-Destructive Testing Methods. Fırat University 2022.
[20] ASTM C 1074. Standart Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, ASTM Standards 1987; Philadelphia.
[21] TS EN 197-1. P. and C. C. Cement - Part 1: General Cements, Composition, Turkish Standards Institute 2012; Turkey.
[22] TS EN 706. Aggregate for concretes. Turkish Standards Institute 2003; Turkey.

[23] Soykan O, Cengiz Ö, and Cenk Ö. Investigation of the Usability of Slate and Andesite as Concrete Aggregate. J Suleyman Demirel Univ Grad School Nat Appl Science 2015; 19(1).
[24] Flores Medina N, Barluenga G, and Hernández-Olivares F. Combined effect of Polypropylene fibers and Silica Fume to improve the durability of concrete with natural Pozzolans blended cement. Construction Build Materials 2015; 96.
[25] Yu R, Spiesz P, and. Brouwers HJH. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. Cement Concrete Composite 2015; 55.
[26] Vigneshwari M, Arunachalam K, and Angayarkanni A. Replacement of silica fume with thermally treated rice husk ash in Reactive Powder Concrete. Journal Clean Production 2018; 188.
[27] TS EN 196–2. Methods Test. Cement. Turkish Standards Institute 2010; Turkey.
[28] TS EN 25. Natural pozzolan (Trass) for use in cement and concrete - Definitions, requirements and conformity criteria. Turkish Standards Institute 2015; Turkey.
[29] Demir T, Ulucan M, and Alyamaç KE. Determination of Early Age Strength of High Strength Concretes Using the RSM Method. Fırat University Engineering Science Journal 2022; 34, (1):105–114.
[30] Demir T, Demirel B, and Öztürk M. An Evaluation of the Effect of Waste Aluminum Sawdust on the Carbonation of Concrete. Bitlis Eren Univ J Science 2022; 11(4):993–999.
[31] Breysse D. Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. Construction Build Materials 2012; 33:139–163.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 61-74, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1501652

Otizm Spektrum Bozukluğu Tanısında Öznitelik Seçimi Yoluyla Farklı Sınıflandırıcıların Karşılaştırılması

Sinem KOÇ[1*], Onur SEVLİ[2]
[1] Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Eğitimi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Burdur, Türkiye
[2] Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Burdur, Türkiye
[*1] sinem.kc.07@gmail.com, [2] onursevli@mehmetakif.edu.tr

(Geliş/Received: 15/06/2024; Kabul/Accepted: 17/10/2024)

Öz: Otizm Spektrum Bozukluğu (OSB), sosyal etkileşim ve iletişimde zorluklar, tekrarlayıcı işlemler ve duygusal sorunlar gibi belirgin bir dağılıma sahip karmaşık bir nörogelişimsel durumdur. Bireylerin sosyal etkileşimi, iletişimin gelişmesi ve belirli davranış kalıpları üzerindeki zorluklarla birlikte kendini gösterir. Otizmin genellikle erken çocukluk döneminde başladığı ve bu dönemde belirginlik kazandığı gözlemlenmektedir. Otizmde erken teşhis önemlidir; çünkü erken tanı ile tedavinin erken başlaması mümkündür. OSB sorununun teşhisi için geleneksel yöntemlere ek olarak, günümüzde istikrarlı çıkarımları ile farklı pek çok alanda uygulamaları olan makine öğrenmesi yöntemleri teşhis başarısını arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Yöntemler, büyük veri setlerini analiz ederek otizm belirtilerini hızla tanımlamak, erken ve doğru teşhis sağlamak amacıyla bu çalışmada 17 girdi ve 1 hedef olmak üzere toplam 18 öznitelik değişkenden oluşan bir veri seti üzerinde öznitelik seçimi yöntemi ve sınıf dengeleme yöntemleri uygulanarak ardından dört farklı makine öğrenmesi algoritması (K-En Yakın Komşu, Lojistik Regresyon, Naive Bayes, Destek Vektör Makineleri) ile sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırma performansı doğruluk, duyarlılık, özgüllük ve F1 skoru gibi metriklerle değerlendirilmiştir. Öznitelik seçimi sonrası, Destek Vektör Makineleri ve Lojistik Regresyon algoritmaları ile %100 doğruluk oranı elde edilirken, K-En Yakın Komşu ve Naive Bayes algoritmaları sırasıyla %94,7 ve %96,7 doğruluk sağlamıştır. Öznitelik seçimi yapılmadığında ise en yüksek doğruluk oranı %96,2 olarak kaydedilmiştir. Sonuçlar, öznitelik seçiminin makine öğrenmesi algoritmalarının sınıflandırma performansını belirgin bir şekilde artırdığını göstermektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda OSB tanısında makine öğrenmesi yöntemlerinin uygulanabilirliğini ve doğruluğunu ortaya koymakta olup, teşhis sürecini iyileştirmek adına önemli bir katkı sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Makine Öğrenmesi, Otizm Spektrum Bozukluğu, Otizm Teşhisi, Öznitelik Seçimi.

Comparison of Different Classifiers Through Feature Selection in The Diagnosis of Autism Spectrum Disorder

Abstract: Autism Spectrum Disorder (ASD) is a complex neurodevelopmental condition with a marked distribution of difficulties in social interaction and communication, repetitive processing and emotional problems. It is manifested by difficulties with individuals' social interaction, the development of communication and difficulties with certain patterns of behavior. It is observed that autism usually starts in early childhood and gains prominence in this period. Early diagnosis is important in autism because early diagnosis allows treatment to start early. In addition to traditional methods for diagnosing ASD, machine learning methods, which have applications in many different fields with their stable inferences, are now used to increase diagnostic success. In this study, SelectKBest feature selection method was applied using a dataset consisting of 18 feature variables (17 input and 1 target) and classification processes were performed with four different machine learning algorithms (K-Nearest Neighbor, Logistic Regression, Naive Bayes, Support Vector Machines). Classification performance was evaluated with metrics such as accuracy, sensitivity, specificity and F1 score. After feature selection, Support Vector Machines and Logistic Regression algorithms achieved 100% accuracy, while K-Nearest Neighbor and Naive Bayes algorithms achieved 94.7% and 96.7% accuracy, respectively. When no feature selection was performed, the highest accuracy rate was recorded as 96.2%. The results show that feature selection significantly improves the classification performance of machine learning algorithms. These results demonstrate the applicability and accuracy of machine learning methods in the diagnosis of ASD and provide an important contribution to improve the diagnostic process.

Key words: Machine Learning, Autism Spectrum Disorder, Autism Diagnosis, Feature selection.

[*] Sorumlu yazar: sinem.kc.07@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0009-0002-8451-6452, [2] 0000-0002-8933-8395

1. Giriş

Otizm Spektrum Bozukluğu (OSB), nörogelişimsel bir durum olup, genellikle çocukluk döneminde başlayan ve ömür boyu süren karmaşık bir bozukluktur. Bu bozukluk, bireylerin sosyal etkileşim becerilerinde, iletişim yeteneklerinde ve davranışlarında belirgin farlılıkların ortaya çıktığı geniş bir spektrumu kapsar. OSB'nin belirtileri kişiden kişiye önemli ölçüde değişkenlik gösterir ve bu durum, genetik ve çevresel faktörlerin etkileşimiyle şekillenen karmaşık bir etiyolojiye işaret eder. Genellikle tipik gelişim gösteren bireylerle kıyaslandığında, OSB tanısı alan bireyler tekrarlayıcı davranışlar, sınırlı ilgi alanları ve sözel olmayan iletişim becerilerinde zorluklar yaşarlar. OSB'nin nedenleri konusundaki araştırmalar, genetik yatkınlığın yanı sıra çevresel etkenlerin de etkili olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, OSB karmaşık ve çeşitliliği yüksek bir bozukluktur [1]. Otizmin belirtileri genellikle çocuğun ilk yaşlarında ortaya çıkar ve genellikle belirgin bir şekilde 18 ila 24 ay arasında görülür. Ancak, bu belirtiler bazı durumlarda doğumdan sonraki ilk yıl içinde de fark edilebilir. Birçok otizmli çocuk, sosyal etkileşim ve iletişim becerilerindeki zorluklar, tekrarlayıcı davranışlar ve sınırlı ilgi alanları gibi belirtilerle dikkat çeker. Ancak, dikkat çekici olan, bazı çocukların doğumdan sonra normal bir gelişim gösteriyor gibi görünmeleridir. Bu çocuklarda, genellikle 18 ila 24 aylık dönemde, bir gerileme yaşanır ve otizme özgü belirtiler belirginleşmeye başlar. Erken bebeklik otizmi, ilk defa 1943 yılında Leo Kanner tarafından tanımlanmıştır. Kanner'ın gözlemlerine dayanarak yapılan bu tanımlama, otistik çocukların doğumdan itibaren diğer insanlarla olan ilişki becerilerinin zayıf olduğunu, belirgin ekolaliye sahip olduklarını, zamirleri yanlış kullandıklarını, davranışlarında tekrarlayıcı ve amaçsız etkinliklere yönelik bir eğilim gösterdiklerini, cansız objelere karşı belirgin bir ilgi sergilediklerini ve değişikliklere karşı huzursuz olduklarını vurgulamaktadır [1]. Bu tanımlama, erken bebeklik otizminin temel özelliklerini açıklamakla birlikte, günümüzdeki bilimsel literatür ve klinik gözlemler ışığında genişlemiş ve derinleşmiştir [2]. OSB terimi, farklı bireyler arasındaki çeşitliliği ve belirtilerin şiddet derecesini daha iyi ifade ederek Kanner'ın orijinal tanımına evrilmiştir. Bu bağlamda, erken bebeklik otizmi üzerine yapılan çağdaş araştırmalar, nörolojik, genetik ve çevresel faktörlerin etkileşimini daha detaylı bir şekilde incelemekte ve bireysel farklılıkları dikkate almaktadır [3]. OSB'de erken teşhis son derece önemlidir. Erken müdahalenin genel hedefi, bireyin gelişimsel, iletişimsel ve sosyal becerilerini olumlu yönde etkilemektir. Erken müdahale, genellikle çocukluk döneminde başlar, zira bu dönemde beynin plastisitesi yüksektir ve bireyin öğrenme yetenekleri daha fazla esnektir. Erken müdahale, bireyin gelişimini destekleme, dil ve iletişim becerilerini arttırma ve çevresiyle etkileşim kurma yeteneğini iyileştirmeye yönelik stratejileri içerir [4]. Otizm tanısı almış bireylerin aileleri, genellikle bir dizi benzersiz zorlukla karşı karşıyadır. Bu durum, aile üyelerinin günlük yaşam, eğitim, sosyal etkileşim ve gelecek planlaması konularında çeşitli önemli kararlar almasını gerektirir [5]. OSB olan bir çocuğa sahip olmak, aile dinamiklerini etkileyebilir ve çeşitli duygusal, finansal ve sosyal zorluklara neden olabilir [6]. Bireylerin eğitimine mümkün olan en erken aşamada başlanması, bireyin gelişimi açısından kritik bir öneme sahiptir. Ancak, OSB'nin teşhisi karmaşık ve zaman alıcı bir süreç olduğundan, tedaviye başlama noktasında gecikmeler yaşanabilmektedir. Hastalığın teşhisi sürecindeki belirsizlikleri ve gecikmeleri azaltmak amacıyla, günümüzde alternatif karar destek yöntemlere başvurulmaktadır.

Yapay zekâ tekniklerinin günümüzde pek çok alanda başarılı uygulamaları mevcuttur. Yapay zekânın bir alt disiplini olan makine öğrenmesi mevcut veriler üzerinde, bazen keşfedilmesi insan eliyle son derece zor olan örüntüleri bularak gelecek durumlar hakkında istikrarlı tahminlerde bulunmayı sağlayan teknikleri içerir [7]. Bu durum, otizmin erken teşhisine yönelik çabaları güçlendirmeyi amaçlayan bir yaklaşım olarak da ön plana çıkmaktadır. Makine öğrenmesi teknikleri, belirli davranış örüntülerini analiz ederek otizm belirtilerini daha hızlı ve hassas bir şekilde tanımlama potansiyeline sahiptir. Bu klinik uzmanların, özellikle gelişimsel belirtilerin ortaya çıktığı erken çocukluk dönemlerinde, doğru teşhisi koyabilmeleri için önemli bir destek sistemi rolü üstlenebilir. Bu teknikler, büyük veri setlerini analiz ederek otizmin belirli özelliklerini daha iyi anlamaya yardımcı olabilmektedir. Özellikle, semptomların çeşitliliği ve bireyden bireye farklılık göstermesi nedeniyle, makine öğrenmesi, geniş veri setlerini işleyerek, öznitelik seçimi yaparak daha kesin ve bireyselleştirilmiş teşhisler sunma potansiyeline sahiptir. Bu yöntem, teşhis sürecindeki gecikmeleri azaltarak ve daha kesin sonuçlar elde ederek OSB'li bireylere erken ve etkili müdahale imkânı sunar. Bu çalışmada, OSB'li ve OSB'siz bireylerin ayırt edilmesi amacıyla SelectBest öznitelik seçimi yöntemi kullanılmıştır. OSB teşhisi sürecindeki belirsizlikleri azaltarak ve daha hızlı sonuçlar üreterek klinik uzmanların kararlarını destekleyici bir sistem sunmaktadır.

Bu çalışmanın amaçları şunları içerir:

- Makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak OSB'nin erken ve etkin teşhisi: Otizm spektrum bozukluğunun erken teşhisinde yapay zekâ ve makine öğrenmesi tekniklerinin etkinliğini inceleyerek bu alandaki mevcut literatüre katkıda bulunmaktadır.
- Öznitelik seçimi ve sınıf dengeleme ile performanslı ve doğruluğu yüksek teşhis: Mevcut veri seti üzerinde öznitelik seçimi yapılarak ve sınıf dengesi sağlanarak sınıflandırma performansı arttırılmıştır.

- Teşhis Süreçlerindeki Gecikmelerin Azaltılması: Yapay zekâ tabanlı karar destek sistemlerinin, otizm teşhisindeki süreçleri hızlandırarak, klinik gecikmeleri nasıl azaltabileceği tartışılmıştır.

Literatürde OSB teşhisine yönelik yapılan çalışmalar, farklı makine öğrenmesi uygulamalarının kullanımı geniş bir şekilde yer verilmektedir.

Çelik ve Çeşmeli'nin [8] çalışması, OSB teşhisinde veri madenciliği yöntemlerinin uygulanabilirliğini araştırmaktadır. 292 OSB'li çocuktan elde edilen gerçek veriler ile 20 öznitelik ve 1 çıkış özelliği kullanılarak, yapay sinir ağları ve dilsel kuvvetli sinir-bulanık sınıflandırıcılarla ilişkilendirilmiştir. K-means ve X-means kümelenmeleri ile veriler üzerinde analiz gerçekleştirilmiş, OSB teşhis özellikleri katkı sunabileceği vurgulanmıştır. Demirhan [9] OSB'nin ergenlerde farklı makine öğrenme teknikleri ile incelenmesini ve karşılaştırılmasını gerçekleştirmiştir. DVM, KNN ve RO çözümleri kullanılarak yapılan geliştirmeler, RO yöntemi %100 doğruluk oranı ile öne çıkan ve bu bulgular, RO'nun klinik uygulamalarında OSB teşhisinde güvenilir bir araç olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Metlek ve Kayaalp [10] YSA ve dilsel kuvvetli sinir-bulanık sınıflandırıcıyı kullanarak %100'de başarı oranı göstermiştir. Bununla birlikte YSA'nın test verisinde %98.85 başarı oranı ile daha üstün bir görünüm yeteneği sergilediği vurgulandı.

Thabtah ve Peebles [11] Lojistik Regresyon (LR) ile %97,94 ve Naive Bayes (NB) ile %92,80 başarı oranlarına ulaşmıştır. Akyol ve Karaci [12] ise genel kurallı lojistik regresyon raporları ile %92,00 ve %97,33 başarı oranları sağlamıştır. Saihi ve Alshraideh [14] çalışmalarında, C4.5, RO ve Sinir Ağı modellerini karşılaştırmış ve Sinir Ağı'nın en yüksek doğruluk performansına sahipti. Şuvo vd [15] RO sınıflandırıcısını 10 davranışsal ve 10 bireysel özellik içeren veri seti üzerinde inceleyerek %0,96 genel doğruluk elde etmiştir. Bidwe ve arkadaşları [16] Zenodo'dan alınan yüzde verileri, veri ayarları Üzerinde Transfer Öğrenme (TL) yöntemlerini kullanarak, VGG16, VGG19, InceptionV3, AlexNet ve ResNet50 modelleri arasında InceptionV3'ün %87,99 doğruluk oranı ile en yüksek performansı gösterdiğini saptamışlardır.

Raj ve Masood [17] NB, DVM, LR, KNN, Sinir Ağı (NN) ve Evrişimli Sinir Ağı (CNN) modelleriyle çocukluk, ergenlik ve yetişkin OSB öngörüsü yapmayı amaçlamış ve CNN'in %99,53, %98, 30 ve %96,88 doğruluk oranlarıyla üstün performans sergilediğini belirtmişlerdir. Alaika ve Alamsyah [18] DVM ve CFS (Korelasyon Tabanlı Öznitelik Seçimi) kullanılmıştır. UCI makine öğrenimi deposundan alınan Çocuklara Yönelik Otistik Spektrum Bozukluğu Taraması Veri Seti üzerinde yapılan karşılaştırmada, DVM'nin %94,91 doğruluk oranı sağladığı tespit edilmiştir. DVM algoritması, CFS ile birleştirildiğinde ise doğruluk oranı %96,61'e yükselerek, seçilen 17 özniteliğin kullanılmasıyla %1,7'lik bir iyileşme göstermektedir. Saran ve Pirouz [19] OSB üzerine odaklanarak EEG sinyallerinden duyguların çıkarılması ve KNN, RO, DVM ve LR kullanılarak, OSB özelliklerinin tahmin edilmesini içeriyor. Yeni yürümeye başlayan çocuklar ve yetişkinlerde OSB verilerine dayanarak geliştirilen model %73 doğruluk oranına ulaştığı göstermektedir. Misman vd [20] OSB tanısında performansı artırmak amacıyla DNN mimarisini kullanarak yetişkin OSB tarama verilerini analiz etmektedir. İki farklı veri seti üzerinde yapılan analizlerde DNN modelinin %99,40 ve %96,08 doğruluk oranları elde ettiği gözlemlenmiştir. Karşılaştırmalı olarak, DVM modeli %95,24 ve %95,08 doğruluk oranlarına ulaşmıştır.

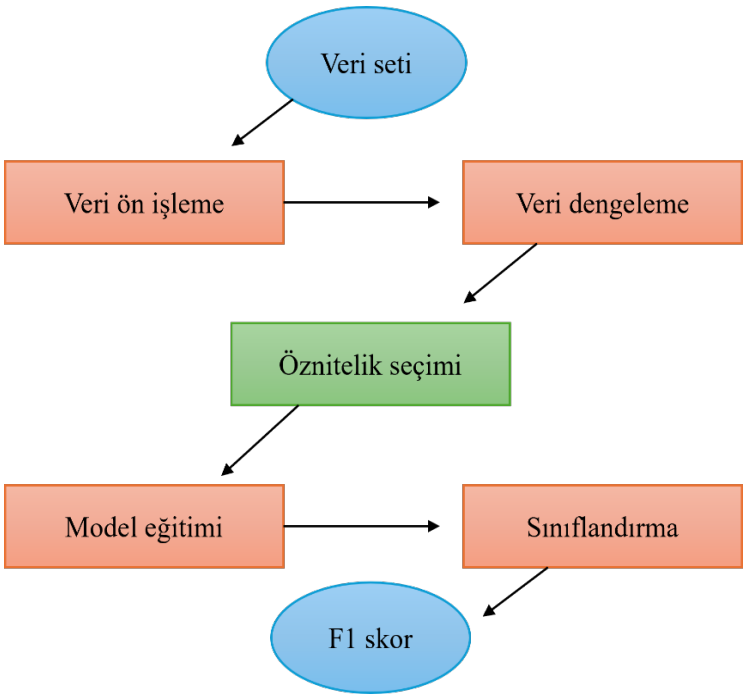
Khatun ve ekibi [21] 704 klinik OSB verisi üzerinde dört denetimli öğrenme tekniğini kullanarak DVM ile %85 doğruluk oranı sağlamış, en yüksek performansa ulaşmıştır. Santos [22] KNN, RO ve DVM karşılaştırmalarını yaparak, %79,35 F1 skoru ile Çok Katmanlı Perceptron'un (MLP) OSB teşhisinde en etkili model olduğunu belirtmiştir. Mokni ve Haoues [23] OSB Test veri tabanından elde edilen çocuk, ergen ve yetişkin veri kümeleri üzerinde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, derin sınıflandırıcı modelinin diğer makine öğrenimi tekniklerinden daha yüksek doğruluk oranlarına sahip olduğunu göstermektedir. Dedgaonkar ve arkadaşları [24] duyusal işleme bozukluğunun tespit edilmesi ve duygu tanıma amaçlı derin öğrenme teknikleri kullanılmış ve %100'ünün ortaya çıktığı görülmüştür. Uddin [25] RO, Çok Terimli NB, Bernoulli NB, DVM ve GNB yükseltmelerini kullanarak çocuk ve yetişkin veri kümelerinde %100 doğrulukta ulaşmış, özellikle RO'nun en yüksek performansı gösterdiğini belirtmiştir. Praveena ve arkadaşları [26] OSB'nin erken tahmin için farklı özellik dönüştürme tekniklerini incelemiş ve Adaboost'un %100 doğrulukla en etkili sonuçların elde edilmesini sağlamıştır. Özellikle Log, Power-Box Cox ve Yeo-Johnson ayar yöntemleri veri setlerinde başarılı olmuştur. Pottem ve arkadaşları [27] OSB tahmini için Karar Ağacı sınıflandırıcısının %97,47 test performansıyla öne çıktığını belirtmiştir. Günay ve Alkan [28] dört farklı hareket tipine ait elektromiyografi (EMG) sinyallerini gösterirken Destek Vektör Makineleri (DVM) kullanarak, spektral ön işleme tekniklerinin işleyişinin artırıldığını ve %94,25 başarı oranının elde edildiğini bildirmiştir. Son olarak, Balcı ve Alkan [29] HPV kaynaklı siğillerin tedavisinde en uygun yöntemle belirlenmesi amacıyla kriyoterapi ve immünoterapi yöntemlerinin yöntemini değerlendirmiştir. HPV'nin biyolojik verim sisteminin atlatılmasına neden olduğu ve hızlı gerekli tedavi olduğu vurgulanmıştır.

Literatür incelemeleri karşılaştırıldığında, çalışmanın hem yüksek doğruluk oranı hem de daha az sayıda öznitelik kullanarak iki farklı modelle üstün başarı sergilemiştir. Özellikle öznitelik seçiminin optimize edilmesi ve bu süreç sonunda elde edilen yüksek doğruluk oranı, çalışmanın literatürdeki diğer araştırmalara kıyasla öne çıkan güçlü yönlerinden biri olarak değerlendirilebilir. Bu durum, çalışmanın verimliliğini artıran önemli bir

avantaj haline getirmiştir. Bu çalışmanın literatüre katkısı, kullanılan yöntemin, daha önce benzer başarımları elde eden yöntemlerle karşılaştırıldığında, belirli avantajlar sunmasıyla öne çıkmaktadır. Öncelikle, önerilen model, çözüm hızını artırırken doğruluğu da optimize etmektedir. Daha önceki çalışmalarda kullanılan yöntemler arasında sıklıkla karar ağaçları, rastgele ormanlar veya destek vektör makineleri yer almakta, ancak bu çalışmada hibrit bir yaklaşım benimsenerek farklı öğrenme algoritmalarının bir arada kullanıldığı görülmektedir. Bu entegrasyon hem işlem süresini kısaltmış hem de doğruluk oranlarında gözle görülür bir artış sağlamıştır. Literatüre yapılan yenilikçi katkı, özellikle makine öğrenmesi modellerinin birleştirilmesiyle elde edilen başarım artışında yatmaktadır. Bu çalışmanın avantajı, diğer yaklaşımların aksine hem sınıflandırma başarısını artırmak hem de karmaşık veri setleriyle daha verimli başa çıkmak olarak ifade edilebilir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada kullanılan veri seti, 17 girdi ve 1 hedef değişken olmak üzere toplamda 18 öznitelikten oluşmaktadır. Veri setindeki sınıf dengesizliklerini gidermek amacıyla azınlık sınıf örneklerinin arttırımına dayalı SMOTE veri dengeleme tekniği uygulanmıştır. İstatistiksel testlere dayalı SelectKBest yöntemi kullanılarak, veri setindeki düşük öneme sahip öznitelikler elimine edilerek sınıflandırma performansının artırılması hedeflenmiştir. Veri seti, dört farklı sınıflandırma algoritması ile analiz edilmiştir. Bu algoritmaların her biri, verinin farklı özelliklerini modelleyebilmek adına ayrı ayrı değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Çalışmada uygulanan yöntemin özet akış diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Akış diyagramı.

2. 1. Veri Seti

Bu çalışmada OSB'nin erken teşhis ve sınıflandırmasına yönelik olarak, Manukau Enstitüsü'nden araştırmacı Dr Fadi Fayez Thabtah tarafından [30] derlenen ve kamuya açık olarak paylaşılan *Autism Screening Data for Toddlers* [31] bir veri seti kullanılmıştır. Veri seti erken bebeklik dönemindeki otizm tespitine yönelik olarak 12-36 ay arasındaki bebeklerdeki ölçüm sonuçlarını içermektedir. Veri seti içerisinde, her biri 18 farklı öznitelikten oluşan toplam 1054 kayıt bulunmaktadır. Veri seti içerisinde OSB tespitine yönelik olarak uygulanan 10 soruluk testin cevapları ve bunun yanında bireyin çeşitli demografik verileri yer almaktadır. Veri seti içerisinde 17 girdi ve 1 hedef olmak üzere toplam 18 öznitelik bulunmaktadır. Özniteliklerin ayrıntıları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Veri seti öznitelikler.

Sıra	Öznitelik Adı	Öznitelik Türü	Açıklama
1	A1: Soru	(0,1 şeklindeki var yok verileri tür açısından kategoriktir)	Çocuğunuz adını söylediğinizde size bakıyor mu?
2	A2: Soru	(0,1 şeklindeki var yok verileri tür açısından kategoriktir)	Çocuğunuz ile göz teması kurmak sizin için ne kadar kolay?
3	A3: Soru	(0,1 şeklindeki var yok verileri tür açısından kategoriktir)	Çocuğunuz bir şey istediğini belirtmek için işaret ediyor mu? (örneğin, bir oyuncağa ulaşamadığında)
4	A4: Soru	(0,1 şeklindeki var yok verileri tür açısından kategoriktir)	Çocuğunuz sizinle ilgisini paylaşmak için işaret ediyor mu? (örneğin, bir şeyi işaret etmek)
5	A5: Soru	(0,1 şeklindeki var yok verileri tür açısından kategoriktir)	Çocuğunuz rol yapıyor mu? (örneğin, oyuncak bebeklere bakmak, oyuncak telefonla konuşmak)
6	A6: Soru	(0,1 şeklindeki var yok verileri tür açısından kategoriktir)	Çocuğunuz nereye baktığınızı takip ediyor mu?
7	A7: Soru	(0,1 şeklindeki var yok verileri tür açısından kategoriktir)	Ailenizden bir birey veya siz gözlemlenebilir bir şekilde üzgün olduğunuzda, çocuğunuzun bu duygu durumunu fark edip aşağıdaki belirtileri gösteriyor mu? (saçlarını okşamak veya sarılmak)
8	A8: Soru	(0,1 şeklindeki var yok verileri tür açısından kategoriktir)	Çocuğunuzun ilk kelimelerini şöylemi tanımlarsınız?
9	A9: Soru	(0,1 şeklindeki var yok verileri tür açısından kategoriktir)	Çocuğunuz basit jestler kullanıyor mu? (örneğin, el sallamak)
10	A10: Soru	(0,1 şeklindeki var yok verileri tür açısından kategoriktir)	Çocuğunuz görünürde bir amacı olmadan boş boş bakıyor mu?
11	Age (Yaş)	(sayısal sürekli)	Yaş
12	Score by Q-chat-10 (Q-chat-10'a göre puan)	Tam sayı	Teste cevaplanan sorulara göre elde edilen skor
13	Sex (Cinsiyet)	karakter	Kadın, Erkek
14	Ethnicity (Etnik köken)	Evet hayır	Bireyin etnik kökeni
15	Born with jaundice (Sarılık durumu)	Evet hayır	Birey sarılık geçirmiş mi?
16	Family member with ASD history (OSB geçmişi olan aile üyesi)	Evet hayır	Ailede OSB öyküsü var mı?
17	Who is completing the test (Testi kim tamamlıyor)	string	Aile, sağlık personeli vb..
18	Class variable (Sınıf değişkeni)	string	OSB durumu

OSB'de önemli değişkenlerden biri olan cinsiyetin veri seti içerisindeki örnek dağılımı Şekil 2'de sunulmuştur. Bu grafik, çalışmanın başlangıcında kullanılan veri setindeki cinsiyet dağılımını göstermektedir.



Şekil 2. Cinsiyete göre dağılım grafiği.

Veri setinde yer alan kayıtlardan bireylerin OSB durumunu gösteren hedef değişkene göre dağılımları Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Veri setinde OSB'li olan ve olmayan bireylerin dağılımı.

2.2. Sınıflandırmada Kullanılan Algoritmalar

Makine öğrenmesi, algoritmaların istatistiksel ve matematiksel yöntemleri kullanarak, veri setlerinden öğrenme yeteneğine sahip olduğu bir bilgi işleme dalıdır. Bu algoritmalar, verilerden örüntüler çıkarmak ve gelecekteki bilinmeyen verileri tahmin etmek için kullanılır [32]. Bu çalışmada, sınıflandırma alanında literatürde de yaygın olarak kullanılan dört farklı makine öğrenimi algoritması kullanılmıştır. Bunlar; K-En Yakın Komşu

(K-Nearest Neighbor / KNN), Destek Vektör Makinesi (DVM), Lojistik Regresyon (LR) ve Naive Bayes (NB)'dir. KNN algoritması, sınıflandırma görevlerinde kullanılan bir temel algoritmadır [33]. Eğitim aşamasında, veri noktalarının konumları depolanır. Sınıflandırma sırasında, yeni bir veri noktasının etrafındaki en yakın K komşu belirlenir. Bu komşuların sınıfları üzerinden, yeni veri noktasının sınıfı tahmin edilir.

DVM, iki sınıf arasındaki ayrımı en üst düzeye çıkarmayı hedefleyen bir lineer sınıflandırma veya regresyon modelidir. Özellikle, yüksek boyutlu veri setlerinde etkilidir. Hiper düzlemi bulma esasına dayanır ve bu hiper düzlem, destek vektörleri tarafından belirlenir [34].

LR, bir veri noktasının belirli bir sınıfa ait olma olasılığını tahmin etmek için kullanılan bir lineer modeldir. İkili sınıflandırma görevlerinde yaygın olarak kullanılır. Model, özniteliklerin ağırlıkları ile lineer bir kombinasyonunu alır ve bu değeri bir lojistik fonksiyon içinde kullanarak sınıflandırma gerçekleştirir [35].

NB, Bayes Teoremi 'ne dayalı bir olasılık temelli sınıflandırma algoritmasıdır. Öznitelikler arasındaki bağımsızlık varsayımını kullanır. Sınıflandırma sırasında, NB Teoremi ile veri noktasının ait olma olasılığı hesaplanır ve bu olasılıklar üzerinden en yüksek olasılığa sahip sınıf tahmin edilir [36].

2.3. Öznitelik Seçimi

Öznitelik seçimi, makine öğrenmesinde veri boyutunu optimize etmek, sınıflandırma doğruluğunu artırmak ve hesaplama maliyetini minimize etmek amacıyla kullanılan bir stratejidir. Bu yaklaşım, ilgili öznitelikleri seçerek modelin karmaşıklığını azaltır ve dolayısıyla daha etkili bir performans elde etmeyi hedefler. Bu süreç, öznitelikler arasında anlamsız veya gereksiz olanları elemek suretiyle modelin genel performansını artırır [37].

Bu sayede hem işleme hızı artar hem de daha az veriyle daha güvenilir sonuçlar elde etmek mümkün olur. Öznitelik seçimi, veri madenciliği ve makine öğrenimi alanlarında önemli bir aşama olarak kabul edilen bir yöntemdir. Bu yöntem, bir veri kümesinde bulunan özniteliklerin (features) sayısını azaltmayı veya belirli öznitelikleri seçmeyi amaçlar. Genellikle, bir veri setinde bulunan tüm özellikleri kullanmak, modelin karmaşıklığını artırabilir, eğitim sürecini zorlaştırabilir ve genelleme yeteneğini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, öznitelik seçimi, veri setindeki en önemli ve bilgi taşıyan öznitelikleri belirleyerek, modelin performansını artırmak ve gereksiz karmaşıklığı azaltmak için kullanılır. Öznitelik seçiminin temel amacı, modelin doğruluğunu artırırken aynı zamanda işlem maliyetini düşürmektir. Büyük veri setlerinde bulunan gereksiz veya birbirleriyle düşük korelasyona sahip özelliklerin elemesi, modelin daha hızlı eğitilmesine ve daha etkili çalışmasına olanak tanır. Ayrıca, öznitelik seçimi, modelin anlaşılabilirliğini artırarak, karar süreçlerini daha şeffaf hale getirir [38].

Bu çalışmada öznitelik seçimi yöntemleri arasından "SelectKBest" yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, scikit-learn kütüphanesinde bulunan bir fonksiyondur ve öznitelik seçiminde temel bir araç olarak kullanılır. SelectKBest yöntemi, veri kümesindeki öznitelikleri belirli bir kriterle değerlendirerek en iyi k özniteliği seçmeyi sağlar. Özniteliklerin değerlendirilmesi için çeşitli istatistiksel metrikler kullanılır. Bu aşamada ise "chi2" istatistiği tercih edilmiştir. Bu istatistik, özellikler arasındaki ilişkiyi ölçer ve en bilgi verici öznitelikleri seçmek için kullanılır. SelectKBest yöntemi, veri kümesindeki öznitelikleri değerlendirme ve seçme konusunda etkili bir yöntemdir. Bu yöntem özellikle sınıflandırma problemlerinde kullanılmak üzere tasarlanmıştır ve modelin daha doğru ve verimli olmasını sağlar. Seçilen öznitelikler, modelin performansını artırmak ve gereksiz öznitelikleri elemek amacıyla kullanılır. Bu seçim işlemi, modelin doğruluğunu artırmak ve analizde daha etkili sonuçlar elde etmek için gereklidir. SelectKBest yöntemiyle öznitelik seçimi yapılırken, chi2 istatistiğini kullanarak özniteliklerin önemi değerlendirilir. Bu istatistik öznitelikler arasındaki ilişkiyi ölçerek en bilgi verici olanların seçilmesini sağlar. Bu süreç, modelin genelleme yeteneğini iyileştirmek ve gereksiz bilgi karmaşasını azaltmak amacıyla önemli bir adımdır.

Öznitelik seçimi sürecinde "SelectKBest" gibi otomatik yöntemler kullanılarak belirlenen özniteliklerin ardından manuel olarak gözden geçirilmesi, modelin doğruluğunu artırmak için önemli bir adımdır. Bu süreç, özniteliklerin daha derinlemesine incelenmesini ve gerektiğinde ayarlanmasını sağlayarak modelin daha güçlü ve güvenilir olmasını destekler.

2.4. Smote Yöntemi

SMOTE, 2002 yılında Chawla ve arkadaşları tarafından önerilen bir fazla örnekleme (oversampling) tekniğidir ve dengesiz veri setlerindeki azınlık sınıfının örnek sayısını artırmak için sentetik veri örnekleri oluşturur [39]. SMOTE'un temel çalışma prensibi, azınlık sınıfındaki örnekler arasında doğrusal interpolasyon yoluyla yeni örnekler üretmektir. Bu yöntem, azınlık sınıfındaki örnekleri çoğaltmak yerine, mevcut veriler arasında yeni sentetik örnekler oluşturarak veri setindeki dengesizliği giderir. Bu çalışmada, sınıf dengesizliğini gidermek ve modelin her iki sınıftan da eşit derecede öğrenmesini sağlamak için SMOTE yöntemi kullanılmıştır. Öncelikle,

veri seti eğitim ve test setlerine ayrılmıştır. Daha sonra, SMOTE uygulanarak eğitim setinde azınlık sınıfı olan OSB tanısı olmayan bireylerin sayısı artırılmıştır. Böylece, modelin azınlık sınıfını göz ardı etme olasılığı azaltılmış ve sınıflar arasında denge sağlanmıştır. SMOTE, sınıf dağılımında denge sağlamak amacıyla azınlık sınıfına yakın olan komşu noktalar arasında yeni veriler oluşturarak çoğaltma yapar. Bu yöntem, özellikle büyük veri setlerinde modelin daha genel bir öğrenme yapmasını sağlayarak aşırı uyum (overfitting) riskini azaltabilir [40]. SMOTE uygulanmadan önce, OSB tanısı olan bireylerin oranı yaklaşık %69 iken, OSB tanısı olmayan bireylerin oranı %31'dir. SMOTE uygulamasıyla bu oran dengelenmiş ve eğitim setindeki sınıf dağılımı eşitlenmiştir. Bu sayede model, her iki sınıfa da eşit önem vererek daha dengeli bir sınıflandırma yapabilecektir. SMOTE ile yapılan oversampling, dengesiz veri setlerinde önemli bir rol oynar ve bu çalışmada veri dengesizliğinin önüne geçmek için etkin bir şekilde kullanılmıştır. Bu teknik sayesinde, model hem OSB tanısı olan hem de olmayan bireyleri daha iyi öğrenerek, sınıflandırma performansını artıracaktır. Literatürde yaygın olarak kullanılan bir oversampling yöntemidir ve dengesiz veri setlerindeki azınlık sınıfına ait örneklerin sayısını artırarak sınıf dengesini sağlamayı hedefler.

2.5. Çapraz Doğrulama

Modellerin etkin bir şekilde değerlendirilmesi için, eğitim seti üzerinde katmanlı 5 katlı çapraz doğrulama yöntemi kullanıldı. Bu yöntem, eğitim setini beş farklı alt kümeye (fold) ayırarak her katmanı hem eğitim hem de doğrulama için kullanır. Her bir katmanın hedef sınıflarının dağılımının tüm veri setini temsil etmesi, çapraz doğrulama sürecinde sınıf dengesizliği ile ilgili endişelerin belirlenmesine katkı sağlar.

Bu yöntem, veri setinin beş alt küme (fold) olarak bölünmesini sağlayarak modelin her bir alt küme üzerinde ayrı ayrı eğitilip değerlendirilmesini mümkün kılmıştır. Modelin güvenilirliğini artırmak ve aşırı uyum (overfitting) problemlerini önlemek amacıyla kullanılır. Bu bütünlüklü yaklaşım, özellikle büyük veri setleri üzerinde etkili, verimli ve genelleme yeteneği yüksek modellerin oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

3. Deneysel Çalışma ve Bulgular

Araştırmada sınıflandırma öncesinde veri seti üzerinde önişleme gerçekleştirilmiş, ardından öznitelik seçimi yapılarak farklı sınıflandırıcılar ile tahminlemeler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sınıflandırmalar için LR, NB, DVM ve KNN algoritmaları kullanılmıştır.

Veri setinde yer alan 17 adet girdi özniteliğin önce tamamı kullanılarak ve ardından öznitelik seçimi uygulanarak gerçekleştirilen toplam 4 farklı algoritma ile gerçekleştirilen sınıflandırmaların sonuçları çeşitli metrikler açısından değerlendirilmiştir. Sınıflandırmada kullanılan girdi özniteliklerin tamamı Tablo 2'de belirtilmiştir.

Tablo 2. Sınıflandırmada kullanılan girdi öznitelikleri.

Öznitelik No	Öznitelik Adı	Öznitelik No	Öznitelik Adı
1	A1: SORU	10	A10: SORU
2	A2: SORU	11	A11: SORU
3	A3: SORU	12	A12: SORU
4	A4: SORU	13	A13: SORU
5	A5: SORU	14	A14: SORU
6	A6: SORU	15	A15: SORU
7	A7: SORU	16	A16: SORU
8	A8: SORU	17	A17: SORU
9	A9: SORU	18	

Bu çalışmada 17 adet giriş özniteliğin OSB veri seti üzerinde sınıflandırmalar gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada veri setindeki tüm öznitelikler kullanılarak 4 farklı makine öğrenmesi algoritmasının sınıflandırma başarıları test edilmiştir. Sınıflandırma için kullanılan modellerin performansları temelde karmaşıklık matrisleri ve bunun üzerinden elde edilen alt metriklere göre raporlanmıştır. Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Karmaşıklık matrisi**.**

		Gerçek Sınıf	
		OSB'li	OSB'li değil
Tahmin Edilen Sınıf	OSB'li	DP	YP
	OSB'li değil	YN	DN

Sınıflandırıcı tarafından OSB'li olduğu belirlenen örneğin gerçek sınıfı da OSB'li ise bu durum Doğru Pozitif (DP), gerçek sınıfı OSB'li değil ise Yanlış Pozitif (YP) olarak adlandırılır. Benzer şekilde sınıflandırıcının OSB'li olmadığını belirlediği örneğin gerçek sınıfı da OSB'li değil ise bu durum Doğru Negatif (DN), gerçek sınıfı OSB'li ise Yanlış Negatif (YN) olarak adlandırılır. Bu değerler kullanılarak hesaplanan performans metrikleri ve formülleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Model performans metrikleri.

Metrik	Matematiksel İfadesi
Doğruluk	(DP + DN) / (DP + YP + YN + DN)
Kesinlik	DP / (DP + YP)
Duyarlılık	DP / (DP + YN)
F1 Skoru	2 * Kesinlik * Duyarlılık / (Kesinlik + Duyarlılık)

Öznitelik seçimi yapmadan ve 5 farklı öznitelik seçimi uygulanarak veri seti üzerinde KNN, LR, NB ve DVM algoritmaları ile sınıflandırmalar gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırma işlemlerinde 5 kat çapraz doğrulama uygulanmış ve skorların ortalamaları, Tablo 4'te belirtilen metrikler ile raporlanmıştır. Öznitelik seçimi uygulanmadan gerçekleştirilen bu sınıflandırmalar sonucunda elde edilen bulgular Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Öznitelik seçimi yapılmadan elde edilen sonuçlar**.**

Öznitelik Sayısı	Sınıflandırıcı (%)	Doğruluk (%)	Kesinlik (%)	Duyarlılık (%)	F1 Skoru (%)
18 (tamamı)	KNN	84,3601	83,8862	87,2037	86,6666
	NB	86,7298	90,0473	86,1904	87,7594
	LR	89,5734	88,6255	86,1904	87,0959
	DVM	83,8862	86,2559	83,3333	85,6714

Veri setinde yer alan 17 girdi ve 1 hedef değişken, toplamda 18 öznitelik içermektedir. Ön işleme aşamasını takiben gerçekleştirilen öznitelik seçimi adımında, kapsamlı bir "feature selection" (öznitelik seçimi) stratejisi kullanılmıştır. Bu strateji, belirli özelliklerin çıkarılması ve ardından modellerin eğitilmesi aşamasında önem taşımaktadır. Veri setindeki önemli öznitelikleri belirlemek ve modelin genel performansını artırmak amacıyla çeşitli öznitelik seçim yöntemleri içermektedir. KNN, DVM, LR ve NB gibi çeşitli sınıflandırma modelleri, seçilen önemli özniteliklerle birlikte oluşturulmuştur. Her bir durumda seçilen öznitelikler ve bu öznitelikler üzerinde gerçekleştirilen sınıflandırmalara ait bulgular Tablo 6'da detaylı olarak sunulmuştur. Tablo 6'da ki sonuçlar incelendiğinde, seçilen 5 adet öznitelik üzerinde DVM ve LR sınıflandırıcı ile elde edilen başarı oranı %100 olarak elde edilmiştir. Farklı sınıflandırmalarda seçilen en az öznitelik sayısı 5 olup, bu sayıda öznitelikle elde edilen en yüksek doğruluk oranı KNN algoritması ile %99,52 olarak belirlenirken, NB algoritması ile %96,68 olarak elde edilmiştir. Sınıflandırmalar sonucunda, öznitelik seçimi yapılan durumlar ile yapılmayan durumlar arasındaki en yüksek doğruluk değerleri özet olarak Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 6. Öznitelik seçimi ile elde edilen sonuçlar.

Öznitelik	Sınıflandırıcı	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skoru
Tümü	NB	86,7298	90,0473	86,1904	87,7594
	KNN	84,3601	83,8862	87,2037	86,6666
	DVM	83,8862	86,2559	83,3333	85,6714
	LR	89,5734	88,6255	86,1904	87,0959
1-4-11-12-13	NB	96,6824	93,8388	92,8909	93,4529
	KNN	99,5260	1	1	99,9052
	DVM	**1**	**1**	**1**	**1**
	LR	**1**	**1**	**1**	**1**
2-5-6-7-8-9-11	NB	95,2606	91,4691	91,9431	91,7436
	KNN	95,2606	92,4170	91,9431	92,1236
	DVM	96,6824	91,9431	91,4691	91,7436
	LR	97,1563	93,3649	91,4691	92,1236
11-12-13-14-15-16	NB	78,1990	82,4644	76,6666	71,4470
	KNN	99,0521	1	99,0476	99,24080
	DVM	**1**	**1**	**1**	**1**
	LR	**1**	**1**	**1**	**1**
2-5-6-7-9-11-13-16	NB	90,6303	91,9431	89,2606	94,1173
	KNN	92,4170	90,9952	90,5213	90,1308
	DVM	95,7345	93,3649	91,4691	91,8370
	LR	96,2085	93,3649	91,9431	92,1214

Tablo 7. Elde edilen en iyi doğruluk değerleri**.**

Öznitelik	NB	KNN	DVM	LR	Ortalama
Tümü	86,7298	84,3601	83,8862	89,5734	86,54022
1-4-11-12-13	96,6824	99,5260	**1**	**1**	99,0521
2-5-6-7-8-9-11	95,2606	95,2606	96,6824	97,1563	96,089975
11-12-13-14-15-16	78,1990	99,0521	**1**	**1**	94,312775
2-5-6-7-9-11-13-16	90,6303	92,4170	95,7345	96,2085	93,747575
Ortalama	89,50042	94,12316	95,26062	96,58764	

Sonuçlar detaylı bir analiz ile incelendiğinde, öznitelik seçiminin sınıflandırma algoritmalarının performansına olan etkisi açıkça belirginleşmektedir. Özellikle, öznitelik seçimi yapılan tüm durumlarda, elde edilen sınıflandırmaların başarısı, öznitelik seçimi yapılmayan durumlara kıyasla anlamlı bir şekilde daha yüksektir. Dört farklı sınıflandırıcı arasında yapılan karşılaştırmada, başarı değeri bakımından en yüksek performans DVM ve LR modeli ile elde edilmiştir ve bu durum %100 başarı oranıyla ifade edilmiştir. İkinci sırada ise KNN %99,52 başarı oranıyla yer alırken, üçüncü sırayı %96,68 başarı oranı ile NB almıştır.

3.1 Tartışma

Bu çalışmada otizm spektrum bozukluğu (OSB) tanısında farklı makine öğrenimi modellerinin ve öznitelik seçme yöntemlerinin etkinliğini karşılaştırmalı olarak inceleyerek, bu modellerin klinik uygulamalarda potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Elde edilen bulgular, sınıflandırıcıların performansının, öznitelik seçiminin model doğruluğunu önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Özellikle, Destek Vektör Makineleri

(DVM), Rastgele Orman (RO) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) gibi modellerin yüksek doğruluk oranlarına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslandığında, kullanılan öznitelik azaltma ve sınıflandırma yöntemlerinin performansı belirgin şekilde öne çıkmaktadır. Çalışmanın en önemli katkılarından biri, veri setinde yer alan 17 girdi ve 1 hedef değişken, toplamda 18 öznitelik üzerinden gerçekleştirilen analizlerin, OSB tanısında hangi özniteliklerin en kritik olduğunu göstermesidir. Öznitelik seçiminin, sınıflandırma başarısını artırmada kilit rol oynadığı ve minimum sayıda öznitelik ile yüksek doğruluk oranlarına ulaşılabildiği görülmektedir. Bu durum, OSB tanısında daha az veri ile daha yüksek başarı elde edilebileceğini ve dolayısıyla tanı süreçlerinin optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, özellikle büyük veri setleriyle çalışmanın zor olduğu klinik ortamlar için önemli bir pratik katkı sunmaktadır. Çalışmanın sınırlılıkları arasında, kullanılan veri setinin büyüklüğünün sınıflandırıcıların performansını nasıl etkilediği konusunda sınırlı bilgi sunması sayılabilir. Özellikle geniş veri setlerinde bu modellerin doğruluk oranlarının ne kadar korunabileceği gelecekteki çalışmalar için bir araştırma konusu olabilir. Ayrıca, farklı demografik gruplar ve yaş aralıklarında makine öğrenmesi modellerinin etkinliğini incelemek, OSB tanısında daha kapsayıcı ve genellenebilir sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayabilir. OSB tanısında kullanılan makine öğrenmesi modellerinin etkinliğini artırmak için öznitelik seçiminin kritik bir adım olduğunu ve sınıflandırıcı modellerin doğruluğunu önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Çalışmada elde edilen yüksek doğruluk oranları, bu yöntemlerin klinik uygulamalarda etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermekte olup, gelecekteki araştırmalar için önemli bir temel oluşturmaktadır. Özellikle, farklı makine öğrenimi algoritmalarının OSB tanısında daha fazla araştırılması ve bu algoritmaların klinik uygulamalarda daha geniş bir şekilde test edilmesi, alanın gelişimi açısından kritik olacaktır.

Bu çalışmada elde edilen bulguların, aynı veri setini kullanılan literatürdeki güncel çalışmaların bulguları ile karşılaştırılması Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Bulguların literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması.

	Referans	**Yöntem**	**En İyi Doğruluk (%)**
1	de Campos Souza & Guimaraes (2018)	YSA	100
2	Akyol ve Karaci (2018)	LR	97,33
3	Shuvo vd (2019)	RO	96
4	Misman vd (2019)	DNN, DVM	95,24
5	Raj & Masood, (2020)	NB, DVM, LR, KNN, CNN, YSA	99,53
6	Metlek ve Kayaalp (2020)	YSA, DKSBS	100
7	Thabtah & Peebles (2020)	NB, LR	97,94
8	Mokni ve Haoues (2020)	Decision Tree, DVM	99,50
9	Khatun vd (2021)	DVM	85
10	Santos (2021)	KNN, DVM, RO	79,35
11	Saihi & Alshraideh (2021)	RO, C4.5 Tree-, YSA	99
12	Saran & Pirouz (2021)	KNN, RO, DVM, LR	73
13	Alaika & Alamsyah (2022)	GSA, DVM, CFS	96,61
14	Dedgaonkar vd (2022)	KNN, CNN	100
15	Uddin (2023)	RO, MNB, BNB, DVM, NB	100
16	Praveena vd (2023)	Adaboost given, RO	100
17	Pottem vd (2023)	NB, KNN	97,47
18	Bidwe vd (2023)	CNN	87,99
19	Bu çalışma	DVM, LR	**100**

Tablo 8'de sunulan verilere göre, son altı yılda gerçekleştirilen benzer çalışmalarda en yüksek doğruluk %100 iken en düşük doğruluk %73 olarak kaydedilmiştir. Bu çalışmada elde edilen en yüksek doğruluk değeri de %100'e ulaşmıştır. Bu çalışmada, öznitelik seçimi ve sınıflandırıcıların kullanımıyla elde edilen sonuçların, benzer çalışmalara kıyasla yüksek bir performans sergilediği tespit edilmiştir. Tabloda yer alan diğer çalışmalar veri setindeki özniteliklerin tamamı üzerinde işlem yaparken, gerçekleştirilen çalışmada önce öznitelik seçimi gerçekleştirilmiş, daha az öznitelik kullanarak daha performanslı sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Özellikle,

Destek Vektör Makinesi ve Lojistik Regresyon Modellerinin 5 öznitelik ile %100 doğruluk sağladığı diğer benzer çalışmalardan daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu sonuç, özellikle OSB veri setindeki öznitelik seçimi yoluyla daha etkin sonuç elde etme konusuna odaklı araştırmalar için önemli bir bulgudur. Literatürdeki benzer çalışmaların bulguları incelendiğinde bu çalışmada kullanılan yöntemlerin diğer çalışmalarda rekabet edebilecek düzeyde ve genelinden daha yüksek skorlar sağladığı görülmektedir. Benzer çalışmalarda aynı yüksek doğruluk seviyelerine ulaşmasına rağmen, bu çalışmada daha az sayıda öznitelik kullanılarak %100'e ulaşan başarı sağlanmıştır. Bu durum, daha az ve etkin özniteliklerle yüksek başarıya ulaşabildiğini göstermektedir. Bu çalışmanın özellikle öznitelik seçimi yöntemlerinin ve farklı sınıflandırıcıların kombinasyonunun ne kadar etkili olabileceğini göstermektedir. 5 öznitelikle %100 doğruluk elde edilmesi, öznitelik seçiminin önemini ve doğru yöntemlerin kullanılmasının sonuçlara olan etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

4. Sonuç

Erken teşhis ve etkili müdahaleler, OSB ile ilişkili zorlukların üstesinden gelmede hayati önem taşımaktadır. Erken tanı, müdahalelerin ve terapilerin etkinliğini önemli ölçüde artırabileceğinden dolayı son derece kritik bir konudur. Erken teşhis, müdahalelerin ve terapilerin etkisini belirgin şekilde artırma potansiyeline sahiptir ve bu nedenle büyük önem taşımaktadır. OSB veri seti üzerinde gerçekleştirilen öznitelik seçimi ve sınıflandırıcıların performansı veri setindeki 17 girdi ve 1 hedef değişken, toplamda 18 öznitelik üzerinde yapılan analizler, öznitelik seçiminin sınıflandırma modellerinin başarısına olan etkisini açıkça ortaya koymuştur. Öznitelik seçimi yapılmadan önce tüm özniteliklerin kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar, farklı sınıflandırma modelleri için kabul edilebilir doğruluk oranlarına işaret etmiştir. Ancak, öznitelik seçimi yapıldığında, sınıflandırma modellerinin başarı oranlarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Özellikle, DVM ve LR modelleri, minimum sayıda öznitelikle %100 doğruluk oranına ulaşarak diğer modellerden ayrılmıştır. Literatürdeki benzer çalışmaların doğruluk değerleriyle karşılaştırıldığında, bu çalışmanın kullanılan yöntemler ve modeller açısından daha yüksek başarı elde ettiği görülmüştür. Öznitelik seçme yöntemlerinin etkin kullanımıyla daha az sayıda öznitelikle yüksek doğruluk oranlarına ulaşılması, özellikle veri setindeki önemli özniteliklerin belirlenmesi ve model performansının artırılmasında önemli bir artış görülmüştür. Bu çalışma öznitelik seçimi yöntemlerinin ve farklı sınıflandırıcıların kombinasyonunun sınıflandırma modellerinin performansını nasıl etkileyebileceği gösterilmiştir. Özellikle, doğru öznitelik seçimi ve uygun sınıflandırıcıların seçimiyle elde edilen %100 doğruluk oranı, benzer çalışmalardan daha yüksek bir başarı düzeyini temsil etmektedir. Bu nedenle, öznitelik seçimi ve sınıflandırma modellerinin dikkatli bir şekilde seçilmesi ve uygulanması özellikle karmaşık veri setleri üzerinde yüksek doğruluk ve performans sağlayabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, veri madenciliği ve sınıflandırma alanında çalışan araştırmacılar için değerli bir rehberlik sunmaktadır. Özellikle karmaşık veri setleri üzerinde yüksek doğruluk ve performans sağlamak için öznitelik seçimi ve sınıflandırma modellerinin dikkatlice seçilmesi ve uygulanması gerektiği konusunda araştırmacılara yönlendirme sağlanabilir. Bu şekilde, gelecekteki çalışmaların daha etkili ve güvenilir sonuçlar elde etmesinde katkı sağlayacak niteliktedir.

Çalışmanın bazı sınırlamaları da göz önünde bulundurulmalıdır. İlk olarak, çalışma yalnızca belirli bir veri seti üzerinde gerçekleştirilmiştir; dolayısıyla, elde edilen bulgular farklı veri setlerine genellenebilir mi sorusu araştırılması gereken bir konudur. Farklı veri setleri üzerinde benzer sonuçların elde edilip edilemeyeceği, gelecekteki çalışmaların ana odaklarından biri olmalıdır. Ayrıca, öznitelik seçimi yöntemlerinin etkinliği, veri setinin özelliklerine ve yapısına bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle, çalışmada kullanılan öznitelik seçimi yöntemlerinin, farklı veri türleri ve boyutları üzerinde nasıl performans göstereceği daha fazla araştırılmalıdır. Bir diğer sınırlama ise, çalışmada yalnızca belirli sayıda sınıflandırıcı modelin değerlendirilmiş olmasıdır. İleride yapılacak çalışmalar, farklı sınıflandırıcı modelleri veya derin öğrenme algoritmalarını da inceleyerek, bu modellerin OSB veri setleri üzerindeki performanslarını değerlendirebilir. Son olarak, %100 doğruluk oranına ulaşan modellerin genelleme yetenekleri, özellikle daha büyük ve daha karmaşık veri setleri üzerinde test edilmelidir. Modelin aşırı öğrenme (overfitting) yapma riski dikkate alınarak, genelleme yeteneği daha geniş çaplı analizlerle değerlendirilmelidir.

Bu çalışmanın bulgularını daha da genişletmek için çeşitli yaklaşımlar önerilebilir. İlk olarak, daha geniş ve çeşitlendirilmiş veri setleri üzerinde ek analizler yapılarak, farklı öznitelik seçimi yöntemlerinin ve sınıflandırıcıların performansı test edilebilir. Böylelikle, bulguların genellenebilirliği artırılabilir. Ayrıca, derin öğrenme teknikleri kullanılarak daha karmaşık modellerin incelenmesi, özellikle büyük veri setlerinde doğruluk oranlarının daha da iyileştirilmesine katkı sağlayabilir. İleride yapılacak çalışmalar, özellikle bu tür modellerin hesaplama maliyetlerini ve uygulanabilirliğini de göz önünde bulundurmalıdır. Çalışmanın bulguları, özellikle bazı öznitelik kombinasyonlarıyla önemli başarılar elde edildiğini göstermektedir. Tablo 8'de görüldüğü gibi, öznitelik seçimi yapıldıktan sonra DVM ve LR modelleri %100 doğruluk oranına ulaşmış ve diğer modellerden belirgin şekilde ayrılmıştır. Özellikle, "1-4-11-12-13" ve "11-12-13-14-15-16" öznitelik kombinasyonları kullanıldığında, DVM ve LR modellerinin doğruluk oranları en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Ortalama doğruluk

oranları incelendiğinde, LR modeli %96,59, DVM modeli ise %95,26 doğruluk ile öne çıkmaktadır. Bu sonuçlar, öznitelik seçiminin ve sınıflandırıcıların dikkatli bir şekilde belirlenmesinin sınıflandırma performansını nasıl artırabileceğine dair önemli bir kanıt sunmaktadır.

Kaynaklar

[1] Korkmaz B. Otizm: Klinik ve nörobiyolojik özellikleri erken tanı tedavi ve bazı güncel gelişmeler çağrılı Yazar. Türk Pediatri Arşivi 2010; 45(12): 1-8.

[2] Çattik EO, Yetkin Aİ, Diken İH. Erken çocukluk döneminde otizm spektrum bozukluğunda aile merkezli müdahaleler. Ankara Üniversitesi Eğitim Bilimleri Fakültesi Özel Eğitim Dergisi 2020; 21(3): 589-610.

[3] Volkmar FR, McPartland JC. From Kanner to DSM-5: Autism as an evolving diagnostic concept Annu Rev Clin Psychol, 2014 ;10: 193-212.

[4] Akkuş PZ, Saygan BB, Bahadur Eİ, Cak T, Özmert E. Otizm spektrum bozukluğu tanısı ile yaşamak: Ailelerin deneyimleri. Turkish Journal of Pediatric Disease 2021; 15(4): 272-279.

[5] Atalay M, Çelik E. Büyük veri analizinde yapay zekâ ve makine öğrenmesi uygulamaları- Artificial intelligence and machine learning applications in big data analysıs. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi 2017; 9(22): 155-172.

[6] Tamur Y, Celasin NŞ. Aile sağlığı merkezlerinde görev yapan sağlık profesyonellerinin otizm konusundaki bilgi ve erken tanıya yönelik görüşleri. Turkish Journal of Family Medicine and Primary Care 2022; 16(3): 517-531.

[7] Başkak ET, Aral N. Türkiye'de Otizm tanısı almış bireylerin aileleri ile yapılmış tezlerin ve makalelerin incelenmesi (2000-2021). İzmir Sosyal Bilimler Dergisi 2021; 3(2): 213-224.

[8] Çelik S, Çeşmeli MŞ. Çocuklar için Otizm Spektrum bozukluğunun veri madenciliği yöntemleri ile analizi. Acta Infologica 2021; 5(1): 167-186.

[9] Demirhan,A. Performance of machıne learnıng methods ın determınıng the autısm spectrum dısorder cases. Mugla. Journal Of Science And Technology 2018; 4(1): 79-84.

[10] Metlek S, Kayaalp K. Otistik Spektrum bozukluğunun makine öğrenme algoritmaları ile tespiti. Int J Intell. Syst International.: Theory and Applications 2020; 3(2): 60-68.

[11] Thabtah F, Peebles D. A new machine learning model based on induction of rules for autism detection. Health Inf J 2020; 26(1): 264-286.

[12] Akyol K, Karaci A. A study on autistic spectrum disorder for children based on feature selection and fuzzy rule. International congress on engineering and life science 2018: 804-807.

[13] De Campos Souza PV, Guimaraes AJ. Using fuzzy neural networks for improving the prediction of children with autism through mobile devices. Symposium on computers and communications 2018; 01086-01089.

[14] Saihi A, Alshraideh H. Development of an autism screening classification model for toddlers. Conference on Machine Learning & Applications 2021; 2110.01410.

[15] Shuvo SB, Ghosh J, Oyshi AS. A data mining based approach to predict autism spectrum disorder considering behavioral attributes ICCCNT 2019; 1-5.

[16] Bidwe RV, Mishra S, Bajaj S. Performance evaluation of Transfer Learning models for ASD prediction using non-clinical analysis. Proceedings of the 2023 Fifteenth International Conference on Contemporary Computing 2023; 474-483.

[17] Raj S, Masood S. Analysis and detection of autism spectrum disorder using machine learning techniques. Procedia Comput Sci 2020; 167: 994-1004.

[18] Alaika L, Alamsyah A. Optimization of accuracy to autism spectrum disorder ıdentification for children using support vector machine and correlation-based feature selection. Journal of Advances in Information Systems and Technology 2022; 4(1): 1-12.

[19] Saran PK, Pirouz M. EEG analysis for predicting early autism spectrum disorder traits. Proceedings of the Future Technologies Conference 2021; 2: 658-675.

[20] Misman MF, Samah AA, Ezudin FA, Majid HA, Shah ZA, Hashim H, Harun MF. Classification of adults with autism spectrum disorder using deep neural network. In2019 1st International Conference on Artificial Intelligence and Data Sciences (AiDAS); 2019; Sep 19; Malaysia: 29-34.

[21] Khatun MA, Ali MA, Ahmed MR, Noori SRH, Sahayadhas A. Empirical study of computational ıntelligence approaches for the early detection of autism spectrum disorder. Intelligent Computing and Applications: Proceedings of ICICA 2019; 2021; 161-170.

[22] Santos DF. Analyzing the predictive power of machine learning models for autism detection. SciELO Preprints 2023.

[23] Mokni R, Haoues M. Deep Classifier Model for Autism Spectrum Disorder Prediction. Knowledge Innovation Through Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques. IOS Press; 2020: 138-49.

[24] Dedgaonkar S, Sachdeo R, Godbole S. Hybrid feature vector for screening of autistic people using deep learning. International Journal of Intelligent Engineering & Systems 2022; 15(1).

[25] Uddin KMM. A machine learning approach to predict autism spectrum disorder (ASD) for both children and adults using feature optimization. Network Biology 2023; 13(2): 37.

[26] Praveena KN, Mahalakshmi R, Manjunath C, Zubair AF, Karthikeyan P. OptimizedFeature selection and transformations for early stage prediction of autism using supervised machine learning models. MECS 2023; 6: 73-89.
[27] Pottem A, Sirisha G, Chaitanya RK. Prediction of autism spectrum disorder from high dimensional data using machine learning techniques. 2023;28:261.
[28] Günay M, Alkan A. Classification of EMG signals by spectral methods and SVM classifier. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2016; 13(2): 63-80.
[29] Balcı M, Alkan A. Identification of wart treatment evaluation by using optimum ensemble based classification techniques. Biomed Signal Process Control 2024; 95: 106491.
[30] Thabtah F, Peebles D. A new machine learning model based on induction of rules for autism detection. Health Inf J 2020: 26(1): 264-286.
[31] Autism screening data for toddlers 2018. https://www.kaggle.com/datasets/fabdelja/autism-screening-for-toddlers.
[32] Çelik Ö. A Research on Machine Learning Methods and Its Applications. J Educ Technol Online Learn. 2018;1(3):25-40.
[33] Boser BE, Guyon IM, Vapnik VN. A training algorithm for optimal margin classifiers. Proceedings Of The Fifth Annual Workshop On Computational Learning Theory 1992; 144-152.
[34] Bone D, Bishop SL, Black MP, Goodwin MS, Lord C, Narayanan SS. Use of machine learning to improve autism screening and diagnostic instruments: Effectiveness, efficiency, and multi-instrument fusion. J Child Psychol Psychiat.; 57(8): 927-937.
[35] Pisner DA Schnyer DM. Chapter 6-Support vector machine, Machine Learning. A. Mechelli & S. Vieira (Ed.). Academic Press, 2020; 101-121.
[36] Nick TG, Campbell KM. Logistic regression, Topics in Biostatistics. W. T. Ambrosius (Ed.). Humana Press, 2007; 273-301.
[37] Huang X, Jin G, Ruan W. Naive bayes, Machine Learning Safety. X. Huang, G. Jin, & W. Ruan (Ed.). Springer Nature 2023; 95-102.
[38] Cai J, Luo J, Wang S, Yang S. Feature selection in machine learning: A new perspective. Neurocomputing 2018; 300: 70-79.
[39] Fernandez A, Garcia S, Herrera F, Chawla NV. SMOTE for Learning from Imbalanced Data: Progress and Challenges, Marking the 15-year Anniversary. J Artif Intell Res, 2018; 61: 863-905.
[40] Elreedy D, Atiya AF, Kamalov F. A theoretical distribution analysis of synthetic minority oversampling technique (SMOTE) for imbalanced learning. Mach learn 2024; 113(7): 4903-4923.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 75-82, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1443205

Aloe Vera Yüklü Kitosan/Fibroin Filmlerin Hazırlanması, Karakterizasyonu ve İlaç Salım Özelliklerinin Araştırılması

Pınar DEMİR[1*], Hasan YETİK[2]
[1] Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojisi Bölümü, EOSB MYO, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
[2] Biyoteknoloji Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
[*1] pdemir@firat.edu.tr, [2] hasanyetiktr@gmail.com

(Geliş/Received: 27/02/2024; Kabul/Accepted: 19/12/2024)

Öz: Bu çalışmada ilaç taşıyıcı özelliğe sahip, biyopolimer esaslı kitosan /ipek fibroin/aloe vera içeren filmler hazırlanmıştır. Bu amaçla öncelikle ham ipekten fibroin proteini saflaştırılarak ayrılmıştır. Daha sonra çözeltiden döküm yöntemiyle aloe vera katkılı fibroin/kitosan filmleri hazırlanmış ve SEM, FTIR ve TGA teknikleriyle hem yüzey, hem yapısal hem de ısıl davranışları karakterize edilmiştir. Ayrıca hazırlanan harman polimer filmlerine katılan antibiyotiğin salım şartları belirlenmiştir. Maksimum ilaç salımı %75 kitosan içeriğine sahip FK3 filminde gözlenmiştir. Ayrıca polimer filmlerinin pH 2 de en yüksek ilaç salımı sergilediği ve pH arttıkça salımın azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Fibroin, Kitosan, Aloe vera, İlaç Salım.

Preparation, Characterization and Investigation of Drug Release Properties of Aloe Vera Loaded Chitosan/Fibroin Films

Abstract: In this study, biopolymer-based chitosan/silk fibroin/aloe vera-based films with drug carrier properties were prepared. For this purpose, firstly, fibroin protein from raw silk was purified and separated. Then, aloe vera-doped fibroin/chitosan films were prepared by solution casting method and their surface, structural and thermal behaviors were characterized using SEM, FTIR and TGA techniques. Additionally, the release conditions of the antibiotic added to the prepared blend polymer films were determined. Maximum drug release was observed in FK3 film with 75% chitosan content. It was also determined that polymer films exhibited the highest drug release at pH 2 and that the release decreased as pH increased.

Key words: Fibroin, Chitosan, Aloe vera, Drug Release

1. Giriş

Doğal polimerler genellikle hayvan ya da bitkilerden elde edilen, in vivo olarak herhangi bir toksik etki göstermeksizin hidroliz veya enzimatik sindirim yoluyla küçük biyolojik moleküllere parçalanan makromoleküller olarak tanımlanır [1].

Binlerce yıl önce keşfedildiğinden beri ipekböceği ipeğinin çok çeşitli çekici özelliklere sahip bir biyopolimer olduğu bilinmektedir. İpekböceği ipeğinin ana proteini olan ipek fibroinin kullanımı tekstil endüstrisi ile sınırlı kalmamış, ilaç salım sistemleri ve doku mühendisliği için biyomalzemeler dâhil olmak üzere çeşitli yüksek teknoloji uygulama alanlarına da yayılmıştır. İpek fibroinin kolay işlenebilirliği, üstün biyouyumluluğu, kontrol edilebilir biyolojik bozunması ve çok yönlü işlevselleştirilmesi dâhil olmak üzere olağanüstü mekanik özellikleri, yenilikçi uygulamalar için kullanılmasına izin vermiştir [2]. Biyomalzemeler olarak ipek fibroin bazlı malzemelerin geçmişteki ve günümüzdeki kullanımını analiz edildiğinde, dermatolojik durumların tedavisi için ipek kumaşları ve plastik cerrahi uygulamaları fark edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmalarda yara iyileşmesi veya kulak zarı perforasyonu onarımları için ipek fibroin filmin insan klinik denemeleri de yapıldığı görülmüştür [3].

Kitosan, kısmi deasetilasyon ile elde edilebilen kitin türevi bir bileşiktir [4]. Kitosan, mükemmel biyoyararlanım, biyolojik olarak parçalanabilirlik ve adsorpsiyon özelliklerinin yanı sıra toksik olmama özelliğine sahiptir. Bu özellikler, yara tedavisi, ilaç taşıyıcı, gıda paketleme, diyet takviyesi, şelatlama maddesi, farmasötik ve biyomateryal amaçlar vb. gibi birçok alanda çeşitli uygulamalarda çok faydalı olmasını sağlamaktadır [5].

Aloe vera, binlerce yıldır çeşitli kültürlerde tıbbi amaçlar için kullanılmıştır [6]. Aloe vera, çok sayıda bileşeni nedeniyle antikanser, antimikrobiyal, antiviral ve yara iyileşmesi gibi biyomedikal uygulamalarda kullanılan bir bitki özüdür. Aloe veranın biyolojik aktiviteleri arasında analjezik, antibakteriyel, antioksidan, antifungal, antiviral, yara iyileşmesi, antienflamatuar, temizleme, antiseptik vb. özellikleri bulunmaktadır [7].

[*] Sorumlu yazar: pdemir@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0001-6074-3410, [2] 0000-0002-8188-2206

İlaç dağıtım sistemleri, kontrollü ilaç salınımı, daha uzun temas süresi, daha fazla hedef özgüllüğü, azaltılmış doz ve ilaç uygulama düzenliliği sağlamayı amaçlamaktadır. Birçok çalışma kitosan/fibroin kompozitlerinin ilaç veya rekombinant büyüme faktörü dağıtımında geniş uygulamalarını bildirmiştir [8-10]. Bu çalışmada da kitosan/fibroin ve aloevera yüklü kitosan/fibroin filmlerinin ilaç salım özellikleri incelenmiştir.

2. Materyal ve metot

2.1. Materyal

İpekten fibroin elde edilmesi amacıyla kullanılan ham ipek Diyarbakır Kulp Ziraat Kooperatifinden temin edildi. Polimer filmlerinin eldesi için saf fibroin çözeltisi formik asit (Merck), kitosan (BLDpharm) çözeltisi asetik asit (Merck) kullanılarak hazırlandı. Aloe vera jeli aloe vera yapraklarından elde edildi. İlaç salım çalışmaları için model ilaç olarak Amoksisilin trihidrat (Tokyo Chemical Industry Co. Ltd.) kullanıldı.

2.2. Metot

2.2.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Kimyasalların ve Malzemelerin Hazırlanması

Çalışmada saf fibroin eldesi için kullanılacak ham ipek Diyarbakır Kulp Ziraat Kooperatifinden temin edildi. İpek lifleri katı halde 5 gr tartıldı. Sodyum karbonat çözeltisi hazırlamak için 0,5 gr sodyum karbonat (Sigma-Aldrich) katısı 500 mL'lik balon jojede çözüldü (çözelti saf su kullanılarak hazırlandı). 5 gr ipek lifi behere alınarak 300 mL sodyum karbonat çözeltisi ile 40°C sıcaklıkta 1 saat süreyle karıştırıldı. Daha sonra ipek lifi süzülerek ayrıldı ve 10 mL alkol içeren 200 mL sodyum karbonat çözeltisinde 40°C'de 30 dakika bekletildi. 5 gr yeşil sabun tartılarak 500 mL balon joje de saf su kullanılarak çözüldü. Süzülen katı ipek lifleri 5 mL alkol ve 500 mL yeşil sabun çözeltisi ile 90-95 derecede 1-1,5 saat karıştırıldı. Süzme işlemi gerçekleştirildikten sonra 1 saat liflerin soğuması beklendi. İpek lifleri kuruması için süzgeç kâğıdına alındı.

Serisini uzaklaştırılan fibroin lifleri bol saf su ile durulandı ve oda sıcaklığında 48 saat kurutuldu. Daha sonra 85 °C'de $CaCl_2$:CH_3CH_2OH:H_2O (Ajisawa çözeltisi) (1:2:8 mol oranı) içinde 90 dakika süreyle %5 (ağırlık/hacim) konsantrasyona kadar çözüldü. Fibroin çözeltisi, çözücünün tuzlarını uzaklaştırma için 3 gün boyunca 8°C'de saf suya daldırılmış 3,5 kDa moleküler ağırlık kesimli (Serva) bir selüloz membran kullanılarak diyaliz edildi. Diyaliz suyu, fibroin solüsyonunun suya oranı 1:15 olacak şekilde tutularak her 24 saatte bir değiştirildi. Diyaliz sonrası Fibroinin %2 (ağırlık/hacim) sulu çözeltisi elde edildi ve filmlerin hazırlanmasında kullanıldı.

Aloe Vera (AV) jeli hazırlamak için tıbbi olarak kullanılan aloe vera yaprakları tek bir bahçe bitkisi setinden toplanarak yıkandı ve bıçakla uzunlamasına kesildi. Spatül kullanılarak jel kısım kabuk kısmından ayrıldı. Ayrılan aloe vera jeli damıtılmış suyla (40 °C) yıkanarak kurutuldu ve filmlerin hazırlanmasında kullanılana kadar 4°C'de saklandı.

2.2.2. Polimer Filmlerinin Hazırlanması

Fibroin, Kitosan ve aloe vera kullanılarak aloe vera yüklü fibroin/kitosan filmlerini hazırlamak için %2 asetik asit çözeltisi kullanılarak kitosan çözeltisi hazırlandı. Ardından kütlece %25, %50 ve %75 fibroin (formik asitte çözüldü) içerecek şekilde kitosan/fibroin çözeltileri hazırlandı. Fibroin/Kitosan oranı ağırlıkça 1:3, 1:1, 3:1 olacak şekilde hazırlanan çözeltiler 30 dakika boyunca sonike edildi. Çözeltiler sırasıyla FK1, FK2 ve FK3 olarak kodlandı. Ayrıca hazırlanan bu çözeltilere %5 ve %10 oranında aloe vera jeli eklenerek ikinci bir seri çözelti hazırlandı. Hazırlanan çözeltiler FK1/AV(%), FK2/AV(%) ve FK3/AV(%) olarak kodlandı. Hazırlanan çözeltiler petri kaplarına dökülerek filmler hazırlandı.

2.2.3. Polimer Filmlerine Model İlaç Yüklemesi

Kitosan ve fibroin kullanılarak farklı oranlarda hazırlanan harmanlara model ilaç olarak amoksisilin trihidrat, ağırlıkça %0,1'lik bir konsantrasyon elde etmek üzere ilave edildi. Model ilacı içeren harman çözeltisi, 12 saat boyunca yavaşça karıştırıldı ve oda sıcaklığında tozsuz bir atmosferde temiz kuru Petri kaplarına dökülmeden önce hava kabarcıklarından kurtulmak için gece boyunca bırakıldı. Filmler, ortam sıcaklığında 72 saat kurumaya bırakıldı ve daha sonra kullanılmadan önce bir desikatörde silika üzerinde saklandı. Filmlerin kalınlığı 25–30 μm arasında tutuldu.

Model ilacın filmlerden salım özelliklerini incelemek için ilaç yüklü harman filmleri, 37 °C'de pH 2,0, 5,5 ve 7,2'lik tampon çözeltilere daldırıldı. Belirli bir zaman aralığında, 1 mL'lik alikotlar çekildi ve salınan ilaç miktarı açısından test edildi. Solüsyonlarda salınan amoksisilin trihidrat miktarı, 272 nm'de UV spektrofotometre (Perkin Elmer, Lambda 10) kullanılarak belirlendi. Deneyler üç tekrar halinde yapıldı. Serbest bırakılan ilaçların yüzdeleri, ilacın kalibrasyon eğrilerinden hesaplandı.

2.2.4. Polimer Filmlerinin Karakterizasyonu

Hazırlanan Fibroin/kitosan ve aloe vera yüklü Fibroin/kitosan filmlerinin yapısal karakterizasyonu Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR, Perkin Elmer Spectrum One) ile 400-4000 cm^{-1} dalga boyu aralığında gerçekleştirilmiştir. Polimer filmlerinin ısıl davranışlarının belirlenmesi için TGA (Shimadzu TGA-50) analizleri yapılmıştır. TGA analizleri 25-500 °C sıcaklık aralığında 30 mL/dakika azot gazı akışında 10 °C/dakika ısıtma hızında gerçekleşmiştir. Hazırlanan filmlerin yüzey morfolojileri Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy, JEOL JSM 6510) ile incelenmiştir. Analiz öncesi filmler vakumlu ortamda altın ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra, 20 kV hızlandırma gerilimi altında, 2500x, 5000x ve 10000x büyütme oranında filmlerin yapılarına ait görüntüler alınmıştır.

2.2.5. Polimer Filmlerinin Şişme Özellikleri

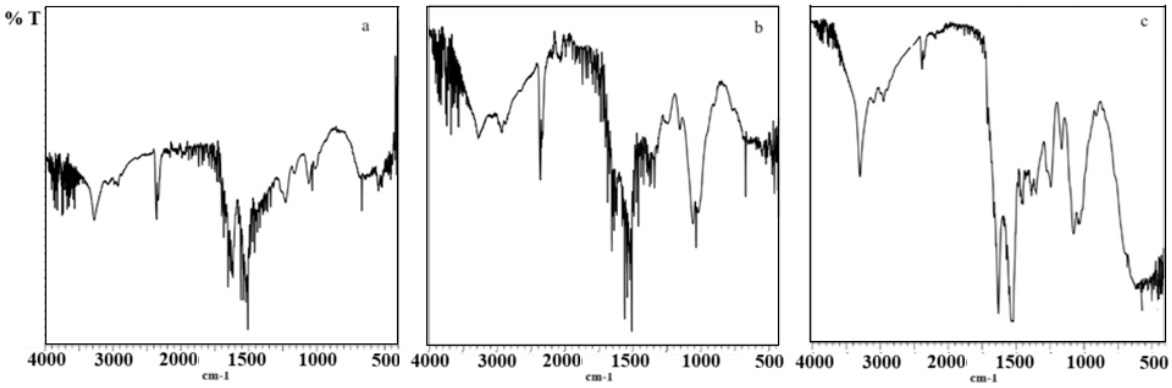
Fibroin/kitosan harman filmlerinin su emme özelliği, 24 saat boyunca 37°C'de PBS'ye (pH 7,4) daldırma ile belirlendi. Yaş ağırlık (Ws, şişmiş ağırlık) ve kuru ağırlık (Wd, 65°C'de gece boyunca kurutulmuş) ölçüldü. Daha sonra şişme indeksi Denklem 1'de gösterildiği gibi hesaplandı.

$$Şişme\ İndeksi = \left(\frac{(Ws-Wd)}{Wd} x100\right) \quad (1)$$

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. FT-IR Analizi

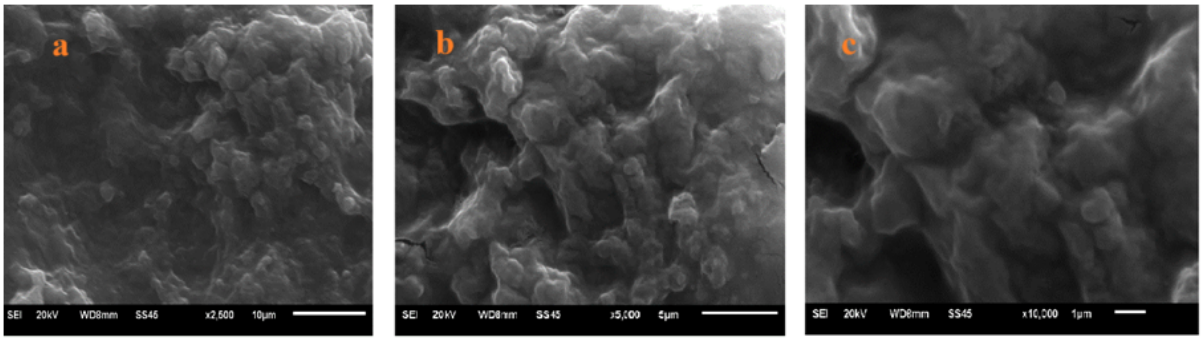
Serisini ayrıştırılmış ipek fibroinin FTIR spektrumu, Şekil 1a'da gösterilmiştir. İpek proteininde bulunan amid gruplarının varlığı 1620 cm^{-1} etrafındaki amid I'in (C=O bağı) peptid bağının absorbsiyonuna ait karakteristik titreşim bantları, 1513 cm^{-1} etrafındaki amid II (N-H bağı) ve 1230-1444 cm^{-1} etrafındaki amid III (C-N bağı) bantları ile karakterize edilir. Yine ipek fibroininin moleküler yapısında bulunan β-tabaka (1630, 1530 ve 1250 cm^{-1} civarındaki pikler), düzensiz halka yapısı (1645, 1550 ve 1230 cm^{-1}civarındaki pikler) ve α-sarmal (1655 cm^{-1} deki pik) yapısı ilgili piklerle karakterize edilmektedir [11]. Yaptığımız çalışmada da FTIR sonuçları incelendiğinde, serisini ayrıştırılmış ipek fibroini β-tabaka yapısını oluşturan 1623cm^{-1} (amid I), 1509 cm^{-1} (amid II), 1228-1444 cm^{-1} (amid III) absorbsiyon piklerini görülmektedir (Şekil 1a). FK1 filminin FTIR spektrumu, Şekil 1b'de gösterilmektedir. 3283 cm^{-1} OH ve amin N-H simetrik gerilme titreşimlerini, 2930 cm^{-1} piranoz halkasına bağlı simetrik CH_2 gerilme titreşimini, 1621 cm^{-1} amid I'in peptid omurgasını (C –O germe), 1520 cm^{-1} amid II (N-H bükme) karakteristik tepe noktaları ve 1021 cm^{-1}'de C-O germe titreşimine aittir. FK1 filmi, hem fibroinin hem de kitosanın karakteristik piklerini göstermiştir ve bu da kompozitin başarılı bir şekilde oluşumunu doğrulamıştır. Bununla birlikte, amid I ve amid II'nin piklerindeki bazı kaymalar, fibroin ve kitosan arasındaki moleküller arası etkileşime bağlanabilir [12]. Bazı çalışmalar, amid I ve amid II bantlarındaki (Şekil 1c) piklerin kaymasını gözlemleyerek fibroin ve kitosan arasında moleküller arası etkileşimin oluştuğunu bildirmiştir [13].



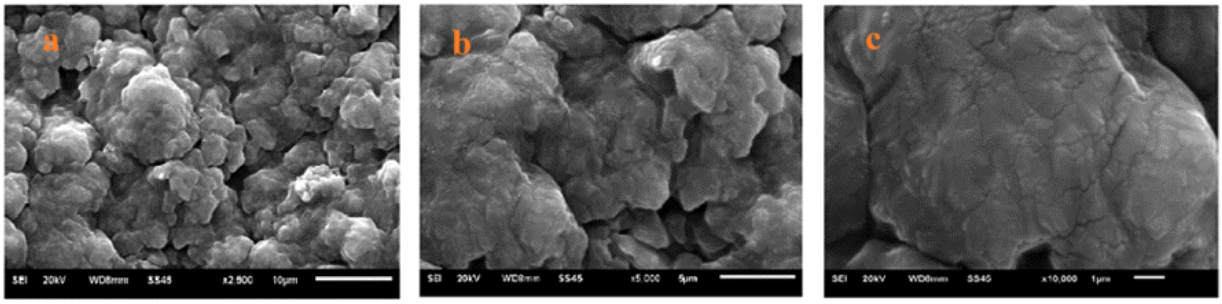
Şekil 1. a)Fibroin b)FK1 c)FK1/AV (%5) filmlerine ait FT-IR Spektrumları.

3.2. SEM Analizi

Şekil 2 ve Şekil 3'te FK1 ve FK2 kompozitlerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. FK1 ve FK2 filmlerini gözenek yapısı düzensiz bir yapıdadır. Kitosan içeriğinin düşük olduğu FK1 filminde gözenek boyutu daha büyük görülmektedir. Film oluşumu sırasında kitosan ilavesi ile karışık çözelti saf fibroin çözeltisinden daha yüksek viskoziteye sahip olmuştur ve molekül zincirlerinin esnekliği zayıflamıştır. Hidrojen bağının kaybı ve hidrofobik kuvvetin artması, molekül zincirlerinin daha küçük gözenek boyutuna sahip filmler oluşturmak üzere bir araya toplanmasını daha mümkün kılmıştır. Şekil 2 ve Şekil 3'te görüldüğü gibi filmlerin yüzeyi gözenekli yapıya sahiptir, bu da filmlerin ilaç yükleme ve salım için potansiyel bir uygulamaya sahip olduğunu gösterir [14].



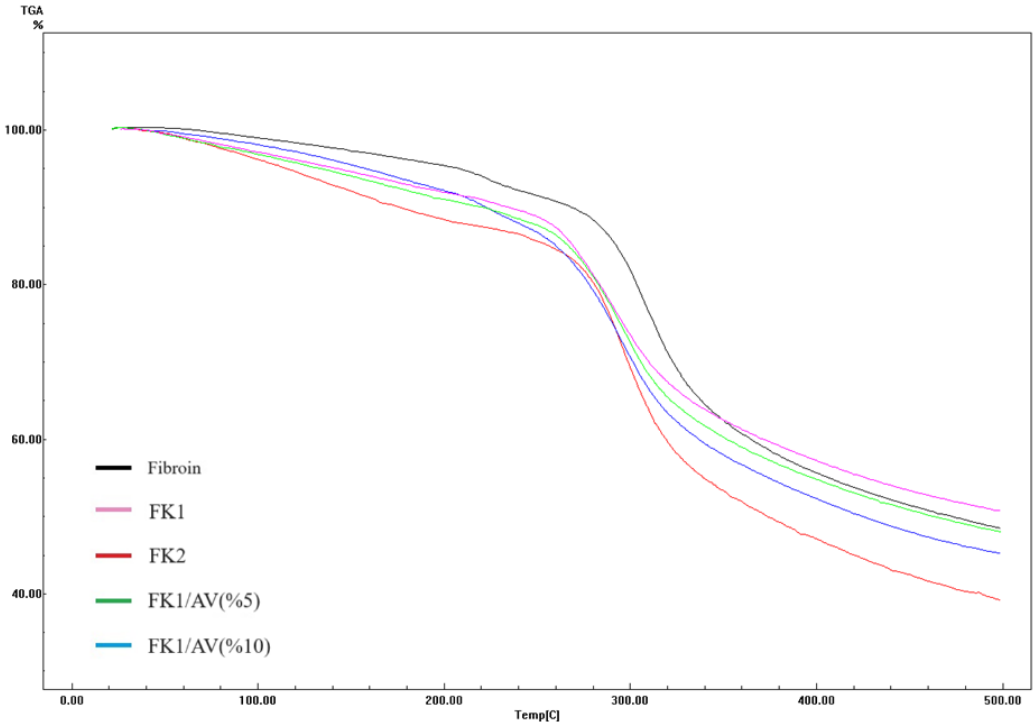
Şekil 2. FK1 filminin a) 2500x, b) 5000x, c)10000x büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri.



Şekil 3. FK2 filminin a) 2500x, b)5000x, c)10000x büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri.

3.3. Termal Karakterizasyon

Hazırlanan kompozitlerin TGA eğrileri Şekil 4'te verilmiştir. Her bir ölçüm için numune miktarı yaklaşık 2 mg olup, ölçümlerin tamamı azot atmosferi altında gaz akışıyla ve 10 °C/dk ısıtma hızında 500 °C'ye kadar ısıtılarak yapılmıştır. Toplanan veriler ağırlık kaybı (%) ve sıcaklık (25–500 °C) olarak ifade edilir. 120 °C'nin altındaki tüm termogramlardaki ilk ağırlık kayıpları, adsorbe edilmiş ve bağlı suyun buharlaşmasına bağlanabilir. TGA eğrilerinde 240–500 °C aralığındaki ağırlık kaybı, organik makromoleküllerin termal ayrışmasına atfedilebilir. Tüm numuneler için eğriler iki bölgeye ayrılmıştır. 1. bölgede gözlenen su kaybı 100 °C civarında meydana gelmiştir. İkinci kütle kaybı büyük oranda 270–370 °C'de gerçekleşmiştir. Bu fibroindeki peptit bağlarının parçalanması ile ilişkilidir [15]. Termal ayrışma, moleküller arası etkileşimin parçalanmasından ve moleküler yapının kısmen kırılmasından kaynaklanmıştır. İpek fibroin 330 °C'de maksimum bozunma sıcaklığına sahiptir. Harmanların TGA eğrilerinde maksimum bozunma sıcaklığının saf fibroinden daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum kitosanı çözmek için kullanılan asetik asidin harman filminde dağıldığını ve fibroin zincirlerinin bir ön kristalleşmesini indüklediğini göstermektedir. Harman filmlerin TGA eğrileri incelendiğinde kitosan oranının daha yüksek olduğu FK2 filminin daha az artık bıraktığı gözlenmiştir. Yine FK2 filmi 300 °C civarında maksimum bozunma göstermiştir. Bu bozunma, sakarit halkalarının dehidrasyonu, asetillenmiş ve deasetillenmiş polimer birimlerinin depolimerizasyonu ve ayrışmasını içeren karmaşık bir sürece atfedilebilir [16]. Hazırlanan TGA verilerine ilişkin bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. Aloe vera katkısının filmlerin başlangıç bozunma sıcaklığını arttırdığı ve artık yüzdesini azalttığı görülmüştür. Aloe vera katkısının kitosan oranının fazla olduğu polimer filmlerinin termal kararlılığına katkı sağladığı söylenebilir [17].



Şekil 4. Fibroin, FK1, FK2 and FK1/AV(%5) filmlerine ait TGA eğrileri.

Tablo 1. Filmlerin termal özelliklerine ilişkin veriler.

Polimer	Başlangıç Bozunma Sıcaklığı (°C)	Maksimum Bozunma Sıcaklığı (°C)	% artık
Fibroin	242	317	48,3
FK1	235	332	50,8
FK2	240	343	40
FK1/AV%5	240	329	49
FK1/AV%10	242	330	47

2.4. İlaç Salım Çalışmaları

2.4.1. Harman Bileşiminin İlaç Salımına Etkisi

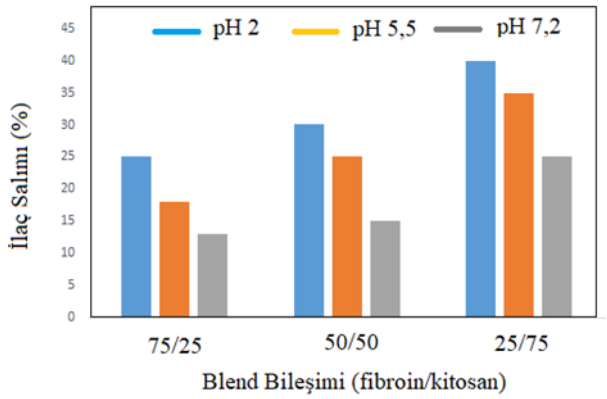
Karışım bileşiminin farklı pH'larda (pH 2,0, 5,5 ve 7,2) ilaç salımı üzerindeki etkisi Şekil 5'te gösterilmektedir. Bu çalışmada ilaç yüklü harman filmlerde %25, % 50 ve % 75 (FK1, FK2 ve FK3) ipek fibroin içerikleri kullanılmıştır. Model ilaç için maksimum ilaç salımının %75 kitosan içeriğine sahip FK3 filmde gözlendiği bulunmuştur. Bu, harman filmlerin şişme davranışı terimi ile açıklanabilir. Sistemlerden salınan ilaçların en yüksek miktarı model ilaç için pH 2,0'de gözlendiği görülmüştür. Şişme derecelerinin en yüksek değerlerinin pH 2,0'de elde edildiği ve filmlerin şişme derecelerinin, filmin pH'ı arttıkça düşme eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu, asidik bir ortamda kitosanın amino gruplarının protonlanması, bunun sonucunda kitosan ve ipek lifi arasındaki hidrojen bağlarının kırılması ve ağın ayrışması ile açıklanabilir [18].

Tablo 2, farklı harman bileşimlerinin ilaç yüklü harman filmlerinin Denklem 1'de gösterilen formülle hesaplanan şişme derecelerini göstermektedir. Hidrojel dağıtım sistemleri için ilacın salımının hidrojelin şişme davranışı tarafından kontrol edildiği bilinmektedir. Taşıyıcının şişmesi, polimer matris içindeki sulu çözücü içeriğini artırarak ilacın şişmiş ağdan dış ortama yayılmasını sağlar. İlaç dağıtım cihazları olarak potansiyel bir uygulama için birkaç kitosan bazlı hidrojel araştırılmıştır, havada kurutulmuş ve dondurularak kurutulmuş kitosan/poli(vinil pirolidon) hidrojellerinden amoksisilin salımlarının, hidrojellerin şişme derecesi ile ilişkili olduğunu belirtilmiştir [19]. Başka bir çalışmada bir kitosan/polieter yarı-iç içe geçen hidrojelden klorheksidin diasetat ve simetidin salımını incelemiş ve şişme dereceleri ne kadar yüksekse, salınan ilaç miktarlarının da o kadar yüksek olduğu bulunmuştur [20]. Bu çalışmada, kitosan/ipek fibroin harman filmlerin şişmesi, kitosan ve ipek fibroin zincirleri arasındaki kitosanın amino gruplarının protonlanmasının neden olduğu ayrışma nedeniyle meydana gelebilir. Tüm harman filmlerinde şişme derecesinin en yüksek olduğu pH 2'de ilaç salımının da en yüksek oranda gerçekleştiği gözlenmiştir.

Harman filmler, nötr ortamda daha düşük bir şişme derecesi sergilemiştir. Bu, bu pH'ta kitosanın protonlanmış amino gruplarının sayısındaki azalmaya karşılık gelebilir. Kitosanın pKa'sı 6,3-6,5'tir, bu kitosanın asidik çözeltide protonlanma eğiliminde olduğunu gösterir. Bu nedenle pH 7,2'de filmlerin şişme dereceleri asidik çözeltideki filmlere göre daha düşük olmuştur.

Tablo 2. İlaç yüklü fibroin/ kitosan harman filmlerin şişme derecesi ve ağırlık kaybı yüzdesi.

Fibroin/kitosan oranı	Şişme Derecesi (%)			Ağırlık Kaybı (%)		
	pH 2	pH 5,5	pH 7,2	pH 2	pH 5,5	pH 7,2
25/75	714	563	171	27,22	26,23	17,6
50/50	538	427	138	18,73	17,50	18,10
75/25	493	391	117	17,08	16,43	16,83



Şekil 5. Harman bileşiminin model ilaç salımına etkisini gösteren grafik.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada doğal birer polimer olan ipek fibroin ve kitosan ile aloe vera kullanılarak çözeltiden döküm yöntemiyle hazırlanan filmlerin karakterizasyonu ve ilaç salım özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ham ipek uygun yöntemlerle saflaştırılarak fibroin elde edilmiştir. Elde edilen saf fibroin kitosan polimeri ile farklı oranlarda karıştırılarak bir seri kompozit hazırlanmıştır. Bu kompozitlere farklı % oranlarında aloe vera katkılanarak hazırlanan filmlerin ilaç salım özellikleri pH ve kompozit bileşimine bağlı olarak incelenmiştir. Hazırlanan malzemelerin yapısal, ısıl ve yüzey özellikleri karakterize edilmiştir.

Hazırlanan malzemelerin FTIR ile yapısal karakterizasyonu yapılmıştır. İpek fibroinin IR spektrumu incelendiğinde 1620 cm^{-1} deki amid I e ait karbonil bandı, 1510 cm^{-1} civarında ki amid II (N-H bağı) ve 1230-1440 cm^{-1} civarındaki amit III (C-N bağı) yapıyı karakterize etmektedir. FK1 filminin FTIR spektrumunda gözlenen sinyaller hem fibroin hemde kitosanı karakterize etmektedir. Hazırlanan filmlerin SEM görüntüleri incelendiğinde düzensiz bir gözenek yapısına sahip oldukları görülmektedir. Kitosan oranının düşük olduğu FK1 filminde gözeneklerin daha büyük olduğu görülmüştür. Filmlerin yüzeyi birbirine bağlı gözenek yapısına sahiptir (Şekil 4 ve Şekil 5), bu da filmlerin ilaç yükleme ve salım için potansiyel bir uygulamaya sahip olduğunu gösterir.

Hazırlanan filmlerin TGA ile termogravimetrik analizi yapılmış ve tüm filmlerde 120 $^{\circ}$C'nin altında adsorbe edilmiş ve bağlı suyun buharlaşmasına ait bir kütle kaybı gözlenmiştir. Saf ipek fibroinin 330 $^{\circ}$C'de maksimum bozunma gösterdiği belirlenmiştir. Filmlerin TGA eğrileri incelendiğinde maksimum bozunma sıcaklıklarının ipek fibroinden düşük olduğu görülmüştür. Bu, kitosanı çözmek için kullanılan asetik asidin harman filminde dağıldığını ve fibroin zincirlerinin bir ön kristalleşmesini indüklediğini göstermektedir. Harman filmlerin TGA eğrileri incelendiğinde kitosan oranının daha yüksek olduğu FK2 filminin daha az artık bıraktığı gözlenmiştir. Yine FK2 filmi 300 $^{\circ}$C civarında maksimum bozunma göstermiştir. Bu bozunma, sakarit halkalarının dehidrasyonu, asetillenmiş ve deasetillenmiş polimer birimlerinin depolimerizasyonu ve ayrışmasını içeren karmaşık bir sürece atfedilebilir.

Çalışmada ilaç salımına harman bileşimi ve pH'ın etkisi incelenmiştir. İlaç yüklü harman filmlerde %25, 50 ve % 75 (FK1, FK2 ve FK3) ipek fibroin içerikleri kullanılmıştır. Model ilaç için maksimum ilaç salımının %75 kitosan içeriğine sahip FK3 filmde gözlendiği bulunmuştur. Bu, harman filmlerin şişme davranışı terimi ile açıklanabilir. Şişme dereceleri ne kadar yüksekse, salınan ilaç miktarlarının da o kadar yüksek olduğunu belirlenmiştir.

İlaç salımına pH etkisini incelemek için yapılan çalışmada en yüksek ilaç salımının pH 2 de gerçekleştiği belirlenmiştir. Şişme derecelerinin en yüksek değerlerinin pH 2,0'da elde edildiği ve filmlerin şişme derecelerinin, filmin pH'ı arttıkça düşme eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu, asidik bir ortamda kitosanın amino gruplarının protonlanması, bunun sonucunda kitosan ve fibroin lifi arasındaki hidrojen bağlarının kırılması ve ağın ayrışması ile açıklanabilir. Harman filmler, nötr ortamda daha düşük bir şişme derecesi sergilemesi kitosanın protonlanmış amino gruplarının sayısındaki azalmaya karşılık gelebilir. Kitosanın pKa'sı 6,3-6,5'tir, bu kitosanın asidik çözeltide protonlanma eğiliminde olduğunu gösterir. Bu nedenle pH 7,2'de filmlerin şişme dereceleri asidik çözeltideki filmlere göre daha düşük olmuştur. Elde edilen malzemelerin ilaç salımı için uygun olduğu belirlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışmaya MMY.22.01 kodlu projeyle destek veren Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederiz. Bu çalışmada P.D. fikir sahibidir, deneysel çalışmaları gerçekleştirdi ve makaleyi yazdı. H.Y. deneysel çalışmalara katkı sağladı.

Kaynaklar

[1] Xing X, Han Y, Cheng H. Biomedical applications of chitosan/silk fibroin composites: A review. Int J Biol Macromol 2023; 240:124407.
[2] Kaplan DL, Adams WW, Farmer B, et all. Silk Polymers. Mater Sci and Biotech, ACS Publications 1994; 544:2–16.
[3] Shao Z, Vollrath F. Surprising strength of silkworm silk. Nature 2002; 418:741.
[4] Rinaudo M. Chitin and chitosan: properties and applications. Prog Polym Sci 2006; 31(7):603-32.
[5] Gallo M, Naviglio D, Caruso AA, Ferrara L. Applications of chitosan as a functional food. In Novel approaches of nanotechnology in food. Academic Press, 2016; 425-464.
[6] Marshall JM. Aloe vera gel: What is the evidence? Pharma Jr. 1990; 24:360–2.
[7] Iarc Monographs. Aloe vera In: Some Drugs and Herbal Products, International Agency for research on Cancer, Lyon, France, 2016.

[8] Jeencham R, Sutheerawattananonda M, Rungchang S. Novel daily disposable therapeutic contact lenses based on chitosan and regenerated silk fibroin for the ophthalmic delivery of diclofenac sodium. Drug Deliv 2020; 27 (1) :782-790.
[9] Zhou Y, Liang K, Zhao S. Photopolymerized maleilated chitosan/methacrylated silk fibroin micro/nanocomposite hydrogels as potential scaffolds for cartilage tissue engineering. Int J Biol Macromol 2018; 108:383-390.
[10] Shao J, Ding Z, Li L. Improved accumulation of TGF-β by photopolymerized chitosan/silk protein bio-hydrogel matrix to improve differentiation of mesenchymal stem cells in articular cartilage tissue regeneration. J Photochem Photobiol B 2020; 203:111744.
[11] Zhang H, Li LL, Dai FY, Zhang HH, Ni B, Zhou W, Yang X, Wu YZ. Preparation and characterization of silk fibroin as a biomaterial with potential for drug delivery. J Transl Med 2012; 10:117.
[12] Mosselhy DA, Ge Y, Gasik M, Nordstrom K. Silica Gentamicin nanohybrids: synthesis and antimicrobial action. Materials 2016; 9(3):170.
[13] Huang J, Qin J, Zhang P, Chen X, You X, Zhang F, Zuo B, Yao M. Facile preparation of a strong chitosan-silk biocomposite film. Carbohydr Polym 2020; 229: 115515.
[14] Huang B, Liu M, Zhou C. Chitosan composite hydrogels reinforced with natural clay nanotubes. Carbohydr Polym 2017; 175: 689–698.
[15] Çalamak S, Erdoğdu C, Özalp M, Ulubayram K. Silk fibroin based antibacterial bionanotextiles as wound dressing materials. Mater Sci Eng C, 2014; 43: 11-20.
[16] Kweon HY, Um IC, Park YH. Structural and thermal characteristics of Antheraea pernyi silk fibroin/chitosan sa film. Polymer 2001; 42: 6651–6656.
[17] Iqbal DN, Munir A, Abbas M and et all. Polymeric Membranes of Chitosan/Aloe Vera Gel Fabrication With Enhanced Swelling and Antimicrobial Properties for Biomedical Applications. Dose-Response 2023; 21: 2.
[18] Fu Z, He C, Li H, Yan C. Chen L, Huang J and Liu,Y. A novel hydrophilic–hydrophobic magnetic interpenetrating polymer networks (IPNs) and its adsorption towards salicylic acid from aqueous solution. J Chem Eng 2015; 279(1): 250-259.
[19] Chu HC, Chen KM. Reuse of activated sludge biomass: I. The rate processes for the adsorption of basic dye. Process Biochem 2002; 37: 595-600.
[20] Koetting MC, Peters JT, Steichen SD and Peppas N A. Stimulusresponsive hydrogels: Theory, modern advances, and applications. Mater Sci Eng: R: Reports 2015; 93: 1-49.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 83-92, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1469178

Creating a Clinical Psychology Dataset with Synthetic Data: Automatic Detection of Cognitive Distortions Classified with NLP

Hakkı Halil BABACAN[1], Ramazan OĞUZ[2*], Yahya Kemal BEYİTOĞLU[3]
[1,2] Institue of Forensic Sciences and Legal Medicine, İstanbul University-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye
[3] Vocational School of Besni, Adıyaman University, Adıyaman, Türkiye
[1] hakki.babacan@erzincan.edu.tr, [*2] ramazan.oguz@ogr.iuc.edu.tr, [3]ybeyitoglu@adiyaman.edu.tr

(Geliş/Received: 16/04/2024; Kabul/Accepted: 16/09/2024)

Abstract: Cognitive distortions are thought errors that lead individuals to perceive reality in a misleading way and are strongly associated with psychopathologies. Therefore, accurately identifying and classifying distortions can enhance the effectiveness of cognitive-behavioral therapy (CBT). This study investigates the effectiveness of deep learning and NLP techniques for the automatic detection of cognitive distortions. The RoBERTa model was trained using English synthetic data generated by GPT-4 (2000 examples) and the dataset from Shreevastava and Foltz (1590 cognitive distortion examples, 933 non-distortion examples). Three scenarios were tested: the original dataset, the synthetic dataset, and their combination. The results showed that synthetic data is a strong resource. Accuracy rates were 60.67% (original), 94.51% (synthetic), and 77.18% (combined). The GPT-4-based dataset provided almost perfect F1 scores, particularly in some categories. ROC curve analyses showed that the GPT-4 dataset had the highest AUC value (0.80). The study revealed that using synthetic data expands the potential of AI applications in clinical psychology and offers a way to develop effective models while preserving patient privacy. Future research should test synthetic data with different models and compare it with real clinical data.

Key words: Cognitive distortion, machine learning, natural language processing, GPT-4, depression.

Sentetik Verilerle Klinik Psikoloji Veri Seti Oluşturma: Bilişsel Çarpıtmaların NLP ile Sınıflandırılarak Otomatik Tespiti

Öz: Bilişsel çarpıtmalar, bireylerin gerçekliği yanıltıcı bir şekilde algılamalarına neden olan düşünce hatalarıdır ve psikopatolojilerle güçlü bir ilişkisi vardır. Bu nedenle, çarpıtmaların doğru bir şekilde belirlenmesi ve sınıflandırılması, bilişsel davranışçı terapinin (CBT) etkinliğini artırabilir. Bu çalışma, bilişsel çarpıtmaların otomatik tespiti için derin öğrenme ve NLP tekniklerinin etkinliğini incelemektedir. GPT-4 ile üretilen İngilizce sentetik veriler (2000 örnek) ve Shreevastava ve Foltz'un veri seti (1590 bilişsel çarpıtma, 933 çarpıtma içermeyen örnek) kullanılarak RoBERTa modeli eğitilmiştir. Üç senaryo test edilmiştir: orijinal veri seti, sentetik veri seti ve bunların kombinasyonu. Sonuçlar, sentetik verilerin güçlü bir kaynak olduğunu göstermiştir. Doğruluk oranları sırasıyla %60,67 (orijinal), %94,51 (sentetik) ve %77,18 (kombine) olarak elde edilmiştir. GPT-4 tabanlı veri seti, özellikle bazı kategorilerde neredeyse mükemmel F1 skorları sağlamıştır. ROC eğrisi analizleri, GPT-4 veri setinin en yüksek AUC değerine (0,80) sahip olduğunu göstermiştir. Çalışma, sentetik veri kullanımının klinik psikolojide yapay zeka uygulamalarının potansiyelini genişlettiğini ve hasta gizliliğini korurken etkili modeller geliştirmenin bir yolunu sunduğunu ortaya koymuştur. Gelecekteki araştırmalar için, sentetik verilerin farklı modellerle test edilmesi ve gerçek klinik verilerle karşılaştırılması önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: Bilişsel çarpıtma, makine öğrenimi, doğal dil işleme, GPT-4, depresyon.

1. Introduction

Cognitive distortions are thought errors that lead individuals to perceive reality in a misleading and often negative way [1]. These distortions are typically addressed within cognitive-behavioral therapy (CBT), one of the goals of which is to help individuals recognize and correct these distortions [2]. There are various types of cognitive distortions, including overgeneralization, personalization, filtering, black-and-white thinking, and catastrophizing [3]. These distortions can negatively impact individuals' emotional states and behaviors. Understanding and recognizing cognitive distortions can positively influence individuals' emotional states and behaviors. Beck [4] suggests that depression stems from cognitive distortions.

There are quite striking findings in the literature regarding the relationship between cognitive distortions and psychopathologies, as well as their impact on individuals' daily lives. Rnic et al. [5] found that cognitive distortions can prevent individuals from adopting a humorous and joyful perspective on life, leading to an increase in depressive symptoms. This study provided strong evidence of the impact of cognitive distortions on depressive

[*] Sorumlu yazar: ramazan.oguz@ogr.iuc.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0001-9609-5128, [2] 0000-0002-7297-4141, [3] 0000-0001-6421-8939

symptomatology. Additionally, a study conducted on adolescents also presented strong evidence that cognitive distortions play an active role in the onset of depression [6]. Beyond the symptomatology of depression, it is known that a life-threatening serious mental disorder, such as Anorexia Nervosa, is characterized by cognitive distortions about weight and body shape [7]. Recent studies also reveal the effects of cognitive distortions on individuals' behaviors. There is current evidence that cognitive distortions have an active role in the emergence and maintenance of gambling behavior [8] and in predicting depression, anxiety, and stress [9].

Cognitive-behavioral therapy (CBT) aims to identify and correct cognitive distortions [2]. Recent advancements in deep learning and natural language processing (NLP) have brought the automatic detection and classification of cognitive distortions to the forefront. NLP, a subfield of artificial intelligence, enables computers to understand and process human languages, and significant progress has been made in this area. NLP creates semantic vector representations of words through word and sentence embedding techniques [10]. Deep learning models, particularly convolutional neural networks (CNNs) and recurrent neural networks (RNNs), are effective in tasks such as classification and language translation [11]. Transformer models like BERT excel in many NLP tasks by better capturing the meaning and context of language [12]. NLP systems operate through preprocessing, model training, and inference stages, employing supervised, semi-supervised, and unsupervised learning methods [10]. However, the inner workings of deep learning models are often opaque, leading to the development of various interpretability techniques [13]. For example, machine translation systems use transformer models to translate sentences from a source language to a target language, successfully capturing contextual meaning [11]. In recent years, NLP models have demonstrated significant success in text classification and detection tasks involving symbolic structures in natural language. The success of NLP techniques in text classification has led to the application of these techniques to study many phenomena in psychology.

The meta-analysis conducted by Harrigian et al. [14] reported that data mining from social networks like Reddit and Twitter has been used to create datasets on topics such as depression and suicidal ideation, with automatic detection studies conducted using NLP techniques. However, the number of NLP studies related to cognitive distortions, which are reported as significant predictors of depression, is quite limited. Shickel et al. [15] conducted one of the first studies on the automatic detection of cognitive distortions using machine learning and deep learning, reporting that the application of machine learning techniques in the context of mental health is highly limited and that the cognitive-behavioral perspective has been neglected. They also noted that studies on the detection and classification of cognitive distortions bear similarities to text-based emotion recognition tasks, and in their study, they utilized a dataset consisting of crowdsourced data and mental health therapy records [15]. Although the models achieved an F1 score of 0.88 in the classification task of determining the presence or absence of cognitive distortion, when the model was applied to smaller counseling datasets, the F1 score dropped to 0.45. Additionally, the dataset used in the study was not shared publicly.

In another significant study on the subject, a dataset created from a publicly available therapist-patient question-and-answer dataset [16] on Kaggle was trained using the BERT [17] model, which is based on the Transformer architecture [18]. In this study, inferences were made from the therapist question-and-answer dataset regarding cognitive distortions, leading to the creation of an English cognitive distortion dataset consisting of 1,590 cognitive distortion examples and a total of [19], 523 data points. In the binary classification task, the F1 score for the SVM (Support Vector Machines) and BERT-based approaches was determined to be 0.79. As mentioned in the study, the biggest challenge in using artificial intelligence in clinical psychology is the lack of datasets [18]. In addition to these challenges, issues such as reaching a consensus among domain experts on statements containing depression and cognitive distortion values, as well as patient privacy concerns, make access to large data sources difficult. Information on the existing datasets related to cognitive distortions in the literature is provided in Table 1.

Table 1. Existing cognitive distortion datasets.

Evaluation Criteria	Our Dataset	MH Tumblr Dataset: Shickel et al. [15]	Shreevastava & Foltz [18]
Publicly Accessible	✓	✗	✓
Multiple Types of Cognitive Distortions	✓	✓	✗
Labeled by Psychology Professionals	✓	✗	✗
Dataset Language	English	English	English
Dataset Scale	4,531	2,769	1,728

This study aims to generate synthetic data using GPT-4 LLM (Large Language Model) developed by OpenAI to overcome the existing data limitations in the literature and the ethical issues related to obtaining patient data. Even if personal data is collected with patient's consent and anonymized, datasets may still contain clues related to individuals in clinical psychology. To address this issue and explore the contributions of synthetic data to the field of deep learning, this method was chosen. GPT-4, created by OpenAI as a large multimodal model based on the transformer architecture, has demonstrated success in generating text for many challenging tasks [20]. GPT-4 is a significantly enhanced language model developed by OpenAI compared to its predecessors. With billions of parameters, GPT-4 is designed to understand the semantic and contextual aspects of language more deeply. Built on GPT-3, which contains 175 billion parameters, GPT-4 excels in natural language processing (NLP) tasks [21]. The number of parameters in GPT-4 is one of its most distinguishing features, allowing the model to comprehend more complex language structures and produce more coherent texts [20]. This increase in the number of parameters enables GPT-4 to deliver more accurate and reliable results across a wide range of tasks. Additionally, GPT-4's multimodal capabilities allow it to process not only text but also visual data, making it one of the most powerful models in the NLP field [20]. Considering the privacy and subjectivity aspects of clinical psychology data, this study's primary research question is whether GPT-4 can be an effective tool for generating data related to clinical psychology. The purpose of this research is to compare the performance of existing datasets by generating synthetic data related to cognitive distortions using GPT-4. Additionally, the study aims to investigate whether the validity and success rates of existing datasets can be improved with the inclusion of synthetic data generated by GPT-4. In line with these objectives, the potential to achieve successful results from synthetic data generated by GPT-4 may provide a significant contribution to the literature and offer a practical solution to the existing dataset limitations in AI studies related to clinical psychology. For this study, the RoBERTa model, based on the transformer architecture and previously trained to extract semantic information from short texts successfully, was chosen for training [22]. The study asked a GPT-4-based model to generate a total of 2,000 realistic cognitive distortion statements related to ten different types of cognitive distortions, each consisting of at least two sentences.

2. Methods and Dataset

In the study, two datasets were prepared (Figure 1). In the first phase, a GPT-4-based model was asked to generate 200 realistic cognitive distortion statements for each of ten different types of cognitive distortions, resulting in a total of 2,000 statements, each consisting of at least two sentences (for relevant prompts, see references)[23]. All cognitive distortions generated by GPT-4 were considered synthetic expressions. The synthetic data generated were semantically reviewed by two domain expert psychologists. For training, the "no distortions" class was represented by using the data from the "no distortions" category (933 statements) in the dataset created by Shreevastava and Foltz [18], which is the only publicly available dataset on this topic, combined with the synthetic data from the "distortions" class. The first dataset was prepared to compare the metric values of synthetic data with existing public datasets. The second dataset involved adding synthetic data to the dataset created by Shreevastava and Foltz [18]. This dataset aimed to examine the change in performance when synthetic data is added to the publicly available cognitive distortion dataset. During the data preprocessing stage, punctuation marks other than periods and exclamation points were removed. The data were formatted to be compatible with CSV UTF-8 format. The dataset [24] composed entirely of synthetic cognitive distortion sentences and the other dataset [25], which was augmented with synthetic data, were uploaded to the Huggingface platform. Eighty percent of the data was allocated for training and 20% for testing. The data were trained using the RoBERTa model, a transformer-based approach that was previously trained.

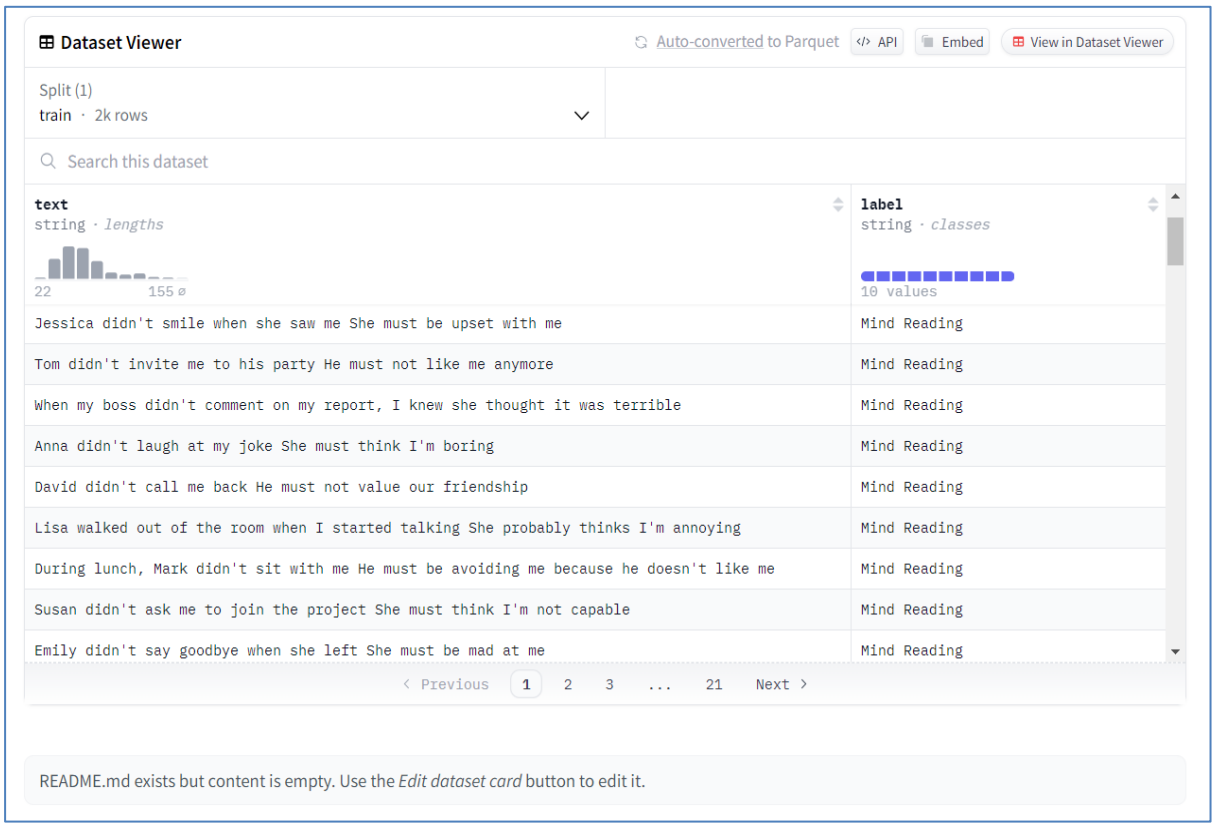


Figure 1. Dataset example.

2.1. RoBERTa model

The success of the BERT model, a transformer-based approach, in text-based emotion classification tasks has led to its use in the automatic detection of cognitive distortions [18]. RoBERTa, another model with a transformer-based architecture, has several key advantages over the widely used BERT model. These advantages stem from RoBERTa being trained on a larger text corpus and more diverse pre-training tasks. This allows RoBERTa to capture more complex patterns and nuanced features in text data [26]. Additionally, the RoBERTa model uses a dynamic attention mask, which enhances the model's ability to generalize and adapt to new text sequences [26].

When the RoBERTa model is combined with a Gated Recurrent Unit (GRU), these advantages are further enhanced. GRU can more effectively capture long-range dependencies in text data. Additionally, GRU's gating mechanism addresses the vanishing gradient problem, making it more suitable for text analysis [27]. In one study, the RoBERTa-GRU model outperformed all other comparison methods on the IMDb, Sentiment140, and Twitter US Airline datasets. The RoBERTa-GRU model achieved accuracy rates of 94.63%, 89.59%, and 91.52% on these datasets, respectively [28]. These results demonstrate that the combination of RoBERTa and GRU forms a powerful and effective model for sentiment analysis. Considering the advantages of the RoBERTa model over the BERT model, it was chosen for this study instead of BERT.

The model used for training was implemented with RoBERTa provided by the Transformers library. RoBERTa has 12 Transformer layers, each containing a self-attention mechanism, layer normalization, and a two-layer feedforward neural network. The input layer tokenizes the text data to create input IDs and attention masks that the model can understand, while the classification layer assigns the model's output to specific classes. The training process of the model was conducted using the AdamW optimization algorithm. AdamW prevents the model from overfitting with its weight decay mechanism, while its adaptive learning rates provide a more stable and faster learning process. In this study, the learning rate was set to 2e-5, ensuring precise learning with small steps during fine-tuning. The model was trained for 3 epochs, with performance evaluation conducted on training and validation data at each epoch.

3. Results

This study presents a comparative analysis of three distinct training scenarios to evaluate the performance of the RoBERTa model in classifying cognitive distortions, using various datasets including those generated synthetically via GPT-4. The results of these training scenarios are summarized and analyzed below, with detailed comparisons provided in tabular form to illustrate the outcomes of each approach.

Performance Metrics:

To evaluate the model's performance across these scenarios, we used the following metrics:
Accuracy: The proportion of correct predictions among the total number of cases examined.
Precision: The ratio of correctly predicted positive observations to the total predicted positive observations.
Recall: The ratio of correctly predicted positive observations to all observations in the actual class.
F1-Score: The harmonic mean of Precision and Recall, providing a single score that balances both metrics.
Support: The number of samples for each class.

Training Scenario 1: Shreevastava and Foltz's [18] Dataset (Table 2)

In the first training scenario, the model was trained exclusively on the dataset provided by Shreevastava and Foltz [18]. The results indicate that the model achieved moderate accuracy with room for improvement across several cognitive distortion categories.

Table 2. Performance metrics for training scenario 1.

Cognitive Distortion Category	Precision	Recall	F1-Score
No Distortion	0.9000	1.0000	0.9474
Mind Reading	0.6538	0.6296	0.6415
Should Statements	0.4000	0.5455	0.4615
All-or-Nothing Thinking	0.1562	0.2941	0.2041
Overgeneralization	0.4096	0.6182	0.4928
Mental Filter	0.0000	0.0000	0.0000
Magnification	0.0000	0.0000	0.0000
Emotional Reasoning	0.1818	0.0952	0.1250
Personalization	0.5625	0.3000	0.3913
Fortune-telling	0.7143	0.3125	0.4348
Labeling	0.4118	0.6364	0.5000

The results from this scenario indicate that the model performed well in detecting "No Distortion" cases, but struggled significantly with other categories, particularly "Mental Filter", "Magnification", and "All-or-Nothing Thinking", where the F1-scores were very low or non-existent.

Training Scenario 2 [29] : GPT-Generated Cognitive Distortion Dataset (Table 3)

In the second scenario, the model was trained solely on synthetic data generated by GPT-4, which aimed to capture ten distinct types of cognitive distortions. This dataset provided a much-improved performance across almost all cognitive distortion categories.

In this experiment, dataset-1, composed entirely of synthetic cognitive distortions data generated with GPT-4, was used. These data consist of sentences representing cognitive distortions. This dataset has been used for a binary classification task, meaning each data example either represents a cognitive distortion or does not. The model's task is to accurately predict whether a data example represents a cognitive distortion or not.

Table 3. Performance metrics for training scenario 2.

Cognitive Distortion Category	Precision	Recall	F1-Score
Mind Reading	1.0000	1.0000	1.0000
Overgeneralization	0.9355	0.6170	0.7436
Magnification	0.9184	0.9783	0.9474
Labelling	0.6863	0.9722	0.8046
Personalization	1.0000	1.0000	1.0000
Fortune-telling	1.0000	1.0000	1.0000
Emotional Reasoning	1.0000	1.0000	1.0000
Mental Filter	1.0000	1.0000	1.0000
Should Statements	1.0000	1.0000	1.0000
All-or-Nothing Thinking	1.0000	0.9487	0.9737

The results from this scenario demonstrate a remarkable improvement in model performance, with most cognitive distortion categories achieving an F1-score close to or at 1.0000. The synthetic data provided by GPT-4 appears to be a robust resource for training models on cognitive distortion classification tasks.

Training Scenario 3 [30]: Combined Dataset (Table 4)

The third training scenario combined the original dataset from Shreevastava and Foltz [18] with the synthetic data generated by GPT-4. This approach aimed to leverage the strengths of both datasets to improve overall classification performance.

Table 4. Performance metrics for training scenario 3.

Cognitive Distortion Category	Precision	Recall	F1-Score
Mind Reading	0.8933	0.7444	0.8121
Overgeneralization	0.5977	0.6118	0.6047
Magnification	0.7015	0.6026	0.6483
Labelling	0.7347	0.9730	0.8372
Personalization	0.5800	0.8657	0.6946
Fortune-telling	0.8608	0.7816	0.8193
Emotional Reasoning	0.5676	0.7500	0.6462
Mental Filter	1.0000	1.0000	1.0000
Should Statements	1.0000	1.0000	1.0000
All-or-Nothing Thinking	1.0000	1.0000	1.0000
Labeling	0.7692	0.2857	0.4167

The combined dataset scenario provided balanced results (Table 5), improving upon the weaknesses observed in the first scenario while maintaining strong performance in the categories where the synthetic data excelled. Notably, categories such as “Mental Filter” and “Should Statements” achieved perfect F1-scores, reflecting the strengths of incorporating synthetic data into the training process. However, certain categories such as “Overgeneralization” and “Labeling” still showed room for improvement, suggesting the potential for further refinement in data augmentation and model tuning.

Table 5. Summary of training scenario performance.

Metric	**Shreevastava and Foltz [18]**	**GPT-Generated Data**	**Combined Dataset**
Accuracy	0.6067	0.9451	0.7718
Average F1-Score	0.4467	0.9461	0.7677
Lowest F1-Score	0.0000	0.7436	0.4167
Highest F1-Score	0.9474	1.0000	1.0000

The comparative analysis reveals that the GPT-generated data significantly enhances the model's ability to accurately classify cognitive distortions, particularly in categories where the original dataset was lacking. The combined dataset approach further capitalizes on the strengths of both data sources, providing a more balanced and effective model across most categories. Confusion matrices for each scenario are provided in Figure 2. The confusion matrix offers additional insights into the model's performance:

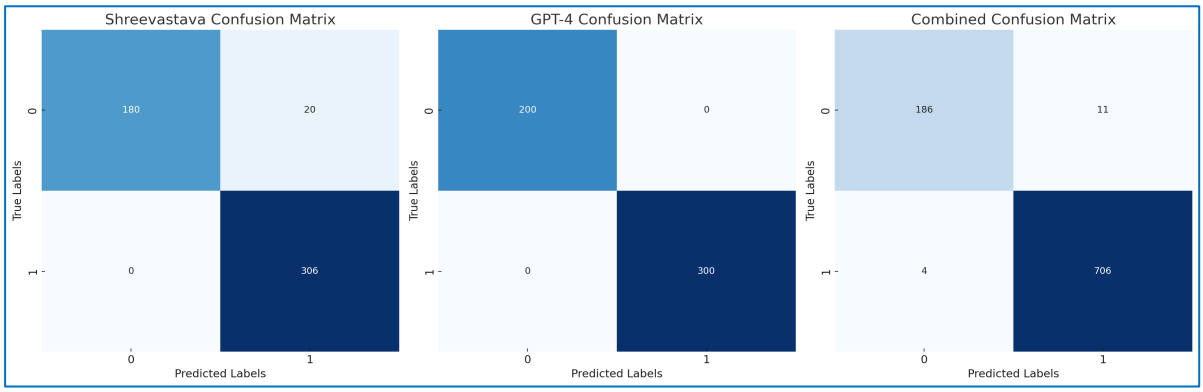


Figure 2. Confusion matrix.

These matrices visually represent the model's classification performance, highlighting true positives, false positives, true negatives, and false negatives for each scenario. The GPT-4 Confusion Matrix shows near-perfect classification, while the Combined Confusion Matrix demonstrates improved performance compared to the Shreevastava Confusion Matrix.

The Shreevastava Confusion Matrix indicates that the model is quite effective at detecting the "No Distortion" category (180 true positives) but struggles to identify other cognitive distortion categories (306 false negatives).

The GPT-4 Confusion Matrix shows that the model classifies both the "No Distortion" and cognitive distortion categories excellently (200 true positives, 300 true negatives).

The Combined Confusion Matrix shows high accuracy in the "No Distortion" category (186 true positives) and improved performance in the cognitive distortion categories (706 true negatives).

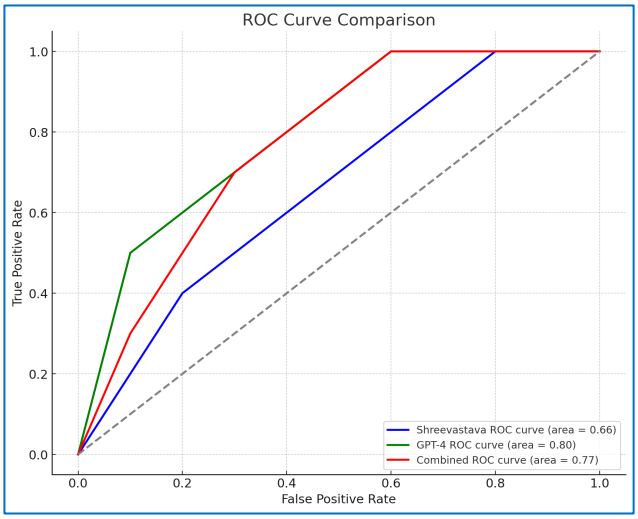


Figure 3. ROC curve comparison.

In the ROC curve comparison (Figure 3), we can examine the model performance across three different scenarios:

1. Shreevastava ROC Curve (Blue Line): With an AUC value of 0.66, this model exhibits lower performance compared to the other two scenarios. This indicates that while the model maintains a high true positive rate, it also increases the false positive rate. This suggests that the model's ability to correctly detect the positive class is weak.

2. GPT-4 ROC Curve (Green Line): With an AUC value of 0.80, this scenario demonstrates better performance compared to the Shreevastava curve. The model is seen to reduce the false positive rate while increasing the true positive rate. This indicates that the model has generally better classification ability.

3. Combined ROC Curve (Red Line): With an AUC value of 0.77, this scenario performs better than the Shreevastava model but slightly lower than the GPT-4 model. This suggests that the combined dataset provides some advantages, but not as significant a performance boost as provided by GPT-4.

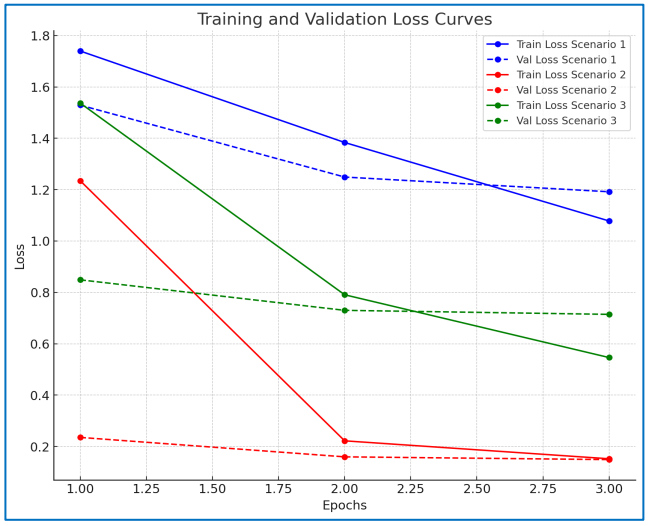


Figure 4. Training and validation loss curves.

Loss curves are used to understand how the model performs throughout the training process. In this graph (Figure 4), we compare the training and validation losses of three different scenarios:

1. Scenario 1 (Blue Line - Shreevastava Dataset):

- The training loss consistently decreases, but the validation loss either stabilizes or slightly increases after a certain point. This suggests that the model might be prone to overfitting, as it performs well on the training data but doesn't achieve the same success on the validation data.

2. Scenario 2 (Red Line - GPT-4 Dataset):
   - Both the training and validation losses decrease steadily in this scenario. This indicates that the model performs well on both the training and validation data, with minimal overfitting. This scenario suggests that the model delivers more generalized performance.
3. Scenario 3 (Green Line - Combined Dataset):
   - A steady decrease in both the training and validation losses is observed. The training loss decreases in parallel with the validation loss, indicating that the model performs well on both training and validation data. However, the rate at which the losses decrease may be slower compared to other scenarios. This suggests that the combined dataset leads the model to learn more balanced and cautiously.

4. Conclusion and Discussion

This study was conducted to explore the potential of deep learning and natural language processing (NLP) techniques for the automatic detection and classification of cognitive distortions. Considering the limitations of existing datasets in the literature and ethical issues, the study utilized the GPT-4 model, which generates synthetic data, and trained these data on the RoBERTa model for cognitive distortion classification tasks. The findings of the study suggest that the use of synthetic data can significantly improve model performance, especially in areas with limited datasets.

The most notable finding of the research is that the synthetic data generated by GPT-4 proved to be a strong resource for the classification of cognitive distortions. Compared to the original Shreevastava and Foltz [18] dataset, the GPT-4-based datasets brought a noticeable improvement in model performance. In particular, the model trained with synthetic data achieved near-perfect F1 scores in categories like "Mental Filter", "Should Statements", and "All-or-Nothing Thinking". These results highlight the potential of synthetic data to enhance classification performance and suggest that further exploration of synthetic data generation is warranted in future research.

Experiments with the combined dataset demonstrated that the use of both synthetic and real data leads to a more balanced and comprehensive model performance. Combining the Shreevastava and Foltz [18] dataset with data generated by GPT-4 increased the model's classification accuracy and provided improvements in certain cognitive distortion categories. This combination underscores the importance of increasing data diversity and quantity, particularly in fields with limited datasets. However, it was also observed that this combination still needs improvement in some categories, such as "Overgeneralization" and "Labeling".

The metrics used to evaluate model performance (accuracy, precision, recall, F1-score) allowed for comparison of results across all three scenarios. The particularly high accuracy and F1-score of the dataset generated by GPT-4 demonstrated the effectiveness of such synthetic data in cognitive distortion classification tasks. Training with the combined dataset helped the model avoid overfitting and provided a more balanced learning process. However, ROC curve and loss curve analyses revealed that the use of the combined dataset resulted in a slower learning process compared to the GPT-4-based dataset.

The findings of this study expand the potential of artificial intelligence applications in the field of clinical psychology. Synthetic data generation emerges as a strong alternative to real datasets, which are often limited due to the need to protect patient privacy. In sensitive and subjective areas such as the detection of cognitive distortions, synthetic data have a positive impact on model training and overall performance. However, it should be noted that synthetic data cannot fully replace real patient data but can serve as a supportive tool.

The results of this study demonstrate the potential of using synthetic data in the automatic detection of cognitive distortions. Data generated by advanced language models like GPT-4 played a significant role in enhancing model performance and provided promising results for the classification of cognitive distortions. Future research should further test synthetic data with different models (e.g., BERT, XLNet), use them in conjunction with data augmentation techniques, and compare them with real clinical data. Additionally, more studies are needed on how synthetic data perform in real-world scenarios, the effectiveness of strategies for protecting patient privacy, and ethical issues.

The findings of this study have taken an important step toward addressing the existing data shortages for the classification of cognitive distortions. However, broader and more varied studies with different data sources will be critical in enhancing the overall performance and reliability of models in this field. More information on how

synthetic data is used in clinical psychology and other applications will enable more effective implementation of AI and NLP techniques.

References

[1] Beck AT. Cognitive therapy and emotional disorders. New York: New American Library; 1976.
[2] Ellis A. Reason and emotion in psychotherapy. New York: Lyle Stuart; 1962.
[3] Burns DD. Feeling good: The new mood therapy. New York: New American Library; 1980.
[4] Beck AT. Cognitive therapy: Nature and relation to behavior therapy. Behav Ther. 1970;1(2):184-200.
[5] Rnic K, Dozois DJ, Martin RA. Cognitive distortions, humor styles, and depression. Eur J Psychol. 2016;12(3):348-62.
[6] Marton P, Kutcher S. The prevalence of cognitive distortion in depressed adolescents. J Psychiatry Neurosci. 1995;20(1):33.
[7] Attia E, Schroeder L. Pharmacologic treatment of anorexia nervosa: where do we go from here? Int J Eat Disord. 2005;37(S1):S60-S63.
[8] Altuntaş Y, Söyler HÇ, Kula H. Kumar bağımlılarıyla sağlıklı kontrollerin bilişsel çarpıtmaları, psikopatolojileri ve aile ilişkilerinin karşılaştırılması. Sosyal Beşeri ve İdari Bilimler Dergisi. 2023;6(1):68-84.
[9] Buga A, Kaya İ. The role of cognitive distortions related to academic achievement in predicting the depression, stress, and anxiety levels of adolescents. Int J Contemp Educ Res. 2022;9(1):103-14.
[10] Zhou M, Duan N, Liu S, Shum H. Progress in neural NLP: Modeling, learning, and reasoning. Engineering. 2020.
[11] Wang Y. Basic methodologies used in NLP area. 2020 IEEE 3rd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE). 2020:505-11.
[12] Tenney I, Das D, Pavlick E. BERT rediscovers the classical NLP pipeline. 2019:4593-601. https://doi.org/10.18653/v1/P19-1452.
[13] Wallace E, Gardner M, Singh S. Interpreting predictions of NLP models. 2020:20-23. https://doi.org/10.18653/v1/2020.emnlp-tutorials.3.
[14] Harrigian K, Aguirre C, Dredze M. On the state of social media data for mental health research. In: 7th Workshop on Computational Linguistics and Clinical Psychology: Improving Access, CLPsych 2021; 2021:15-24.
[15] Shickel B, Siegel S, Heesacker M, Benton S, Rashidi P. Automatic detection and classification of cognitive distortions in mental health text. 2020 IEEE 20th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE). 2020:275-80.
[16] Kaggle. Therapist QA dataset [Internet]. Available from: https://www.kaggle.com/datasets/arnmaud/therapist-qa. Accessed 30 Oct 2024.
[17] Devlin J, Chang MW, Lee K, Toutanova K. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. arXiv preprint arXiv:1810.04805.
[18] Shreevastava S, Foltz PW. Detecting cognitive distortions from patient-therapist interactions. NAACL HLT. 2021;151.
[19] Kaggle.Cognitive Distortion Detection Dataset [Internet]. Available from: https://www.kaggle.com/datasets/sagarikashreevastava/cognitive-distortion-detetction-dataset?select=Annotated_data.csv. Accessed 30 Oct 2024.
[20] OpenAI. GPT-4 technical report. arXiv preprint arXiv:2303.08774.
[21] Brown T, et al. Language models are few-shot learners. Adv Neural Inf Process Syst. 2020;33:1877-901.
[22] Gao L, Zhang L, Zhang L, Huang J. RSVN: A RoBERTa sentence vector normalization scheme for short texts to extract semantic information. Appl Sci. 2022;12(21):11278.
[23] ChatGPT. Shared conversation [Internet]. Available from: https://chatgpt.com/share/e/e7f0600a-68c3-482d-8647-a40cc4b8ee7a. Accessed 30 Oct 2024.
[24] HuggingFace. Dataset-1 [Internet]. Available from: https://doi.org/10.57967/hf/2858. Accessed 30 Oct 2024.
[25] HuggingFace. Dataset-2 [Internet]. Available from: https://doi.org/10.57967/hf/2857. Accessed 30 Oct 2024.
[26] Liu Y, Ott M, Goyal N, Du J, Joshi M, Chen D, et al. RoBERTa: A robustly optimized BERT pretraining approach. arXiv preprint arXiv:1907.11692.
[27] Chung J, Gulcehre C, Cho K, Bengio Y. Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling. arXiv preprint arXiv:1412.3555.
[28] Zhang X, Zhao J, LeCun Y. A novel RoBERTa-GRU model for sentiment analysis. Appl Sci. 2023;13(6):3915.
[29] HuggingFace. Model-1 [Internet]. Available from: https://doi.org/10.57967/hf/2859. Accessed 30 Oct 2024.
[30] HuggingFace. Model-2 [Internet]. Available from: https://doi.org/10.57967/hf/2832. Accessed 30 Oct 2024.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 93-110, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1477791

Üçgenleme İle Konumlandırmanın Hassasiyetinin Hata Yayılma Kanunu ile Belirlenmesi

Nezir DOĞAN[1], Önder Halis BETTEMİR[2*]
[1,2] İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye
[1] nezirdogan22@gmail.com, [*2] onder.bettemir@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 03/05/2024; Kabul/Accepted: 10/01/2025)

Öz: İç mekân konum sistemleri GPS konumlandırma sisteminin çalışmadığı bina içerisinde gerçekleştirilen sosyal uygulamalar için canlıların konumunu belirleme, nesnelerin interneti, üretimde otomasyon ve robotik uygulamalar amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Kişilerin hangi odada veya bölgede olduğunu belirleyen uygulamalarda yeterli konum hassasiyeti kolaylıkla sağlanabilirken iç mekânın haritalanmasını amaçlayan uygulamalarda oldukça zahmetli ve pahalı ölçümlerin yapılmasını gerektirmektedir. Literatürde kullanılan alıcıların mesafe ölçme hassasiyetine bağlı olarak elde edilecek konum hassasiyetini inceleyen yeteri kadar çalışma bulunmamaktadır. Belirtilen literatür boşluğunu gidermek için bu çalışmada üçgenleme yöntemi ile gerçekleştirilen iç mekân konumlandırmasının hassasiyeti hata yayılma kanunu ile tahmin edilmiştir. Hata yayılmanın girdi parametreleri olarak üç adet istasyonun konumlarındaki belirsizlik ve istasyonlar ile gezici arasında ölçülen mesafelerin belirsizlikleri alınmıştır. Hata yayılma kanununun uygulanması için üçgenleme denklemlerinin girdi parametrelerine göre kısmi türevleri hesaplanmıştır. Yöntemin uygulanabilmesi için boyutları 10x10 metreden oluşan sanal bir odanın kenarlarına yerleştirilmiş üç adet istasyon noktasından odanın düzenli aralıklı ızgaranın düğüm noktaları üzerinde yapılacak konum belirleme işleminin hassasiyeti hesaplanmıştır. En düşük hata miktarının istasyon noktalarının ağırlık merkezi olan odanın orta bölgesinde gerçekleştiği, bir istasyondan uzaklaşıldığında istasyondan kaynaklanan hata miktarının arttığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca elde edilen hata değerlerinin komşuluklarına göre farkları alınarak göreceli hata miktarı incelenerek odanın merkezinden uzaklaşıldığında konumlandırma hatasının ve hata büyüklüğündeki değişimin arttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma sonucunda iç mekân konumlandırmaya bağlı olarak yapılacak haritalandırma ve rölöve çalışmalarının doğruluğu ve ölçülen cisimlerin mutlak boyutlarının hataları belirlenmiştir. Çalışma ayrıca bir ölçme cihazının mesafe hassasiyetine göre üçgenleme hassasiyetini de ortaya çıkardığı için gereksiz pahalılıkta ölçme cihazı alınmasının önüne geçebilecektir.

Anahtar kelimeler: İç mekân konumlandırma; hata yayılma kanunu; üçgenleme.

Determination of Precision of Triangulation by Error Propagation Law

Abstract: Indoor location systems are widely used where the GPS positioning system does not provide location data. Social applications performed inside buildings, determining the location of living beings, the internet of things, automation in production, and robotic applications are examples for the implementation of indoor positioning. Aforementioned technique can provide sufficient location accuracy for the applications that requires the detection of which room or area people are in. On the other hand, obtaining sufficient accuracy requires laborious and expensive measurements for the indoor mapping applications. In the literature, effect of the accuracy of the distance measurement on the accuracy of position obtained by triangulation has not been discussed thoroughly. In this study to fill the aforementioned literature gap, precision of indoor positioning achieved by triangulation is estimated by the error propagation law. Uncertainties of the locations of three stations and uncertainties of the distances measured between the stations and the rover are taken as the input parameters of error propagation process. The partial derivatives of the triangulation equations of the error propagation equations with respect to the input parameters are calculated. Precision of the localization process conducted with the three station points placed on the sides of a virtual room is estimated at the joints of the formed regular mesh of a room with dimensions of 10x10 meters. It was concluded that the lowest amount of error occurred at the center of the room, which is the center of gravity of the station points, and that the amount of error caused by a station increased as the location is moved away from the center. Moreover, by examining the relative amount of error by taking the differences of the obtained error values with respect to their neighbors, it was observed that the positioning error and the change in the error size increased as it is moved away from the center of the room. Precision of positioning and the errors of the absolute dimensions of measured objects based on indoor mapping techniques are determined. This study also reveals the precision of a location obtained by triangulation conducted by a surveying device with a specific distance measurement accuracy, which can prevent the purchase of unnecessarily expensive surveying devices.

Key words: Indoor positioning; error propagation law; triangulation.

[*] Sorumlu yazar: onder.bettemir@inonu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0009-0005-9685-0740, [2] 0000-0002-5692-7708.

1. Giriş

Yaşanan depremlerin ardından orta hasar düzeyinde hasar görmüş binaların deprem performans analizlerinin gerçekleştirilebilmesi ve güçlendirme projelerinin hazırlanabilmesi için mevcut halinin statik ve mimari projelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat mevcut binaların statik ve mimari projelerine tam uyularak yapılmamasına yaygın biçimde rastlanılmaktadır. Buna ek olarak eski yapıların statik ve mimari projelerinin kaybolması veya sadece taranmış görüntü biçiminde elde edilebilme ihtimali çok yüksektir. Belirtilen nedenler deprem performans analizi sürecinde bina içinde rölöve çalışmasının yapılmasını da gerektirmektedir.

Rölöve sırasında bina içerisinde incelemeler ve ölçümler yapılarak veri toplanır. Statik analiz için gerekli olan yapısal elemanların boyut ve konum bilgileri elde edilir. Eşyaların bulunduğu ve hasar görmüş bir binada rölöve çalışmalarını yürütmek deprem bölgesinde depremin ilk aylarında çok sık artçı depremler meydana geldiği için oldukça zahmetlidir. Zaman zaman ciddi büyüklükte meydana gelebilen artçı depremler, orta hasarlı binalarda rölöve çalışmalarını yürütecek ekiplerde ciddi endişe yaratabilmektedir. Bu nedenle binanın içinde en az sürede, minimum insan gücüyle rölöve çalışmalarının yürütülmesi ihtiyacı bulunmaktadır. Hızlı ve yüksek doğrulukta rölöve hazırlanabilmesi ağırlıklı olarak iç mekân konumlandırma sistemleri kullanılarak yapılan ölçümlere dayanmaktadır.

Teknolojinin gelişmesiyle beraber kişiler, taşıtlar ve diğer nesnelerin konumlarını tespit etmek mümkün hale gelmiştir. Uydu tabanlı konumlandırma sistemleri dış ortamlarda hassas bir şekilde konumlandırma yapabilmektedir. Ancak iç mekânlarda uydu sinyalleri duvarlar ve ortamda bulunan katı cisimler tarafından engellenerek zayıflamaktadır. Dış mekânda yüksek hassasiyete sahip uydu tabanlı konumlandırma sistemleri ile iç mekânda sinyallerin zayıf olması nedeniyle aynı hassasiyetle konumlandırma yapılamaz [1,2]. Bu nedenle iç mekânlarda uygulanacak konumlandırma teknolojileri için alternatif yöntemler gerekmektedir [3].

İç mekân konumlandırma sistemleri yaygın olarak konumu bilinen ve istasyon noktası olarak tanımlanan noktalar ile konumlandırma yapılacak nokta arasındaki mesafenin ölçülüp üçgenleme tekniği ile söz konusu noktanın koordinatlarının hesaplanmasına dayalıdır. İç mekân konumlandırma sistemleri doğruluk, duyarlılık, kapsama alanı, uyarlanabilirlik, ölçeklenebilirlik, maliyet ve karmaşıklık performans kriterleri üzerinden sınıflandırılabilir. Doğruluk, tahmin edilen konum ile gerçek konum arasındaki mesafedir. Duyarlılık, konumu belirlenmek istenen hareketli bir hedefin konum tahminin güncellenme hızını ifade etmektedir. Çevresel etkilerdeki değişiklikler konumlandırma sistemlerinin performanslarını etkileyebilmektedir. Konumlandırma sistemlerinin bu değişikliklerle başa çıkabilme yetenekleri uyarlanabilirliktir. Uyarlanabilir bir sistem daha yüksek konumlandırma doğruluğu sağlayabilir ve aynı zamanda kalibrasyon ihtiyacını önleyebilir [4].

Konumlandırma için kullanılan sensörlerden hiçbiri tamamen doğru ölçümler yapmadığı için tahmin edilen konumun belirsizliğini dikkate alarak farklı sensörlerden gelen bilgileri birleştirmek çok önemlidir. Ölçüm belirsizliğinin yönetilmesi yeterli doğrulukta konumlandırma yapılabilmesi için önemlidir [5]. Konumlandırma süreci sinyal ölçümü ve konum hesaplama aşaması olmak üzere genel olarak iki aşamada incelenmektedir. İlk aşamada, referans ve hedef düğümler arasında iletilen sinyallerin, varış zamanı, yönü ve sinyal gücü gibi özellikleri alıcılar tarafından belirlenir. Bu sayede varış zamanı (*Time of Arrival* – ToA), alınan sinyal gücü (*Received Signal Strength* – RSS), varış açısı (*Angle of Arrival* – AoA) ve varış zaman farkı (*Time Difference Of Arrival* – TDoA) gibi sinyal parametreleri elde edilir. İkinci aşamada, daha önce elde edilen parametreler kullanılarak hedef düğüm noktasının konumu belirlenecektir. Ayrıca sinyal ölçümleri gerçek sistemlerde özellikle iç mekânlarda tamamen doğru olmadığından, sonuç doğruluğunun artırılması ve ölçüm gürültüsünün filtrelenmesi için optimizasyon tabanlı istatistiksel yöntemler kullanılır [6]. Bu çalışmada mevcut iç mekân konumlandırma sistemleri incelenmiş ve rölöve çalışması için üçgenleme yöntemi ile yeterli hassasiyette konumlandırma yapılabilme durumu hata yayılma kanunu ile analiz edilmiştir.

2. Yaygın İç Mekân Konumlandırma Teknikleri

İç mekân konumlandırma sistemleri üzerine yapılan çalışmalarda sonuçların doğruluğunu artırmada Radyo Frekansı ile Tanımlama (*Radio Frequency İdentification* – RFID), kızılötesi (*Infrared* – IR) sensörler, iBeacon ve akıllı telefonların konum belirleme bileşenleri kullanılmaktadır. Mobil cihazlar daha doğru sonuçlara ulaşma olasılığını artırırken, yüksek maliyetlere neden olmaktadır. Cep telefonları veya kullanıcılara takılan sensörler sayesinde kullanıcı aktif olarak takip edilebilir ancak bu yöntemler kullanıcıların bu cihazları giymeleri veya yanlarında taşımaları gerektiğinden her zaman uygulanamamaktadır. Bununla birlikte IEEE 802.11 standardıyla uyumlu alıcılar ve vericiler kullanılarak beacon ve bluetooth üzerinden düşük maliyetli konumlandırma gerçekleştirilebilmektedir. Fakat belirtilen ucuz alıcıların sunduğu konum hassasiyeti düşüktür. İç mekânda

konumlandırma yapan sistemin yaygın olarak kullanılabilmesi için kolay ve hızlı biçimde kurulabilmelidir. Mevcut altyapı kullanılarak ek donanım gerektirmeyen sistemler tercih edilebilir [7, 8].

İç mekânda üçgenleme tekniği ile konumlandırma yapabilmek için RFID, Ultra Geniş Bant (*Ultra-wideband* – UWB), WiFi, Bluetooth ve ZigBee ağırlıklı olarak kullanılan teknolojilerdir. Bir konumlandırma sistemi ölçülecek hedef noktanın konumunu sinyalin fiziksel büyüklüğü, ölçüm metodu ve konum tahmini olmak üzere üç ayrı yöntemle tahmin eder. Sinyaller alıcı ve verici cihazlar arasında hareket ederek düğüm noktalarının konum bilgilerini iletir. ToA, TDoA, AoA, RSS teknikleri ile ölçülen istasyon ve gezici arasındaki mesafeyi konum bilgisine dönüştürmek için üçgenleme, yakınlık, ortam analizi ve parmak izi olarak sınıflandırılan algoritmalar kullanılır. Üçgenleme yönteminin zorluğu mesafe ölçümlerinin hatasız olmamasıdır. Ölçümlerin hata içermesi tüm dairelerin ortak bir noktada kesişmemesine neden olur. Ölçüm sayısı 3'ten fazlaysa konum belirleme multilaterasyon olarak adlandırılır ve en küçük kareler algoritması ile dairelere en yakın nokta tahmin edilerek bu sorun aşılabilir. İç mekân konumlandırma teknikleri arasından WiFi, Bluetooth, Bluetooth Düşük Enerji (*Bluetooth Low Energy* – BLE), ZigBee, RFID, Kızılötesi ve Sonar teknolojilerinin mesafe ölçüm ve/veya konumlandırma hassasiyetleri incelenmiştir.

2.1. Ağ sinyali tabanlı konumlandırma

İç mekân konumlandırmada kurulmuş sistemlerin yaygınlığı, düşük maliyetli oluşu ve engellerin bulunduğu karmaşık yapılı görüş hattı olmayan (NLOS) ortamlardan etkilenmemesi nedenleriyle WiFi tabanlı konumlandırma sistemleri yaygın olarak tercih edilmektedir [1, 9, 10]. Konumlandırmada kanal frekans yanıtı (*Channel Frequency Response* – CFR) ve alınan sinyal gücü göstergesi (*Received Signal Strength Indicator* – RSSI) değerini kullanabilir. Konumla alakalı parmak izi toplama ve veritabanında saklanan değerlerle Yapay Sinir Ağı (YSA) eğitiminin ardından anlık elde edilen parmak izi ile YSA çıktısını değerlendirerek konumlandırma gerçekleştirilir. Parmak izi tabanlı iç mekân konumlandırma sistemleri kalibrasyon (çevrimdışı) ve konumlandırma (çevrimiçi) olmak üzere iki aşamadan oluşur. Çevrimdışı aşamada parmak izi haritaları oluşturulur. Çevrimiçi aşamada konumu belirlenmek istenen noktadan sinyal özellikleri ölçülür ve çevrimdışı aşamada oluşturulan harita ile karşılaştırılır. Kalibrasyon aşamasının zor olması, sisteme yeni kalibrasyon noktalarının eklenmesinde ve iç mekândaki nesnelerin değişikliğinde sinyal haritasının değişmesi parmak izi yönteminin dezavantajlarındandır [11]. WiFi sinyalleri duvar gibi katı engellerden geçebilir ve altyapısının yaygın olması nedeniyle ek bir donanım gerektirmemektedir. Bu durum maliyet açısından avantaj sağlar ve ekstra yazılım gerektirmeden konumlandırma yapılabilir. Doğruluk düzeyi erişim noktası sayısı ile ilişkili olmakla birlikte 20 ile 40 m arasındadır ve kapsama alanı 150 metreye kadar ulaşabilir [1, 11, 12].

2.2. Bluetooth tabanlı konumlandırma

Bluetooth tabanlı teknolojilerin menzili 10 cm ile 10 m arasındadır. Konum tahmini için genelde yakınlık ve RSS yaklaşımları kullanılır [13]. Bluetooth tabanlı konumlandırma teknolojisinin enerji tüketimi çok fazla olduğu için iç mekân konumlandırmada enerji tüketimi daha düşük olan "Bluetooth Low Energy" daha yaygın biçimde kullanılmaktadır. BLE teknolojisinin bağlantı hızı bluetooth teknolojisine göre düşük olsa da hızlı cihaz eşleştirme, düşük maliyet ve sinyal bozulmalarının az oluşu yöntemin avantajlarıdır [9].

Düşük Enerjili Mavi diş (Bluetooth Low Energy - BLE) bluetooth teknolojisi tabanlıdır ve daha az enerji tüketir. İç mekân konumlandırmada mekâna işaretçiler yerleştirilir ve bu işaretçilerin ortama yaydıkları sinyallerin sinyal gücü değeri kullanılarak konum tahmini yapılır. Bu sistemin basit olması ve konumlandırma doğruluğunun sisteme yerleştirilen işaretçilerin yoğunluğu ile doğrudan ilişkili olması avantaj sağlar [2].

2.3. Ultra geniş band tabanlı konumlandırma

Ultra Geniş Band (Ultra – Wideband - UWB) sistemi dalga yansıması, ToF, ToA, TDoA, AoA prensiplerini kullanarak mesafe ölçer ve RSSI parmak izi haritaları oluşturmaya dayalı konumlandırma yapar. UWB, sahip olduğu 500 MHz ve daha üzeri geniş frekanslı bant genişliği sayesinde elde edilen yüksek çözünürlüklü zaman ve menzil avantajıyla hassas mesafe ölçümü elde edilebilmesini sağlar. Duvarlar ve mobilyalar gibi engeller nedeniyle çoklu yol etkisinin bulunduğu iç mekânlarda UWB geniş bant genişliği sayesinde sinyallerin zaman gecikmeli versiyonlarını kolayca tespit eder [14]. Konumları bilinen referans noktalarından ve konumu belirlenecek etiketlerden oluşur. Etiketin doğru bir şekilde konumlandırılması için en az dört adet referans düğüm noktası gereklidir. Referans noktası sayısının artması konumlandırma doğruluğunu artırır. UWB sensörleri diğer teknolojilere kıyasla daha az güç tüketirler.

UWB tekniğinde düşük frekanslı darbeler ile sinyalin duvarlardan ve çeşitli nesnelerden geçebilmesi konumlandırma doğruluğunda artış sağlayarak cm düzeyinde doğruluk elde edilir. Yüksek bant genişliği sayesinde yüksek miktarda veri iletimi sağlanır ve kısa darbelerle çok yollu girişim etkisini azaltarak ToA'nın daha kolay belirlenmesini ve diğer teknolojilere göre daha üstün olmasını sağlar. UWB teknolojisi konum tahmininde üçgenleme ve parmak izi yöntemlerini kullanır. Alıcı ve verici nokta arasındaki mesafeyi sinyallerin varış zaman farkı (TDoA) değerini kullanarak bulan ve az miktarda enerji ile yüksek boyutta veri transferi yapan UWB teknolojisinin doğruluk değeri oldukça yüksektir. 150 metreye ulaşabilen geniş kapsama alanı ve 0,1 ile 0,3 metre arasında gerçekleşen hata büyüklüğü, yöntemi iç mekân konumlandırma için uygun bir çözüm olmasını sağlamaktadır. Fakat diğer tekniklere göre maliyeti yüksektir ve pahalı olması uygulamada sınırlayıcı bir faktördür [1, 2, 9, 12, 13, 15].

2.4. Zigbee tabanlı konumlandırma

Zigbee alıcı ve verici cihazlar arasındaki mesafeyi ölçmek için hedef düğüm noktasından yansıyan sinyalin faz kayması değerini kullanır. Zigbee teknolojisinin avantajı düşük enerji tüketimi ve maliyetidir. Dezavantajları anti-parazit özelliğinin zayıf oluşu, konumlandırma hatasının büyüklüğü ve konumlandırma aralığının küçük olmasıdır [2, 13].

2.5. Radyo frekansı tabanlı konumlandırma

RFID radyo dalgaları, okuyucular ve etiketler arasında sinyal aktarımına dayalı bir teknolojidir. RFID sistemleri nesnelere yerleştirilmiş etiketlerden ve RFID okuyucularından oluşur. RFID etiketleri aktif ve pasif olarak ikiye ayrılır ve konumlandırmada etiketlerin varlığı algılanır. RFID tabanlı navigasyon sistemlerinde genellikle harici enerji kaynağı gerektirmeyen pasif etiketler kullanılır. RFID'nin kapsama alanı geniş olduğu için duvarlardan ve diğer engellerden kolayca geçebilir. RFID düşük maliyetli olması ve kolay uygulanabilir algoritmalarla konumlandırma yapabilmesi nedeniyle tercih edilir. Ancak konumlandırma doğruluğu yaklaşık 3 ile 5 metre arasındadır ve doğruluğu iyileştirmek için okuyucu sayısını artırmak maliyeti ve karmaşıklığı artırmaktadır. Konum tahmininde RSS, AoA, ToA ve TDoA kullanılır [16]. RFID ile en çok kullanılan yöntem yakınlık yöntemi olmakla birlikte RSS ile de konumlandırma yapılabilmektedir [13]. RFID tabanlı iç mekân konumlandırma sistemleri 1 ile 2 metre seviyelerinde doğruluk değerlerine ve 30 metreye ulaşabilen kapsama alanına sahiptir ve diğer sistemlerle birleştirilmesi zordur [2, 9, 12].

2.6. Kızılötesi tabanlı konumlandırma

Kızılötesi, görüş hattı gerektirmeyen, diferansiyel faz kayması, yakınlık ve varış açısı yöntemlerini kullanarak konumlandırma yapar [13]. IR ışınları kısa menzillidir ve sinyallerin belirli bir mesafeden sonra zayıflamasına ve etkin menzilin sınırlı olmasına neden olabilir. Ayrıca, IR sinyallerinin etkili olabilmesi için ortamda engel ve parazit bulunmamalıdır. Açık havada veya düşük engel içeren bir ortamda IR daha iyi performans sağlar [12].

2.7. Sonar tabanlı konumlandırma

Ultrasonik (*Ultrasound* - US) konumlandırma teknolojileri alıcı ve verici cihazlar arasındaki mesafeyi ultrason dalgalarının ToA ölçümlerini kullanarak tahmin eden kısa menzilli bir yöntemdir [13]. Elektronik etiketler ve gezici bir alıcıdan oluşan ultrasonik konumlandırma sistemleri ses hızı yardımıyla sabit etiket ve gezici arasındaki mesafenin belirlenmesi prensibiyle çalışır. Ses dalgalarının iletim hızı hava şartlarından etkilenir. Ultrasonik konumlandırma sistemleri kısa menzillidir, kapsama alanı 2 ile 10 m arasındadır, engellere karşı hassastır ve santimetre seviyesinde konumlandırma doğruluğuna sahiptir [2, 12].

Ultrasonik tabanlı iç mekân konumlandırma sistemleri santimetre düzeyinde yüksek doğruluğa ve hassasiyete sahip olmasının yanı sıra diğer iç mekân konumlandırma sistemlerine göre daha düşük maliyetlidir. US sistemler ses hızından yararlanarak ToF ölçümü ile konumlandırma yapar. Ses hızı ortam koşullarına bağlı olduğu için sıcaklık ve basınç ölçülerek düzeltme yapılması gereklidir [15].

3. Kaynak Taraması

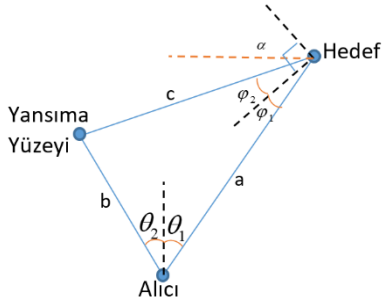
Yaman vd. uygun maliyetli ve benzerlerine yakın doğrulukta iç mekân konumlandırma sistemleri için bir elektronik kart tasarımı ve analiz programı geliştirmişlerdir [7]. 3 "Konum Verici Elektronik Kart", 1 "Konum Alıcı Elektronik Kart" ve 1 "Konum Alıcı-Verici Elektronik Kart" tasarlanmıştır. Sistemin hata düzeyi mevcut çalışmalarla kıyaslanmış ve benzer performans sergilediği belirlenmiştir. Tunç vd. iç mekân konumlandırma sistemlerinin hata düzeylerini azaltmak için parmak izi tabanlı RSSI (alınan sinyal gücü göstergesi) değerine dayalı biçimde yapay sinir ağı (YSA) ile mekânı 4 ya da 16 hücreye ayırmayı önermiştir. 4,25 x 1,75 m'lik iç mekânda 4 ve 16 hücreli konumlandırmada sırasıyla %94,4 ve %98,6 doğruluk oranları elde edilmiştir [17].

Üstebay vd. kablosuz erişim noktalarının (KEN) sinyal haritalarını kullanarak iç mekânda konumlandırma yapılmasını sağlayan bir model önermiştir [18]. Önerilen modelde, K-En yakın komşuluk (K-EYK), Destek Vektör Makineleri (DVM) ve Doğrusal Ayırtaç Analizi (DAA) yöntemleri uygulanmıştır. Küçültülmüş sinyal haritasının kullanıldığı modelin, orijinal sinyal haritasına sahip olan modele göre %70 daha az KEN kullanarak konum tespiti yapabildiği, %91 doğruluk oranına sahip olduğu ve %75 daha hızlı çalıştığı tespit edilmiştir.

Tunca vd. Android işletim sistemli akıllı telefonlarla iç mekân konumlandırma yapabilmek için yapay sinir ağı tabanlı lokalizasyon algoritması geliştirmiştir [8]. Geliştirilen yöntem ofis ve ev ortamlarında test edilmiştir. Ofis deneyinde 6x6 m², ev deneyinde ise 7x5,5 m² ebatlarında mekân kullanılmıştır. Aynı nokta için ofis deneyinde elde edilen konum değerlerinin %68'i 1,76 m², ev deneyinde elde edilen konum değerlerinin %68'i ise 1,44 m² alan içerisinde kalmıştır. Akçura vd. açık veya kapalı bir ortamda navigasyon görevi için otonom robot geliştirmiştir [19]. Lazer sensör, akü, elektronik denetim modülleri ve bilgisayarı birlikte taşıyabilecek kapasitede dört tekerlekli bir araç olarak geliştirilmiştir. Matlab'ta geliştirilen yazılımda bilgisayar ile SICK LMS 100 mesafe sensörü seri haberleşme portu ile bağlanmış ve sensör verileriyle konum ve doğrultuyu belirlenmektedir.

Kablosuz sinyal veya görüntü tabanlı parmak izi teknolojileri yaygın olarak kullanılmaktadır. Kablosuz sinyal veya görüntülerin alınan sinyal gücü göstergesi (RSSI) değerlerine göre parmak izi haritaları oluşturulur ve konum tahmini yapılır. Bu teknolojilerin dezavantajı ise iç mekânda duvar veya eşyaların konum ve yön değişiklikleri sinyal ve görüntülerin değişmesine neden olarak parmak izi haritasının yeniden oluşturulmasını gerektirmesidir [3]. Ortamda değişmeyen veya çok az değişiklik gösteren nokta yer işareti olarak belirlenir. Yer işaretlerinin hepsi çalışmasa dahi doğru çalışan yer işaretleri ile konum tahmini yapılabildiği için parmak izi yöntemine göre daha tutarlıdır. Ortam yapısının sıklıkla değiştiği alışveriş merkezi gibi karmaşık yapıların konumlandırılmasında yer işareti tekniği etkin bir şekilde kullanılır. Yer işareti yönteminde depolanan veri boyutunun parmak izi yöntemine göre daha az olması konumlandırma maliyetini azaltır [3].

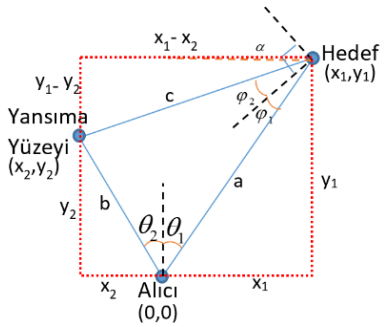
Soltanaghaei vd. hedef cihazın konumunu tek bir alıcı ile belirleyen yeni bir konumlandırma tekniği olan çok yollu üçgenlemeyi önermiştir. Bu teknikte çok yollu yansımalar konumlandırmayı geliştirmek için elemek yerine kullanılmıştır. Çok yollu üçgenlemede hedef ve alıcı cihaz arasında doğrudan ve yansıyan yol olmak üzere iki yol vardır. Bu yöntem hedefin yönünü belirlemek için doğrudan yolun AoA ve AoD ölçümlerini, hedefin yansıtıcıya alıcıya göre konumunu belirlemek için yansıyan yolun AoA ve AoD ölçümlerini kullanır. Hedefin konumunun belirlenmesinde ise iki yol arasındaki göreli ToF ölçümü kullanılır. Doğrudan ve yansıyan yollar, köşelerinde alıcı cihaz, hedef cihaz ve yansıma yüzeyleri bulunan üçgen oluşturur [20].



Şekil 1. Çok yollu üçgenleme geometrisi.

Sinyal, hedeften φ_1 açısıyla alıcıya iletilir, a ile ifade edilen mesafe kadar yayılır ve alıcıya θ_1 açısıyla ulaşır. Çok yollu yansıma φ_2 açısıyla hedeften alıcıya iletilir, b+c ile ifade edilen mesafe kadar yol kat ederek alıcıya θ_2 açısıyla ulaşır. θ_1: Doğrudan yolun AoA'sı; $\varphi 1$: Doğrudan yolun AoD'si; θ_2: Yansıyan yolun AoA'sı; φ_2: Yansıyan yolun AoD'si olarak ifade edilmektedir. MonoLoco, çok yollu etkileri çözmek için AoA, AoD ve ToF'ların

yarattığı tahmin edilebilen faz kaymalarından yararlanmıştır. $\Phi(\theta_l)$ ek faz kayması AoA ve antenler arası mesafenin fonksiyonudur.



Şekil 2. Yansıma sonucu faz kaymasının gösterimi.

MonoLoco kütüphanesi ile Şekil 2'de sunulan geometride oluşan bilinmeyenler çözülür. $\alpha = \varphi_1 + \theta_1$ denkleminden α belirlenir ve $XY = [x_1, y_1, x_2, y_2]$ konum parametreleri, $[XY] = \arg\min_{XY} S(XY)$doğrusal olmayan optimizasyon problemi çözülerek bulunur. Çok yollu üçgenlemenin temel avantajı, tek bir alıcıyla yardımsız cihaz lokalizasyonunun sağlanmasıdır. Bu yöntem, AP'lerle koordinasyon ihtiyacını ortadan kaldırır ve kesin ToF (Zamanın Geçişi) ölçümlerine dayanmak yerine rToF (Göreceli Zamanın Geçişi) prensibini kullanır. Farklı frekansta olan sinyallerin göreceli faz değerlerine dayanan rToF, saat senkronizasyonu gerektirmediği için verici ile koordinasyon sağlamadan tek alıcıyla konumlandırma yapılabilir.

Soltanaghaei vd. çok yollu sinyal fonksiyonun optimizasyonu için 20 cm x 20 cm boyutlarında ızgara oluşturmuş ve her nokta için S(XY) fonksiyonunu kullanarak çoklu yol izleyen sinyali belirleyip hedef ve alıcının konumunu yüksek doğrulukta belirlemeyi hedeflemiştir. Ölçümlerde 0,5m'lik medyan lokalizasyon hatası ve 6,6 derecelik medyan oryantasyon hatası elde edilmiştir [20].

Jekabsons vd. ortamda seçilen kalibrasyon noktalarından RSS ölçümü yaparak n adet (q_i,r_i) (i=1,2,…,n) ölçüm radyo haritasına eklenmiştir. Ağırlıklı k – en yakın komşular algoritması ile bilinmeyen konumda ölçülen r vektörüne en yakın r_{i1}, r_{i2}, ….., r_{ik} değerlerinin k indisini 2 olarak belirlemiş ve her nokta için q tahmini konumu hesaplanmıştır. Riga Teknik Üniversitesinde bulunan 5 katlı bir binanın son katında yapılan deneylerde 860 m² alanda dahili kablosuz karta sahip dizüstü bilgisayar ve 82 kalibrasyon noktası kullanılmıştır. Yalnızca güçlü WiFi erişim noktalarından alınan sinyal gücü verilerinden yararlanılarak hesaplanan konumun ortalama hata düzeyi 2,43 m iken zayıf WiFi erişim noktalarından alınan sinyal gücü verilerinden de yararlanıldığında hata düzeyi ortalama 2,19 m olarak belirlenmiştir [21].

Chen vd. önerdikleri sistemde eşyalı ofis ortamında %99,91 ve %100 konum tespit oranları ve 5 cm mesafeli konumlar için görüş hattı olan (*Line of Sight* – LOS) ve görüş hattı olmayan (*Non-line of Sight* – NLOS) ortamlar için sırasıyla %1,81 ve %1,65 yanlış alarm oranlarını elde etmişlerdir. Önerilen sistem 0,5 cm birim mesafe ile 1 ile 2 cm aralığında konumlandırma doğruluğu elde etmiştir [22, 23]. Qian vd. farklı hız ve konumlara sahip hareketin, sinyal yayılma yollarındaki sapmalarla insan hareketinin hızını, yönünü ve konumunu desimetre düzeyinde tahmin etme yeteneği sunan WiFi tabanlı Widar'ı önermiştir [24]. Widar, hedeflere ulaşmak için istatistiksel öğrenme metotları yerine WiFi sinyallerinin Kanal Durum Bilgilerine (*Channel Status Information* – CSI) başvurarak kullanıcıların anlık olarak hız, yön ve konumlarını belirlemiştir. Sinyallerin yayılım yolu uzunluğunun değişim oranı (*Path Length Change Rate* – PLCR) ile kullanıcının hızı ve konumu tahmin edilmiştir. Cihazların sadece köşelere ve sadece bir tarafa yerleştirildiği 4x4 m² izleme alanına sahip iki düzenekle yöntem denenmiştir. Hız tahmini için Widar'ı max PLCR (bağlantılardan en büyük PLCR'nin yarısını alan) ve single PLCR (sadece bir bağlantı mevcut olduğunda) ile karşılaştırmıştır. Widar, Max PLCR ve Single PLCR medyan hata oranları sırasıyla %13, %19 ve %40'tır. COTS WiFi cihazlarıyla Widar, 25cm ve 38cm konum hatası ve %13 bağıl hız hatası elde edilmiştir.

Silvia vd. hedefler, düğümler, bir sunucu ve üç temel cihazdan oluşan bir sistem kurmuştur. Düğümler ortamda bulunan nesnelerin hareketlerinin izlenmesi ve ölçülmesi için binaya yerleştirilen sabit cihazlardır. Düğümler, sunucuya kablosuz LAN veya Ethernet ile bağlıdır ve ölçümlerin doğru yapılabilmesi için en az dört düğüm noktası gereklidir. Hedefler ise takip edilmek istenen nesnelere yerleştirilen cihazlardır. Sistem 700 m² alana sahip bir garajda test edilmiştir. Ölçümlerin %70'inde hata değerleri 0,4 metreden daha düşüktür [12].

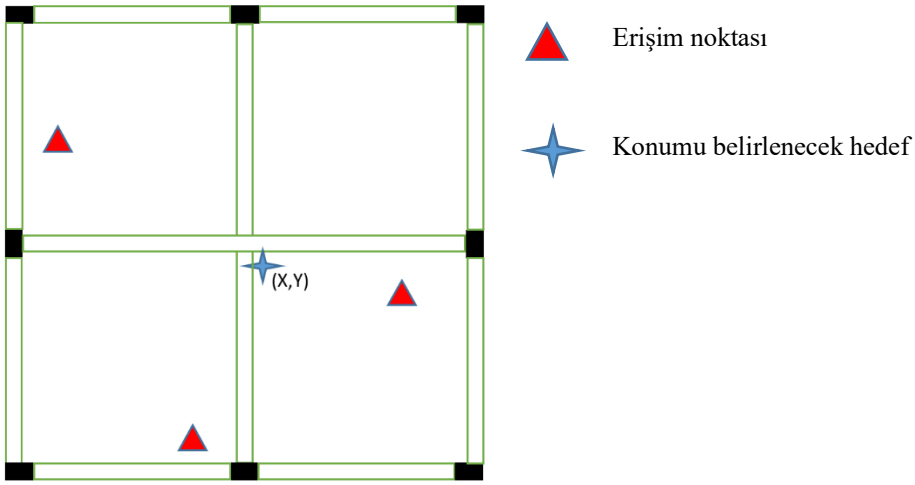
Liu vd. WiFi ile kullanıcıların konumlarını aktif ve pasif konumlandırma ile belirlemiştir. Olasılıksal algoritma sabit bir konumdaki her erişim noktasından alınan RSS değerlerinin olasılıksal dağılım fonksiyonunu oluşturur ve veritabanında ortak dağılım fonksiyonu olarak birleştirilmiş parmak izi olarak kaydeder. Ardından alıcı cihazın RSS değeri için veritabanında arama yaparak en olası konumunu belirler [10].

Dabove vd. düşük maliyetli konumlandırma ve izleme sağlayan Pozyx'i incelemişlerdir. İç mekân oda testinde 6,44 m x 4,91 m boyutlarındaki odanın köşelerine yükseklikleri farklı dört adet istasyon yerleştirilmiş ve iki farklı algoritma ile 100 ± 25 mm 3 boyutlu ortalama doğruluk değeri elde edilmiştir. Dar koridor testinde 1,8 m x 6,8 m boyutlarında koridora 4 adet istasyon yerleştirilmiş ve menzil ölçüm ortalama doğruluğu yaklaşık 150 ± 50 mm, üç boyutlu konumlandırma doğruluğu yaklaşık 60 ± 45 mm olarak belirlenmiştir [14]. Vleugels vd. buz hokeyinde oyuncuların kullandıkları sopalara IMU (Ataletsel Ölçüm Birimi) yerleştirip aktivite tespiti ve tanımlaması yaparak Decawave DWM1001 modül serisi ile UWB yönteminin konumlandırma performansını ölçmüştür. Güncelleme oranı yüksek olduğu için TDoA yaklaşımıyla konumlandırma yapılmıştır. En uzun menzil etiketin çubuğun içinde olduğu durumda 20 m, etiketin açık alanda olduğu durumda 35 m olarak ölçülmüştür. Etiketin çubuğun içinde olduğu durumdaki mesafe tahmini ile etiketin açık alanda olduğu durumdaki mesafe tahmini arasındaki fark 43 mm'dir [25]. Alışkan vd. ESP8266-7 WiFi modülü, STM32F103C mikro çipi ve UWB uyumlu DWM1000 sinyal alıcı verici modül ile konumlandırma yapmıştır. TDoA algoritması ile ölçümler yaparak Kalman filtresi uygulanan ve uygulanmayan ölçümlerin hatalarını incelemiştir. Kalman filtresi uygulanmadan ortalama 24,69 cm, Kalman filtresi uygulanarak ortalama 9,24 cm konum hatası elde etmiştir. Alıcı cihazların optimum pozisyonunun dar açılı üçgen oluşturacak şekilde olduğu tespit edilmiş ve bu pozisyonda 24,69 cm olan konum hatası %9,55 iyileşerek 22,33 cm olarak tespit edilmiştir [1].

4. Yöntem

Literatür taramasında iç konumlandırma sistemlerinin konumlandırma hassasiyetinin yaygın olarak sistem kurulduktan sonra değerlendirildiği, sistemin konumlandırma hatasının kurulum öncesi istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmediği görülmüştür. Belirtilen durum istenilen konumlandırma hassasiyetinin sağlanabilmesi için hangi hassasiyete sahip alıcıların temin edilmesi gerektiğinin önceden bilinememesine yol açmaktadır. Bu durum gereğinden pahalı alıcıların tercih edilmesi veya istenilen hassasiyette konum bilgisinin elde edilememesi risklerini doğurmaktadır. Belirtilen riskin önlenebilmesi için bu çalışmada hata yayılma kanunu ile iç mekân konumlandırma hassasiyeti istasyon konumları ve istasyon ile gezici alıcı arasındaki mesafelerin hataları dikkate alınarak tahmin edilmesini sağlayan denklemler oluşturulmuş ve gerekli kısmi türevler hesaplanmıştır.

Hata yayılma kanunu arazi ölçümleri ve uydu görüntülerinin haritalanması işlemlerinin hata değerlerini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [26, 27]. Hata yayılma kanunu girdi parametrelerinin sonuca etkisi kısmi türevler ile hesaplar. Bunun için girdi parametrelerinin hata değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Literatür taraması ile elde edilen mesafe ölçüm hassasiyet değerleri dikkate alınarak iç mekân konumlandırma yönteminin hassasiyeti hata yayılma kanunu ile incelenmiştir. Konumlandırma hassasiyeti Şekil 3'te sunulan geometrideki mekân için tahmin edilmiştir.



Şekil 3. Ölçme geometrisinin tanımlanması.

Üçgenleme yöntemi ile konumlandırılacak noktanın X ve Y koordinatları Eşitlik 1 ve 2'de sunulduğu gibi hesaplanmaktadır [4, 17].

$$X = \frac{\begin{vmatrix} (d_1{}^2 - d_2{}^2) - (x_1{}^2 - x_2{}^2) - (y_1{}^2 - y_2{}^2) & 2(y_2 - y_1) \\ (d_1{}^2 - d_3{}^2) - (x_1{}^2 - x_3{}^2) - (y_1{}^2 - y_3{}^2) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}} \quad (1)$$

$$Y = \frac{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & (d_1{}^2 - d_2{}^2) - (x_1{}^2 - x_2{}^2) - (y_1{}^2 - y_2{}^2) \\ 2(x_3 - x_1) & (d_1{}^2 - d_3{}^2) - (x_1{}^2 - x_3{}^2) - (y_1{}^2 - y_3{}^2) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}} \quad (2)$$

Eşitlik 1 ve 2'de yer alan d_1, d_2 ve d_3 terimleri sırası ile 1, 2 ve 3 numaralı istasyonlar ile alıcı arasında ölçülen mesafeleri tanımlamaktadır. Eşitlik 1'deki determinant hesaplamaları açık haliyle Eşitlik 3'te, Eşitlik 2'de sunulan denklemin açık hali Eşitlik 4'te sunulduğu gibi yazılmaktadır.

$$X = \frac{2(y_3 - y_1)[(d_1{}^2 - d_2{}^2) - (x_1{}^2 - x_2{}^2) - (y_1{}^2 - y_2{}^2)] - 2(y_2 - y_1)[(d_1{}^2 - d_3{}^2) - (x_1{}^2 - x_3{}^2) - (y_1{}^2 - y_3{}^2)]}{4(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - 4(y_2 - y_1)(x_3 - x_1)} \quad (3)$$

$$Y = \frac{2(x_2 - x_1)[(d_1{}^2 - d_3{}^2) - (x_1{}^2 - x_3{}^2) - (y_1{}^2 - y_3{}^2)] - 2(x_3 - x_1)[(d_1{}^2 - d_2{}^2) - (x_1{}^2 - x_2{}^2) - (y_1{}^2 - y_2{}^2)]}{4(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - 4(x_3 - x_1)(y_2 - y_1)} \quad (4)$$

Eşitlik 3 ve 4'te yer alan parantezler açıldığında ve gerekli sadeleştirmeler yapıldığında sırası ile Eşitlik 5 ve 6'da sunulan denklemler elde edilir.

$$X = \frac{\begin{bmatrix} 2d_1{}^2y_3 - 2d_1{}^2y_2 - 2d_2{}^2y_3 + 2d_3{}^2y_2 + 2d_2{}^2y_1 - 2d_3{}^2y_1 - 2x_1{}^2y_3 + 2x_1{}^2y_2 + 2x_2{}^2y_3 \\ -2x_3{}^2y_2 - 2x_2{}^2y_1 + 2x_3{}^2y_1 - 2y_1{}^2y_3 + 2y_1{}^2y_2 + 2y_2{}^2y_3 - 2y_3{}^2y_2 - 2y_2{}^2y_1 + 2y_3{}^2y_1 \end{bmatrix}}{4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1} \quad (5)$$

$$Y = \frac{\begin{bmatrix} 2d_1{}^2x_2 - 2d_1{}^2x_3 - 2d_3{}^2x_2 + 2d_2{}^2x_3 + 2d_3{}^2x_1 - 2d_2{}^2x_1 - 2x_1{}^2x_2 + 2x_1{}^2x_3 + 2x_3{}^2x_2 \\ -2x_2{}^2x_3 - 2x_3{}^2x_1 + 2x_2{}^2x_1 - 2y_1{}^2x_2 + 2y_1{}^2x_3 + 2y_3{}^2x_2 - 2y_2{}^2x_3 - 2y_3{}^2x_1 + 2y_2{}^2x_1 \end{bmatrix}}{4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1} \quad (6)$$

Üçgenleme ile elde edilen konumun hassasiyeti hata kaynaklarının ölçülen 3 mesafe ve 3 istasyon noktalarının konum hatalarına bağlı olarak hata yayılma kanunu ile tahmin edildiğinde ölçülen konumun x ve y koordinatlarının hassasiyetleri sırası ile Eşitlik 7 ve 8'de sunulan denklemlerle tahmin edilir.

$$\sigma_X = \sqrt{\left(\frac{\partial X}{\partial d_1}\sigma_{d_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial d_2}\sigma_{d_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial d_3}\sigma_{d_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial x_1}\sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial x_2}\sigma_{x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial x_3}\sigma_{x_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial y_1}\sigma_{y_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial y_2}\sigma_{y_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial y_3}\sigma_{y_3}\right)^2} \quad (7)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial d_1}\sigma_{d_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial d_2}\sigma_{d_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial d_3}\sigma_{d_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_1}\sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_2}\sigma_{x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_3}\sigma_{x_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial y_1}\sigma_{y_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial y_2}\sigma_{y_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial y_3}\sigma_{y_3}\right)^2} \quad (8)$$

Elde edilen koordinat konum hata değerleri Eşitlik 9'da belirtilen ifade ile birleştirilerek 2 boyutlu mutlak konum hatası elde edilir.

$$\sigma_K = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2} \quad (9)$$

Eşitlik 7 ve 8'de yer alan kısmi türev denklemleri aşağıda sunulmuştur. X koordinatının mesafelere göre kısmi türevleri Eşitlik 10-12'de gösterilmiştir.

$$\frac{\partial X}{\partial d_1} = \frac{(4d_1y_3 - 4d_1y_2)}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)} \tag{10}$$

$$\frac{\partial X}{\partial d_2} = \frac{(4d_2y_1 - 4d_2y_3)}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)} \tag{11}$$

$$\frac{\partial X}{\partial d_3} = \frac{(4d_3y_2 - 4d_3y_1)}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)} \tag{12}$$

Eşitlik 13-15'te sunulan denklemler konumlandırılacak noktanın X koordinatının 3 istasyon noktasının her birinin x koordinatına göre kısmi türevlerini ifade etmektedir.

$$\frac{\partial \mathrm{X}}{\partial \mathrm{x}_1} = \frac{(4\mathrm{x}_1\mathrm{y}_2 - 4\mathrm{x}_1\mathrm{y}_3)(4\mathrm{x}_1\mathrm{y}_3 - 4\mathrm{x}_2\mathrm{y}_1 - 4\mathrm{x}_1\mathrm{y}_3 - 4\mathrm{x}_3\mathrm{y}_2 + 4\mathrm{x}_1\mathrm{y}_2 + 4\mathrm{x}_3\mathrm{y}_1) - (4\mathrm{y}_2 - 4\mathrm{y}_3) \times (\mathrm{PAY(X)})}{(4\mathrm{x}_2\mathrm{y}_3 - 4\mathrm{x}_2\mathrm{y}_1 - 4\mathrm{x}_1\mathrm{y}_3 - 4\mathrm{x}_3\mathrm{y}_2 + 4\mathrm{x}_1\mathrm{y}_2 + 4\mathrm{x}_3\mathrm{y}_1)^2} \tag{13}$$

$$\frac{\partial \mathrm{X}}{\partial \mathrm{x}_2} = \frac{(4\mathrm{x}_2\mathrm{y}_3 - 4\mathrm{x}_2\mathrm{y}_1)(4\mathrm{x}_2\mathrm{y}_3 - 4\mathrm{x}_2\mathrm{y}_1 - 4\mathrm{x}_1\mathrm{y}_3 - 4\mathrm{x}_3\mathrm{y}_2 + 4\mathrm{x}_1\mathrm{y}_2 + 4\mathrm{x}_3\mathrm{y}_1) - (4\mathrm{y}_3 - 4\mathrm{y}_1) \times (\mathrm{PAY(X)})}{(4\mathrm{x}_2\mathrm{y}_3 - 4\mathrm{x}_2\mathrm{y}_1 - 4\mathrm{x}_1\mathrm{y}_3 - 4\mathrm{x}_3\mathrm{y}_2 + 4\mathrm{x}_1\mathrm{y}_2 + 4\mathrm{x}_3\mathrm{y}_1)^2} \tag{14}$$

$$\frac{\partial \mathrm{X}}{\partial \mathrm{x}_3} = \frac{(4\mathrm{x}_3\mathrm{y}_1 - 4\mathrm{x}_3\mathrm{y}_2)(4\mathrm{x}_2\mathrm{y}_3 - 4\mathrm{x}_2\mathrm{y}_1 - 4\mathrm{x}_1\mathrm{y}_3 - 4\mathrm{x}_3\mathrm{y}_2 + 4\mathrm{x}_1\mathrm{y}_2 + 4\mathrm{x}_3\mathrm{y}_1) - (4\mathrm{y}_1 - 4\mathrm{y}_2) \times (\mathrm{PAY(X)})}{(4\mathrm{x}_2\mathrm{y}_3 - 4\mathrm{x}_2\mathrm{y}_1 - 4\mathrm{x}_1\mathrm{y}_3 - 4\mathrm{x}_3\mathrm{y}_2 + 4\mathrm{x}_1\mathrm{y}_2 + 4\mathrm{x}_3\mathrm{y}_1)^2} \tag{15}$$

Eşitlik 16-18'de sunulan denklemler konumlandırılacak noktanın X koordinatının 3 istasyon noktasının her birinin y koordinatına göre kısmi türevlerini içermektedir.

$$\frac{\partial X}{\partial y_1} =$$

$$\frac{(2{d_2}^2 - 2{d_3}^2 - 2{x_2}^2 + 2{x_3}^2 - 4y_1y_3 + 4y_1y_2 - 2{y_2}^2 + 2{y_3}^2)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4x_3 - 4x_2) \times (PAY(X))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \tag{16}$$

$$\frac{\partial X}{\partial y_2} =$$

$$\frac{(2{d_3}^2 - 2{d_1}^2 + 2{x_1}^2 - 2{x_3}^2 + 2{y_1}^2 + 4y_2y_3 - 2{y_3}^2 - 4y_2y_1)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4x_1 - 4x_3) \times (PAY(X))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \tag{17}$$

$$\frac{\partial X}{\partial y_3} =$$

$$\frac{(2{d_1}^2 - 2{d_2}^2 - 2{x_1}^2 + 2{x_2}^2 - 2{y_1}^2 - 2{y_2}^2 - 4y_3y_2 + 4y_3y_1)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4x_2 - 4x_1) \times (PAY(X))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \tag{18}$$

Eşitlik 19-27'de sunulan denklemler Y koordinatının girdi parametrelerine göre kısmi türevlerini içermektedir. Eşitlik 19-21'de sunulan denklemler mesafeye göre kısmi türevleri içermektedir.

$$\frac{\partial Y}{\partial d_1} = \frac{(4d_1x_2 - 4d_1x_3)}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)} \tag{19}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial d_2} = \frac{(4d_2x_3 - 4d_2x_1)}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)} \tag{20}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial d_3} = \frac{(4d_3x_1 - 4d_3x_2)}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)} \tag{21}$$

Eşitlik 22-24'te sunulan denklemlerde istasyon noktalarının x koordinatına göre kısmi türevleri sunulmuştur.

$$\frac{\partial Y}{\partial x_1} =$$

$$\frac{(2{d_3}^2 - 2{d_2}^2 - 4x_1x_2 + 4x_1x_3 - 2{x_3}^2 + 2{x_2}^2 - 2{y_3}^2 + 2{y_2}^2)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4y_2 - 4y_3) \times (PAY(Y))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \tag{22}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_2} =$$

$$\frac{(2{d_1}^2 - 2{d_3}^2 - 2{x_1}^2 + 2{x_3}^2 - 4x_2x_3 + 4x_2x_1 - 2{y_1}^2 + 2{y_3}^2)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4y_3 - 4y_1) \times (PAY(Y))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \tag{23}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_3} =$$

$$\frac{(2{d_2}^2 - 2{d_1}^2 + 2{x_1}^2 + 4x_3x_2 - 2{x_2}^2 - 4x_3x_1 + 2{y_1}^2 - 2{y_2}^2)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4y_1 - 4y_2) \times (PAY(Y))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \tag{24}$$

Eşitlik 25 – 27'de sunulan denklemlerde istasyon noktalarının y koordinatına göre kısmi türevleri sunulmuştur.

$$\frac{\partial Y}{\partial y_1} = \frac{(4y_3x_3 + 4y_1x_2)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4x_3 - 4x_2) \times (PAY(Y))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \tag{25}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial y_2} = \frac{(4y_2x_1 - 4y_2x_3)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4x_1 - 4x_3) \times (PAY(Y))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \tag{26}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial y_3} = \frac{(4y_3x_2 - 4y_3x_1)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4x_2 - 4x_1) \times (PAY(Y))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \tag{27}$$

Kısmi türev denklemlerinde yer alan PAY(X) ve PAY(Y) terimlerinin açık ifadesi Eşitlik 28 ve 29'da sunulmuştur.

$$PAY(X) = \begin{bmatrix} 2{d_1}^2y_3 - 2{d_1}^2y_2 - 2{d_2}^2y_3 + 2{d_3}^2y_2 + 2{d_2}^2y_1 - 2{d_3}^2y_1 - 2{x_1}^2y_3 + 2{x_1}^2y_2 + 2{x_2}^2y_3 \\ -2{x_3}^2y_2 - 2{x_2}^2y_1 + 2{x_3}^2y_1 - 2{y_1}^2y_3 + 2{y_1}^2y_2 + 2{y_2}^2y_3 - 2{y_3}^2y_2 - 2{y_2}^2y_1 + 2{y_3}^2y_1 \end{bmatrix} \tag{28}$$

$$PAY(Y) = \begin{bmatrix} 2{d_1}^2x_2 - 2{d_1}^2x_3 - 2{d_3}^2x_2 + 2{d_2}^2x_3 + 2{d_3}^2x_1 - 2{d_2}^2x_1 - 2{x_1}^2x_2 + 2{x_1}^2x_3 + 2{x_3}^2x_2 \\ -2{x_2}^2x_3 - 2{x_3}^2x_1 + 2{x_2}^2x_1 - 2{y_1}^2x_2 + 2{y_1}^2x_3 + 2{y_3}^2x_2 - 2{y_2}^2x_3 - 2{y_3}^2x_1 + 2{y_2}^2x_1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

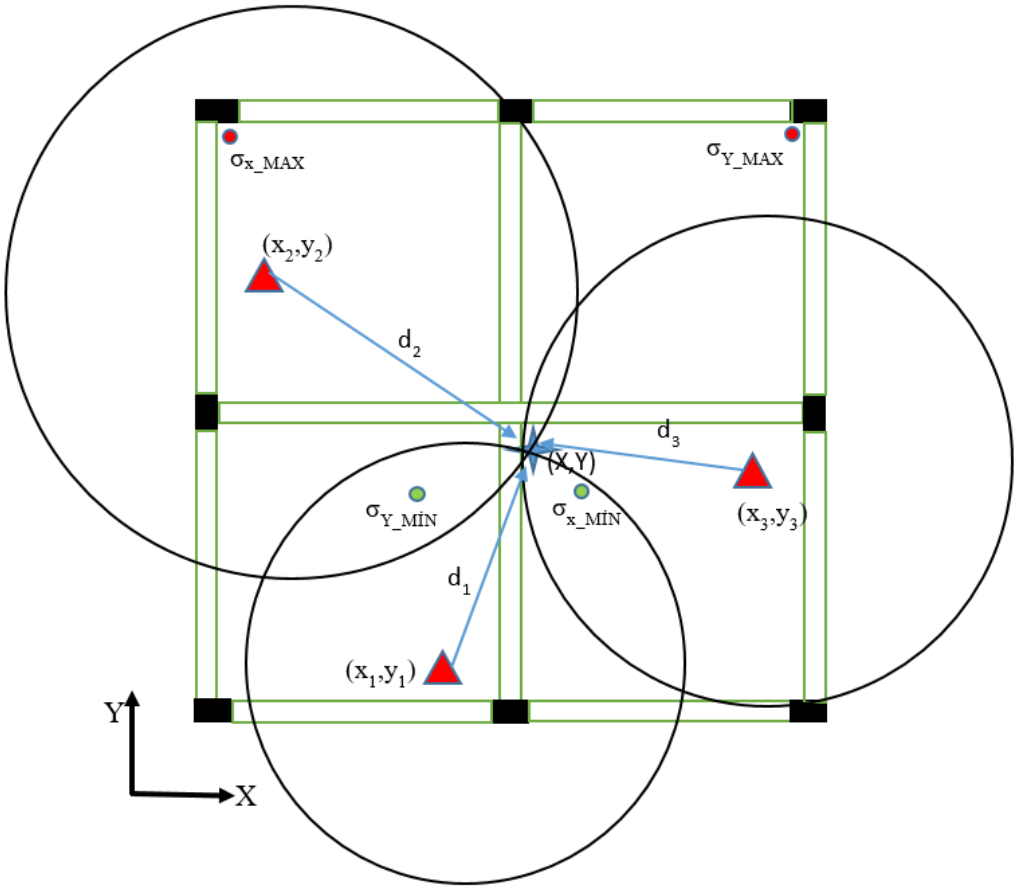
Kısmı türev denklemleri ve ölçme hassasiyeti değerlerinin denklemlerde yerine yazılması ile konumlandırma hassasiyeti hesaplanır. İç mekânın farklı konumları için gezici ve istasyonlar arasındaki mesafe değerleri girilip denklemlerin uygulanması ile konumlama hassasiyetleri ilgili konum için hesaplanır ve konumlama tutarlılığı belirlenebilir.

5. Vaka Çalışması

Yöntem kısmında açıklanan denklemlerin uygulaması Şekil 4'te sunulan hipotetik iç mekânda gerçekleştirilmiştir. Ölçülen konumun hassasiyeti Tablo 1'de sunulan girdi parametrelerinin hassasiyet değerlerine bağlı olarak hesaplanmıştır.

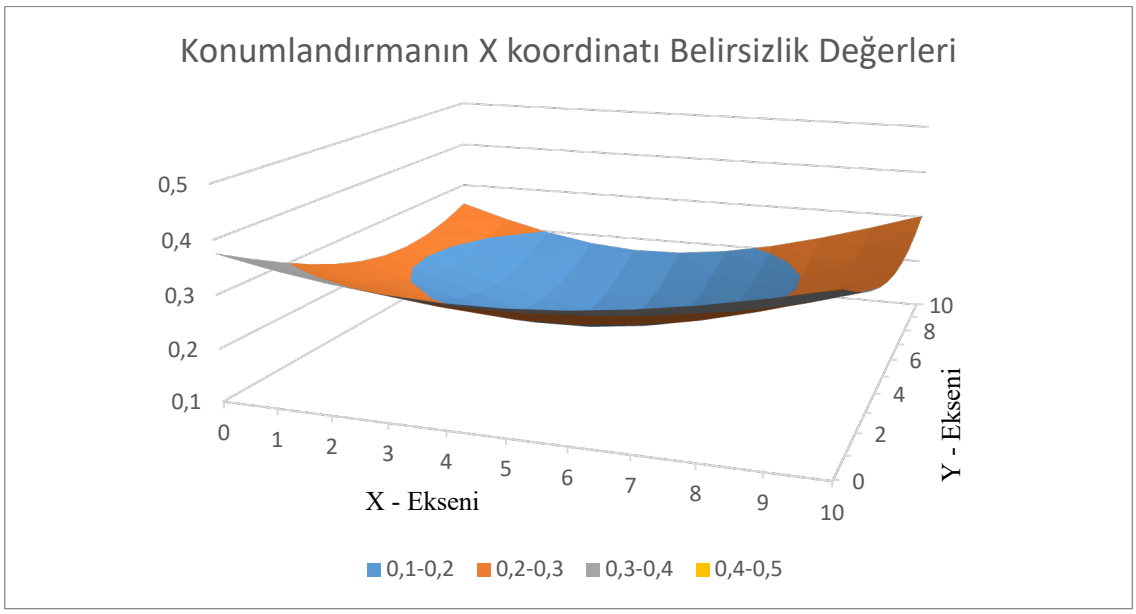
Tablo 1. Hata yayılma kanunu ile belirsizlik tahmininin girdi parametreleri.

İstasyon	$Konum_x$	$Konum_y$	Belirsizlik (m)	Mesafe	Belirsizlik (m)
1	3,5	0,3	0,05	d_1	0,1
2	2,5	6,2	0,05	d_2	0,15
3	8,2	4	0,05	d_3	0,2



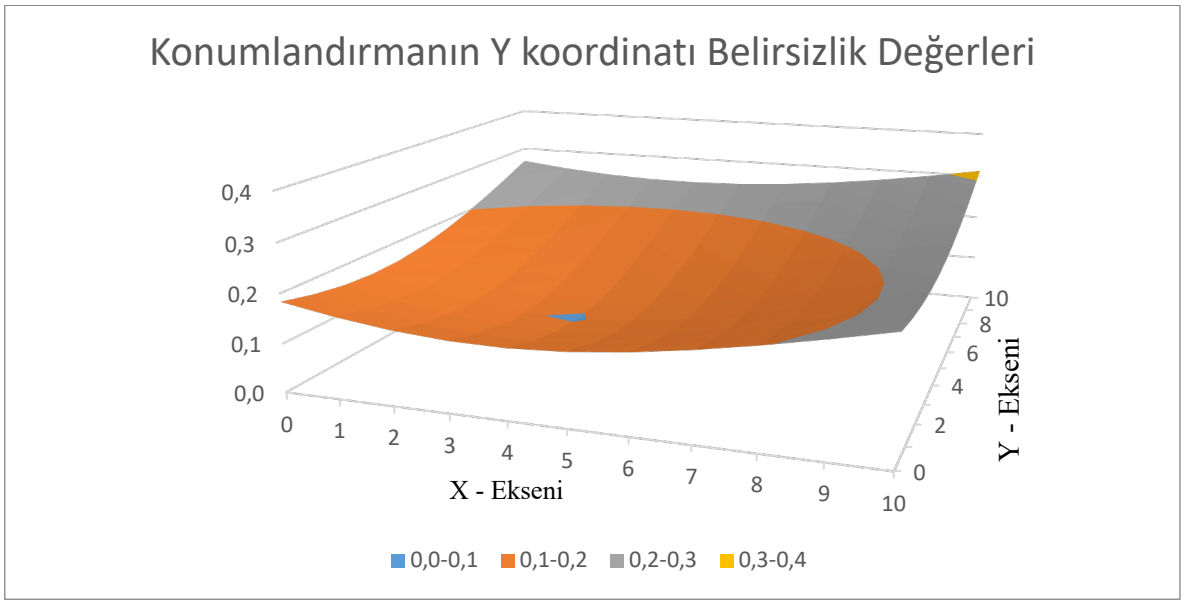
Şekil 4. Üçgenleme yönteminin gösterimi.

İç konumlandırmanın simüle edildiği alan 10 x 10 m² boyutundadır. İstasyon noktalarının konumları Tablo 1'de sunulmuş ve Şekil 4'te gösterilmiştir. Mekân bir metrelik kare ızgaralara ayrılmış ve ızgaraların kesişimleri toplam 121 nokta oluşturmuştur. Konumlama hassasiyeti belirtilen 121 noktada hata yayılma kanunu ile hesaplanmıştır. Eşitlik 7 uygulanarak elde edilen konumlandırmanın x koordinatının hassasiyet değerleri Şekil 5'te sunulmuştur. En düşük hata değeri x=7, y=4 noktasında ± 0,112 m olarak elde edilirken en yüksek konumlandırma hatası x=0, y=0 noktasında ± 0,410 m olarak elde edilmiştir.



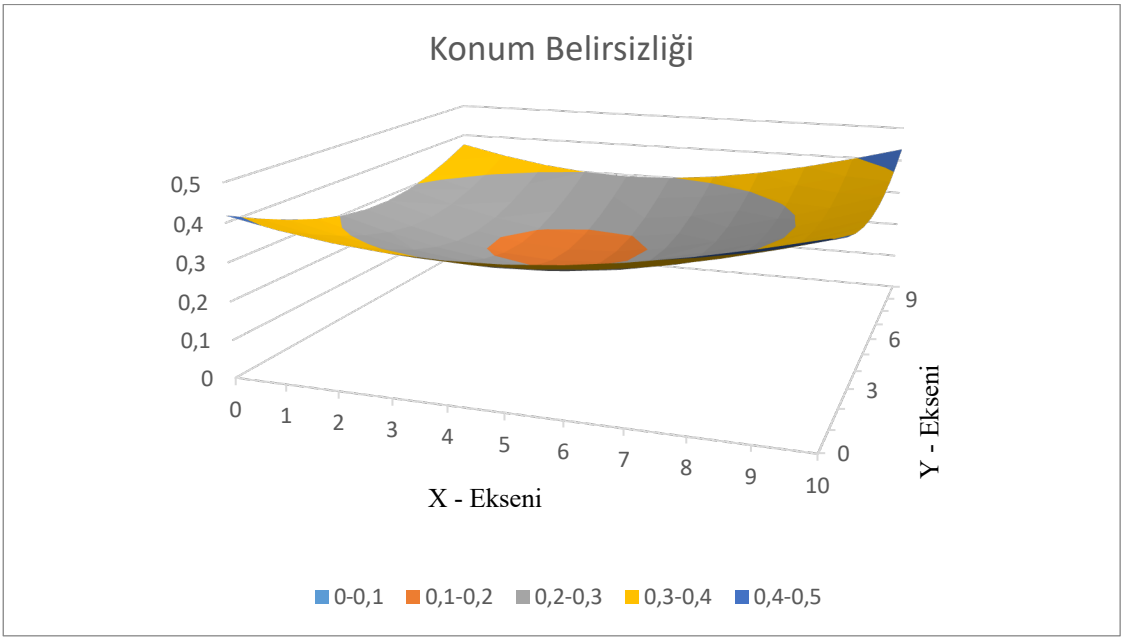
Şekil 5. Konumlandırmanın X – koordinatının belirsizliği.

Eşitlik 8 uygulanarak elde edilen konumlandırmanın y koordinatının hassasiyet değerleri Şekil 6'da sunulmuştur. En düşük hata değeri x=3, y=4 noktasında ± 0,099 m iken en yüksek konumlandırma hatası x=10, y=10 noktasında ± 0,312 m olarak elde edilmiştir.



Şekil 6. Konumlandırmanın Y – koordinatının belirsizliği.

Eşitlik 9 uygulanarak elde edilen mutlak konumlandırma hassasiyet değerleri Şekil 7'de sunulmuştur. Ayrıca sonuçlar metre biriminde tablo halinde Tablo 2'de verilmiştir. En düşük hata değeri x=6, y=4 noktasında ± 0,180 m iken en yüksek konumlandırma hatası x=0, y=10 noktasında ± 0,478 m olarak elde edilmiştir.

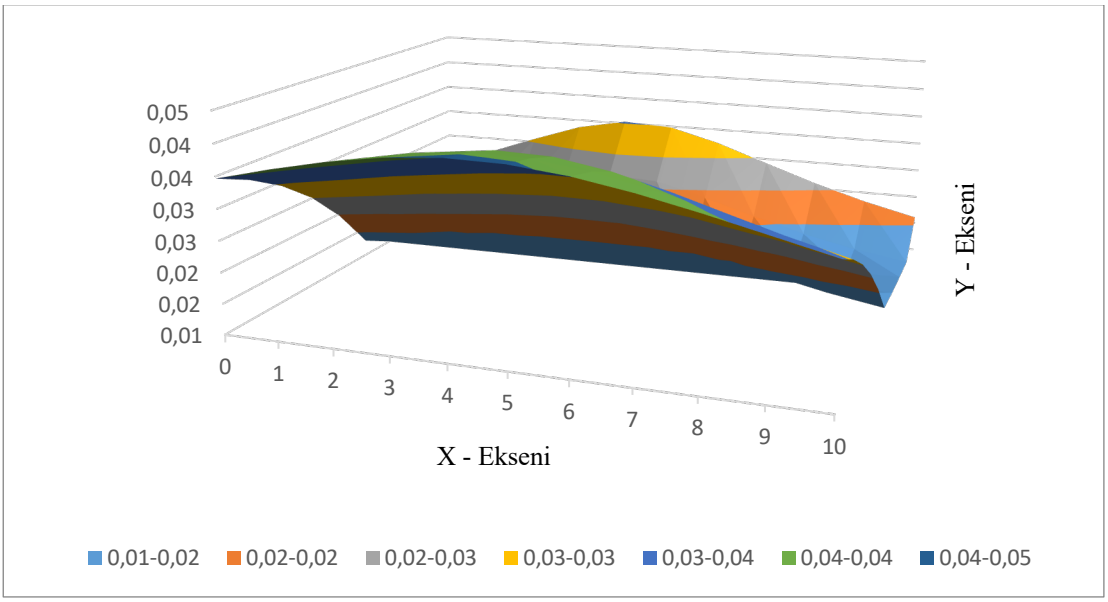


Şekil 7. Hata yayılma kanunu ile elde edilen konumlandırma belirsizliği.

Tablo 2. Hesaplanan Konum Hatalarının Tablo Halinde Gösterimi.

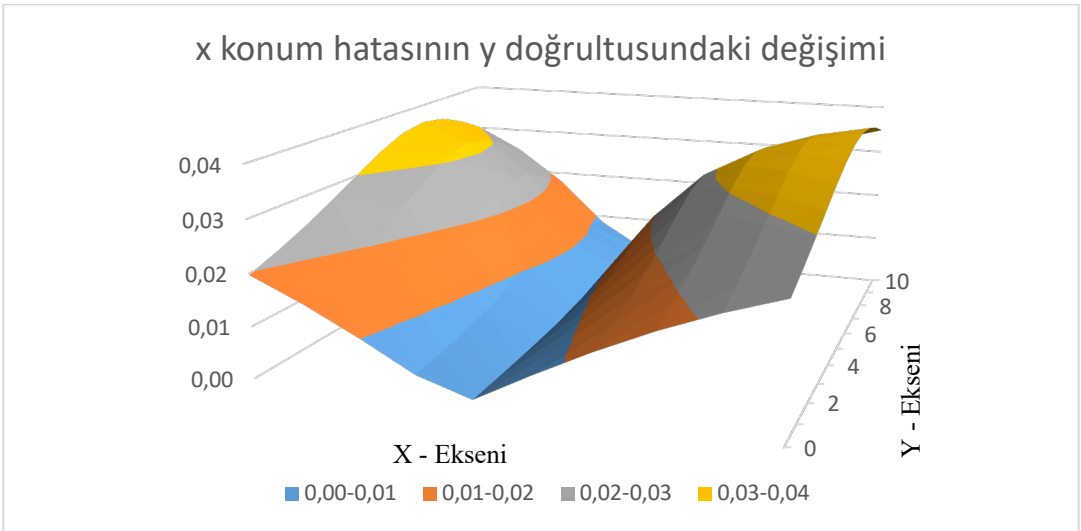
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,418	0,392	0,372	0,360	0,355	0,358	0,370	0,388	0,413	0,443	0,478
1	0,380	0,351	0,329	0,315	0,309	0,313	0,326	0,347	0,375	0,408	0,445
2	0,346	0,315	0,290	0,273	0,267	0,272	0,286	0,310	0,341	0,377	0,417
3	0,319	0,284	0,256	0,237	0,230	0,235	0,252	0,279	0,312	0,351	0,394
4	0,298	0,261	0,230	0,209	0,200	0,206	0,226	0,255	0,291	0,333	0,377
5	0,286	0,247	0,214	0,192	0,183	0,189	0,210	0,241	0,279	0,322	0,368
6	0,285	0,245	0,212	0,189	0,180	0,186	0,207	0,239	0,278	0,321	0,367
7	0,293	0,255	0,223	0,201	0,193	0,199	0,219	0,249	0,286	0,328	0,373
8	0,311	0,275	0,246	0,226	0,219	0,224	0,242	0,270	0,304	0,344	0,387
9	0,336	0,304	0,278	0,260	0,254	0,258	0,274	0,299	0,330	0,367	0,408
10	0,368	0,338	0,315	0,300	0,295	0,299	0,312	0,334	0,363	0,397	0,435

Şekil 5-7'de sunulan konumlandırma hatası yüzeyleri konum hatasının ve konum hatası değişimlerinin mekân içerisinde önemli farklılıklar gösterebildiği sonucunu vermiştir. Konumlandırma hatasının mekân içerisindeki değişimini incelemek için konumlandırmanın x ve y koordinatlarında ölçülen hata değerlerinin hem x hem de y doğrultusu üzerinde ardışık komşuluklarına göre farkları alınmıştır. Elde edilen eğriler Şekil 8 – 12'de sunulmuştur.

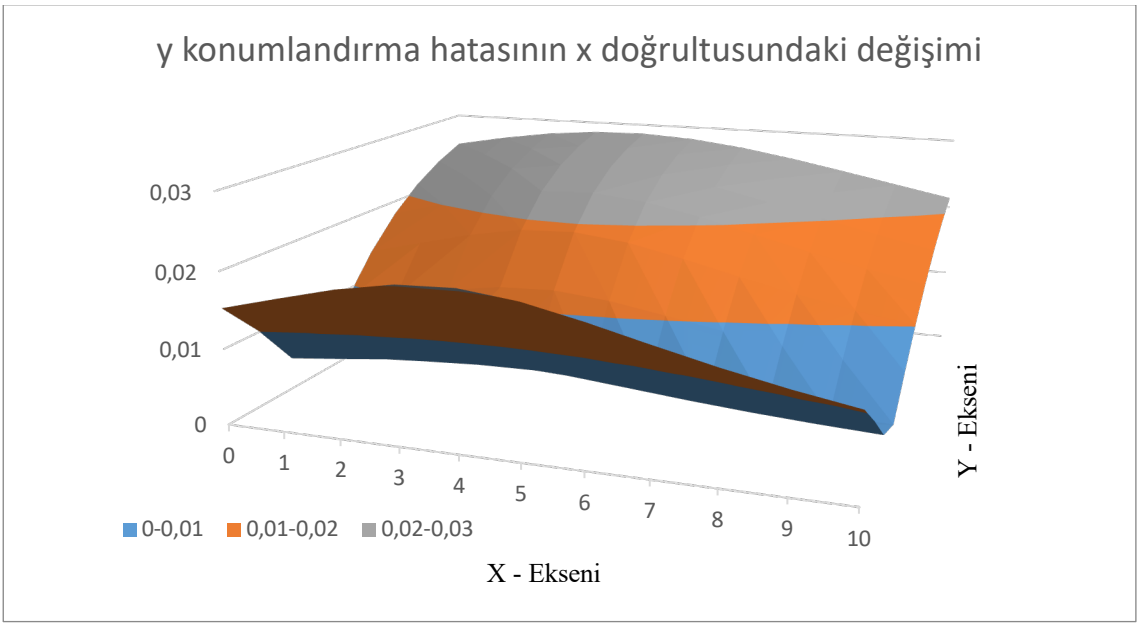


Şekil 8. Konumlandırmanın x koordinatı belirsizliğinin x doğrultusundaki değişimi.

Şekil 8'de sunulan hata eğrisi Şekil 5'te sunulan x koordinatı konumlandırma hatasından x koordinatı boyunca ardışık biçimde bir önceki hücreden çıkarılarak elde edilmiştir. Bu nedenle konumlandırma hatası x ekseni boyunca 11 noktada hesaplanırken hata fark değerleri x ekseni boyunca 10 noktada hesaplanabilmiştir. Şekil 9'da sunulan hata eğrisi Şekil 5'te sunulan x koordinatı konumlandırma hatasından y koordinatı boyunca ardışık biçimde bir önceki hücreden çıkarılarak elde edilmiştir. Bu nedenle konumlandırma hatası y ekseni boyunca 11 noktada hesaplanırken hata fark değerleri y ekseni boyunca 10 noktada hesaplanabilmiştir. x koordinatı konumlandırma hatasının hem x hem de y konumu için odanın merkezine yakın bölgelerde birim mesafede daha az değiştiği kenarlara gidildikçe hata miktarındaki değişimin arttığı görülmektedir. Belirtilen hata eğrileri incelendiğinde odanın merkezinde x doğrultusu boyunca uzanan bir elemanın boyutu başlangıç ve bitiş noktalarından ölçülen iki konumun farkı ile hesaplandığında düşük bir hata değeri beklenirken aynı cismin odanın kenarında bulunması halinde çok daha yüksek bir hata değeri beklenmektedir. Cismin y doğrultusu boyunca uzandığı ve cismin odanın merkezine yakın olduğu durum için hata miktarının daha düşük oda kenarlarına yakın olduğu durumda ise daha yüksek hata değeri beklenmektedir.

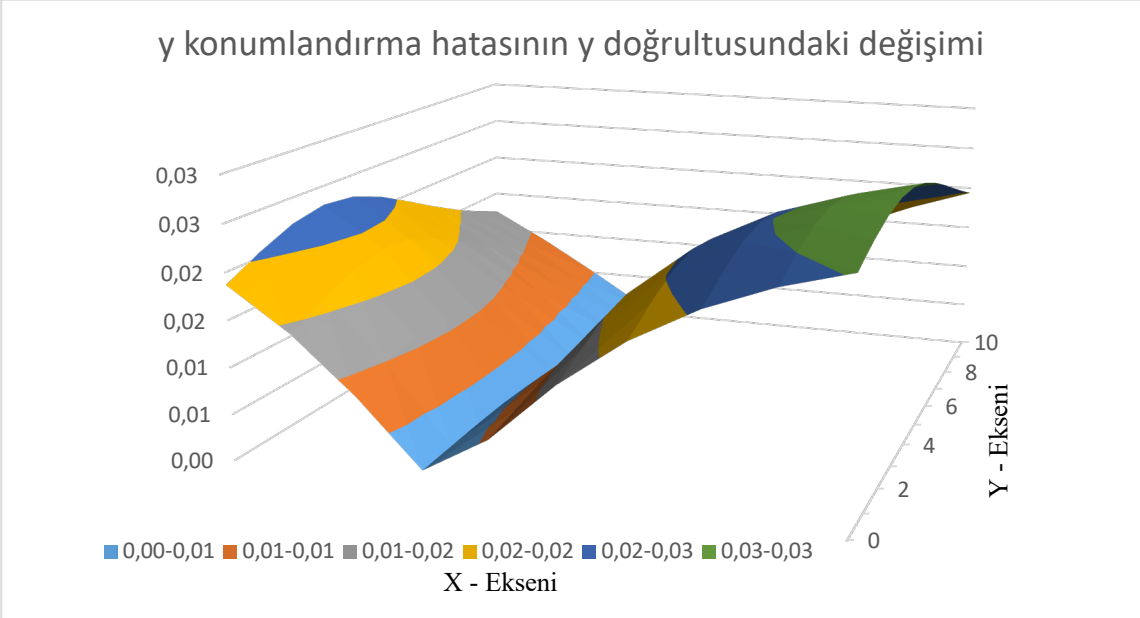


Şekil 9. x konumlandırma hatasının y doğrultusundaki değişimi.



Şekil 10. y konumlandırma hatasının x doğrultusundaki değişimi.

Şekil 10 ve 11'de sunulan hata eğrileri Şekil 6'da sunulan y koordinatı konumlandırma hatasından sırasıyla x ve y koordinatları boyunca ardışık biçimde bir önceki hücreden çıkarılarak Şekil 8 ve 9'da sunulan eğrilere benzer şekilde elde edilmiştir. y koordinatı konumlandırma hatasının hem x hem de y konumu için odanın merkezine yakın bölgelerde birim mesafede daha az değiştiği kenarlara yakınlaştıkça hata miktarındaki değişimin arttığı görülmektedir. Belirtilen hata eğrileri incelendiğinde odanın merkezinde y doğrultusu boyunca uzanan bir elemanın boyutu başlangıç ve bitiş noktalarından ölçülen iki konumun farkı ile hesaplandığında düşük bir hata değeri beklenirken aynı cismin odanın kenarında bulunması halinde çok daha yüksek bir hata değeri beklenmektedir. Cismin x doğrultusu boyunca uzandığı ve cismin odanın merkezine yakın olduğu durum için hata miktarının daha düşük oda kenarlarına yakın olduğu durumda ise daha yüksek hata değeri beklenmektedir.



Şekil 11. y konumlandırma hatasının y doğrultusundaki değişimi.

6. Tartışma

Üçgenleme tekniği ile elde edilen konum değerinin hassasiyeti bu çalışmada hata yayılma kanunu ile tahmin edilmiştir. Girdi parametrelerinin belirsizlikleri olarak istasyon noktalarının konum belirsizliği ile istasyon ile gezici arasında ölçülen mesafelerin hata miktarları alınmıştır. Bir oda içinde düzenli aralıklarda belirlenen gezici konumuna göre oluşan ölçme geometrisine göre üçgenleme tekniği denklemlerinin girdi parametrelerine göre kısmı türevleri hesaplanarak hata yayılma kanunu ile konumlama hassasiyeti tahmin edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda ölçülen konumun hem x hem de y doğrultusuna göre hata miktarının sabit kalmadığı ve oda konumuna göre değişiklik gösterdiği belirlenmiştir.

Odanın orta bölgesinde istasyon noktalarının ağırlık merkezinde bulunulduğunda en düşük hata miktarının elde edildiği, bir istasyondan uzaklaşıldığında ise Şekil 6-7'de gösterildiği üzere hata miktarının arttığı görülmüştür. Bu durum konumlandırma hatasının mekân içerisinde sabit kalmadığını göstermektedir. Hata miktarının değişken olması özellikle duvar konumu ve kalınlığı, kolon dişlerinin büyüklüğünü ölçmede önemli sorun oluşturmaktadır. Konum hatası büyüklüğünün ne kadar değiştiği ardışık ölçüm noktalarında beklenen hataların farkları alınarak hesaplanmış ve Şekil 8-11'de gösterildiği gibi hata farklarının rastgele olmayacak biçimde değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Mekânın merkezinden dışa doğru gidildikçe hatanın birikecek şekilde yükseldiği ve mekânın sınır bölgesinde birim konum değişiminde görülen hata artışının en yüksek düzeye ulaştığı görülmüştür. Belirtilen çıkarım üçgenleme tekniği ile rölöve hazırlanması halinde dış çevrede bulunan kolon dişi, pencere boyutu, bölme duvar ve diğer yapısal ve mimari elemanların boyutlarında ve yönelimlerindeki hata miktarının odanın merkezinde bulunan elemanlardan daha fazla olması beklenmektedir. Rölöve çalışmalarında işaretlenecek elemanların ağırlıklı olarak mekânın dış çevresinde bulunacağı dikkate alındığında en yüksek birim hata ile konumlandırmanın yapıldığı bölgeye denk geldikleri görülecektir. Belirtilen sorunun aşılabilmesi için ilave istasyon noktaları eklenerek hatanın dengelenmesiyle konum hatasındaki değişkenlik azaltılabilir. Ayrıca yapısal ve mimari elemanların boyut ve konumlarının belirlenmesinde ilgili elemanın diyagonal uçları arasındaki hata büyüklüğü farkı hata yayılma kanunu ile tahmin edilerek elemanın özniteliklerini de dikkate alacak şekilde sınıflandırarak rölöve çalışmasının doğruluğu iyileştirilebilecektir.

Hassas mesafe ölçme teknikleri uygulansa dahi üçgenleme ile elde edilecek konumun hata düzeyinin yaklaşık 20 cm değişkenlik gösterebileceği analizler sonucunda belirlenmiştir. Bunun sonucunda yapısal ve mimari elemanların konumlarında 20 cm mertebesinde kayma olabileceği gibi eleman uzunluklarının da hatalı ölçülebileceği değerlendirilmektedir. Bu durumda oda boyutlarının mesafe ölçümü ile belirlenip konumlandırma ile elde edilecek oda boyutları arasındaki tutarsızlık doğrusal düzeltme ile giderilebilir. Elde edilen kapanma hatası değerine hata yayılma kanunu sonucu elde edilen hata tahminine göre yapısal ve mimari elemanların konumlarına düzeltme ağırlığı uygulanarak rölövenin doğruluğu iyileştirilebilecektir.

Projesi olmayan bir binada yüksek doğrulukta rölöve hazırlanması için yapılan ölçümlerin hassas olması gerekir. Bu nedenle kullanılacak iç mekân konumlandırma teknolojisinin seçimi oldukça önemlidir. Altyapısının yaygın olması nedeniyle iç mekân konumlandırmada sıklıkla kullanılan WiFi teknolojisi, sinyallerin duvardan geçerken zayıflaması ve konum hata oranının yüksek olması nedeniyle rölöve için uygun değildir. Kızılötesi ve ZigBee teknolojileri ortamdaki engellerden önemli ölçüde etkilenir ve hata oranları yüksektir. Kısa menzile sahip bu teknolojiler de hassas ölçümler gerektiren rölöve için uygun değildir. Bluetooth, BLE, RFID teknolojileri düşük enerji tüketimi ve geniş kapsama alanı avantajlarına sahip olsalar da konumlandırma hatalarının yüksek olması nedeniyle rölöve için uygun değildir. Geniş kapsama alanı, ölçeklenebilir olması ve hata oranının düşük olması nedeniyle rölöve hazırlamak için en uygun teknoloji sonar mesafe ölçümleri ile desteklenmiş UWB teknolojisi olabileceği yapılan analizler neticesinde değerlendirilmektedir.

Çalışmada alıcı ve istasyon mesafeleri arasındaki mesafe hataları WiFi, RFID, bluetooth ve ZigBee teknikleri ile elde edilebilecek mesafelere göre daha yüksek hassasiyette kızılötesi, ultrason ve UWB tekniklerinden ise daha düşük hassasiyette simüle edilmiştir. Literatürde tanımlanan hata değerleri ile karşılaştırıldığında simülasyon sonuçlarının WiFi, RFID, bluetooth ve ZigBee tekniklerinden daha iyi kızılötesi, ultrason ve UWB tekniklerinde daha düşük hassasiyette konum hataları elde edilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde simülasyonun tutarlı sonuçlar verdiği görülecektir. Bununla birlikte literatürde üçgenleme tekniği ile konum belirlemenin konuma göre hata değerinin nasıl değişebileceğinin araştırılmadığı görülmüştür. Bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde istasyon noktalarının dağılımına bağlı olarak istasyon noktalarının ağırlık merkezinde en yüksek hassasiyette konumlandırmanın yapıldığı ağırlık merkezinden uzaklaşıldıkça konumlandırma hatasının arttığı belirlenmiştir.

7. Sonuç

Bu çalışmada hata yayılma kanunu ile üçgenleme yöntemi ile elde edilecek konum bilgisinin hassasiyeti incelenmiştir. Konum hassasiyetinin mekân içerisinde sabit kalmadığı, istasyonlardan uzaklaştıkça konumlandırma hassasiyetinin azaldığı yapılan vaka çalışması ile belirlenmiştir. Ayrıca üçgenleme denklemlerinin istasyon noktaları ve ölçüm mesafelerine göre alınan kısmi türev denklemleri sunulmuş ve bu alanda analitik çalışma yapacak araştırmacıların kullanımına sunulmuştur. Hassas mesafe ölçümü sağlayan alıcılar kullanılsa dahi üçgenleme ile yeterli ve tutarlı konum hassasiyetinin elde edilemeyeceği ve fazladan istasyon noktalarının kurularak multilaterasyon tekniği ile konumlandırma hassasiyetinin iyileştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Afet bölgesinde hasarlı binalarda ölçüm için çok sayıda istasyon kurulması bina içinde daha fazla süre kalınması anlamına geldiği için yeterli konum hassasiyetini sağlayan en az istasyon sayısı ve yerleşiminin belirlenmesinin ileri çalışma olarak gerçekleşmesi bu çalışmanın eksikliklerini tamamlayacaktır. Çalışmanın literatüre katkısı hata yayılma kanunu ile üçgenleme yönteminin hata analizinin yapılmasıdır.

Kaynaklar

[1] Alışkan İ, Şahin A. Ultra Geniş Bant Teknolojisi ile Kapalı Alanlarda Konum Belirleme. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi 2023; 13(1): 179-190.

[2] Shang Z, Wang L. Overview of WiFi fingerprinting based indoor positioning. IET Communications 2022; 16(7): 725-733.

[3] Jang B, Kim H. Wook Kim, J. Survey of landmark-based indoor positioning Technologies. Inf Fusion 2023; 89: 166-188.

[4] Farid Z, Nordin R, Ismail M. Recent advances in wireless indoor localization techniques and system. J Comput Networ Comm 2013(1):1-12.

[5] Fox D, Hightower J, Kauz H, Liao L, Patterson D. Bayesian techniques for location estimation. In Proceedings of the 2003 workshop on location-aware computing; 12-13 October 2003; Seattle, Washington, USA; pp. 16-18.

[6] Zhang D, Xia F, Yang Z, Yao C, Zhao W. Localization technologies for indoor human tracking. In 2010 5th international conference on future information technology; 21-23 May 2010; Busan, Korea (South); IEEE. pp. 1-6.

[7] Yaman Z, Gündoğdu K, Çalhan A. Yeni Bir İç Mekân Konum Bulma Sistemi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 2021; 9(2): 636-645.

[8] Tunca C, Toplan E, Işık S, Ersoy C. Yapay sinir ağları ile wifi tabanlı iç mekan konumlandırma. 16. Akademik Bilişim Konferansı; 5-7 Şubat 2014; Mersin, Türkiye. pp. 665-670.

[9] Akleylek S, Kılıç E, Söylemez B, Aruk TE, Çavuş A. Kapalı mekân konumlandırma üzerine bir çalışma. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2020; 8(5): 90-105.

[10] Liu F, Liu J, Yin Y, Wang W, Hu D, Chen P, Niu Q. Survey on WiFi-based indoor positioning techniques. IET communications 2020; 14(9): 1372-1383.

[11] Mrindoko NR, Minga LM. A comparison review of indoor positioning techniques. IJC 2016; 21(1): 42-49.

[12] Silvia Z, Martina C, Fabio S, Alessandro P. Ultra wide band indoor positioning system: Analysis and testing of an IPS technology. IFAC-PapersOnLine 2018; 51(11): 1488-1492.

[13] Alarifi A, Al-Salman A, Alsaleh M, Alnafessah A, Al-Hadhrami S, Al-Ammar MA, Al-Khalifa HS. Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances, Sensors 2016; 16(5): 707.

[14] Dabove P, Di Pietra V, Piras M, Jabbar AA, Kazim SA. Indoor positioning using Ultra-wide band (UWB) technologies: Positioning accuracies and sensors' performances. IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS); 23-26 April 2018; Monterey, CA, USA: IEEE. pp. 175-184.

[15] Ijaz F, Yang HK, Ahmad AW, Lee C. Indoor positioning: A review of indoor ultrasonic positioning systems. 15th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT); 27-30 Jan 2013; IEEE. pp. 1146-1150

[16] Kunhoth J, Karkar A, Al-Maadeed S, Al-Ali A. Indoor positioning and wayfinding systems: a survey. HCIS 2020; 10(1): 1-41.

[17] Tunç M, Kara F, Kaya H. Dinamik Yapay Sinir Ağı ile İç Mekân Konum Kestirimi. El-Cezeri 2020; 7(2): 858-870.

[18] Üstebay S, Gümüş E, Aydın MA, Sertbaş A. İç mekân konum tespitinde sinyal haritasının küçültülmesi ve performans analizi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2017; 32(4): 1131-1142.

[19] Akçura N, Uyar E, Candan M, Yavuz E. Çevre Haritalandırma ve Obje Geçme Algoritması Entegreli Bir Mobil Aracın Bulanık Mantık ile İç Mekan Navigasyon Kontrolü. Ulusal Otomatik Kontrol Konferansı (TOK); 11-13 Eylül 2014; pp. 563-566.

[20] Soltanaghaei E, Kalyanaraman A, Whitehouse K. Multipath triangulation: Decimeter-level wifi localization and orientation with a single unaided receiver. 16th annual international conference on mobile systems, applications, and services; 10-15 June 2018; Munich Germany: pp. 376-388.

[21] Jekabsons G, Kairish V, Zuravlyov V. An Analysis of Wi-Fi Based Indoor Positioning Accuracy. Computer Science 2011; 47: 1407-7493

[22] Chen C, Chen Y, Han Y, Lai HQ, Liu KR. Achieving centimeter-accuracy indoor localization on WiFi platforms: A frequency hopping approach. IEEE Internet of Things Journal 2016; 4(1): 111-121.

[23] Chen C, Chen Y, Han Y, Lai HQ, Zhang F, Liu KR. Achieving centimeter-accuracy indoor localization on WiFi platforms: A multi-antenna approach. IEEE Internet of Things Journal 2016; 4(1), 122-134.
[24] Qian K, Wu C, Yang Z, Liu Y, Jamieson K. Widar: Decimeter-level passive tracking via velocity monitoring with commodity Wi-Fi". 18th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, Chennai India July 10 - 14, 2017 pp. 1-10.
[25] Vleugels R, Van Herbruggen B, Fontaine J, De Poorter E. Ultra-wideband indoor positioning and IMU-based activity recognition for ice hockey analytics. Sensors, 2021; 21(14): 1-19.
[26] Bettemir ÖH. Prediction of georeferencing precision of pushbroom scanner images. IEEE transactions on geoscience and remote sensing. 2011; 50(3); 831-838.
[27] Bettemir ÖH. Sensitivity and error analysis of a differential rectification method for CCD frame cameras and pushbroom scanners. Master's thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2006.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 111-124, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1492486

RPA ile Pazaryeri Siparişlerinde Otomatik Faturalandırma Süreci

Hediye BIYIK[1*], Erhan AKIN[2]
[1,2] Bilgisayar Mühendisliği, Mhendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
[*1] hediyebyk@gmail.com, [2] eakin@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 30/05/2024; Kabul/Accepted:04/10/2024)

Öz: Robotik Süreç Otomasyonu (RPA), dijital sistemlerle insan benzeri etkileşimler yoluyla tekrarlanan görevleri otomatize eden bir teknoloji olup, bu çalışmada RPA'nın e-ticaretteki, özellikle de Türkiye'nin önde gelen pazaryeri platformlarında sipariş faturalandırması süreçlerine uygulanışını incelemektedir. Trendyol, Hepsiburada ve N11 gibi platformlarda manuel faturalandırmanın operasyonel zorluklar ve hata oranlarını artırdığı tespit edilmiş ve bu sürecin RPA ile otomatize edilerek nasıl iyileştirilebileceği araştırılmıştır. Çalışmada, pazaryeri entegrasyonlarının yapısına, sipariş ve müşteri bilgilerinin işleniş biçimine ve RPA kullanılarak otomatik fatura oluşturma süreçlerine dair detaylı bir iş akışı modeli geliştirilmiştir. Bu modelin, küçükten büyüğe işletmeler için uygulanabilir bir çözüm sunduğu ve RPA'nın iş süreçlerine etkisinin çeşitli senaryolar altında analiz edildiği belirtilmiştir. Simülasyonlar ve gerçek zamanlı uygulamalarla, RPA'nın iş süreçlerinde doğruluk ve hızı artırdığı, manuel hataları ve zaman kaybını azalttığı gösterilmiştir. Araştırma sonuçları, pazaryeri faturalandırma süreçlerinde dijital dönüşümü destekleyecek ve şirketlerin rekabet gücünü artıracak stratejik öneriler sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: RPA, fatura, sipariş, otomatik faturalaştırma.

Automated Billing Process for Marketplace Orders with RPA

Abstract: Robotic Process Automation (RPA) is a technology that automates repetitive tasks through human-like interactions with digital systems, and this study examines the application of RPA to order invoicing processes in e-commerce, especially in Turkey's leading marketplace platforms. It has been determined that manual invoicing on platforms such as Trendyol, Hepsiburada and N11 increases operational difficulties and error rates, and it has been investigated how this process can be improved by automating it with RPA. In the study, a detailed workflow model was developed regarding the structure of marketplace integrations, the way order and customer information is processed, and automatic invoice creation processes using RPA. It has been stated that this model offers a feasible solution for small to large businesses and the impact of RPA on business processes has been analyzed under various scenarios. Through simulations and real-time applications, RPA has been shown to increase accuracy and speed in business processes, reducing manual errors and time loss. The research results provide strategic recommendations that will support digital transformation in marketplace invoicing processes and increase the competitiveness of companies.

Key words: RPA, invoice, order, automatic invoicing.

1. Giriş

Robotik Süreç Otomasyonu (RPA), dijital dönüşümün vanguardında yer almakta ve iş süreçlerinde devrimsel değişikliklere yol açan önemli yeniliklerden biridir. Özellikle e-ticaret gibi dinamik ve değişim hızının yüksek olduğu sektörlerde, RPA iş akışlarını, rutin görevleri ve zaman yoğun işlemleri otomatikleştirmek suretiyle bir katalizör işlevi görmekte; bu süreçlerin hızlandırılmasını, hata oranlarının minimize edilmesini ve genel iş verimliliğinin artırılmasını mümkün kılmaktadır. Bu otomatikleştirme, fatura entegrasyonlarından sipariş yönetimine, fatura oluşturmaya kadar olan geniş bir iş alanında etkili bir uygulama alanı bulmuş durumdadır. RPA'nın işlevselliği, kompleks iş süreçlerinin basitleştirilmesi ve veri yönetimi gibi kritik alanlarda işletmelere somut avantajlar sunarak, rekabet gücünü artırma ve operasyonel mükemmelliği hedefleme açısından kritik öneme sahiptir.

Robotik Süreç Otomasyonu (RPA) teknolojisinin e-ticaret platformlarındaki sipariş ve faturalama süreçlerindeki otomasyon etkisini ayrıntılı bir biçimde irdelemekte ve aynı zamanda bu teknolojinin işletmelerin operasyonel verimliliklerine olan potansiyel transformasyonel etkisini incelemektedir. Bu makalede RPA çözümlerinin entegrasyon süreci ve bu süreçlerin operasyonel sonuçlara etkisi mercek altına alınarak, otomasyon aracılığıyla iş süreçlerindeki iyileştirmelerin yanı sıra, süreçlerin analizi ve otomasyon için belirlenmesi gereken adımların nasıl stratejik bir yaklaşımla ele alınması gerektiği tartışılmaktadır.

* Sorumlu yazar: hediyebyk@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0001-8033-0883, [2] 0000-0001-6476- 9255

Robotik Süreç Otomasyonu (RPA), insanların genellikle yaptığı tekrarlayan görevleri otomatikleştirmek için yazılım robotlarını kullanır. Bu robotlar, dijital sistemler ve yazılımlarla insan eylemlerini taklit ederek etkileşime girebilir, örneğin uygulamalara giriş yapma, formları doldurma ve bir sistemden diğerine veri taşıma gibi işlemleri yapabilir [1][2].

RPA, yüksek hacimli tekrarlayan görevleri otomatikleştirerek kuruluşların verimlilik ve üretkenliklerini artırmasını sağlar. Bu, süreçleri hızlandırmakla kalmaz, insan hatasını azaltarak daha tutarlı ve güvenilir çıktılar elde etmelerine de yardımcı olur. RPA ayrıca, yorgunluk olmaksızın 24/7 çalışabilir ve bu da operasyonel verimliliği önemli ölçüde artıran bir teknolojidir [3].

Teknoloji, bankacılık, finans, sigortacılık ve sağlık hizmetleri gibi birçok sektörde uygulamalar bulur. RPA, veri girişi, işlem işleme ve müşteri kaydı gibi görevleri otomatikleştirebilir. RPA'nın çok yönlülüğü ve uygulanma kolaylığı, onu küresel olarak en hızlı büyüyen kurumsal yazılım çözümlerinden biri haline gelmiştir [2][4].

RPA ilk olarak 2012 yılında kullanılmaya başlanmış ancak bu terim 2014-2015 yılları arasında gerçek anlamda kullanılmaya başlanmıştır [5] [6].

Robotik Süreç Otomasyonu (RPA) teknolojisinin temelleri, 2000'li yılların başında, mevcut sistemlerle entegrasyonu zor olan eski sistemler arasında bir köprü işlevi gören ekran kazıma teknolojisiyle atılmıştır. Ekran kazıma, özellikle web üzerindeki verilerin çıkarılması gibi işlemlerde kullanılmış ve iş süreçlerinin otomasyonundaki ilk önemli aşamalardan biri olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte, iş akışı otomasyonu ve yönetim araçları, 2000li yıllarda giderek daha yaygın hale gelmiş ve sipariş işleme gibi süreçlerde verimliliği artırarak manuel veri girişi ihtiyacını önemli ölçüde azaltmıştır. Bu gelişmeler, RPA'nın evriminde kritik bir rol oynayarak, iş süreçlerinin daha etkin ve verimli bir şekilde yönetilmesine olanak sağlamıştır [7][8].

2000'lerin başında RPA terimi daha yaygın hale gelmiş ve bu teknoloji, kullanıcıların kodlama bilgisi olmadan otomasyon ve iş akışlarını görsel bir şekilde yönetmelerini sağlayacak şekilde evrilmiştir. RPA yazılımları, değişen web sitelerine uyum sağlamak için optik karakter tanıma teknolojisini kullanarak, iş süreçlerini daha verimli hale getirmiştir [9] [10].

RPA'nın gelişimi, özellikle iş süreçlerini dış kaynak kullanımından daha etkin bir şekilde yönetmeye başlayan işletmeler tarafından hızla benimsenmiştir. Bu adaptasyon, iş süreçlerinin daha maliyet etkin ve hızlı bir şekilde yürütülmesini sağlamış, bu da özellikle iş süreci dış kaynak kullanımı sektörü için büyük bir dönüşüm yaratmıştır [11].

Araştırma, iş süreçlerinin otomatikleştirilmesinde RPA'nın stratejik bir araç olarak nasıl benimsenip uygulanabileceği, bu sürecin yönetilmesindeki en iyi pratikler ve otomasyonun şirketlerin rekabet avantajını nasıl artırabileceğine dair bulgular sunmayı amaçlamaktadır. Akademik perspektiften bakıldığında, makalenin RPA'nın iş süreçleri üzerindeki olumlu etkilerini analitik bir çerçeve içinde sunması ve bu teknolojinin kullanımının neden stratejik öneme sahip olduğunu detaylandırması önem taşımaktadır. Bu çalışma aynı zamanda, RPA teknolojisinin iş dünyasındaki uygulanabilirliğini ve onun işletmeler için sunduğu değeri artırıcı yönde etkilerini vurgulamaktadır.

Bu çalışma, Robotik Süreç Otomasyonu (RPA) teknolojisinin e-ticaret sektöründe nasıl bir dönüşüm aracı olarak işlev görebileceğini ve işletmelerin bu teknolojiyi kendi iş stratejilerinin merkezine nasıl yerleştirebilecekleri konusunda bir referans noktası oluşturmayı hedeflemektedir. RPA'nın iş süreçlerini daha akıcı ve esnek hale getirme, operasyonel maliyetleri optimize etme ve iş hedeflerine ulaşmada sağladığı ivmeyi detaylandıran bu çalışma, iş süreçlerinin sürekli değişen ve gelişen doğasıyla başa çıkmak için RPA'nın adaptasyonunu ve evrimini işletmelerin gelecekteki başarısının anahtarı olarak öne çıkarmaktadır.

RPA'nın e-ticaret uygulanabilirliği ve getirdiği yenilikleri derinlemesine inceleyen makale, teknolojinin pazaryeri entegrasyonları ve sipariş yönetimi süreçlerine olan etkilerini ve bu inovasyonun işletmelerin rekabetçi avantajını nasıl artırabileceğini ortaya koymaktadır. İşletmelerin kendi süreçlerini nasıl dönüştürebileceklerine ve RPA'nın onlara nasıl zaman ve kaynak tasarrufu sağlayabileceğine dair stratejik yönlendirmeler, sadece verimlilik artışını teşvik etmekle kalmayıp, aynı zamanda müşteri memnuniyetini artırma ve pazara daha dinamik yanıt verme yeteneğini güçlendirme potansiyelini vurgulamaktadır.

Ayrıca, bu çalışma Uygulama Programlama Arayüzü (Application Programming Interface) entegrasyonları, veri yönetimi, otomatik karar mekanizmaları, hata yönetimi ve ölçeklenebilirlik gibi anahtar konuları içeren bütünsel bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yaklaşım, RPA'nın sadece bir teknolojik çözüm olmanın ötesine geçip işletmelerin genel iş yapısını dönüştürme potansiyelini yansıtmaktadır.

Son olarak, bu makale, iş süreçlerinin sürekli değiştiği ve geliştiği bir ortamda, RPA'nın adaptasyonunun ve evriminin işletmelerin gelecekteki başarısının anahtar unsuru olduğu konusunda ısrar eder. Bu çerçevede, RPA teknolojisinin derinlemesine analizi ve stratejik uygulaması, işletmelerin daha akıllı ve verimli çalışmasını sağlamak için zorunlu bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmanın amacı, RPA'nın e-ticaret alanındaki

uygulamalarını kapsamlı bir şekilde ele almak ve işletmelerin bu teknolojiyi nasıl başarıyla entegre edebileceklerine dair kapsamlı ve işlevsel stratejiler sunmaktır.

2. RPA ve Otomatik Faturalandırma Süreci

Robotik Süreç Otomasyonu (RPA), işletmelerdeki iş süreçlerini optimize etmek amacıyla kullanılan bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. RPA, bilgisayar yazılımları veya yapılandırılmış robotlar aracılığıyla mevcut uygulamalardaki işlemleri yürüterek veri seçme, yorumlama, manipülasyon ve diğer dijital sistemlerle iletişim kurma yeteneğine sahiptir. Bu teknoloji, insanların yaptığı görevleri hızlı, doğru ve tekrarlayıcı bir şekilde gerçekleştirerek insan gücü gerektiren diğer işlere odaklanmalarını sağlar [12][13].

RPA'nın ortaya çıkışı, geçmişte kullanılan ekran kazıma ve iş akışı otomasyonu gibi teknolojilerin gelişimiyle bağlantılıdır. Fakat RPA, bu teknolojilere göre daha esnek, ölçeklenebilir ve kod içermeyen bir yapıya sahiptir. Kullanıcılar, görsel bir arayüz üzerinden kolayca otomasyon oluşturabilir ve iş süreçlerini yönetebilirler [12][14].

Bu teknolojinin işletmelere sağladığı faydalar arasında maliyetlerin azaltılması, hızın artması, verimliliğin artması, kalitenin yükselmesi ve müşteri memnuniyetinin artması gibi avantajlar bulunmaktadır. Özellikle, RPA'nın işgücü maliyetlerini düşürme potansiyeli, dış kaynak kullanımının yerine geçerek maliyetlerde önemli ölçüde tasarruf sağladığı görülmüştür [12][15].

RPA yazılımları, iş süreçlerini geliştirme ortamı, sanal işçiler veya robotlar ve kontrol panelleriyle birlikte içeren bir yapıyı oluşturur. Geliştirme ortamı, iş süreçlerini adım adım oluşturmaya ve görevleri tanımlamaya izin verirken, robotlar belirlenmiş görevleri uygulamalarla entegre olarak yerine getirir. Attended, Unattended ve Hibrit olmak üzere üç robot türü vardır [16].

Robotlar, İnsan Müdahaleli (Attended), İnsan Müdahalesi Olmayan (Unattended) ve Hibrit olmak üzere üç ana türe ayrılır. Attended robotlar, bireysel kullanıcılara küçük hacimli ve tekrarlayan ön ofis işlerinde yardımcı olurken, Unattended robotlar genellikle kullanıcı etkileşimine ihtiyaç duymadan uzun süreçlerin otomasyonunda kullanılır. Hibrit robotlar ise yapay zeka ile hem attended hem de unattended robotların kullanıldığı bir türdür [16].

RPA, bir organizasyonun bilişim sistemlerinde çalışır ve çeşitli uygulamalar ile web siteleri arasında yer alarak, insan müdahalesi gerektiren tekrarlayan ve kural tabanlı görevleri yerine getirir. İnsan arayüzlerini taklit etme ve çalışan gibi bilgisayar tabanlı görevleri gerçekleştirme yeteneği, özellikle birden fazla uygulama veya ERP örneklerine sahip parçalanmış teknoloji altyapısıyla uğraşan şirketler için özellikle faydalıdır [17].

Özellikle finans ve benzeri alanlarda RPA'nın benimsenmesini tetikleyen iki ana faktör şunlardır:

Kısa ROI (Yatırım Getirisi): RPA projeleri kısa geliştirme süreçlerine sahiptir ve FTE (Tam Zaman Eşdeğer) kaynakları azaltma ve uyumluluğu artırma gibi hızlı dönüşler sağlar. Bu tür girişimler düşük başlangıç yatırımları gerektirir ancak yıllar değil, haftalar veya aylar içinde yüksek yatırım getirisi sunar.

Artan Güvenilirlik: RPA destekli süreçler yüksek denetlenebilirlik, minimum hata oranları, ölçeklenebilirlik sunar ve gelişmiş analizler için kullanıcılara raporlama sağlar. Bu güvenilirlik faktörü, güvenilir ve verimli otomasyon çözümleri arayan işletmeler için RPA'yı cazip kılar.

Robotik Süreç Otomasyonu (RPA), organizasyonların iş süreçlerini manuel insan müdahalesi olmadan otomatikleştirmeyi sağlayan bir teknolojidir. Bu teknoloji, bilgisayar programlarını ve yapay zekayı kullanarak tekrarlayan, kurallara dayalı ve işlem odaklı görevleri gerçekleştirmek için tasarlanmıştır. İşte RPA'nın önemini anlatan bazı detaylar [17].

- Verimlilik Artışı: RPA, tekrarlayan ve rutin işleri otomatikleştirerek insan hatalarını en aza indirir ve süreçleri daha hızlı hale getirir. Bu da iş süreçlerinin daha verimli çalışmasına yardımcı olur.
- İnsan Kaynakları Tasarrufu: Manuel görevlerin otomasyonu, çalışanların daha stratejik ve yaratıcı görevlere odaklanmasını sağlar. Bu sayede organizasyonlar insan kaynaklarını daha etkili bir şekilde kullanabilir.
- Yüksek Doğruluk ve Kalite: RPA sistemleri insan faktörünü ortadan kaldırdığı için işlemlerdeki hata riskini azaltır. Bu da iş süreçlerinin daha yüksek doğruluk ve kalite seviyelerine ulaşmasına yardımcı olur.
- 24/7 Çalışma Yeteneği: RPA robotları sürekli çalışabilir, gece veya hafta sonları dahil, insanların çalışmadığı zamanlarda bile iş süreçlerini sürdürebilir. Bu, iş süreçlerinin sürekliliğini sağlar.
- Hızlı Uygulama ve Entegrasyon: RPA, mevcut sistemlere kolayca entegre edilebilir ve genellikle karmaşık altyapı değişiklikleri gerektirmez. Bu nedenle, işletmeler RPA projelerini hızla uygulayabilir.
- Hatalı ve Tekrarlayan İşlerden Kurtulma: İnsanlar için sıkıcı, monoton ve tekrarlayan işler motivasyon düşüklüğüne neden olabilir. RPA sayesinde bu tür işler otomasyonla gerçekleştirilir ve çalışanlar daha anlamlı işlere yönlendirilir.

- Hızlı Yatırım Getirisi (ROI): RPA projeleri genellikle hızlı bir şekilde yatırım getirisi sağlar çünkü iş süreçlerinin hızlanması ve verimliliğin artması ile maliyet tasarrufları elde edilir.
- Düşük Hata Oranı: RPA, kural tabanlı çalıştığı için işlemlerdeki hata oranını düşürür. Bu da müşteri memnuniyetini artırabilir ve müşteri ilişkilerini güçlendirebilir.
- Regülasyon ve Uyumluluk: RPA sistemleri iş süreçlerini belirli standartlara ve düzenlemelere uygun şekilde otomatikleştirebilir. Bu, regülasyonlara ve uyumluluk gereksinimlerine uyum sağlamayı kolaylaştırır.
- Rekabet Avantajı: RPA'nın benimsenmesi, organizasyonlara rekabet avantajı sağlayabilir. Daha hızlı, daha doğru ve daha verimli iş süreçleri, şirketin pazara daha hızlı tepki vermesine ve müşteri taleplerini daha iyi karşılamasına yardımcı olabilir.

Fatura hizmetleri sunan bir şirkette Robotik Süreç Otomasyonu (RPA) sistemi uygulanmıştır. Bu uygulamanın temel amacı, kaydedilen elektronik faturaların ortalama yüzdesini artırmak ve reddedilen elektronik faturaların ortalama yüzdesini azaltmaktır. RPA yazılımı, araştırmanın yazarı tarafından geliştirilmiştir ve bu yazılım, Java programlama dili ve yazılım testlerini otomatikleştirmeye yönelik kütüphaneleri kullanarak oluşturulmuştur. Bu yazılım, belgeleri okuma, veri girişi yapma, veri manipülasyonu gerçekleştirme ve ayrıntılı raporlar oluşturma gibi işlemleri otomatikleştirme yeteneğine sahiptir. Bu işlevler, elektronik fatura sürecini önemli ölçüde iyileştirmeye katkı sağlamış ve sürecin sürekli izlenmesine ve kontrol edilmesine olanak tanımıştır [18].

Robotik süreç otomasyonu finans ve muhasebe şirketleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Ancak, RPA'nın daha analitik işlere tamamen yerini alamayabileceği ve bu nedenle insanlarla rekabet yaratabileceği belirtilmektedir. Ayrıca, RPA'nın yapay zeka ile entegre olmaya başladığı ve gelecekte bilişsel öğrenme hizmetleriyle birleşeceği öngörülmektedir [18].

Elektronik fatura ve muhasebe alanında RPA'nın kullanılması, belgelerin analiz yükünü azaltmanın yanı sıra yasa ihlallerini veya dolandırma girişimlerini tespit edebilir. Bu, şirketlere ek maliyetlerden kaçınmaları ve vergi gelirlerini artırmalarına yardımcı olabilir. RPA sistemi, sürekli olarak izlenen büyük veri miktarını işlediği için yasal ihlalleri tespit etmek için programlanabilir ve vergi toplamalarının denetçi kurumları tarafından olası yolsuzluk vakalarını hızla tespit edebilmesine olanak tanımıştır [18][19].

RPA, işletmelerin operasyonel verimliliği artırmasına, maliyetleri düşürmesine ve rekabet gücünü artırmasına yardımcı olabilir. Ancak, RPA'nın başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için doğru süreçlerin seçilmesi için iyi bir planlama yapılma, eğitim ve yönetim gereklidir [19].

Fatura işleme görevlerinin manüel giriş gerektiren yarısından fazlası, artan otomasyon ve dijitalleşme çağında şirketlerin dinamik ve ekonomik olma fırsatlarını kaçırmalarına neden olabilir. Müşterilerden gelen veriler genellikle yapılandırılmamıştır ve manüel işlemler zaman alıcıdır. Bu nedenle, tekrarlayan görevlerin otomatikleştirilmesi giderek daha popüler hale gelmektedir.

Robotik Süreç Otomasyonu (RPA), bu tür süreçlerin otomatikleştirilmesi için kullanılabilecek bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir [19].

Müşteri faturalarını otomatikleştirmek için UIPath'in kullanımı açıklanmaktadır. Bu süreçte, düzenli ifadeler ve veri eşleştirme kullanılarak veri kazıma yöntemi kullanılmaktadır. RPA yazılımı, fatura verilerini otomatik olarak çıkarabilir, hataları düzeltebilir ve bazı kararları alabilir. Bu otomasyon, hataları sınırlayabilir ve manuel istisna yönetimi ihtiyacını en aza indirebilir [19].

Projenin uygulama aşamaları ve süreçlerinin ayrıntılı bir açıklaması sunulmaktadır. Uygulama dört ana bölüme ayrılmıştır: E-posta otomasyonu, veri kazıma, veritabanı karşılaştırması ve fatura oluşturma. Bu aşamaların bir araya gelmesiyle fatura işlemleri otomatik hale getirilmektedir [20].

Finans operasyonlarının fatura işleme sürecindeki manuel işlemleri ve gecikmeleri ele alarak, RPA'nın bu sorunları çözmek için nasıl kullanılabileceğini vurgular. RPA'nın finans ve muhasebe operasyonlarını daha verimli hale getirme potansiyelini gösterir [20][21].

Sonuç olarak, RPA'nın fatura işlemlerinde nasıl kullanılabileceği ayrıntılı bir şekilde açıklanmaya çalışılmıştır. Bu otomasyon yaklaşımı, hataları azaltabilir, verimliliği artırabilir ve manuel işlem sürelerini kısaltabilir. Gelecekte, yapay zeka ve makine öğrenme algoritmalarının dahil edilmesiyle bu süreçler daha da geliştirilebilir [22][23].

Siparişlerin e-ticaret sitelerinden alınması, faturaların oluşturulması, oluşturulan bu faturaların e-ticaret sitelerine yüklenmesi ve bu faturaların tahsilatlandırılması muhasebe departmanlarına büyük yük getirmektedir. Otomatik fatura işleme, muhasebe departmanları için büyük faydalar sağlayabilen güçlü bir teknolojik gelişmedir. Muhasebe departmanları için bu tekrar eden ve ağır yüke sahip olan işlemler RPA ile kolaylıkla verimli, tutarlı ve hızlı bir çözümle departmanın verimliliği artırılabilir ve daha verimli bir kar merkezi haline getirilebilir [22][24].

Bu teknoloji, tedarikçi faturalarını dijitalleştirerek ve verileri otomatik olarak işleyerek zamandan ve maliyetten tasarruf etmenin yanı sıra, insan hatalarını da en aza indirir. Şirketlerin iş süreçlerini hızlandırarak ve verimliliği artırarak rekabette öne çıkmasına yardımcı olurken, yatırım getirisi açısından da önemli bir avantaj sunar [22][23][24].

Robotik Süreç Otomasyonu (RPA), iş süreçlerinin otomatikleştirilmesi yoluyla verimliliği artıran, maliyetleri düşüren ve operasyonel etkinliği sağlayan bir teknolojidir. Sağlık, finans, üretim, sigorta, kamu ve telekomünikasyon gibi farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılmakta olup, manuel süreçleri dijitalleştirerek işletmelerin rekabet gücünü artırmaktadır. İşlevsel açıdan değerlendirildiğinde, BT, finans ve muhasebe, insan kaynakları, müşteri hizmetleri, paylaşılan hizmetler ile satış ve pazarlama gibi alanlarda süreç optimizasyonu sağlamaktadır. Teknolojiye entegrasyonu açısından ise Google Cloud, AWS ve Microsoft Azure gibi bulut platformlarıyla bütünleşik çalışarak güvenli ve ölçeklenebilir otomasyon çözümleri sunmaktadır. Bu bağlamda, RPA, yapay zeka ile birleşerek işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerine katkıda bulunmakta ve operasyonel verimliliği artırmaktadır [25] [26].

Robotik Süreç Otomasyonu (RPA), işletmelerdeki iş süreçlerini optimize etmek amacıyla kullanılan bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. RPA, bilgisayar yazılımları veya yapılandırılmış robotlar aracılığıyla mevcut uygulamalardaki işlemleri yürüterek veri seçme, yorumlama, manipülasyon ve diğer dijital sistemlerle iletişim kurma yeteneğine sahiptir. Bu teknoloji, insanların yaptığı görevleri hızlı, doğru ve tekrarlayıcı bir şekilde gerçekleştirerek insan gücü gerektiren diğer işlere odaklanmalarını sağlar [27][28].

Bu teknolojinin işletmelere sağladığı faydalar arasında maliyetlerin azaltılması, hızın artması, verimliliğin artması, kalitenin yükselmesi ve müşteri memnuniyetinin artması gibi avantajlar bulunmaktadır. Özellikle, RPA'nın işgücü maliyetlerini düşürme potansiyeli, dış kaynak kullanımının yerine geçerek maliyetlerde önemli ölçüde tasarruf sağlanabileceği ortaya koyulmuştur. [27][29][30].

RPA yazılımları, iş süreçlerini geliştirme ortamı, sanal işçiler veya robotlar ve kontrol panelleriyle birlikte içeren bir yapıyı oluşturur. Geliştirme ortamı, iş süreçlerini adım adım oluşturmaya ve görevleri tanımlamaya izin verirken, robotlar belirlenmiş görevleri uygulamalarla entegre olarak yerine getirir. Attended, Unattended ve Hibrit olmak üzere üç robot türü vardır [31].

Robotlar, Attended (İnsan Müdahaleli), Unattended (İnsan Müdahalesi Olmayan) ve Hibrit olmak üzere üç ana türe ayrılır. Attended robotlar, bireysel kullanıcılara küçük hacimli ve tekrarlayan ön ofis işlerinde yardımcı olurken, Unattended robotlar genellikle kullanıcı etkileşimine ihtiyaç duymadan uzun süreçlerin otomasyonunda kullanılır. Hibrit robotlar ise yapay zeka ile hem attended hem de unattended robotların kullanıldığı bir türdür [31].

RPA, bir organizasyonun bilişim sistemlerinde çalışır ve çeşitli uygulamalar ile web siteleri arasında yer alarak, insan müdahalesi gerektiren tekrarlayan ve kural tabanlı görevleri yerine getirir. İnsan arayüzlerini taklit etme ve çalışan gibi bilgisayar tabanlı görevleri gerçekleştirme yeteneği, özellikle birden fazla uygulama veya ERP örneklerine sahip parçalanmış teknoloji altyapısıyla uğraşan şirketler için özellikle faydalıdır [32].

Robotik Süreç Otomasyonu (RPA) uygulamalarının işletmelerdeki etkisini inceleyen çalışma, özellikle elektronik fatura süreçlerine odaklanmaktadır. Çalışmada, Java programlama dili ve yazılım test otomasyonu kütüphaneleri kullanılarak geliştirilen bir RPA yazılımının, elektronik faturaların işlenme verimliliğini artırdığı ve süreçlerin otomatik izlenmesine olanak tanıdığı belirtilmektedir. Uygulama sonucunda, kaydedilen belgelerin oranı %75,66'dan %95,77'ye yükselirken, reddedilen belgelerin oranı %16,08'den %3,30'a düşmüştür. RPA'nın finans ve muhasebe sektörlerinde önemli etkileri olduğu vurgulanmakla birlikte, analitik işlemlerde insan faktörünün tamamen ortadan kalkamayacağı ifade edilmektedir. Ayrıca, RPA'nın yapay zeka ile entegrasyon sürecinde olduğu ve gelecekte bilişsel öğrenme sistemleriyle birleşerek daha gelişmiş otomasyon çözümleri sunacağı öngörülmektedir. İşletmelerde süreçlerin etkinliğini ve performansını artıran RPA, insan kaynakları ihtiyacını azaltmakla birlikte, çalışanların daha üst düzey bilişsel ve karar verme süreçlerine yönlendirilmesine katkı sağlamaktadır [33].

Robotik Süreç Otomasyonu (RPA), işletmelerin operasyonel verimliliğini artırarak maliyetleri düşürmesine ve rekabet gücünü yükseltmesine katkıda bulunur. Ancak, başarılı bir uygulama için doğru süreçlerin seçilmesi, iyi bir planlama, eğitim ve yönetim gereklidir. Fatura işleme süreçlerinde RPA, manuel giriş gereksinimini azaltarak tekrarlayan işlemleri otomatikleştirmekte ve hata oranlarını düşürmektedir. UIPath gibi araçlar, veri kazıma yöntemleri ve düzenli ifadeler kullanarak fatura verilerini otomatik işleyebilir ve hataları düzeltebilir. Bir uygulama örneğinde, fatura işlemleri dört ana aşamada (e-posta otomasyonu, veri kazıma, veritabanı karşılaştırması ve fatura oluşturma) otomatik hale getirilmiştir. Özellikle otomotiv sektöründe kullanılan RPA çözümleri, OCR ve doğal dil işleme teknolojileriyle PDF formatındaki faturalardan veri çıkararak manuel iş yükünü azaltmakta ve süreçleri daha verimli hale getirmektedir. RPA'nın bu süreçlerde etkin kullanımı, hataları en aza indirerek istisna yönetimi ihtiyacını azaltmakta ve işletmelerin dijital dönüşümüne katkı sağlamaktadır [34] [35].

Robotik Süreç Otomasyonu (RPA), finans operasyonlarında manuel işlemleri ve gecikmeleri azaltarak süreçlerin daha verimli hale getirilmesine katkı sağlamaktadır. Çalışmalar, RPA'nın finans ve muhasebe operasyonlarını optimize etme potansiyelini örnek uygulamalar ve başarı öyküleriyle desteklemektedir. Ayrıca, bilişsel yaklaşımlar, OCR teknolojisi ve Durum Temelli Akıl Yürütme gibi çeşitli tekniklerin bu süreçlerde etkin bir şekilde kullanıldığı belirtilmektedir. Gereksinim analizi kapsamında, donanım ve yazılım gereksinimleri sistemin çalışması için gerekli bileşenleri tanımlarken, işlevsel gereksinimler kullanıcı ihtiyaçlarını ve sistemin işlevselliğini belirlemektedir. İşlevsel olmayan gereksinimler ise güvenlik, güvenilirlik, performans, kullanılabilirlik ve ölçeklenebilirlik gibi kritik sistem özelliklerini içermektedir. Bu bağlamda, RPA'nın finansal süreçlerde etkin şekilde uygulanabilmesi için teknik ve işlevsel gereksinimlerin dikkatlice ele alınması gerektiği vurgulanmaktadır [35][36].

Robotik Süreç Otomasyonu (RPA), finansal operasyonlarda ve fatura işleme süreçlerinde dönüşüm sağlayarak işletmelerin verimliliğini artıran kritik bir teknolojidir. Çalışmalar, RPA'nın manuel işlem sürelerini kısalttığını, hata oranlarını azalttığını ve süreçleri daha etkin hale getirdiğini ortaya koymaktadır. Gelecekte, yapay zeka ve makine öğrenme algoritmalarının entegrasyonuyla bu süreçlerin daha da iyileştirilmesi öngörülmektedir. Özellikle muhasebe departmanları için RPA, sipariş yönetiminden fatura oluşturma ve tahsilat süreçlerine kadar olan operasyonları otomatize ederek iş yükünü azaltmakta ve verimliliği artırmaktadır. Aynı zamanda, tedarikçi faturalarının dijitalleşmesiyle zaman ve maliyet tasarrufu sağlarken, insan hatalarını en aza indirerek işletmelerin rekabet gücünü artırmaktadır. Bu bağlamda, RPA'nın finansal süreçlerde kullanımı, yatırım getirisi açısından önemli avantajlar sunmaktadır [37][38][39].

E-Fatura uygulaması, Türkiye'de 2010 yılında Maliye Bakanlığı tarafından Vergi Usul Kanunu Genel Tebliği ile başlatılmıştır. Bu sistem, işletmelerin fatura işlemlerini dijital ortamda yönetmelerini sağlayarak kağıt tüketimini azaltmış ve süreçleri hızlandırmıştır. Büyük ölçekli işletmeler ve belirli sektörler için zorunlu hale getirilen E-Fatura, vergi kaçakçılığını önlemeyi ve devlet gelirlerinin düzenli tahsilini amaçlamaktadır [40].

Gelir İdaresi Başkanlığı (GİB) tarafından desteklenen sistem, otomatikleştirilmiş faturalama süreci ile mali raporlama süreçlerinde şeffaflık sağlamıştır. 2013'te yapılan düzenlemelerle gerçek kişi mükellefler de sisteme dahil edilerek kullanıcı tabanı genişletilmiştir. E-Fatura'nın gelecekte daha da geliştirilerek tüm işletmeler için zorunlu hale getirilmesi beklenmektedir. Bu dönüşüm, Türkiye'nin dijitalleşme sürecinde kritik bir rol oynayacaktır [40].

E-Fatura sistemi, Türkiye'deki mükellefler için, mali işlemlerin dijitalleştirilmesi ve iş süreçlerinin verimliliğinin artırılması amacıyla Gelir İdaresi Başkanlığı (GİB) tarafından kurulan teknik bir altyapıdır. E-Fatura'nın teknik yapısı, Universal Business Language (UBL) standartları temelinde kurulmuş ve bu standart, Türkiye koşullarına özelleştirilerek UBL-TR olarak adapte edilmiştir [41].

Elektronik muhasebe sistemlerinin entegrasyonu, muhasebe verilerinin doğruluğunu artırarak, finansal raporlama süreçlerinde şeffaflığı güçlendirmiştir. Bu süreçler, işletmelerin küresel rekabetteki pozisyonlarını güçlendirirken, Türkiye'nin dijital dönüşüm yolculuğunda da önemli bir adım olmuştur. Gelecekte, bu teknolojilerin daha da entegre edilmesi beklenmekte ve bu entegrasyonun işletmelerin uluslararası standartlara uyumunu daha da kolaylaştırması öngörülmektedir. Bu bağlamda, E-Dönüşümün, iş dünyası ve mali regülasyonlar üzerindeki etkilerinin sürekli olarak değerlendirilmesi ve güncellenmesi gerekmektedir. Bu gelişmeler, Türkiye'nin finansal teknolojilerdeki liderliğini pekiştirecek ve global ekonomide daha rekabetçi bir konuma gelmesini sağlayacak önemli faktörler arasında yer almaktadır [42].

2013 yılında, Vergi Usul Kanunu'nun 58/2013.03 sayılı Sirküler ile E-Fatura'ya geçiş zorunluluğu detaylandırılmış ve genişletilmiştir. Bu sirküler, E-Fatura kullanmaya başlayacak mükellefler için geçiş tarihlerini ve gerekli prosedürleri belirlemiştir. Ayrıca, E-Fatura ve E-Defter sistemlerine geçişin genel yasal çerçevesini çizen 424, 433, 447 ve 448 sıra numaralı Genel Tebliğler, bu süreci daha da resmileştirmiştir [43].

E-Fatura'nın Türkiye'deki yasal altyapısı, 397 sıra numaralı Vergi Usul Kanunu Genel Tebliği ile 5 Mart 2010'da oluşturulmuş ve elektronik faturaların kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Sistem, vergi kaybını önleme, kayıt dışı ekonomi ile mücadele ve işlemlerin şeffaflığını artırma amacı taşımaktadır. Başlangıçta belirli büyüklükteki işletmeleri kapsayan zorunluluk, 421 sıra numaralı tebliğ ile 14 Aralık 2012'de genişletilerek daha fazla mükellefi kapsamına almıştır [44].

E-Fatura entegrasyon süreci, mükelleflerin mevcut bilgi işlem altyapılarını GİB'in sistemine entegre etmelerini gerektirir. Bu entegrasyon, mükelleflere 7/24 kesintisiz bir bağlantı imkânı sağlar ve süreç içerisinde her türlü fatura işleminin otomatik olarak yönetilmesine olanak tanır [45].

E-Fatura uygulaması, iş dünyasında ve kamu yönetiminde önemli dönüşümler sağlamıştır. Maliyet tasarrufu, işlem hızının artırılması, çevresel etkilerin azaltılması ve vergi uyumunun kolaylaştırılması gibi avantajlar sunar. Elektronik kayıt sistemi sayesinde, denetim süreçleri hızlanmakta ve şirketlerin mali yönetimi daha etkin hale

gelmektedir. Ayrıca, uluslararası ticarette entegrasyonu kolaylaştırarak küresel uyumu destekler. Genel olarak, E-Fatura işletmelerin operasyonel verimliliğini artırırken maliyetleri düşürmekte ve şeffaflığı teşvik etmektedir [45].

3. RPA ve Otomatik Faturalandırma Sürecinin Uygulanışı

Robotik Süreç Otomasyonu (RPA) teknolojisi, e-ticaret platformlarında siparişten fatura oluşturmaya uzanan süreçleri otomatize ederek işlemlerin verimliliğini artırır ve iş akışını hızlandırır. Siparişlerin sisteme işlenmesi aşamasında, e-ticaret platformları üzerinden alınan siparişlerin sistemimize entegrasyonu, özelleştirilmiş API'ler vasıtasıyla düzenli aralıklarla gerçekleştirilir. Bu entegrasyon süreci, siparişlerin zamanında ve doğru işlenmesini sağlar ve böylece müşteri memnuniyeti ve operasyonel etkinlik için gerekli olan veri doğruluğunun garantisini verir. Faturalandırma sürecinde, RPA sistemi müşterinin tercihlerine bağlı olarak otomatik kararlar alır ve bu kararlar, Universal Business Language (UBL) standartlarına uygun faturaların oluşturulmasından Gelir İdaresi Başkanlığı'na (GİB) iletimine, tahsilat işlemlerinin gerçekleştirilmesine ve irsaliyelerin düzenlenmesine kadar çeşitli süreçleri yönetir. Bu sistem yaklaşımı, iş süreçlerinin verimliliğini ve karar mekanizmalarının hassasiyetini artırarak, hem maliyet tasarrufu sağlar hem de fatura yönetimi süreçlerinin akıcılığını ve uyumunu güçlendirir.

Fatura oluşturma ve gönderme sürecinde, sistemimizde kayıtlı sipariş bilgileri, müşteri tercihleri doğrultusunda hazırlanan özelleştirilmiş faturalandırma senaryoları üzerinden otomatik bir şekilde faturalara dönüştürülür. Bu faturalar, Gelir İdaresi Başkanlığı'na (GİB) iletildikten sonra, müşterinin tercihine bağlı olarak ilgili e-ticaret pazaryeri sistemlerine yüklenir. Oluşturulan faturalar, UBL (Universal Business Language) standardına uygun biçimde düzenlenerek, müşteri ve mevzuat gereksinimlerine uygunlukları temin edilir. Bu süreçte, faturaların sistemler arası iletişimi Basit Nesne Erişim Protokolü (Simple Object Access Protocol – SOAP) ve Temsili Durum Transferi (Representational State Transfer - RESTful) web servisleri aracılığıyla gerçekleştirilir, böylece faturaların doğru ve zamanında ilgili taraflara ulaştırılması sağlanmış olur. Bu entegrasyon ve iletim mekanizması, modern e-ticaret çerçevesindeki operasyonel etkinliği ve uyumlu bir ticaret akışını destekler.

Tahsilat ve irsaliye yönetiminde RPA teknolojisinin entegrasyonu, faturalandırma prosedürlerinin ötesine geçerek, tahsilat süreçlerinin yönetilmesi ve irsaliye oluşturulmasını da kapsar. Bu entegrasyon sayesinde, finansal transaksiyonların ve lojistik işlemlerin otomatik bir şekilde koordinasyonu sağlanır, böylece operasyonel süreçlerin verimliliği artırılır ve iş akışlarındaki manuel hatalar en aza indirgenir. Bu yaklaşım, süreçlerin kesintisiz ve etkili bir şekilde yürütülmesine olanak tanırken aynı zamanda işletmelerin kaynak kullanımını optimize etmelerini ve müşteri hizmetlerinde sürekliliği garantilemelerini sağlar.

Otomatik faturalandırma sürecindeki hatalar, RPA sistemi tarafından tespit edilir ve ilgili kayıtlar oluşturulur. Sistem yöneticileri ve müşteriler, bu kayıtlar temelinde hata bildirimleri alırlar. Gelir İdaresi Başkanlığı'nın (GİB) standartlarına uygun olmayan faturalar veya teknik sorunlar gibi özel durumlar, önceden belirlenmiş hata yönetimi protokollerine göre ele alınır. Entegre hata yönetimi mekanizmaları, faturalama sürecinde meydana gelebilecek herhangi bir kesinti veya hatanın sürecin bütünlüğünü bozmamasını sağlar. Hataların sistem yöneticileri ve müşterilere e-posta yoluyla iletilmesi, sorunların hızla çözülmesine imkân tanır. Bu süreç, işlemlerin güvenilirliğini ve sürekliliğini temin ederken aynı zamanda olası hata durumlarına karşı hızlı tepki verilmesini mümkün kılar.

RPA sistemlerinin işlevselliği, süreçlerin sürekli izlenmesi ve geliştirilmesi ile öne çıkar. Bu dinamik izleme, sistem performansındaki potansiyel iyileştirme fırsatlarını ortaya çıkararak operasyonel verimliliği maksimize etmeye ve müşteri memnuniyetini artırmaya yardımcı olur. Sistemin proaktif olarak süreç optimizasyonu yapması, sürekli gelişim sağlayarak kurumların rekabetçiliklerini güçlendirir ve müşteri ihtiyaçlarına daha hızlı yanıt verme yeteneğini artırır.

RPA sisteminin sağladığı ölçeklenebilir altyapı, iş süreçlerinin sürekli değişen gereksinimlerine esnek bir şekilde uyum sağlama yeteneğine sahiptir. İş yükü ve sipariş hacmi artışlarına dinamik bir şekilde yanıt verebilen bu yapı, sunucu kaynaklarını ve bot sayısını işletmenin anlık ihtiyaçlarına göre ayarlayarak, sistem performansını en üst düzeye çıkarmak için tasarlanmıştır. Supervisor'ların rolü, bu gelen iş yükünü dengeli bir şekilde dağıtarak ve sistem kaynaklarını etkin bir şekilde kullanarak, işletmenin piyasada meydana gelen dalgalanmalara karşı direncini artırma ve rekabet gücünü koruma kapasitesini güçlendirmedir. RPA altyapısının bu modüler ve esnek doğası, gerektiğinde daha fazla işlem gücünü devreye sokma veya kaynak kullanımını azaltma esnekliğini sağlar, bu da operasyonel maliyetlerin optimize edilmesine ve iş süreçlerinin kesintisiz bir şekilde devam etmesine katkıda bulunur.

RPA ve otomatik faturalandırma süreçlerinin e-ticaret sektöründe implementasyonu, sadece maliyet ve operasyonel verimliliği iyileştirmekle sınırlı kalmayıp, müşteri deneyimini de zenginleştirir. Otomatikleştirilmiş süreçler, hatasız ve hızlı faturalandırma ile müşteri sadakatini pekiştirir ve müşteri memnuniyetsizliğini azaltır. Aynı zamanda, iş süreçlerinin şeffaflığı artar, müşterilere karşı güvenilir bir imaj çizilmesine yardımcı olur.

İşletmeler için, sistemde gerçekleştirilen her işlemin kaydedilmesi ve analiz edilmesi, stratejik karar alma süreçlerini bilgilendiren zengin veri setleri sağlar. Bu veriler, pazar trendleri ve müşteri davranışları hakkında detaylı içgörüler elde etmek için kullanılabilir. Bu analitik kapasite, işletmelerin sürekli iyileştirme ve yenilik yapma kabiliyetini güçlendirir, böylece piyasada sürdürülebilir bir rekabet avantajı elde etmelerine olanak tanır.

RPA uygulamaları, işlem maliyetlerinin düşürülmesine, iş akışlarının hızlandırılmasına ve müşteri hizmetlerinin geliştirilmesine katkıda bulunarak işletmelerin sürdürülebilir büyümesine destek olur. Ölçeklenebilir yapısı ile işletmelerin genişleme ve büyüme planlarına uyum sağlamalarını kolaylaştırır, böylece değişen iş hacmi ve piyasa koşullarına dinamik bir cevap geliştirmelerini sağlar.

Sonuç olarak, RPA (Robotik Süreç Otomasyonu) ve otomatik faturalandırma, işletmelerin dijital dönüşüm sürecinde temel adımlardan biridir. Bu teknolojiler, işletmelere operasyonel mükemmellik kazandırırken müşteri odaklı bir iş yapısı geliştirmelerine de olanak sağlar. Modern iş dünyasında başarılı olmanın kilit taşlarından biri olarak kabul edilen RPA'nın stratejik uygulanması büyük önem taşımaktadır.

4. Çalışmada Kullanılan Veri Kümesi

Çalışmamızda kullanılan veri seti, sipariş işleme ve otomatik faturalandırma süreçlerindeki her bir siparişin kapsamlı bilgilerini içermektedir. Siparişler, alıcı bilgileri, vergi kimlik numaraları, adres, sipariş tarihleri ve detayları ile ürün bilgileri gibi temel alanları barındırır. Ayrıca, faturaya uygulanacak genel iskontolar, kargo ücretleri ve siparişin durumu gibi ek bilgiler de veri tabanında düzenli bir yapı içerisinde tutulmaktadır. Şekil 1'de gösterilen ve bu çalışmada kullanılan veri kümesi, bir e-ticaret platformundan alınan sipariş kayıtlarını içerir. Bu veri kümesi, siparişin oluşturulma tarih ve saati, sipariş durumu, sipariş tutarı gibi finansal bilgiler, müşteri ve gönderim adresi gibi müşteriye ait bilgiler ve siparişin hangi pazaryeri entegrasyonu üzerinden geldiği gibi operasyonel verileri kapsar. Tablo şeklinde düzenlenmiş olan bu veri kümesi, her bir satırda tekil bir sipariş kaydını temsil eder ve sütunlar, bu siparişlerle ilgili çeşitli parametreleri barındırır. Bu bilgiler, normalizasyon işlemleri ile işlenerek veri tekrarlarının önüne geçilir ve veri tabanının etkin kullanımı sağlanır, bu süreç veri bütünlüğünü korur ve muhasebe süreçlerindeki tüm detayların tutarlı kaydedilmesini garanti altına alır. Komut Çalıştırma Zamanlayıcısı(Command Run On – CRON) işlemleri aracılığıyla, belirlenen zaman aralıklarında sistemimize aktarılan veriler, ilgili tablolara yazılır, bu da sürekli ve düzenli işlemeyi sağlar.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	
id	created_at	updated_at	deleted_at	company_id	integration_i	marketplace	order_id	order_number	order_date	order_status	currency	customer_id	invoice_address_id	shipment_address_id	subtotal_discount_type	discount_group	subtotal_discount_value	vat_exclude
1333674	2023-04-12 1	2023-04-12 17:43:52		Company1	IntegrationId	marketplace	Order1	OrderNumber1	2023-04-12 20:35:42	Created	try	Customer1	Address1	ShippmentAddress1				
1333675	2023-04-12 1	2023-04-12 17:43:55		Company1	IntegrationId	marketplace	Order2	OrderNumber2	2023-04-12 20:16:49	Created	try	Customer2	Address2	ShippmentAddress2				
1333676	2023-04-12 1	2023-04-12 17:43:58		Company1	IntegrationId	marketplace	Order3	OrderNumber3	2023-04-12 16:12:22	Created	try	Customer3	Address3	ShippmentAddress3				
1333677	2023-04-12 1	2023-04-12 17:44:00		Company1	IntegrationId	marketplace	Order4	OrderNumber4	2023-04-12 06:10:40	Shipped	try	Customer4	Address4	ShippmentAddress4				
1333678	2023-04-12 1	2023-04-12 17:44:01		Company1	IntegrationId	marketplace	Order5	OrderNumber5	2023-04-12 03:44:07	Shipped	try	Customer5	Address5	ShippmentAddress5				
1333679	2023-04-12 1	2023-04-12 17:44:01		Company1	IntegrationId	marketplace	Order6	OrderNumber6	2023-04-12 13:54:54	Shipped	try	Customer6	Address6	ShippmentAddress6				
1333680	2023-04-12 1	2023-04-12 17:44:04		Company1	IntegrationId	marketplace	Order7	OrderNumber7	2023-04-12 13:53:20	Shipped	try	Customer7	Address7	ShippmentAddress7				

Şekil 1. Kullanılan sipariş veri kümesi örneği.

Muhasebe sürecinin bir parçası olarak, CRON işlemleri ile oluşturulan siparişler, muhasebe tablolarına aktarılır ve fatura tarihi, KDV oranları, indirimler ve genel iskontolar gibi bilgiler hesaplanır ve kaydedilir. Oluşturulan faturalar, müşteri tercihlerine göre yönetilir ve fatura türü, Gelir İdaresi Başkanlığı'na gönderme, tahsilat ve irsaliye oluşturma gibi işlemler otomatik olarak planlanır.

5. Materyal ve Yöntem

RPA teknolojisi, farklı bileşenler ve kullanım alanları ile dikkat çeker. Örneğin, ekran kaydırmalı otomasyon, kullanıcıların fare hareketleri, tıklamalar ve klavye girişlerini taklit ederek bu etkileşimleri yeniden oluşturabilecek botlar içerir. Bu teknoloji, özellikle eğitim materyallerinin oluşturulmasında ve rutin süreçlerin otomasyonunda etkili bir zaman yönetimi aracı sunar. Kurallı botlar ise belirli algoritmalar ve kurallar setine dayanır. Bu botlar, belirlenen giriş ve çıkış parametreleri ile mantıksal işlemleri otomatik olarak yerine getirir. Böylece, tekrar eden ve standardize iş süreçlerinde insan hatalarını azaltarak hız ve doğruluğu artırır. Yapay zekâ ve makine öğrenimi teknolojilerinin entegrasyonu ile desteklenen RPA, botların daha zeki ve esnek hale gelmesini sağlar. Bu sayede, botlar karmaşık görevleri yerine getirebilir ve süreç içinde karşılaştıkları yeni durumları değerlendirebilir. Bot görev yönetimi, botlar arasındaki iletişimi ve görev dağıtımını düzenler. Bu sistem, çok sayıda görevi ve botu etkili bir şekilde yönetir ve tüm botların aktivitelerini merkezi bir noktadan izler. Zamanlama ve programlama

mekanizmaları, botların iş süreçlerine bağlı olarak belirli zamanlarda veya olaylara göre tetiklenmesini sağlar. Bu, botların özellikle yoğun olmayan zamanlarda veya belirli olaylara bağlı olarak etkin bir şekilde çalışmasına imkân tanır. Botlar, internet bağlantısının durumundan bağımsız olarak veri aktarımı ve işlem yapabilme kabiliyetine sahiptir. Çevrimiçi ve çevrimdışı işlemler gerçekleştirebilir, yerel sistemlerde bağımsız çalışabilirler. Ayrıca, entegrasyon yeteneği sayesinde botlar, RESTful API'ler ve web hizmetleri gibi araçları kullanarak, çeşitli uygulama ve veri depolama sistemleri arasında veri aktarımı ve işlemlerini sorunsuz bir şekilde gerçekleştirebilir. Botlar tarafından toplanan işlem verilerinin sürekli analizi ve raporlaması, süreçlerin etkinliği ve verimliliği hakkında derinlemesine bir anlayış sağlar. Bu veriler, iş akışlarının iyileştirilmesine yardımcı olacak değerli bilgiler sunar. Bu özellikler, RPA'nın işletmeler için ne kadar çok yönlü ve değerli bir araç olduğunu göstermektedir. İşletmeler, bu teknolojileri kullanarak operasyonel süreçlerini iyileştirebilir ve rekabet avantajı elde edebilirler.

RPA'nın uygulanışı, işletmenin mevcut e-ticaret platformlarından alınan siparişlerin otomatik olarak faturalandırılmasını kapsar. RPA'nın uygulanmasında, botların iş sürecine entegre edilmesi için gerekli görev ve iş akışları özenle tasarlanmıştır. Her bir bot, pazaryeri platformlarından alınan sipariş bilgileri doğrultusunda faturalandırma görevlerini yerine getirecek şekilde programlanmıştır. Otomatik işlemlerin düzenli olarak gerçekleştirilmesini sağlamak amacıyla cron joblar kullanılmıştır. Bu yöntem, siparişlerin ve faturalandırma işlemlerinin zamanında ve hatasız bir şekilde yapılmasını sağlamak adına botların belirlenen zamanlarda devreye girmesine olanak tanır.

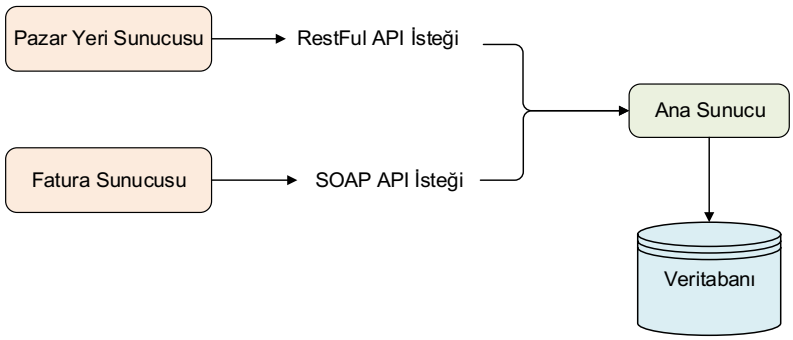
Farklı sistemler arasındaki veri akışı ve eşgüdüm, API'ler aracılığıyla sağlanmıştır. Bu entegrasyon, sipariş veri tabanları ile stok yönetimi ve muhasebe yazılımları arasındaki veri akışını koordine etmektedir. Sürecin verimliliğini değerlendirmek ve iyileştirme alanlarını belirlemek için analitik araçlar kullanılmıştır. Sürekli toplanan işlem verileri üzerinde yapılan analizler, sürecin performansını ölçmek ve sürekli iyileştirme fırsatları sunmak amacıyla kullanılmaktadır.

Potansiyel hataların yönetimi ve süreç optimizasyonu, otomasyonun verimliliğini artırmak ve işletmenin iş akışlarına sorunsuz bir entegrasyon sağlamak için kritik öneme sahiptir. Hataların otomatik olarak tespiti ve müdahalesi, bu protokolün temel bileşenlerindendir.

RPA teknolojisinin uygulaması, iş süreçlerinin otomasyonunda ve yönetiminde detaylı bir metodolojiyi gerektirir. Bu metodoloji, fatura oluşturma, sipariş doğrulama ve muhasebe sistemleri entegrasyonu gibi temel iş süreçlerinin etkin bir şekilde otomatize edilmesini sağlar. Kurallı botlar, iş kuralları ve algoritmalar doğrultusunda programlanarak, bu süreçleri koordine eder ve botlar arası iş yükü dağılımını etkin bir şekilde yönetir.

Zamanlama mekanizmaları, cron joblar aracılığıyla, botların belirli zamanlarda veya olaylara göre aktif hale gelmelerini sağlar, bu sayede süreçlerin düzenli ve zamanında işlemesini garanti eder.

Şekil 2'de belirtilen diyagram ile API ve SOAP yöntemlerini kullanılacak yapının bir örneği gösterilmiştir. Belirtilen diyagram tamamen genel hatlarıyla belirtilen bir akış diyagramıdır.



Şekil 2. Entegresyon diyagram.

Burada, ana sunucu, restful istekler aracılığıyla siparişleri alır ve bu siparişleri veritabanına kaydeder. Veritabanı, siparişlerin ve müşteri bilgilerinin depolandığı yerdir. Ana sunucu, belirli aralıklarla siparişleri alır ve bu siparişleri veritabanına kaydeder. Bu işlem, Laravel Job'ları kullanılarak gerçekleştirilir. Supervisor, bu job'ları yönetir ve düzenli aralıklarla çalışmasını sağlar. Laravel Job'ları, belirli görevleri asenkron bir şekilde gerçekleştirmek için kullanılır. Siparişleri sorgulama işlemi de bu job'lar aracılığıyla yapılır. Sipariş sorgulama işlemi, pazaryerine göre belirli aralıklarla sipariş durumunu güncellemek amacıyla gerçekleştirilir. Siparişin

düştüğüne dair bir event tetiklendiğinde, Laravel eventleri kullanılarak fatura oluşturulur. Bu event, müşteri ayarlarına göre bir UBL (Universal Business Language) faturası oluşturulmasını tetikler. Oluşturulan UBL faturası, ana sunucu tarafından başka bir sunucuya SOAP isteği göndererek gönderilir. Bu istek, faturanın pazaryeri sunucusunda entegrasyonunu sağlar. Pazaryeri sunucusu, gelen UBL faturasını alır, entegratörler tarafından işlenir ve pazaryeri içindeki müşteri hesaplarına yansıtılır. İşlemler tamamlandıktan sonra, oluşturulan faturanın görüntüsü pazaryeri sunucusuna yüklenir. Bu, fatura ile ilgili belgelerin ve bilgilerin kullanıcılar tarafından görüntülenebilir hale gelmesini sağlar. Entegrasyon kabiliyeti, farklı sistemler arasındaki sürekliliği sağlar. API'ler kullanılarak, işletme sistemleri arasında veri akışının sorunsuz bir şekilde gerçekleşmesi sağlanır, bu da iş süreçlerinin tutarlılığını ve güvenilirliğini artırır. Analitik ve raporlama fonksiyonları, iş sürecinin her adımını sürekli olarak değerlendirir, böylece işletme yönetimi ve karar vericilere iş süreçlerinin performansı üzerine değerli veri setleri sağlar. Bu bilgiler, iş süreçlerinin etkinliği ve optimizasyonu için gerekli stratejik bilgileri sunar ve sürekli gelişim fırsatları yaratır. Bu çalışma, RPA teknolojisinin iş süreçlerine entegrasyonu ve yönetimi hakkında kapsamlı bir rehber sunarak, süreçlerin nasıl iyileştirileceği ve maksimize edileceği üzerine derinlemesine anlayış sağlar.

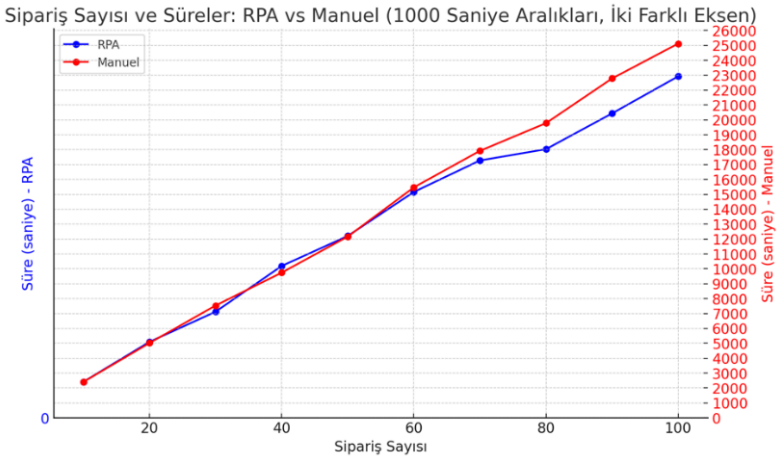
6. Deneysel Sonuçlar

Robotik Süreç Otomasyonu (RPA), e-ticaret alanında işletmelerin operasyonel verimliliğini artırma potansiyelini kanıtlamıştır. Sistemli bir metodoloji izlenerek, pazaryeri entegrasyonlarından veri yönetimine ve otomatik karar verme mekanizmalarına kadar geniş bir yelpazede, RPA çözümleri başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Araştırmanın bulguları, otomasyonun iş süreçlerini hızlandırdığını, hata oranlarını azalttığını ve genel müşteri deneyimini iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

Süreçlerin alımından veritabanı kaydına, karar mekanizmalarının otomasyonundan fatura işlemlerinin yürütülmesine kadar her adımda RPA'nın uygulanışı detaylandırılmıştır. Özellikle siparişten faturaya dönüşüm sürecinin otomasyonu, iş yükünü azaltmış ve sipariş işleme sürelerini kısaltmıştır. Bu iyileştirmeler, işletmelerin piyasada daha çevik ve müşteri odaklı hale gelmesini sağlamış, operasyonel verimliliği ve müşteri hizmetlerini önemli ölçüde geliştirmiştir.

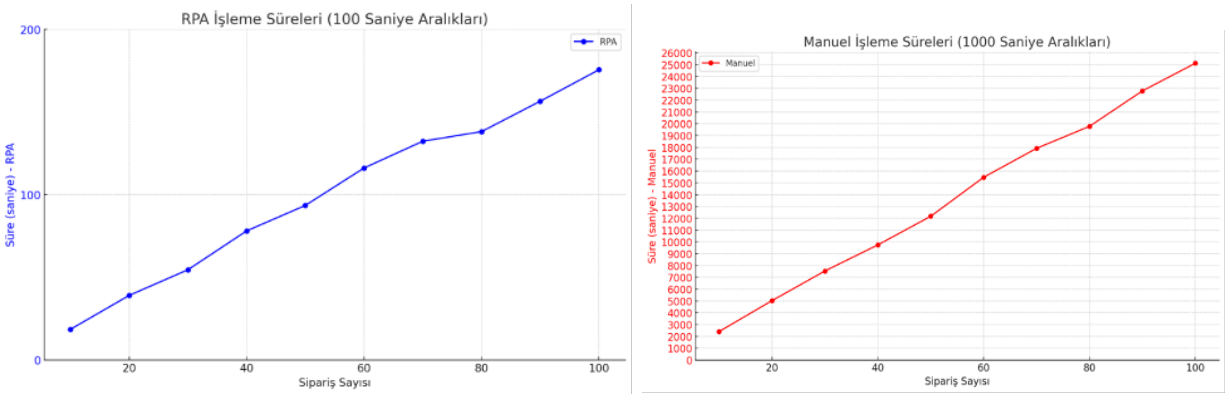
Entegrasyon ve uzaktan izleme yetenekleri, sistem yöneticilerinin ve işletme sahiplerinin işlemleri gerçek zamanlı izlemelerini ve gerekli müdahaleleri yapabilmelerini sağlamıştır. Hata yönetimi sistemi, herhangi bir sistem aksaklığını hızla çözümleme ve süreçlerin kesintisiz sürmesini sağlama kapasitesine önemli katkılarda bulunmuştur. Bu durum, hem iç işleyiş hem de müşteri memnuniyeti ve sadakati için kritik önem taşımaktadır.

Şekil 3, Robotik Süreç Otomasyonu (RPA) ve manuel işlem yöntemleri arasında sipariş işleme süreleri açısından karşılaştırmalı bir analiz sunmaktadır. Şekil 3'te, sipariş sayısı arttıkça RPA'nın süre performansının manuel işlemlere göre nasıl bir avantaj sağladığı gösterilmektedir. RPA kullanımının, sipariş işleme sürelerini önemli ölçüde kısalttığı ve sipariş sayısındaki artışla doğrusal bir ilişki gösterdiği, manuel işlemlere kıyasla daha düşük bir süre eğrisi ile kanıtlanmıştır. Bu, RPA'nın ölçeklenebilirliğini ve büyük veri setleri ile işlem yaparken sağladığı zaman verimliliğini gözler önüne serer.



Şekil 3. RPA ve Manuel siparişlerin sisteme aktarılması için geçen süre.

Şekil 4 (a), RPA ile işleme sürelerine odaklanarak, işlem hacmi artışının RPA'nın performansı üzerindeki etkisini detaylandırırken, Şekil 4 (b)'deki manuel işlem sürelerini ayrıntılı bir şekilde göstermektedir. Manuel işlemlerin lineer bir zaman artışı sergilediği, işlem hacmi arttıkça sürelerin de orantılı olarak uzadığı görülmektedir. Bu, manuel işlemlerin ölçeklenebilirlik ve zaman yönetimi açısından sınırlamalarını açığa çıkarmaktadır.



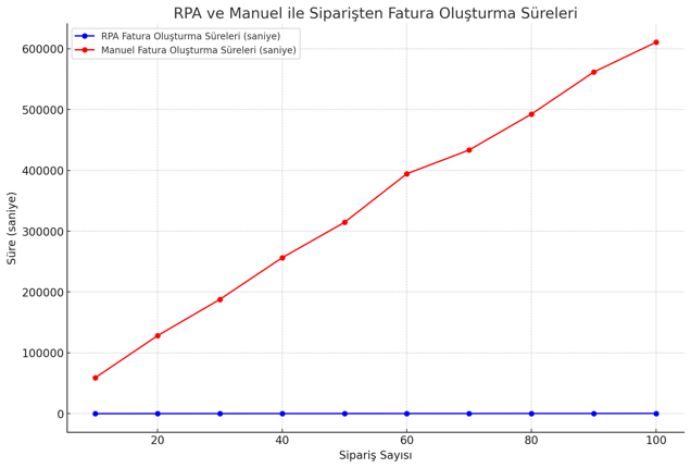
(a) (b)

Şekil 4. (a) RPA ile siparişlerin zaman aralığı (b) Manuel siparişlerin zaman aralığı.

Bu veriler, RPA'nın sipariş işleme süreçlerini otomatize ederek işletmelerin verimliliğini ve operasyonel kapasitesini nasıl artırabileceği üzerine derinlemesine bir bakış sağlar. RPA'nın, artan iş hacimlerine esnek ve etkili bir şekilde uyum sağlama yeteneği, manuel işlemlerin aksine, işletmelerin zaman ve kaynakları daha verimli kullanmasına olanak tanır. Ayrıca, bu analiz, işletmelerin müşteri taleplerine daha hızlı yanıt verme, hizmet kalitesini artırma ve pazar taleplerine daha dinamik bir şekilde adapte olma yeteneklerini geliştirme potansiyellerini de göstermektedir.

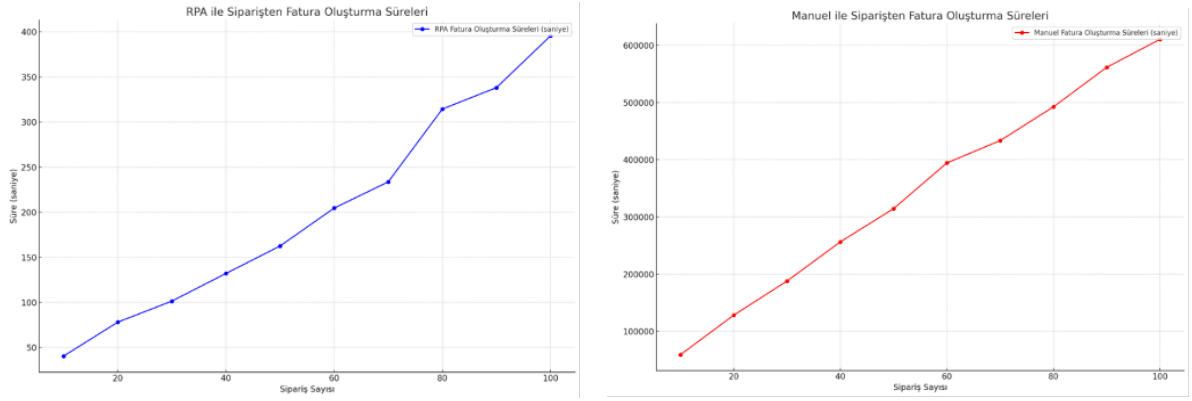
Şekil 5 gösterilen, siparişlerden fatura oluşturma süreçlerinde Robotik Süreç Otomasyonu (RPA)'nın manuel işleme kıyasla performansını karşılaştırmaktadır. Her iki yöntem için de sipariş sayısının artışına göre işleme süreleri incelenmiştir.

Şekil 5, RPA kullanılarak oluşturulan faturaların süreleri, yatay eksen üzerinde tutarlı ve düşük bir zaman dilimi göstermekte; bu durum RPA'nın sipariş işleme hızındaki sabitliği ve etkinliğini yansıtmaktadır. Manuel sürecin faturalama süreleri ise dikey eksen üzerinde, sipariş sayısı arttıkça sürelerin önemli ölçüde arttığını gösteriyor ki bu, manuel işlemlerin ölçeklenebilirlik ve zaman yönetimi açısından RPA'ya göre daha az etkin olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. RPA ve Manuel siparişlerin faturaya dönüştürülme süreleri.

Şekil 6 (a)' da görülen grafikte, RPA ile süreler belirtilmiş ve burada RPA'nın sürekli ve nispeten düşük bir işleme süresini koruduğu, manuel işlemlerin ise lineer ve yüksek süre artışları sergilediği açıkça görülmektedir. Manuel süreçler, sipariş sayısı artışına bağlı olarak sürelerde büyük bir artış gösterirken, RPA'nın neredeyse sabit bir süre tutarlılığı göstermesi, RPA'nın ölçeklenebilirliği ve zaman yönetimi konusunda çok daha üstün olduğunu göstermektedir. Şekil 6 (b)'deki grafikte, manuel işlem sürelerinin doğrusal olarak arttığı ve her yeni siparişin işlenme süresinin toplam süreyi önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Bu, manuel süreçlerin ölçeklenme sınırlamalarına ve iş yükü arttıkça verimlilik kaybına daha yatkın olduğunu ortaya koymaktadır.

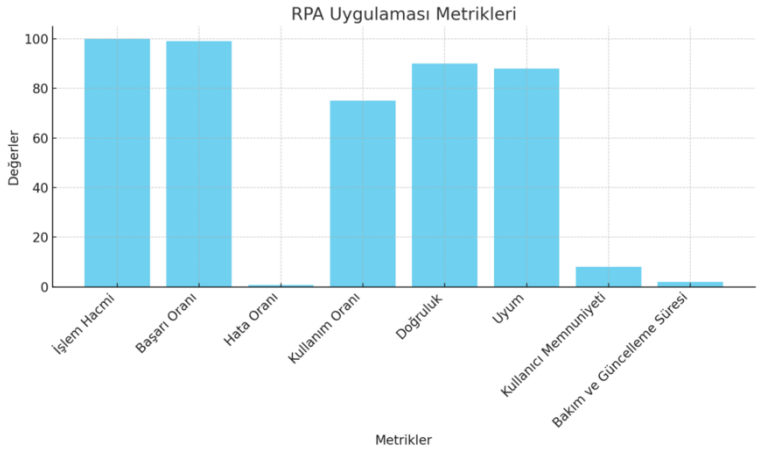


(a) (b)

Şekil 5. (a) RPA siparişlerin faturaya dönüştürülme süreleri (b) Manuel siparişlerin faturaya dönüştürülme süreleri.

Bu veriler, RPA'nın özellikle yüksek sipariş hacimlerinde, işlemleri hızlandırma ve tutarlılık sağlama konusunda manuel işlemlere göre üstün olduğunu göstermektedir. RPA'nın sadece iş süreçlerinin verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda iş yükünün azalmasında önemli bir rol aldığını göstermektedir.

RPA teknolojisi, iç süreçlerin yanı sıra müşteri deneyimini de geliştiren bir potansiyele sahiptir. Müşteri memnuniyeti üzerindeki bu olumlu etki, işletmelerin marka değerini artırmada ve rekabet avantajını sürdürmede etkili bir faktör olarak belirlenmiştir. RPA entegrasyonu sırasında karşılaşılan zorluklar ve bunların üstesinden gelme yöntemleri, sürecin önemli bir parçası olarak ele alınmıştır. Teknolojiye adapte olan işletmelerin, değişen pazar dinamiklerine nasıl daha hızlı uyum sağlayabileceği ve RPA yatırımlarının getirisini nasıl maksimize edebilecekleri üzerine stratejiler geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.



Şekil 7. RPA ile 100 adet siparişin farklı metriklerdeki ölçüm sonuçları.

Şekil 7'de gösterildiği gibi, manuel sipariş sürecinin Robotik Süreç Otomasyonu (RPA) üzerindeki farklı metriklerin ölçüm sonuçları belirtilmiştir. Bu süreçte zaman farkının ölçülmesinin yanı sıra, RPA ile ilgili literatürde belirtilen performans metrikleri kullanılarak yapılan değerlendirmeler, otomasyonların belirli amaçlar doğrultusunda daha sürdürülebilir olduğunu kanıtlamıştır. Özellikle, RPA'nın zaman yönetimi, işlem hacmi, başarı oranı ve hata oranı gibi temel performans göstergelerinde önemli verimlilik artışları sağladığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, RPA'nın işletme süreçlerini optimize etme potansiyelini ve işletme verimliliğine katkısını açıkça göstermektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, Robotik Süreç Otomasyonu'nun (RPA) e-ticaret sektöründe sipariş sayısının artması ve siparişteki ürün kalemlerinin fazlalığıyla ilişkisi incelenmiştir. Elde edilen bulgular, RPA'nın işletmelerin operasyonel verimliliğini artırmada ve iş süreçlerini optimize etmede önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Öncelikle, RPA'nın sipariş süreçlerine entegrasyonu, işletmelerin daha yüksek sipariş hacimlerini yönetebilme kapasitelerini önemli ölçüde artırmıştır. Otomatikleştirilen süreçler sayesinde, siparişlerin alınması, işlenmesi ve faturalandırılması hızlı ve hatasız bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu durum, müşteri memnuniyetini artırırken, işletmelerin müşteri taleplerine daha hızlı ve etkili bir şekilde yanıt vermelerini sağlamaktadır. Sipariş sayısının artması, işletmelerin büyüme potansiyelini gösterirken, RPA'nın bu büyümeyi desteklemesi, işletmelerin rekabetçi avantajlarını korumalarına yardımcı olmaktadır.Ek olarak, siparişteki ürün kalemlerinin fazlalığı, işletmelerin operasyonel karmaşıklığını artırmaktadır. Ancak, RPA'nın sağladığı otomasyon çözümleri, bu karmaşıklığı yönetmede önemli avantajlar sunmaktadır. Otomatik envanter yönetimi, stok takibi ve ürün kategorilendirme gibi süreçler, RPA sayesinde etkin bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu, işletmelerin ürün çeşitliliğini artırmalarını ve müşterilere geniş bir ürün yelpazesi sunmalarını mümkün kılmaktadır. Ayrıca, ürün kalemlerinin fazlalığı, müşteri taleplerine daha iyi uyum sağlama ve kişiselleştirilmiş hizmet sunma fırsatları yaratmaktadır.

Sonuç olarak, RPA'nın e-ticaret sektöründe sipariş sayısının artması ve ürün kalemlerinin fazlalığı üzerindeki olumlu etkileri, işletmelerin operasyonel verimliliğini artırmakta ve müşteri memnuniyetini sağlamaktadır. RPA'nın sağladığı esneklik ve ölçeklenebilirlik, işletmelerin dinamik pazar koşullarına uyum sağlamalarına ve sürdürülebilir büyüme sağlamalarına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, RPA'nın sadece teknolojik bir yenilik değil, aynı zamanda stratejik bir değer yaratma aracı olarak kabul edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

KolayBi Firmasına sipariş entegresyonu oluşumuna destek veren çalışmada kullanılan veri seti için teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

[1] Willcocks L, Hindle J, Lacity M. Keys to RPA Success. Exec Res Rep 2019.
[2] Doğuç O. Robot Process Automation (RPA) and Its Future. In: Handbook of Research on the Evolution of IT and the Rise of E-Society. 2020. pp. 469-480.
[3] Kämäräinen T. Robotic Process Automation: Opportunities and Challenges Associated with a Federated Governance Model. MSc Thesis, School of Business, Information and Service Management, Aalto University, Helsinki, Finland, 2018.
[4] Doruk G. Robotik Süreç Otomasyonu İçin İş Çizelgeleme Algoritması. Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2022.
[5] Flechsig C, Hamann-Lohmer J, Lasch R. Realizing the Full Potential of Robotic Process Automation Through a Combination with BPM. In: Proceedings of the International Scientific Conference on Business and Management. 2019.
[6] Can M. Robotik Süreç Otomasyonun Destek Süreçlerine Olan Etkisi, Verimlilik ve Son Kullanıcı Memnuniyetine Olan Katkısı. Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2022.
[7] Kokina J, Blanchette S. Early evidence of digital labor in accounting: Innovation with Robotic Process Automation. Int J Account Inf Syst 2019; 35:100431.
[8] Fantina R, Storozhuk A, Goyal K. Introducing Robotic Process Automation to Your Organization. 2022.
[9] Value Through Robotic Process Automation. Strategic Finance Magazine, Mar. 2018. https://sfmagazine.com/post-entry/march-2018-value-through-robotic-process-automation/
[10] Gonçalves R. Business Process Management as Continuous Improvement in Business Process. In: Proceedings of the International Scientific Conference on Business and Management. 2010.
[11] Özdem H, Bora MP. Türkiye'de Robotik Süreç Otomasyonu. Comput Sci Technol J 2022; 1(1):1-9.
[12] Yanmaz R. Robotik Süreç Otomasyonunun İşletme Performansı Üzerindeki Etkileri. Ind Eng J 2022; 33(2):125-135.
[13] Yıldırım F. Yazılım Robotlarının Finansal Süreçlerde Kullanımı: Bir Sigorta Şirketi Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2022.

[14] Çalışkan LS, Kıran S. İş süreçlerinin otomasyonunda RSO'nin faydaları. Manage Inf Syst J 2020; 6(1):1-13.
[15] Ekşi Z, Demir M. Robotik Süreç Otomasyonu ve İnsan Kaynakları Üzerine Etkileri. Doktora Tezi, İşletme Fakültesi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2021.
[16] Arslan D. Küçük ve Orta Ölçekli İşletmelerde RSO Uygulamaları: Verimlilik Üzerine Bir İnceleme. Yüksek Lisans Tezi, İşletme Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2020.
[17] Arslan E. Robotik Süreç Otomasyonunun Denetimde Kullanımı: Avantajlar ve Zorluklar. Yüksek Lisans Tezi, Muhasebe ve Denetim Yüksek Lisans Programı, İstanbul Bilgi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2021.
[18] Calva J, Alfaro E. Impact of an RPA (Robotic Process Automation) System that Replaces Human Operators for Validating Documents in Electronic Invoicing. DYNA New Technol 2019; 6(1):1-13.
[19] Doğuç Ö. Finans ve Muhasebede Robotik Süreç Otomasyonunun Uygulamaları. Beykent Univ J Eng Sci 2021; 14(1).
[20] Sahu S, Salwekar S, Pandit A, Patil M. Invoice Processing Using Robotic Process Automation. Int J Sci Res Comput Sci Eng Inf Technol 2020; 6(2):216-223.
[21] Kashish Verma R, Chahal A, Kumar V, Nayak P, Singh P. Automated Order Management Using Robotic Process Automation. In: Proceedings of the International Conference on Innovative Computing and Communication (ICICC-2020), Amity School of Engineering and Technology, Noida, India, 2020.
[22] Özdem H, Bora MP. Türkiye'de Robotik Süreç Otomasyonu. Comput Sci Technol J 2022; 1(1):1-9.
[23] Kajrolkar A, Paralikar P, Pawar S, Bhagat N. Customer Order Processing using Robotic Process Automation. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communication, Information and Computing Technology (ICCICT); 25-27 June 2021; Mumbai, India.
[24] Asquith A, Horsman G. Let the robots do it! – Taking a look at Robotic Process Automation and its potential application in digital forensics. Forensic Sci Int Rep 2019; 1(1).
[25] Kefe İ, Kanarığ Z. Türkiye'de E-Fatura Başvuru Süreci ve Kullanımı. Int J Econ Adm Sci Rev 2019; (25):165-178.
[26] Kara Y. Türkiye'de E-Fatura Uygulamaları ve KOBİ'lerin E-Fatura Sistemine Adaptasyon Süreci. Yüksek Lisans Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2021.
[27] Tektüfekçi F. E-Dönüşüm sürecinde e-muhasebe uygulamaları: Türkiye örneği. J Inf Econ Manage 2017; 12(1):79-87.
[28] Özdemir HT. E-Fatura Uygulamalarına Serbest Muhasebeci Mali Müşavirlerin Bakışı: Ampirik Bir Çalışma. Yüksek Lisans Tezi, Maliye Anabilim Dalı, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2020.
[29] Elçin R. Muhasebe Bilgi Sisteminin Bir Unsuru Olarak E-Fatura, E-Defter ve E-Arşiv Uygulamalarına Yönelik Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2017.
[30] Kılıç Ö. Türkiye'de E-Fatura Uygulaması ve Kullanıcı Şirketlerin E-Faturayı Değerlemesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, 2019.
[31] Demirkaya G. Türkiye'de e-Fatura Uygulamasında Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Önerileri. Yüksek Lisans Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2019.
[32] Demirkaya G. Türkiye'de e-Fatura Uygulamasında Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Önerileri. Yüksek Lisans Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2019.
[33] Qasrawi ASF. Robotic Process Automation Framework for Web Applications Performance and Security Usability Testing. MSc Thesis, Al-Quds University, Jerusalem, Palestine, 2022.
[34] Taulli T. The Robotic Process Automation Handbook: A Guide to Implementing RPA Systems. Monrovia, CA, USA: Apress, 2020.
[35] IBM. What is Robotic Process Automation? 2025. https://www.ibm.com/topics/rpa
[36] UiPath. Robotic Process Automation. 2025. https://www.uipath.com/rpa/robotic-process-automation
[37] Red Hat. What is Robotic Process Automation? 2025. https://www.redhat.com/en/topics/automation/what-is-robotic-process-automation
[38] Wikipedia. Robotic Process Automation. 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Robotic_process_automation
[39] UiPath. The Evolution of RPA: Past, Present, and Future. 2025. https://www.uipath.com/blog/rpa/the-evolution-of-rpa-past-present-and-future
[40] AkaBot. The History of RPA. 2025. https://akabot.com/additional-resources/blog/the-history-of-rpa/
[41] UiPath. Looking Forward, Looking Back: Five Key Moments in the History of RPA. 2025. https://www.uipath.com/blog/rpa/looking-forward-looking-back-five-key-moments-in-the-history-of-rpa
[42] Droidal. Evolution of RPA. 2025. https://droidal.com/blog/evolution-of-rpa/
[43] Nandan. History of Robotic Process Automation (RPA). 2025. https://nandan.info/history-of-robotic-process-automation-rpa/
[44] IT Convergence. The Evolution and Future of RPA: Trends in 2023 and Beyond. 2025. https://www.itconvergence.com/blog/the-evolution-and-future-of-rpa-trends-in-2023-and-beyond/
[45] Neebal. The Future of RPA: Key Trends for 2023 and Beyond. 2025. https://www.neebal.com/blog/the-future-of-rpa_-key-trends-for-2023-and-beyond

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 125-150, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1507856

Bulanık Çok Kriterli Yöntemlerin Karşılaştırılması: Mobilya İşletmelerinin Web Siteleri Örneği

Murat YEŞİLKAYA[1*]
[1] Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat, Türkiye
murat.yesilkaya@gop.edu.tr

(Geliş/Received: 01/07/2024; Kabul/Accepted: 15/10/2024)

Öz: Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri farklı alan ve disiplinlerde başarıyla uygulanmaktadır. Ancak birçok çalışmada karar problemlerine uygun yöntem ve parametrelerin seçilmesi sorunu gündeme gelmektedir. Bu makalede, ÇKKV yöntemlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Yöntemlerden AHP, TOPSIS, VIKOR, Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR kullanılmıştır. Bu analizleri yapmak için COVID-19 sonrası değişimlerle mobilya işletmelerinin web siteleri değerlendirilmiştir. Uygulamada literatür taraması ve uzman görüşü sonucunda altı ana kriter olmak üzere toplam 31 kriter belirlenmiştir. AHP yönteminden kullanılan kriterlerin ağırlıklarını hesaplanmıştır. Daha sonra yöntemlerden elde edilen sonuçlara göre web sitelerinin sıralamasını elde edilmiştir. Sonra ise yöntemler klasik sonuçların sıralaması, ilişki testi, işlem karmaşıklığı ve alternatif sayısındaki değişiklik ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, kullanılan tüm yaklaşımların web sitesi değerlendirmesinde uygun olduğunu göstermektedir. Fakat ilişki testinde yöntemlerin benzer sonuçlar çıktığı, hesaplama karmaşıklığında VIKOR daha iyi performans gösterdiği ve alternatif değişikliklerine uygunlukta ise bulanık TOPSIS yöntemi daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Çok kriterli karar verme, bulanık, web sitesi, karşılaştırma, COVID-19.

Comparison of Fuzzy Multi-Criteria Methods: Case of Furniture Firms Websites

Abstract: Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods are successfully applied in different fields and disciplines. However, in many studies, the problem of selecting appropriate methods and parameters for decision problems comes to the fore. In this article, a comparison of MCDM methods is made. AHP, TOPSIS, VIKOR, Fuzzy TOPSIS, and Fuzzy VIKOR were used. To conduct these analyses, the websites of furniture firms were evaluated in relation to the changes that occurred after COVID-19. In application, the literature review and expert opinion determined six main criteria, with a total of 31 criteria. The weights of the criteria used in the AHP method were calculated. Then, the ranking of the websites was obtained according to the results obtained from the methods. Later, the comparison was made based on the factors: the classical ranking of results, rank similarity coefficients, computational complexity, and adequacy to changes of alternatives. The results show that all approaches used are suitable for website evaluation. However, it was observed that the methods produced similar results in the rank similarity coefficients test. VIKOR performed better in computational complexity, and the fuzzy TOPSIS method performed better in compatibility with alternative changes.

Key words: Multi-criteria decision making, fuzzy, website, comparison, COVID-19.

1. Giriş

Karar verme insan yaşamının ayrılmaz bir parçasıdır. Bu tür kararların tümü, genellikle tercihlere, deneyimlere ve karar vericinin elindeki diğer verilere dayalı olarak bireysel karar seçeneklerinin değerlendirilmesine dayalı olarak alınır [1]. Çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri, birbiriyle çelişen birden fazla kritere sahip olan alternatiflerin değerlendirildiği senaryolarda karar almaya yardımcı olan matematiksel ve mantıksal modeller olarak ifade edilebilir. En bilinen ÇKKV yöntemleri Saaty'in geliştirdiği Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)'dir. Daha sonra birçok yöntem geliştirilmiştir ve geliştirilmeye devam etmektedir. Bu yöntemler tedarikçi seçimi, personel seçimi, proje değerlendirme, enerji kaynağı değerlendirme gibi birçok konularda uygulanmıştır.

Zadeh tarafından ortaya atılan bulanık küme teorisindeki belirsizlik, ÇKKV meraklıları tarafından da kabul edilmiştir. ÇKKV ve bulanık küme teorisinin birleşimi, daha sonra Bulanık ÇKKV olarak bilinen yeni bir karar teorisini ortaya çıkarmıştır [2]. İlk geliştirilen ÇKKV yöntemlerinde analiz edilen bilgiler kesin yargılar içermektedir. Fakat gerçek hayatta kesin olmayan öznel bilgilerin karar süreçleri de olabilmektedir. Bu durumda klasik ÇKKV yöntemlerinin yerine bulanık küme teorisine dayalı yöntemler geliştirilmiştir. Bulanık çok kriterli

* Sorumlu yazar: murat.yesilkaya@gop.edu.tr Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-4440-1311

karar verme yöntemleri, klasik ÇKKV yöntemlerinin bulanık küme teorisinin dahil edilmiş versiyonudur. Bulanık ÇKKV yöntemleri eksik veya belirsiz karar verme süreçlerinde kullanılabilir [4].

Son yıllarda hem klasik yöntemleri hem de bulanık mantık teorisini dikkate alan birçok ÇKKV yöntemi ortaya atılmıştır. Bu yöntemlerin farklarını, üstünlüklerini veya eksikliklerini karşılaştırmak istediğimizde hangi ÇKKV yönteminin kullanılması gerektiğine dair bazı tartışmalar olsa da net bir fikir yoktur. Yöntemler arasında benzerlikleri veya farklılıkları anlayabilmek için bazı karşılaştırmalı analizler yapılmıştır [4]. Farklı ÇKKV teknikleri, farklı seviyelerde hesaplama yoğunluğu gerektirir ve farklı çıktılar üretebilir; dolayısıyla uygun bir tekniğin seçilmesi, önerilen kararın kalitesini ve bu kararı elde etmek için gereken çabayı büyük ölçüde belirler [5].

Çok sayıda ÇKKV yöntemine rağmen, hiçbir yöntemin mükemmel olmadığı ve her karar verme durumunda kullanıma veya her karar probleminin çözümüne uygun olmayabilir. Bu nedenle farklı ÇKKV yöntemlerin kullanılması farklı karar önerilerine yol açabilir [6]. Eğer farklı ÇKKV yöntemler çelişkili sonuçlara ulaşıyorsa, o zaman her birinin seçiminin doğruluğu sorgulanmalıdır. Böyle bir durumda, verilen karar problemine uygun bir yönteminin seçimi önemli bir araştırma konusu haline gelir. Çünkü probleme uygun olarak seçilmiş yöntem karar vericinin tercihlerini yansıtan doğru bir çözüm sunmaktadır [7,8].

Güncel literatürde ÇKKV yöntemlerini gerçek hayatta tedarik zinciri yönetimi [9,10], performans değerlendirme [11], sağlık yönetimi [12,13], proje değerlendirme [14], hedef pazar seçimi [15], kuruluş yeri seçimi [16], sürdürülebilir yönetim [17] gibi birçok karar verme probleminin çözümünde kullanılmaktadır. Bu bölümde ÇKKV yöntemlerini karşılaştırmalı analizini yapan çalışmaların bir literatürü sunuyoruz. Tablo 1'de literatürdeki çalışmalarda kullanılan ÇKKV yöntemleri, uygulama alanları ve karşılaştırmada kullanılan analizler sunulmuştur.

Farklı uygulama alanında yöntemleri kapsamlı karşılaştıran çalışmalar şu şekildedir; Chang [18] bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (Fuzzy Analytic Hierarchy Process - F-AHP) üzerinde genişletme analizi yönteminin uygulanmasını yapmıştır. Çalışmada ikili karşılaştırma ölçeği için üçgensel bulanık sayıların kullanılmıştır. Ayrıca F-AHP yöntemin hesaplama karmaşıklığı da analiz edilmiştir. Junior, vd. [20] tedarikçi seçim kararı için F-AHP ve Bulanık İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralama Tekniği (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution – Bulanık TOPSIS- F-TOPSIS) yöntemlerinin karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Karşılaştırma analizlerinde; alternatiflerin veya kriterlerin değişikliğine uygunluk, karar sürecinde çeviklik, işlem karmaşıklığı, grup karar verme sürecini destekleme yeterliliği faktörlerine dayalı olarak yapılmıştır. Çalışma otomotiv üretim zincirinde yer alan bir firmanın tedarikçi seçiminde uygulanmıştır. Sonuçlar, her iki yöntemin de tedarikçi seçimi sorununda kullanılacağını göstermiştir. Fakat karşılaştırmalı analiz sonuçları, alternatiflerin ve kriterlerin değişimi, çeviklik, kriter sayısı ve alternatif tedarikçiler açısından F-TOPSIS yönteminin tedarikçi seçim problemine daha uygun olduğunu göstermiştir. Sabzi, vd. [5] bulanık SAW, AHP, TOPSIS, ELECTRE ve Çok Kriterli Optimizasyon ve Uzlaşma Çözümü (Visekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje- VIKOR) tekniğinin performanslarını araştırmış ve istatistiksel olarak karşılaştırmıştır. SAW ve TOPSIS istatistiksel olarak benzer performanslara elde edilmiştir. ELECTRE, alternatifler arasında tam ve sıralı sıralamalar sağlama konusunda dezavantaja sahiptir. VIKOR, en yakın alternatifi ortaya koymada güçlü bir teknik olmasına rağmen bazı olumsuzluklar vardır. Ceballos, vd., [4] TOPSIS, VIKOR ve Multi-MOORA ÇKKV yöntemlerini karşılaştırdı. Sonuçlar TOPSIS ve multi-MOORA tarafından oluşturulan sıralamalar birbirine çok benzerken, farklı VIKOR varyantları tarafından oluşturulan sıralamalar büyük bir değişkenlik göstermiştir. Dey, vd [22] depo yeri seçimi için SAW, MOORA, TOPSIS, VIKOR, ELECTRE II, COPRAS, PROMETHEE yöntemlerini karşılaştırmıştır. Banaeian, vd., [23] bulanık küme teorisinin TOPSIS, VIKOR ve GRA yöntemlerine dahil edilmesiyle tedarikçi seçim alanına katkı sağlamıştır. Yöntemler tarım-gıda endüstrisindeki gerçek bir şirket için yeşil tedarikçi değerlendirme ve seçim sürecinde uygulanmıştır. Karşılaştırmalı analiz, üç bulanık yöntemin aynı tedarikçi sıralamalarına ulaştığını, ancak bulanık GRA'nın aynı sonuçları üretmek için daha az hesaplama karmaşıklığı gerektirdiğini göstermiştir. Alkahtani, vd. [24] tedarikçi seçim problemi için AHP, F-AHP ve F-TOPSIS yöntemlerinin karşılaştırmalı analizini yapmıştır. Değerlendirme faktörleri karar sürecindeki çeviklik, hesaplama karmaşıklığı, alternatiflerin veya kriterlerin değişikliğine uygunluk ve grup karar verme sürecini destekleme yeterliliği olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, hesaplama karmaşıklığı açısından AHP, F-TOPSIS ve F-AHP'den daha iyi performans göstermektedir. F-TOPSIS yaklaşımı, karar sürecindeki çeviklik, kriter ve alternatif tedarikçi sayısı ve grup kararını destekleme yeterliliği açısından daha uygun bulunmuştur.

Rashidi ve Cullinane [25] İsveç'teki bir firma için tedarikçi seçiminde bulanık veri zarflama analizi (F-DEA) ve F-TOPSIS yöntemlerini karşılaştırdı. Sonuçlar TOPSIS'in hem hesaplama karmaşıklığı hem de tedarikçi sayısındaki değişikliklere duyarlılık açısından DEA'dan daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Ghaleb, vd. [26] üretim süreci planlama için TOPSIS, AHP ve VIKOR yöntemlerini karşılaştırmıştır. Karşılaştırmalar şu faktörlere bağlı olarak yapılmıştır: alternatif süreç ve kriterlerin sayısı, karar verme süreci boyunca çeviklik, hesaplama karmaşıklığı, grup kararını destekleme yeterliliği ve bir kriterin eklenmesi veya çıkarılmasıdır. Sonuçlar, hesaplama karmaşıklığı açısından VIKOR yöntemi TOPSIS ve AHP'den daha iyi

performans göstermiştir. Ayrıca VIKOR ve TOPSIS yöntemleri karar verme sürecinde çeviklik için üretim süreçlerinin seçimi, alternatif süreç ve kriterlerin sayısı, grup kararını destekleme yeterliliği, bir kriterin eklenmesi veya çıkarılması açısından daha uygun bulunmuştur. Sałabun, vd. [1] çalışmasında TOPSIS, VIKOR, COPRAS, PROMETHEE yöntemlerini kapsamlı olarak karşılaştırmıştır. Youssef [27] bulut sağlayıcı seçimi için AHP, TOPSIS, BWM yöntemleri kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, TOPSIS, BWM yönteminin hesaplama karmaşıklığı ve tutarlılık açısından AHP'den daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Kizielewicz, vd. [31] F-TOPSIS, F-VIKOR, F-WASPAS ve F-MOORA tekniklerini kullanarak konut seçimi problemine bir çözüm önermiştir. Sıralama sonuçları korelasyon katsayıları yöntemleri (Spearman katsayısı ve Sıra benzerlik katsayısı) ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda yöntemler benzer sonuçlar üretmiştir. Varghese ve Karande [32] endüstriyel malzeme seçimi için AHP ile yeni bir yöntem olan MARCOS yöntemini bir arada kullanan hibrit bir yöntem önerdi. Bu hibrit yöntemin sonuçlarını TOPSIS ve VIKOR yöntemi sonuçları ile karşılaştırdı.

Tablo 1. ÇKKV yöntemlerini karşılaştıran çalışmalar.

Yazar	Kullanılan Yöntemler	Uygulama	Karşılaştırma				
			Klasik Sıralama	Korelasyon Katsayısı	İşlem Karmaşıklığı	Alternatif değişikliği	Kriter değişikliği
Chang [18]	F-AHP	Personel seçimi			*		
Yu, vd. [19]	AHP, F-TOPSIS	e-ticaret					
Junior, vd. [20]	F-AHP, F-TOPSIS	Tedarikçi seçimi	*		*	*	*
Ceballos, vd., [4]	TOPSIS, VIKOR, Multi-MOORA ·	Test verisi	*	*			
Büyüközkan ve Güleryüz [21]	F-AHP, F-TOPSIS	Web sitesi değerlendirme	*				
Sabzi, vd. [5]	SAW, AHP, VIKOR, TOPSIS, ELECTRE	Test verisi	*	*			
Dey, vd. [22]	SAW, MOORA, TOPSIS, VIKOR, ELECTRE II, COPRAS, PROMETHEE	Depo yeri seçimi	*		*	*	
Banaeian, vd., [23]	F-TOPSIS, F-VIKOR, F-GRA	Tedarikçi seçimi	*		*		
Alkahtani, vd. [24]	F-AHP, F-TOPSIS	Tedarikçi seçimi	*		*		
Rashidi ve Cullinane [25]	F-TOPSIS, D-DEA	Tedarikçi seçimi	*	*	*	*	
Ghaleb, vd. [26]	AHP, TOPSIS ve VIKOR	Üretim süreci seçimi	*		*	*	*
Youssef [27]	AHP, TOPSIS, BWM	Bulut sağlayıcı seçimi	*		*		
Sałabun, vd. [1]	TOPSIS, VIKOR, COPRAS, PROMETHEE	Test verisi	*	*			
Baczkiewicz, vd. [28]	TOPSIS-COMET, COCOSO, EDAS, MAIRCA ve MABAC	e-ticaret kararı	*	*			
Kropivšek, vd. [29]	AHP, TOPSIS	Web sitesi değerlendirme	*				
Yu, vd. [19]	AHP, TOPSIS	Web sitesi değerlendirme	*				
Pramanik, vd. [30]	EDAS, ARAS, MABAC, MARCOS, COPRAS	Kaynak seçimi	*	*	*		
Kizielewicz, vd. [31]	F-TOPSIS, F-VIKOR, F-WASPAS ve F-MOORA	Konut seçimi	*	*			
Varghese ve Karande [32]	AHP, MARCOS, TOPSIS, VIKOR	Malzeme seçimi	*			*	
Bu çalışma	TOPSIS, VIKOR, F-TOPSIS, F-VIKOR	Web sitesi değerlendirme	*	*	*	*	

Ayrıca literatürde web sitelerini değerlendiren çalışmalar olsa da bu çalışmalar sadece klasik sıralama yöntemi ile karşılaştırma yapmıştır. Yu, vd. [19] e-ticaret web sitelerinin iş birliğini AHP, F-TOPSIS yöntemi ile

değerlendirmiştir. Değerlendirmede kullanılan kriterler, ürün, tasarım, teknoloji, servis kalitesi ve lojistik hizmeti olarak belirlenmiştir. Büyüközkan ve Güleryüz [21] lojistik firmalarının web sitelerinin kalite performanslarının değerlendirmesini F-AHP ve F-TOPSIS yöntemi ile yapmıştır. Web sitelerini değerlendirmek için kriterler ise fiziksel yapı, karşılık verebilme, güvenilirlik, bilgi kalitesi, güvence ve empati olarak belirlenmiştir. Türk lojistik firmaları için uygulama yapılmıştır. Kropivšek, vd. [29] Sloven ahşap şirketlerinin web sitelerinin AHP ve TOPSIS yöntemleri değerlendirmiştir. Nihai web sitesi değerlendirmesi için Web Sitesi Kalite Endeksi geliştirilmiştir. Web sitelerini değerlendirmek için sistem kalitesi, bilgi kalitesi (içerik), hizmet kalitesi, tasarım ve kullanım olmak üzere beş ana kriter ve toplam 36 kriter ile incelenmiştir. Baczkiewicz, vd. [28] TOPSIS-COMET, COCOSO, EDAS, MAIRCA ve MABAC çok ölçütlü karar verme yöntemleri ile e-ticaret siteleri ve web siteleri seçimi için tüketici karar destek sistemi geliştirilmiştir. Korelasyon katsayısı duyarlılık analizi ile sıralama sonuçlarının benzer olduğu görülmüştür.

ÇKKV, kolaylığı ve esnekliği nedeniyle birçok gerçek hayat problemine uygulanmakta ve bu yöntemlerin farklı versiyonları geliştirilmektedir. Bilindiği üzere, bu yöntemlerin hiçbiri mükemmel ya da kesin kararlar ve sonuçlar sağlamamaktadır. Literatürdeki çalışmalar genelde bir veya birkaç ÇKKV yöntemini seçip uygulamakta ve sonuçları analiz etmektedir. Ancak, bu yöntemleri kapsamlı şekilde karşılaştıran çalışmalar azdır (Tablo 1). Fakat bu yöntemlerin etkinliğini ve performansını analiz etmek için farklı boyutlarda karşılaştırılması önemlidir. Ayrıca spesifik uygulama alanımız olarak web sitelerinin değerlendirmesinde kullanılan çeşitli ÇKKV yöntemlerini kapsamlı şekilde karşılaştıran çalışma literatürde bulunmamaktadır. Web sitelerini değerlendiren çalışmalar olsa da bu çalışmalar genelde klasik sıralama yöntemi ile karşılaştırma yapmıştır. Bilgimiz dahilinde pandeminin getirdiği değişiklikleri değerlendirme kriterlerine dahil eden çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada COVID-19 sonrası değişimlerle mobilya işletmelerinin web siteleri bulanık ve bulanık olmayan çok kriterli karar vermek teknikleri ile kapsamlı karşılaştırılmıştır. Bu yöntemlerden AHP, TOPSIS, VIKOR, Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR yöntemlerini kullanarak sonuçlar ve yöntemler karşılaştırılmıştır. İlk olarak AHP yönteminden kullanılan kriterlerin ağırlıklarını hesaplanmıştır. Daha sonra yöntemlerden elde edilen sonuçlara dayanarak web sitelerinin sıralaması yapılmış ve yöntemler kapsamlı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Önerilen yaklaşımın temel avantajları şunlardır: (1) karmaşık bir web sitesi seçimine uygulanabilir; (2) farklı seçim yaklaşımlarını değerlendirmek için genel karşılaştırmalı analiz sağlar; (3) karşılaştırmalı analizde sıralamalardaki farklılık için ilişki testi, hesaplamada işlem karmaşıklığı ve bir alternatifin eklenmesi veya çıkarılması faktörleri dikkate alır. Bu makalede aşağıdaki araştırma sorularını ele almayı hedefliyoruz.

1) ÇKKV yöntemlerinin karşılaştırması için hangi analizler yapılır?
2) Bulanık ve bulanık olmayan ÇKKV yöntemlerinin kapsamlı karşılaştırılmasında hangisi/hangileri daha iyi performans gösterir?
3) Mobilya işletmelerinin web siteleri için önemli olan kriterler hangileridir?
4) COVID-19 web sitelerinde ne gibi değişimler yarattı?
5) ÇKKV yöntemlerine göre Türkiye'de faaliyet gösteren mobilya işletmelerin hangilerinin web sitesi daha yüksek performansını gösterir?

Bu makale, yukarıda belirtilen sorular çerçevesinde ÇKKV kapsamlı karşılaştırmakta ve mobilya işletmelerinin web sitelerinin durumunu analiz etmektedir. Bu çalışmanın katkıları iki ana noktada toplanmaktadır. Birincisi, ÇKKV yöntemlerini gerçek hayat problemi üzerinde klasik sonuçların sıralama sonuçları, ilişki testi, alternatif sayısındaki değişikliğe uygunluk ve işlem karmaşıklığı ile kapsamlı karşılaştırmaktır. İkincisi, bu yöntemleri Türkiye'de ekonomik katma değeri büyük olan mobilya sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin web sitelerini değerlendirmek ve önemli olan kriterleri belirlemektir. Ayrıca, standart web sitesi değerlendirme kriterlilerine ek olarak COVID-19 pandemisi sonrası değişimleri yansıtmak için online alışveriş, COVID-19 güvenli üretim belgesi, canlı müşteri hizmetleri görüşme, 360 sanal mağaza gibi yeni kriterler ekleyerek değerlendirmelere derinlik katılmıştır. Bu analizlerle, karar vericiler için mobilya ticaret stratejilerinin belirlenmesinde değerli bilgiler sağlanmaktadır.

Bu makale beş bölüm halinde yapılandırılmıştır. Giriş bölümünde genel bilgiler verildikten sonra ilgili literatüre bir bakış sunmaktadır. Bölüm 2, çalışmada kullanılan ÇKKV yöntemlerini tanıtmakta ve bu yöntemlerin nasıl uygulandığını açıklamaktadır. Bölüm 3, mobilya işletmelerinin web siteleri uygulamasında ÇKKV yöntemlerinin hesaplama sonuçlarını sunulmaktadır. Bölüm 5'de ise ÇKKV kapsamlı karşılaştırması yapılmaktadır. Son bölümde sonuçlar ve gelecekteki çalışmalar tartışılmaktadır.

2. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) Yöntemleri

ÇKKV yöntemleri herhangi bir konuda karar vermek için birden çok kriterin karar sürecine dahil olduğu durumda en uygunu seçmek veya sıralamak için kullanılan matematiksel ve mantıksal temelli bir yaklaşımdır. Birçok farklı problemin çözümünde kullanılmaktadır [11,33,34]. Birçok ÇKKV yönteminin temeli AHP yöntemine dayanır. AHP yöntemi karar verme teorisinde en yaygın kullanılan araçlardan biridir. AHP, 1970'li yıllarda matematikçi Saaty tarafından ortaya atılan matematik temelli bir yaklaşımdır [35,36]. Bu yöntemin adımları [37,38] incelenebilir. Yöntemin amacı, birden fazla kriter ve farklı alternatiflerden oluşan hiyerarşik bir ağ yapısı ile uygun çözümü araştırmaktır. Bu çalışmada kriterlerin ağırlıklarını belirlemek için klasik AHP yöntemini kullanılmıştır. Literatürde web sitelerinin değerlendirilmesinde kriterlerin belirgin [19, 29] ve birbirinden bağımsız [19,21,39] olmasından dolayı klasik AHP yöntemini tercih edilmiştir. Fakat web siteleri yani alternatifler ise belirsizlikler içerebilmektedir. Bu yüzden kriterlerin ağırlıklarını belirlerken klasik AHP yöntemleri, alternatifleri değerlendirirken hem klasik TOPSIS ve VIKOR hem de Bulanık TOPSIS (F-TOPSIS) ve Bulanık VIKOR (F-VIKOR) yöntemleri kullanılmıştır.

TOPSIS yöntemi basit hesaplama adımları, matematiksel temelleri ve anlaşılması kolay olması nedeniyle popülerlik kazanmıştır. Bu yöntem, alternatifleri pozitif ve negatif ideal çözümler arasındaki mesafeye göre sıralar [40]. VIKOR yöntemi ise karmaşık sistemlerin çok kriterli optimizasyonu için geliştirilmiştir. Bu yöntem, bir dizi alternatif arasından sıralama ve seçim yapmaya odaklanır. Karar vericilerin nihai bir çözüme ulaşmalarına yardımcı olabilecek, çelişkili kriterleri olan problemler için bir uzlaşma çözümü belirler [41]. Her iki yöntem de ideale yakınlığı temsil eden bir toplama fonksiyonuna dayanır. TOPSIS ve VIKOR yöntemleri birçok alana uygulanabilmeleri ve etkili sonuçlar verebilmektedir [42]. Bu yöntemler, hesaplama karmaşıklığı, karar sürecindeki çeviklik ve yeni kriter eklenmesi veya var olan kriterin kaldırılması gibi duyarlılık analizlerinde etkili sonuç vermelerinden dolayı seçilmiştir [26].

Ayrıca, bu çalışmanın temel motivasyonlarından biri de ÇKKV yöntemlerinin karşılaştırılmasıdır. Literatürde sıklıkla birlikte kullanılan bu yöntemlerin bulanık versiyonlarını karşılaştırmak ve farklarını ve yöntemlerin avantajlarını ortaya koymak literatüre önemli kazanım sağlayabilir. Bulanık küme teorisi, ÇKKV problemlerindeki belirsizliği modelleyebilmektedir. Bu yöntemlere bulanık küme teorisinin entegre edilmesiyle gerçek dünya problemlerine ekili çözüm sağlamaktadır [43]. Bu çalışmadaki web sitesi alternatiflerindeki belirsizliği modelleyebilmek ve bulanık ortamla bulanık olmayan ortam arasındaki farkları gözlemleyebilmek için TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinin bulanık versiyonlarını da kullanılmıştır. Bulanık TOPSIS hem pozitif-ideal hem de negatif-ideal kavramlarını dikkate alması, iyi hesaplama verimliliğine sahip olması ve basit bir matematiksel biçimde ölçme yeteneğine sahip olması nedeniyle avantaj sağlamaktadır. Bulanık VIKOR ise çakışan ölçütlerin varlığında bir dizi alternatif arasından sıralama ve seçime odaklanmaktadır [44].

2.1.TOPSIS Yöntemi

TOPSIS yöntemi en iyi bilinen ve ideal çözümü bulan ÇKKV yöntemlerinden biridir [45]. Belirlenen alternatifler arasından en iyiden kötüye doğru bir sıralama yapar [46]. TOPSIS yöntemi şu adımlar ile hesaplanır.
Adım 1: Karar problemi için kriter ve alternatifler uzman görüşü veya literatür taraması belirlenir.
Adım 2: Bu adımda problemin karar matrisi Denklem (1)'deki A_{nk} oluşturulur. y_{nk} , burada n. alternatif, k. kriter değerini göstermektedir.

$$A_{nk} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1K} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{N1} & y_{N2} & \cdots & y_{NK} \end{bmatrix} \tag{1}$$

Adım 3: Denklem (2)'deki gibi r_{nk} değeri hesaplanır ve standart karar matrisi R_{nk} elde edilir.

$$r_{nk} = \frac{y_{nk}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N} y_{nk}^2}} \quad , \quad R_{nk} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1K} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{N1} & r_{N2} & \cdots & r_{NK} \end{bmatrix} \tag{2}$$

Adım 4: Bu adımda ağırlıklı standart karar matrisi V_{nk} oluşturulur. $V_{nk} = R_{nk}\, w_k$, burada w_k kriterlerin ağırlığını ifade eder.

Adım 5: Ağırlıklı standart karar matrisindeki vektörlerindeki en büyük değeler (v_k^+) ile en küçük değerler (v_k^-) belirlenir (Eğer fayda kriteri ise, maliyet kriteri olduğunda tam tersi geçerlidir.).

Adım 6: Pozitif ideal (S_n^+) ve negatif ideal (S_n^-) değerleri Denklem (3) ile hesaplanır.

$$S_n^+ = \sqrt{\sum_{k=1}^{K}(v_{nk} - v_k^+)^2} \quad , S_n^- = \sqrt{\sum_{k=1}^{K}(v_{nk} - v_k^-)^2} \tag{3}$$

Adım 7: Son adımda alternatiflerin sırası ve en uygun kararlar C_n^* belirlenir. Burada en büyük değere sahip C_n^* en iyi alternatiftir (Denklem (4)).

$$C_n^* = \frac{S_n^-}{S_n^- + S_n^+}, \quad 0 \le C_n^* \le 1 \tag{4}$$

2.2. VIKOR Yöntemi

VIKOR yöntemi de bilinen klasik ÇKKV yöntemlerinden biridir. Bu metot Opricovic ve Tzeng, [42] tarafından ortaya atılmıştır. VIKOR yöntemi şu şekilde hesaplanır [47];
Adım 1: A_{nk} karar matrisinden (Denklem 1) her bir kriter maksimum değerler ($f_k^* = max_k f_{nk}$) ve minimum değerler ($f_k^- = min_k\, f_{nk}$) belirlenir. Daha sonra V_{nk} karar matrisi Denklem (5) ile oluşturulur.

$$V_{nk} = w_k\,(f_k^* - f_{nk})/(f_k^* - f_k^-) \tag{5}$$

Adım 2: $T_n ve\ U_n$ değerleri Denklem (6) ile hesaplanır.

$$T_n = \sum_{k=1}^{K} V_{nk}\ , \quad U_n = \max_n\{V_{nk}\} \tag{6}$$

Adım 3: Bu adımda Q_k karar vektörü Denklem (7) ile belirlenir (v= 0,5).

$$Q_n = \frac{v(T_n - T^*)}{(T^- - T^*)} + \frac{(1-v)(U_n - U^*)}{(U^- - U^*)}, \quad 0 \le Q_n \le 1 \tag{7}$$

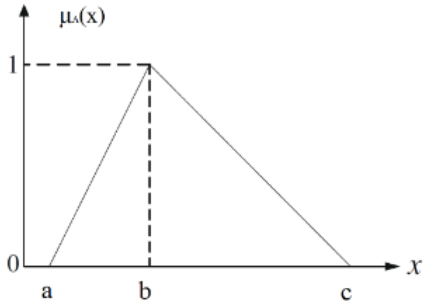
Burada $T^* = max_n\{T_n\},\ \ T^- = min_n\{T_n\},\ \ U^* = max_n\{U_n\},\ \ U^- = min_n\{U_n\}$ ile belirlenir.

Adım 4: Son adımda alternatiflerin sırası ve en uygun kararlar $Q_n$belirlenir. Burada en küçük değere sahip Q_n en iyi alternatiftir. Bu adımda ayrıca testin geçerliliği test edilir [48].

2.3. Bulanık Küme Teorisi

Bulanık küme teorisi ilk olarak Zadeh tarafından ortaya atılmıştır. Klasik yaklaşımlara göre bulanık mantıkta kesin sınırlamaların olmamasıdır. Klasik yöntemlerde üyelik değerleri {0,1} sınırlı iki değer varken, bulanık mantıkta ise üyelik değerleri [0,1] aralığında herhangi bir değer alabilir [49]. Dolaysıyla gerçek hayattaki belirsizlik içeren problemler için daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Bu çalışmada üyelik fonksiyonu (membership function) olarak üçgen bulanık sayılar (triangular fuzzy number) kullanılmıştır. Şekil 1'de üçgen üyelik fonksiyonu ($\mu_A(x)$) ve üçgen bulanık sayılar (a, b, c) gösterilmiştir. Burada a ve c bulanık sayının alt ve üst sınır değerleri olup c ise orta değerini ifade eder. Üyelik fonksiyonu Denklem (8)'deki gibi ifade edilir [50];

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \dfrac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ \dfrac{x-c}{b-c} & b < x < c \\ 0 & x < c \end{cases} \tag{8}$$



Şekil 1. Üçgensel bulanık fonksiyon.

Saaty tanımladığı 5 noktalı Likert ölçeğine karşılık gelen dilsel değişkenler ve bu değerlere karşılık gelen bulanık üçgen sayılar Tablo 2'de verilmiştir. Bu çalışmada Tablo 2'deki değerler kullanılmıştır.

Tablo 2. Dilsel değişkenler ve bulanık sayı değerleri [12].

Dilsel karşılığı (y_{nk})	Saaty değerleri	Bulanık Üçgen Sayılar $[a_{nk}, b_{nk}, c_{nk}]$
Eşit önem	1	[1,1,1]
Orta derece	3	[2,3,4]
Oldukça önem	5	[4,5,6]
Kesinlikle önemli	7	[6,7,8]
Son derece önemli	9	[9,9,9]
Ara değerler	2	[1,2,3]
	4	[3,4,5]
	6	[5,6,7]
	8	[7,8,9]

2.4. Bulanık TOPSIS Yöntemi

Bulanık TOPSIS (F-TOPSIS) Chen [51] tarafından ortaya atılan ilk bulanık ÇKKV yöntemlerinden biridir. Yöntem bulanık pozitif ideal ve bulanık negatif ideal çözümleri için en iyi alternatifleri belirleyerek bir sıralama yapar. Bu metodun temeli bulanık ortamda karar vericilerin dilsel olarak ifade ettiği verilerin kullanılmasına dayanır. Yöntemin adımları şu şekildedir [12,50];

Adım 1: Tablo 2'deki verilen ölçekler ve üçgen sayılar kullanılarak alternatiflerin dilsel karşılıkları için bulanık karar matrisi Denklem (9)'daki gibi geliştirilir.

$$\tilde{A}_{nk} = \begin{bmatrix} [a_{11}, b_{11}, c_{11}] & [a_{12}, b_{12}, c_{12}] & \dots & [a_{1K}, b_{1K}, c_{1K}] \\ [a_{21}, b_{21}, c_{21}] & [a_{22}, b_{22}, c_{22}] & \dots & [a_{2K}, b_{2K}, c_{2K}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [a_{N1}, b_{N1}, c_{N1}] & [a_{N2}, b_{N2}, c_{N2}] & \cdots & [a_{NK}, b_{NK}, c_{NK}] \end{bmatrix} \quad (9)$$

$y_{nk} = [a_{nk}, b_{nk}, c_{nk}]$, $y_{kn} = [1/a_{nk}, 1/b_{nk}, 1/c_{nk}]$ üçgen bulanık sayılar için olarak tanımlanır.

Adım 2: Bulanık karar matrisi Denklem (10) kullanılarak normalize edilir ve R matrisi ile gösterilir. Eğer,

$$\tilde{r}_{nk} = \left[\frac{a_{nk}}{c'_{nk}}, \frac{b_{nk}}{c'_{nk}}, \frac{c_{nk}}{c'_{nk}}\right], c'_{nk} = \max(c_{nk}) \quad (10)$$

ise $\tilde{R}_{nk} = [\tilde{r}_{nk}]_{NK}$. Burada kriterin fayda kriteri olduğu varsayılıştır. Eğer maliyet kriteri olsaydı Denklem (10)'da max yerine min olacaktır.

Adım 3: Daha sonra $\tilde{R}_{nk}$ matrisi kriterlerin ağırlıkları vektörü w_k ile çarpılarak Denklem (11)'deki gibi $\tilde{V}_{nk}$ ağırlıklı standart karar matrisi elde edilir.

$$\tilde{V}_{nk} = [\tilde{v}_{nk}]_{NK}, \quad \tilde{v}_{nk} = \tilde{r}_{nk}. \quad (11)$$

Adım 4: Bu adımda bulanık pozitif ideal ve bulanık negatif ideal çözümleri bulunur. $\tilde{V}_{nk}$ matrisinde bulunan değerlerin $(\tilde{v}_{nk})$sütunların en büyük değerleri ile $\tilde{v}_k^+$ vektörü, en küçük değerleri ile $\tilde{v}_k^-$ vektörü oluşturulur ($\tilde{v}_{nk} = [\tilde{a}_{nk}, \tilde{b}_{nk}, \tilde{c}_{nk}]$).
Adım 5: Maksimum ve minimum ideal noktaya olan uzaklık Denklem (12) ve (13)'te görülen formülle hesaplanır. Artık burada üçgen sayılar tek sayılara dönüşür.

$$\tilde{S}_n^+ = \sum_{k=1}^{K} \sqrt{\frac{1}{3}\left((\tilde{a}_{nk} - \tilde{v}_k^+)^2 + \left(\tilde{b}_{nk} - \tilde{v}_k^+\right)^2 + (\tilde{c}_{nk} - \tilde{v}_k^+)^2\right)} \tag{12}$$

$$\tilde{S}_n^- = \sum_{k=1}^{K} \sqrt{\frac{1}{3}\left((\tilde{a}_{nk} - \tilde{v}_k^-)^2 + \left(\tilde{b}_{nk} - \tilde{v}_k^-\right)^2 + (\tilde{c}_{nk} - \tilde{v}_k^-)^2\right)} \tag{13}$$

Adım 7: Son adımda (Denklem (14)) alternatiflerin sırası ve en uygun kararlar $\tilde{C}_n^*$ belirlenir. Burada maksimum değere sahip C_n^* en iyi alternatiftir.

$$\tilde{C}_n^* = \frac{\tilde{S}_n^-}{\tilde{S}_n^- + \tilde{S}_n^+}, \qquad 0 \le \tilde{C}_n^* \le 1 \tag{14}$$

2.5. Bulanık VIKOR

VIKOR yönteminin belirsizlik altındaki bir uzantısı olan bulanık VIKOR (F-VIKOR), alternatiflerin performans derecelendirmelerini kriterlere göre değerlendirmek ve kriter ağırlıklarındaki belirsizlik seviyelerini azaltmak için dilsel ifadeler kullanır. Yöntemin adımları şu şekildedir [9,48];
Adım 1: $\tilde{A}_{nk}$ karar matrisinden (Denklem 9) her bir kriter maksimum değerler ($\tilde{f}_k^* = max_k \tilde{f}_{nk}$) ve minimum değerler ($\tilde{f}_k^- = min_k\, \tilde{f}_{nk}$) belirlenir. Daha sonra V_{nk} karar matrisi Denklem (15) ile oluşturulur.

$$\tilde{V}_{nk} = w_k \left(\tilde{f}_k^* - \tilde{f}_{nk}\right) / \left(\tilde{f}_k^* - \tilde{f}_k^-\right) \tag{15}$$

Adım 2: Bir önceki adımda elde edilen bulanık ağırlıklandırılmış karar matrisi kullanılarak $\tilde{T}_n ve\ \tilde{U}_n$ değerleri Denklem (16) ile hesaplanır.

$$\tilde{T}_n = \sum_{k=1}^{K} \tilde{V}_{nk}\ , \qquad \tilde{U}_n = \max_n \{\tilde{V}_{nk}\} \tag{16}$$

Adım 3: Bu adımda $\tilde{Q}_k$ karar vektörü Denklem (17) ile belirlenir (v= 0,5).

$$\tilde{Q}_n = \frac{v\left(\tilde{T}_n - \tilde{T}^*\right)}{\left(\tilde{T}^- - \tilde{T}^*\right)} + \frac{(1-v)\left(\tilde{U}_n - \tilde{U}^*\right)}{\left(\tilde{U}^- - \tilde{U}^*\right)}, \qquad 0 \le \tilde{Q}_k \le 1 \tag{17}$$

Burada $\tilde{T}^* = max_n\{\tilde{T}_n\},\ \ \tilde{T}^- = min_n\{\tilde{T}_n\},\ \ \tilde{U}^* = max_n\{\tilde{U}_n\},\ \ \tilde{U}^- = min_n\{\tilde{U}_n\}$ ile belirlenir.

Bu adıma kadar elde edilen değerler üçgen bulanık sayılar olarak üçlüdür. Bu değerleri "En iyi bulanık olmayan performans değeri" yöntemi kullanarak durulaştırılır [49]. Eğer $\tilde{Q}_n = [\check{a}_n, \check{b}_n, \check{c}_n]$ matrisi ise Denklem (18) kullanılarak $\tilde{Q}_n$ değerleri durulaştırılır, yani üçlü sayıdan tekli sayıya dönüştürülür.

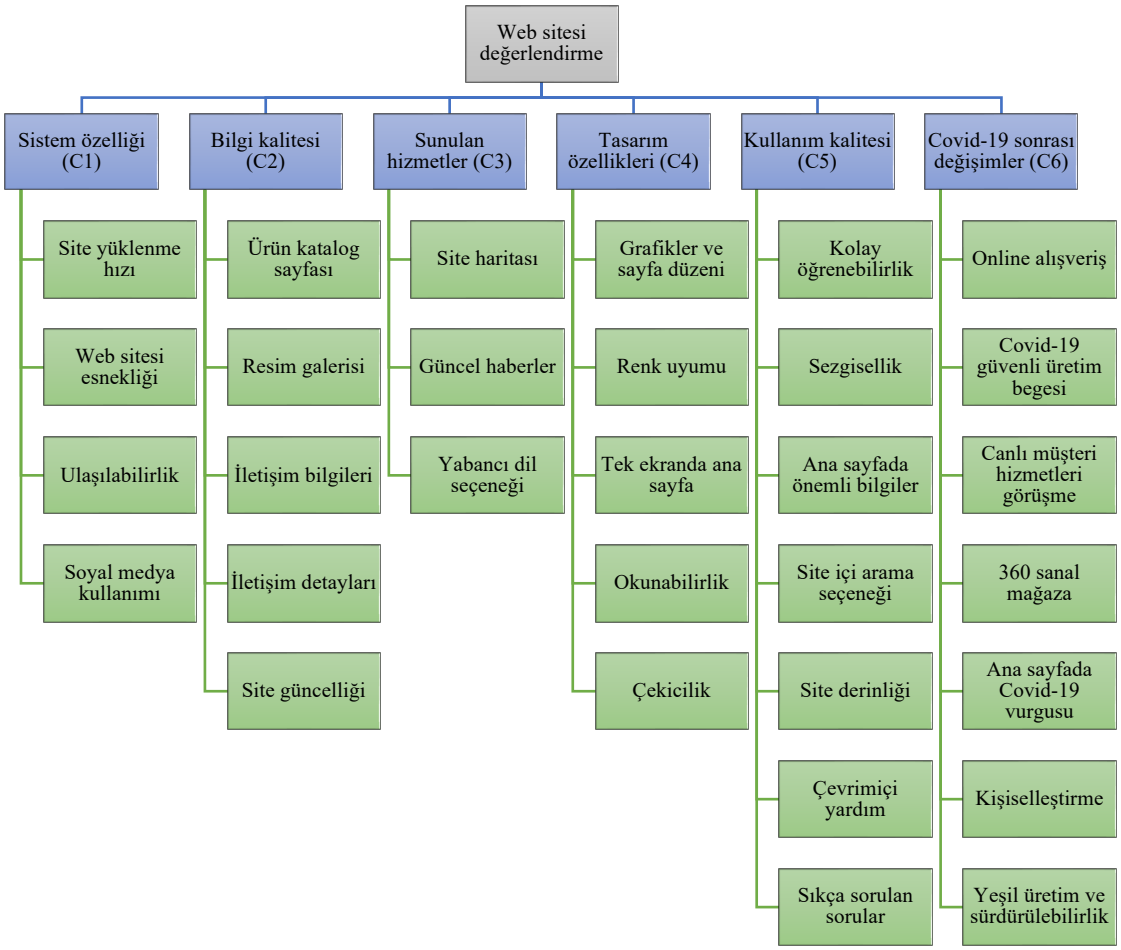
$$BestQ_n = \frac{(\check{c}_n - \check{a}_n) + (\check{b}_n - \check{a}_n)}{3} + \check{a}_n \tag{18}$$

Adım 4: son adımda durulaştırılarak hesaplanan $BestQ_n$belirlenir. Burada en küçük değere sahip $BestQ_n$ en iyi alternatiftir. Bu adımda ayrıca testin geçerliliği test edilir [42].

3. Uygulama: Mobilya İşletmelerinin Web Siteleri

Bu bölümde Türkiye'de üretim yapan mobilya işletmelerinin web siteleri ÇKKV yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Alternatifler oluştururken literatür taraması ve uzman görüşlerini başvurulmuştur. Bildiğimiz kadarıyla Türk Mobilya web sitelerini değerlendiren bir çalışma literatürde yoktur. Bu çalışmadaki kriterler [19,29,52-54] çalışmalarından derlenmiştir. Son yıllarda, COVID-19 salgınının bir sonucu olarak, şirketler faaliyetlerini giderek daha fazla internet ortamına kaydırıyor ve böylece çevrimiçi alışverişin büyümesini hızlandırıyor [29]. Bizde bu çalışmada COVID-19 sonrası web sitelerindeki değişimleri de yeni kriterler olarak analizimize dahil ettik.

Önerilen web sitesi değerlendirme için hiyerarşik yapı oluşturulmuş ve Şekil 2'de verilmiştir. Literatür bilgisine dayalı olarak altı ana kriterin olduğu alt kriterler toplam 31 alt kriterden karar yapısı oluşturulmuştur. Kriterler ve alt kriterler AHP kullanılarak ağırlıkları belirlenmiştir. Tablo 3 tüm kriter ve alt kriterlere ilişkin alternatiflerin değerlendirilmesi amacıyla Likert tipi veya bulanık üçgen sayılardan bir ölçek oluşturulmuştur. Kriterler ve alt kriterlerin kendilerine en uygun olan farklı ölçek aralığı vardır. Ayrıca kriterlerin detaylı özellikleri de Tablo 3'te sunulmaktadır. Örneğin, site yüklenme hızı alt kriteri için hızın 10 saniye üstü olduğunda 1 puan, 7-10 saniye arası için 3 puan, 4-7 saniye arası için 7 puan, 2-4 saniye arası için 7 puan ve 2 saniye altı için 9 puan olarak değerlendirilmiştir. Uygulama bölümünün sonuçları iki bölümden oluşur. İlk olarak kullanılan kriterlerin ağırlıklarını belirlemek için kullanılan AHP yönteminin sonuçları verilmiştir. Daha sonra ise TOPSIS ve VIKOR yöntemi hesaplanan alternatiflerin sıralama sonuçları verilmiştir. Problemde kullanılan hiyerarşik bir yapı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Karar probleminin hiyerarşik yapısı.

Tablo 3. Kriterler ve alt kriterlerin değerlendirmeleri [19,29,52-54].

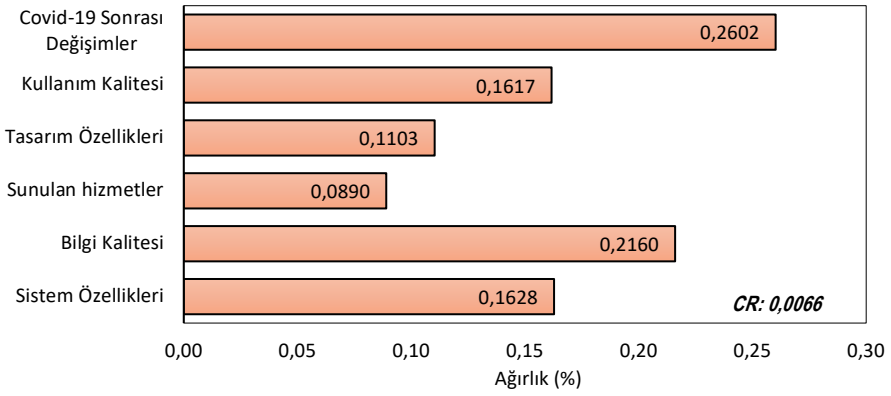
	Kriterler ve Özellikleri	**1 (1,1,1)**	**3 (2,3,4)**	**5 (4,5,6)**	**7 (6,7,8)**	**9 (9,9,9)**
Sistem Özelliği	Site yüklenme hızı	10 saniye üstü (Çok yavaş)	7-10 saniye arası (Yavaş)	4-7 saniye arası (Orta)	2-4 saniye arası (Hızlı)	2 saniye altı (Çok Hızlı)
	Web sitesi esnekliği	Sadece web sayfa	Web ve Mobil site basit	Web ve Mobil site gelişmiş		
	Ulaşılabilirlik	Ulaşılabilirlik 100%'den az	Her zaman ulaşılabilir			
	Sosyal medya kullanımı	1 sosyal medya ancak aktif değil	2 aktif olmayan veya 1 aktif sosyal medya	3 aktif olmayan veya 2 aktif sosyal medya	3 veya daha fazla aktif sosyal medya	
Bilgi Kalitesi	Ürün katalog sayfası	Yok	Basit resimler ve açıklamalar	Daha detaylı teknik özellikler ve açıklamalar	Ayrıntılı ürün kataloğu, pdf olarak okunabilir ve indirilebilir	Etkileşimli ürün kataloğu, daha gelişmiş özellikler
	Resim galerisi	Yok	Basit resim galerisi	Her resim ayrı ayrı tıklama	Kaydırılarak resim galerisi	
	İşletme bilgileri hakkında	Yok	İşletme adı, adres, vergi no	Hedefler, vizyonlar, +2	Geçmiş bilgiler+3	Daha detaylı bilgiler +4
	İletişim detayları	Yok	Sadece adres	Adres ve harita	Adres, harita, çalışma zamanı ve Bayiler	
	Site güncelliği	Güncel değil	1 yıldan önce güncellenmiş	Güncel son 1 ay		
Sunulan hizmetler	Site haritası	Yok	Var			
	Güncel haberler	Yok	Var			
	Yabancı dil seçeneği	Tüm site tek bir dilde (Türkçe)	Farklı dil seçeneği, Google çeviri ile	İki dil seçeneği web sayfası (Türkçe+ İngilizce vb.)	Üç veya daha fazla dil seçeneği web sayfası	
Tasarım Özellikleri	Grafikler ve sayfa düzeni	Klasik veya gereksiz süslemeler	Basit grafik kullanımı,	Yeni güncel tasarım ve işlevsel		
	Renk uyumu	Uygunsuz renkler	Renklerde pasiflik ve vurgu yok	Renk kombinasyonu uyumlu fakat bütünlük yok	Renk kombinasyonu uyumlu fakat bütünlük var ama yine de eksik hissi var	Renk uyumu çok iyi, sayfada bütünlük, planlama ve vurgu çok iyi
	Tek ekranda ana sayfa	Tek ekran değil	Tek ekran			
	Okunabilirlik	Zor okunabilirlik, metin boyutu	Kötü okunabilirlik, metin boyutu ve rengi uygun değil	Orta okunabilirlik, metin boyutu iyi ama yazı tipi kötü	İyi okunabilirlik, metin boyutu iyi ama yazı tipi iyi	Çok okunabilirlik, metin boyutu iyi ama yazı tipi iyi ve renk körleri için uygun
	Çekicilik	Yok	Az	İyi	Çok iyi	
Kullanım Kalitesi	Kolay öğrenebilirlik	Yavaş öğrenme	Hızlı öğrenme			
	Sezgisellik	Yok	Orta	İyi		
	Ana sayfada önemli bilgiler	Adres, sektörel bilgiler, en son haberlerden biri	Adres, sektörel bilgiler, en son haberlerden ikisi	Adres, sektörel bilgiler, en son haberlerden hepsi		
	Site içi arama seçeneği	Yok veya düzgün çalışmıyor	Basit arama seçeneği	Gelişmiş arama seçeneği		
	Site derinliği	En az 10 alt sayfa	10 alt sayfadan fazla			
	Çevrimiçi yardım	Yok	Var			
	Sıkça Sorulan Sorular	Yok	Var ama çok karmaşık	Var ve çok basit		
Covid-19 Sonrası Değişimler	Online alışveriş	Online alışveriş yapılmıyor.	Sadece sipariş talebi yapılabiliyor.	Çevrimiçi alışveriş, sipariş ödeme ve teslimat	İyi tasarlanmış çevrimiçi alışveriş, sipariş ödeme ve teslimat	
	Covid-19 Güvenli Üretim Belgesi	Web sitede yer almıyor	Web sitede yer alıyor.			
	Canlı Müşteri Hizmetleri Görüşme	Yok	Çok basit ara yüz ve çoğu zaman aktif değil	Gelişmiş ara yüz-teknik detaylar, kişiselleştirme ve çoğu zaman aktif		
	360 Sanal Mağaza	Yok	Çok basit ara yüz-basit animasyon	Gelişmiş ara yüz, gerçek mağaza ve kişiselleştirme, kullanımı kolay		
	Ana sayfada Covid-19 vurgusu	Yok	Çok basit	Var ama birkaç cümle veya küçük resim	Var detaylı açıklama/haberler ve uygulanan tedbir ve önlemler	
	Kişiselleştirme	Yok	Tasarım veya mimari açıdan kişiselleştirme			
	Yeşil Üretim ve sürdürülebilirlik vurgusu	Yok	Var			

3.1. AHP Yöntemi Sonuçları

Ana ve alt kriterlerin ağırlıkları bu bölümde hesaplanmıştır. AHP yönteminden elde edilen ana kriterlerin karşılaştırma matrisi Tablo 4'te ve ağırlıkları Şekil 3'te verilmiştir. Hesaplanan tutarlılık oranı (CR) 0,0066 olarak bulunmuştur. Ana kriterlerden en önemlileri Covid-19 sonrası değişimler (0,26), Bilgi kalitesi (0,22) ve sistem özellikleri (0,16)'dir. Ağırlığı en düşük ana kriter ise sunulan hizmetler (0,089) ve Tasarım özellikleri (0,11)'dir.

Tablo 4. Ana kriterlerin karşılaştırma matrisi.

Ana Kriterler	Sistem Özellikleri	Bilgi Kalitesi	Sunulan hizmetler	Tasarım Özellikleri	Kullanım Kalitesi	Covid-19 Sonrası Değişimler
Sistem Özellikleri	1,000	0,590	2,100	1,600	0,930	0,690
Bilgi Kalitesi	1,695	1,000	2,100	1,950	1,250	0,810
Sunulan hizmetler	0,476	0,476	1,000	0,800	0,500	0,380
Tasarım Özellikleri	0,625	0,513	1,250	1,000	0,870	0,350
Kullanım Kalitesi	1,075	0,800	2,000	1,149	1,000	0,620
Covid-19 Sonrası Değişimler	1,449	1,235	2,632	2,857	1,613	1,000

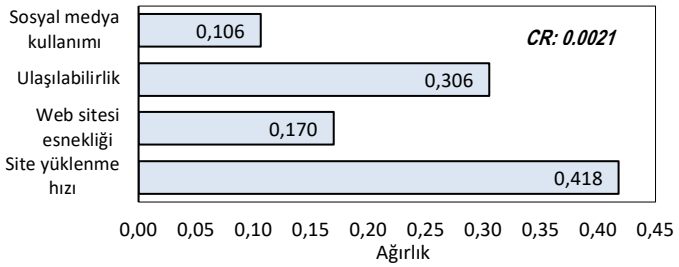


Şekil 3. Ana kriterlerin ağırlıkları.

Sistem kriterinin alt kriter karşılaştırma matrisi Tablo 5'te verilmiştir. AHP yöntemiyle ana faktörün ağırlıklarını hesapladıktan sonra, benzer adımlarla alt kriterlerin ağırlıkları hesaplamış ve Şekil 4'te verilmiştir. Sistem kriterinde, site yüklenme hızı (0,42) ile en yüksek ağırlıkları alırken, bunu sırasıyla ulaşılabilirlik (0,31), web sitesi esnekliği (0,17) ve sosyal medya kullanımı (0,11) takip etmiştir.

Tablo 5. Sistem kriterinin alt kriter karşılaştırma matrisi.

Alt kriterler	Site yüklenme hızı	Web sitesi esnekliği	Ulaşılabilirlik	Sosyal medya kullanımı
Site yüklenme hızı	1,000	2,500	1,400	3,800
Web sitesi esnekliği	0,400	1,000	0,510	1,760
Ulaşılabilirlik	0,714	1,961	1,000	2,700
Sosyal medya kullanımı	0,263	0,568	0,370	1,000

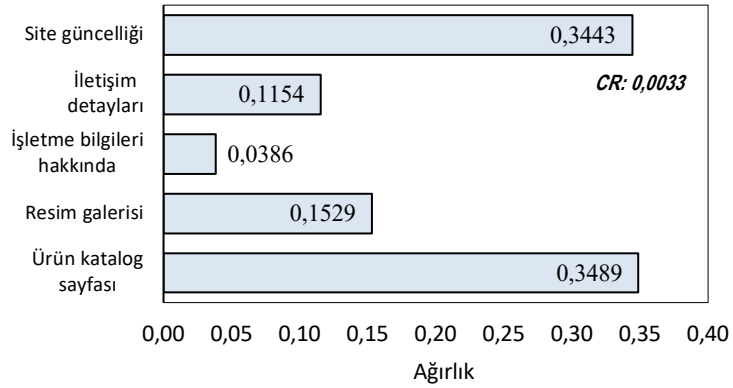


Şekil 4. Sistem kriterinin alt kriter ağırlıkları.

Bilgi kalitesi kriterinin alt kriter karşılaştırma matrisi Tablo 6'da verilmiştir. Şekil 5, Bilgi kalitesi kriterine göre alt kriterlerin ağırlıklarını göstermektedir. Bu ana kriterin yaklaşık %70'ini alt kriterlerden Site güncelliği (0,34) ve Ürün katalog sayfası (0,35) oluşturmaktadır.

Tablo 6. Bilgi kalitesi kriterinin alt kriter karşılaştırma matrisi.

Alt kriterler	Ürün katalog sayfası	Resim galerisi	İşletme bilgileri hakkında	İletişim detayları	Site güncelliği
Ürün katalog sayfası	1,000	2,300	8,500	3,400	0,960
Resim galerisi	0,435	1,000	3,710	1,520	0,420
İşletme bilgileri hakkında	0,118	0,270	1,000	0,300	0,110
İletişim detayları	0,294	0,658	3,333	1,000	0,380
Site güncelliği	1,042	2,381	9,091	2,632	1,000

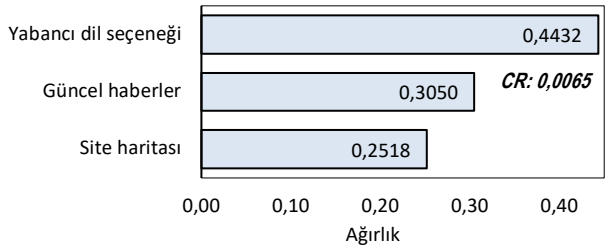


Şekil 5. Bilgi kalitesi kriterinin alt kriter ağırlıkları.

Sunulan hizmetler kriterinin alt kriter karşılaştırma matrisi Tablo 7'de verilmiştir. Şekil 6, sunulan hizmetler kriterine göre alt kriterlerin ağırlıklarını göstermektedir. Bu ana kriter yabancı dil seçeneği (0,44), güncel haberler (0,31) ve site haritası (0,25) olmak üzere üç alt kriterden oluşturmaktadır.

Tablo 7. Sunulan hizmetler kriterinin alt kriter karşılaştırma matrisi.

Alt kriterler	Site haritası	Güncel haberler	Çok dilli site
Site haritası	1,000	0,900	0,520
Güncel haberler	1,111	1,000	0,750
Çok dilli site	1,923	1,333	1,000

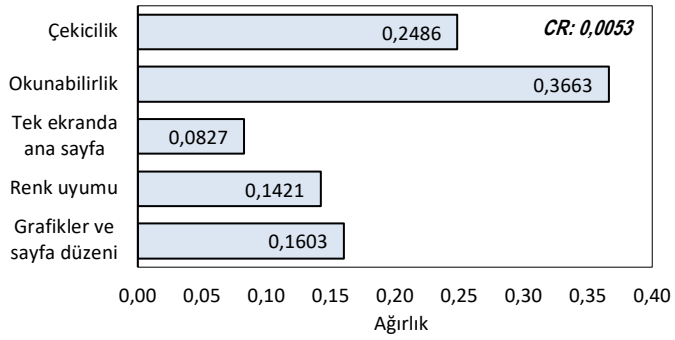


Şekil 6. Sunulan hizmetler kriterinin alt kriter ağırlıkları.

Tasarım özellikleri kriterinin alt kriter karşılaştırma matrisi Tablo 8'de verilmiştir. Şekil 7, tasarım özellikleri kriterine göre alt kriterlerin ağırlıklarını göstermektedir. Bu ana kriterde en önemli alt kriterler Okunabilirlik (0,37) ve çekicilik (0,24)'dir.

Tablo 8. Tasarım özellikleri kriterinin alt kriter karşılaştırma matrisi.

Alt kriterler	Grafikler ve sayfa düzeni	Renk uyumu	Tek ekranda ana sayfa	Okunabilirlik	Çekicilik
Grafikler ve sayfa düzeni	1,000	1,200	2,100	0,400	0,620
Renk uyumu	0,833	1,000	1,900	0,360	0,600
Tek ekranda ana sayfa	0,476	0,526	1,000	0,290	0,300
Okunabilirlik	2,500	2,778	3,448	1,000	1,600
Çekicilik	1,613	1,667	3,333	0,625	1,000

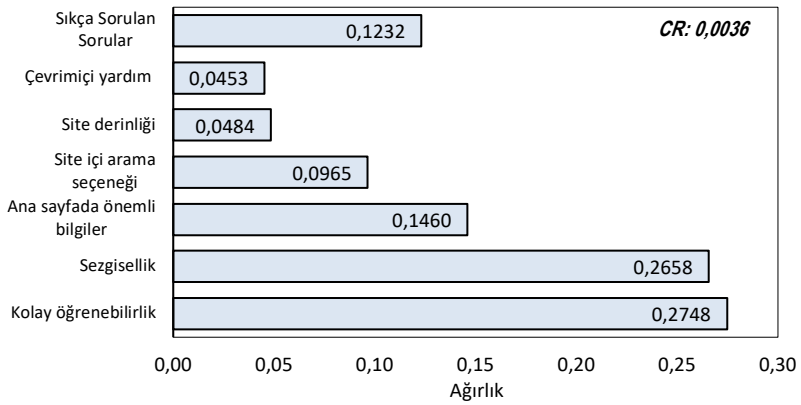


Şekil 7. Tasarım özellikleri kriterinin alt kriter ağırlıkları.

Kullanım kalitesi kriterinin alt kriter karşılaştırma matrisi Tablo 9'da verilmiştir. Şekil 8, kullanım kalitesi kriterine göre alt kriterlerin ağırlıklarını göstermektedir. Bu ana kriterde en önemli alt kriterler Kolay öğrenebilirlik (0,275) ve sezgisellik (0,266)'dir.

Tablo 9. Kullanım kalitesi kriterinin alt kriter karşılaştırma matrisi.

Alt kriterler	Kolay öğrenebilirlik	Sezgisellik	Ana sayfada önemli bilgiler	Site içi arama seçeneği	Site derinliği	Çevrimiçi yardım	Sıkça Sorulan Sorular
Kolay öğrenebilirlik	1,000	1,050	1,930	3,080	5,800	6,000	2,000
Sezgisellik	0,952	1,000	1,900	3,020	5,700	5,000	2,200
Ana sayfada önemli bilgiler	0,518	0,526	1,000	1,500	3,000	3,000	1,400
Site içi arama seçeneği	0,325	0,331	0,667	1,000	2,400	2,000	0,820
Site derinliği	0,172	0,175	0,333	0,417	1,000	1,200	0,440
Çevrimiçi yardım	0,167	0,200	0,333	0,500	0,833	1,000	0,300
Sıkça Sorulan Sorular	0,500	0,455	0,714	1,220	2,273	3,333	1,000

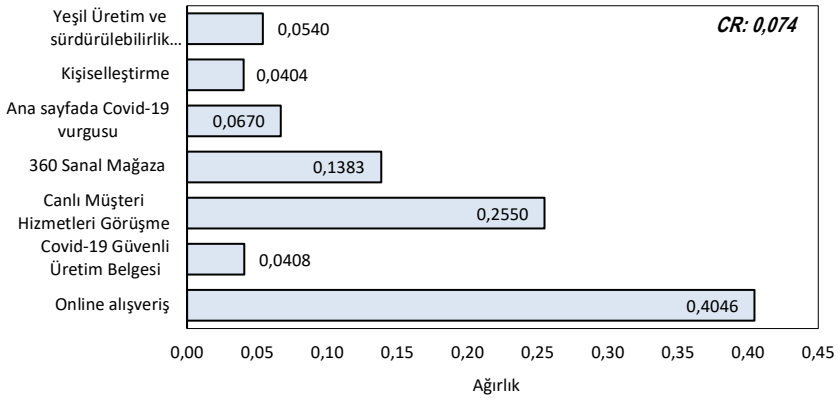


Şekil 8. Kullanım kalitesi kriterinin alt kriter ağırlıkları.

Son ana kriterimiz olan Covid-19 sonrası değişimler kriterine göre alt kriterlerin karşılaştırma matrisi Tablo 10'da ve ağırlıkları Şekil 9'da verilmiştir. Bu kriter ana kriterler içerisinde ağırlıklı en yüksek olan kriterdir. Alt kriterlerin ağırlıkları içinde oranı ise en yüksek online alışveriş seçeneği (0,40)'dir. Bu kriteri 0,25 ile canlı müşteri hizmetleri seçeneği takip etmektedir.

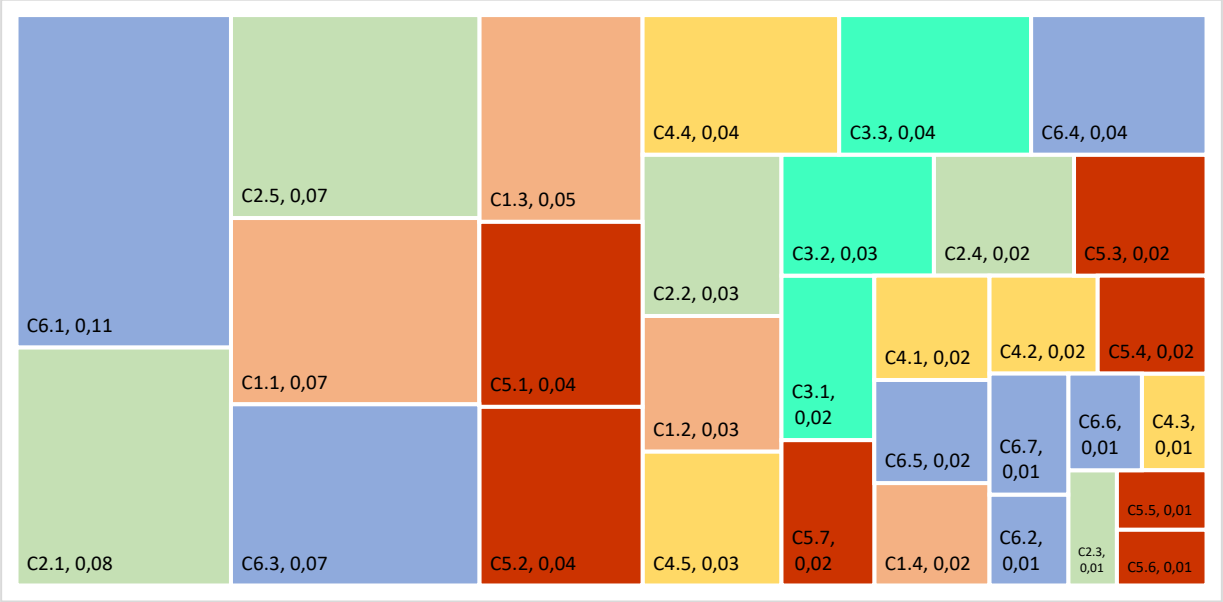
Tablo 10. Covid-19 sonrası değişimler kriterinin alt kriter karşılaştırma matrisi.

Alt kriterler	Online alışveriş	Covid-19 Güvenli Üretim Belgesi	Canlı Müşteri Hizmetleri Görüşme	360 Sanal Mağaza	Ana sayfada Covid-19 vurgusu	Kişiselleştirme	Yeşil Üretim sürdürülebilirlik vurgusu
Online alışveriş	1,000	7,000	4,500	4,000	6,500	5,000	7,000
Covid-19 Güvenli Üretim Belgesi	0,143	1,000	0,200	0,200	0,500	1,000	1,000
Canlı Müşteri Hizmetleri Görüşme	0,222	5,000	1,000	3,000	7,000	8,000	5,000
360 Sanal Mağaza	0,250	5,000	0,333	1,000	2,500	3,000	4,000
Ana sayfada Covid-19 vurgusu	0,154	2,000	0,143	0,400	1,000	2,000	2,000
Kişiselleştirme	0,200	1,000	0,125	0,333	0,500	1,000	0,333
Yeşil Üretim ve sürdürülebilirlik vurgusu	0,143	1,000	0,200	0,250	0,500	3,000	1,000



Şekil 9. Covid-19 sonrası değişimler kriterinin alt kriter ağırlıkları.

AHP yönteminden elde edilen alt kriterlerin nihai ağırlık değerli ve sıralaması Şekil 10'da verilmiştir. En önemli iki kriter online alışveriş seçeneği (C6.1) ve Ürün katalog sayfası kriteri (C2.1)'dir. Daha sonra hemen hemen aynı önem sahip, Site yüklenme hızı, Site güncelliği ve Canlı müşteri hizmetleri kriterleri takip etmektedir.



Şekil 10. Tüm alt kriterlerin önem seviyesi.

3.2. Bulanık TOPSIS ve TOPSIS Sonuçları

Bu bölümde, F-TOPSIS ve TOPSIS yaklaşımı kullanılarak 21 mobilya üretici işletmelerin web sitelerinin sıralaması analiz edilmiştir. Bulanık karar matrisi ve AHP'den elde edilen kriter değerleri kullanılarak ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisi, alternatiflerin her bir alt kritere göre karşılaştırılmasından sonra elde edilmiştir. Bu çalışmanın tüm kriterleri 1-9 arasında sayısal değer olarak kullanılmıştır. Adım 3'te anlatıldığı gibi standart karar matrisi hesaplanmış ve Tablo 11'de ilk iki ve son kriterin değerleri verilmiştir. Burada, matris çok büyük olduğu ve alan kısıtlamaları nedeniyle matris kısaltılmıştır.

Tablo 11. Bulanık TOPSIS standart karar matrisi.

	C1.1	C1.2	C6.7
A1	(0,007;0,0089;0,01070)	(0,0023;0,0034;0,0046)	(0,0014;0,0014;0,0014)
A2	(0,0125;0,0143;0,0161)	(0,0046;0,0057;0,0069)	(0,0014;0,0014;0,0014)
A3	(0,0143;0,0161;0,0178)	(0,0046;0,0057;0,0069)	(0,0014;0,0014;0,0014)
A4	(0,0107;0,0125;0,0143)	(0,0046;0,0057;0,0069)	(0,0014;0,0014;0,0014)
A5	(0,0071;0,0089;0,0107)	(0,0023;0,0034;0,0046)	(0,0029;0,0043;0,0057)
A6	(0,0107;0,0125;0,0143)	(0,0011;0,0023;0,0034)	(0,0014;0,0014;0,0014)
A7	(0,0071;0,0089;0,0107)	(0,0046;0,0057;0,0069)	(0,0029;0,0043;0,0057)
A8	(0,0143;0,0161;0,0178)	(0,0046;0,0057;0,0069)	(0,0014;0,0014;0,0014)
A9	(0,0125;0,0143;0,0161)	(0,0034;0,0046;0,0057)	(0,0014;0,0014;0,0014)
A10	(0,0143;0,0161;0,0178)	(0,0046;0,0057;0,0069)	(0,0029;0,0043;0,0057)
A11	(0,0107;0,0125;0,0143)	(0,0034;0,0046;0,0057)	(0,0029;0,0043;0,0057)
A12	(0,0107;0,0125;0,0143)	(0,0034;0,0046;0,0057)	(0,0014;0,0014;0,0014)
A13	(0,0143;0,0161;0,0178)	(0,0046;0,0057;0,0069)	(0,0014;0,0014;0,0014)
A14	(0,0107;0,0125;0,0143)	(0,0046;0,0057;0,0069)	(0,0029;0,0043;0,0057)
A15	(0,0054;0,0071;0,0089)	(0,0011;0,0023;0,0034)	(0,0014;0,0014;0,0014)
A16	(0,0107;0,0125;0,0143)	(0,0046;0,0057;0,0069)	(0,0014;0,0014;0,0014)
A17	(0,0107;0,0125;0,0143)	(0,0011;0,0011;0,0011)	(0,0014;0,0014;0,0014)
A18	(0,0125;0,0143;0,0161)	(0,0046;0,0057;0,0069)	(0,0014;0,0014;0,0014)
A19	(0,0089;0,0107;0,0125)	(0,0046;0,0057;0,0069)	(0,0014;0,0014;0,0014)
A20	(0,0125;0,0143;0,0161)	(0,0034;0,0046;0,0057)	(0,0014;0,0014;0,0014)
A21	(0,0143;0,0161;0,0178)	(0,0046;0,0057;0,0069)	(0,0014;0,0014;0,0014)

Ayrıca TOPSIS yöntemine göre hesaplanan standart karar metrisi Tablo 12'de ilk iki ve son kriterin değerleri sunulmuştur.

Tablo 12. TOPSIS standart karar matrisi.

	C1.1	C1.2	C6.7
A1	0,1487	0,1517	0,1280
A2	0,2379	0,2529	0,1280
A3	0,2676	0,2529	0,1280
A4	0,2081	0,2529	0,1280
A5	0,1487	0,1517	0,3841
A6	0,2081	0,1011	0,1280
A7	0,1487	0,2529	0,3841
A8	0,2676	0,2529	0,1280
A9	0,2379	0,2023	0,1280
A10	0,2676	0,2529	0,3841
A11	0,2081	0,2023	0,3841
A12	0,2081	0,2023	0,1280
A13	0,2676	0,2529	0,1280
A14	0,2081	0,2529	0,3841
A15	0,1189	0,1011	0,1280
A16	0,2081	0,2529	0,1280
A17	0,2081	0,0506	0,1280
A18	0,2379	0,2529	0,1280
A19	0,1784	0,2529	0,1280
A20	0,2379	0,2023	0,1280
A21	0,2676	0,2529	0,1280

Bu çalışmada kriter değerleri 1-9 arasında değerler olarak kabul ettiğinden, bulanık pozitif ideal çözüm A+(0, 0, 0) olarak ve bulanık negatif ideal çözüm A-(0, 0, 0) olarak tanımlanır ve ardından Denklem (18) pozitif ideal çözüm ile negatif ideal çözüm arasındaki mesafeyi hesaplamak için kullanılır ve ardından Tablo 13'te gösterildiği gibi C* yakınlık katsayısını elde etmek için Denklem (4) ve (14) kullanılır. Yukarıdaki metodoloji kullanılarak elde edilen nihai sıralama Tablo 13'te verilmiştir. Ayrıca benzer adımlarla elde edilen F-TOPSIS yöntemi sonuçları da Tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 13. Bulanık TOPSIS ve TOPSIS yöntemine göre nihai sırala.

	Bulanık TOPSIS				TOPSIS			
	S+	S-	C*	Sıra	S+	S-	C*	Sıra
A1	0,1180	0,0870	0,4244	15	4,0610	3,2384	0,4437	13
A2	0,1489	0,0560	0,2732	20	4,9261	2,1365	0,3025	20
A3	0,0875	0,1173	0,5728	3	3,6193	4,1378	0,5334	3
A4	0,0947	0,1103	0,5380	7	4,6234	3,5453	0,4340	14
A5	0,0342	0,1707	0,8331	1	2,1015	5,4605	0,7221	1
A6	0,1139	0,0914	0,4454	14	4,0777	3,6192	0,4702	11
A7	0,0884	0,1169	0,5696	4	3,6695	4,0561	0,5250	5
A8	0,1321	0,0729	0,3555	17	4,9028	2,5236	0,3398	17
A9	0,1027	0,1023	0,4990	9	4,0214	3,7694	0,4838	9
A10	0,0786	0,1262	0,6163	2	3,5683	4,3060	0,5468	2
A11	0,1334	0,0712	0,3479	18	4,8708	2,3854	0,3287	18
A12	0,0974	0,1080	0,5258	8	3,7844	3,3618	0,4704	10
A13	0,1071	0,0988	0,4798	11	3,6711	3,6462	0,4983	7
A14	0,1116	0,0937	0,4564	12	4,0893	3,5753	0,4665	12
A15	0,1128	0,0929	0,4514	13	4,8214	3,1694	0,3966	15
A16	0,1386	0,0661	0,3228	19	4,7895	2,2586	0,3205	19
A17	0,1844	0,0200	0,0981	21	5,3805	1,2051	0,1830	21
A18	0,1057	0,0999	0,4859	10	3,8611	3,8308	0,4980	8
A19	0,0945	0,1108	0,5398	6	3,6705	4,0052	0,5218	6
A20	0,1250	0,0797	0,3896	16	4,6769	2,6953	0,3656	16
A21	0,0902	0,1148	0,5599	5	3,5703	4,0070	0,5288	4

3.2. Bulanık VIKOR ve VIKOR Sonuçları

Bulanık VIKOR yönteminin ilk adımında açıklandığı gibi standart karar matrisi hesaplanmış ve Tablo 14'te ilk iki ve son kriterin değerleri sunulmuştur.

Tablo 14. Bulanık VIKOR standart karar matrisi.

	C1.1	C1.2	C6.7
A1	(0,0272;0,0545;0,0817)	(0,0000;0,0138;0,0221)	(0,014;0,014;0,014)
A2	(-0,0136;0,0136;0,0408)	(-0,0184;0,0000;0,0111)	(0,014;0,014;0,014)
A3	(-0,0272;0,0000;0,0272)	(-0,0184;0,0000;0,0111)	(0,014;0,014;0,014)
A4	(0,0000;0,0272;0,0545)	(-0,0184;0,0000;0,0111)	(0,014;0,014;0,014)
A5	(0,0272;0,0545;0,0817)	(0,0000;0,0138;0,0221)	(-0,0281;0,0;0,0094)
A6	(0,0000;0,0272;0,0545)	(0,0092;0,0207;0,0277)	(0,014;0,014;0,014)
A7	(0,0272;0,0545;0,0817)	(-0,0184;0,0000;0,0111)	(-0,0281;0,0;0,0094)
A8	(-0,0272;0,0000;0,0272)	(-0,0184;0,0000;0,0111)	(0,014;0,014;0,014)
A9	(-0,0136;0,0136;0,0408)	(-0,0092;0,0069;0,0166)	(0,014;0,014;0,014)
A10	(-0,0272;0,0000;0,0272)	(-0,0184;0,0000;0,0111)	(-0,0281;0,0;0,0094)
A11	(0,0000;0,0272;0,0545)	(-0,0092;0,0069;0,0166)	(-0,0281;0,0;0,0094)
A12	(0,0000;0,0272;0,0545)	(-0,0092;0,0069;0,0166)	(0,014;0,014;0,014)
A13	(-0,0272;0,0000;0,0272)	(-0,0184;0,0000;0,0111)	(0,014;0,014;0,014)
A14	(0,0000;0,0272;0,0545)	(-0,0184;0,0000;0,0111)	(-0,0281;0,0;0,0094)
A15	(0,0408;0,0681;0,0953)	(0,0092;0,0207;0,0277)	(0,014;0,014;0,014)
A16	(0,0000;0,0272;0,0545)	(-0,0184;0,0000;0,0111)	(0,014;0,014;0,014)
A17	(0,0000;0,0272;0,0545)	(0,0277;0,0277;0,0277)	(0,014;0,014;0,014)
A18	(-0,0136;0,0136;0,0408)	(-0,0184;0,0000;0,0111)	(0,014;0,014;0,014)
A19	(0,0136;0,0408;0,0681)	(-0,0184;0,0000;0,0111)	(0,014;0,014;0,014)
A20	(-0,0136;0,0136;0,0408)	(-0,0092;0,0069;0,0166)	(0,014;0,014;0,014)
A21	(-0,0272;0,0000;0,0272)	(-0,0184;0,0000;0,0111)	(0,014;0,014;0,014)

Benzer adımlarla VIKOR yöntemine göre hesaplanan standart karar metrisi Tablo 15'te ilk iki ve son kriterin değerleri sunulmuştur.

Tablo 15. VIKOR Standart karar matrisi.

	C1.1	C1.2	C6.7
A1	0,0545	0,0138	0,0140
A2	0,0136	0,0000	0,0140
A3	0,0000	0,0000	0,0140
A4	0,0272	0,0000	0,0140
A5	0,0545	0,0138	0,0000
A6	0,0272	0,0207	0,0140
A7	0,0545	0,0000	0,0000
A8	0,0000	0,0000	0,0140
A9	0,0136	0,0069	0,0140
A10	0,0000	0,0000	0,0000
A11	0,0272	0,0069	0,0000
A12	0,0272	0,0069	0,0140
A13	0,0000	0,0000	0,0140
A14	0,0272	0,0000	0,0000
A15	0,0681	0,0207	0,0140
A16	0,0272	0,0000	0,0140
A17	0,0272	0,0277	0,0140
A18	0,0136	0,0000	0,0140
A19	0,0408	0,0000	0,0140
A20	0,0136	0,0069	0,0140
A21	0,0000	0,0000	0,0140

F-VIKOR yönteminin uygulanmasında, Q değerinin en düşük olan, alternatif web sitesi içinde en iyi olarak kurulumu için oldukça uygun alan olarak önceliklendirilmiştir. Elde edilen T, U ve Q değerleri Tablo 16'da verilmiştir. Sonuç olarak, ilk üç sıralamada A5, A10 ve A3 alternatifleridir. Bulanık VIKOR ile VIKOR yöntemi sonuçları oldukça benzerdir. Nihai sıralamada sadece A7, A9, A13 ve A19 alternatiflerin sıralaması farklıdır.

Tablo 16. Bulanık VIKOR ve VIKOR yöntemine göre nihai sırala.

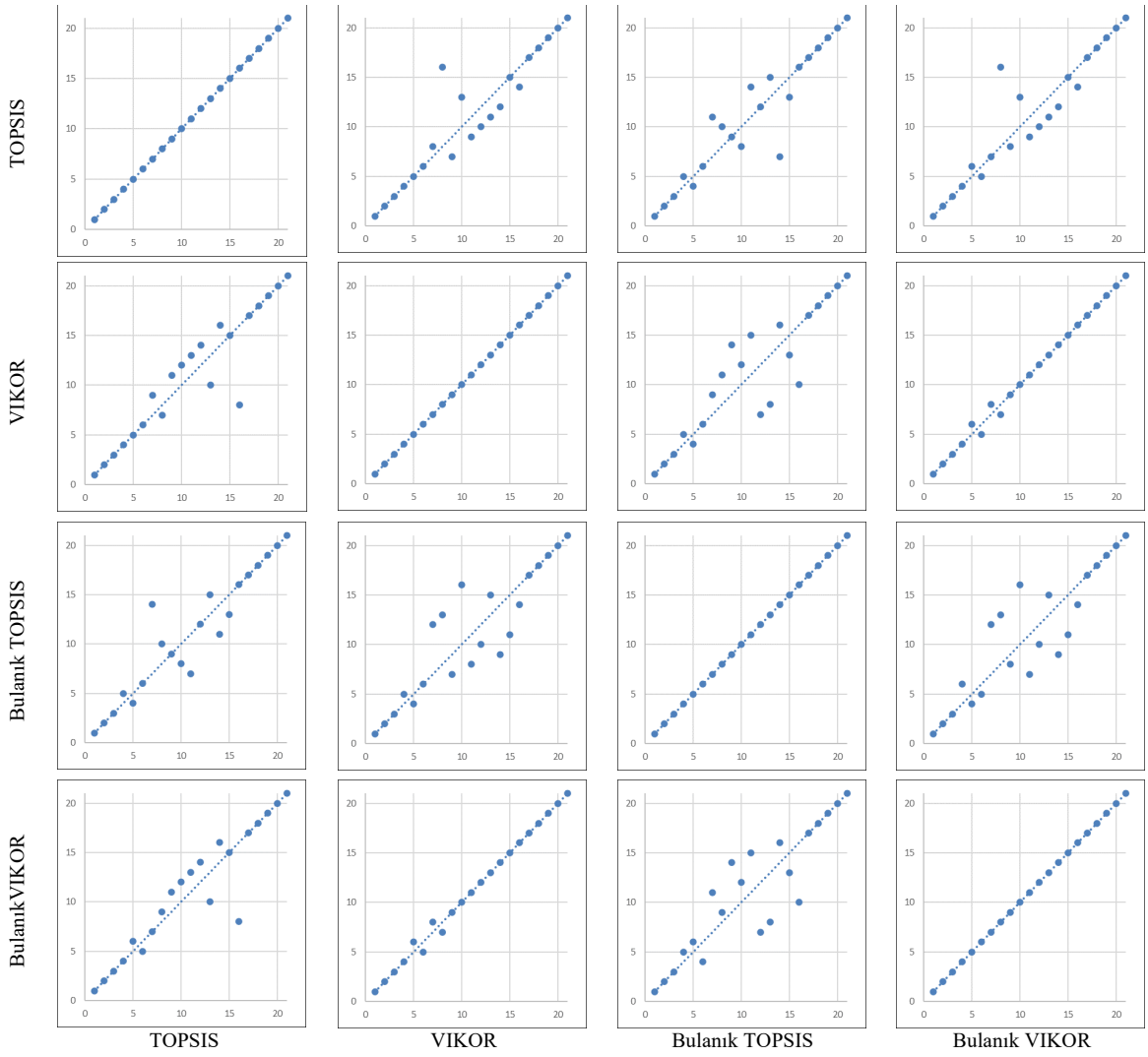
	Bulanık VIKOR				VIKOR			
	T	U	Q	Sıra	T	U	Q	Sıra
A1	0,4351	0,0702	0,2313	11	0,4840	0,0664	0,3418	11
A2	0,6150	0,1053	0,5088	20	0,6468	0,1053	0,8339	20
A3	0,2357	0,0664	0,1484	3	0,2885	0,0664	0,2105	3
A4	0,3029	0,1053	0,4174	12	0,3525	0,1053	0,6364	12
A5	0,0732	0,0545	0,0245	1	0,1493	0,0545	0,0000	1
A6	0,3881	0,0713	0,2247	9	0,4353	0,0664	0,3090	9
A7	0,2867	0,0702	0,1878	6	0,3409	0,0664	0,2457	5
A8	0,4516	0,1053	0,4610	17	0,4980	0,1053	0,7341	17
A9	0,3157	0,0713	0,2035	8	0,3665	0,0664	0,2629	7
A10	0,1842	0,0664	0,1333	2	0,2417	0,0664	0,1791	2
A11	0,4785	0,1053	0,4688	18	0,5322	0,1053	0,7570	18
A12	0,3549	0,1053	0,4326	13	0,4052	0,1053	0,6718	13
A13	0,3916	0,0664	0,1940	7	0,4347	0,0664	0,3087	8
A14	0,3996	0,0713	0,2280	10	0,4379	0,0664	0,3108	10
A15	0,4193	0,1053	0,4515	15	0,4637	0,1053	0,7110	15
A16	0,5713	0,1053	0,4960	19	0,6106	0,1053	0,8096	19
A17	0,8902	0,1053	0,5894	21	0,8941	0,1053	1,0000	21
A18	0,4419	0,1053	0,4581	16	0,4800	0,1053	0,7220	16
A19	0,3136	0,0668	0,1739	5	0,3659	0,0664	0,2625	6
A20	0,4141	0,1053	0,4500	14	0,4627	0,1053	0,7104	14
A21	0,2629	0,0664	0,1563	4	0,3174	0,0664	0,2299	4

4. Çok Kriterli Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Analizi

Bu bölümde, önerilen vaka çalışması için web sitelerinin değerlendirilmesi ve sıralanmasında bulanık TOPSIS, TOPSIS, bulanık VIKOR ve VIKOR yöntemi performanslarını karşılaştırarak kapsamlı bir analiz sunuyoruz. Tablo 13 ve Tablo 16'daki sıralama sonuçları incelendiğinde her bir ÇÖKV yöntemi göre alternatif web sitelerin sıralaması da farklıdır. Aslında her yöntemin uyguladığı farklı teknik esaslara ve seçim yaklaşımları sonuçlarda farklılık yaratıyor. Dikkate alınan tüm yaklaşımların karşılaştırılması şu faktörlere dayalı olarak yapılmıştır: sıralama farklılığı, ilişki testi, hesaplama karmaşıklığı ve alternatif web sitesi sayısındaki değişikliklerdir.

4.1. Sıralamaların Karşılaştırılması

Farklı ÇKKV yöntemlerle çözüm sonuçlarından elde edilen alternatiflerin sıralamalarındaki benzerlik ve farklılık Şekil 11'de detaylı olarak verilmiştir. Kullanılan dört farklı yöntemin birbiri ile karşılaştırılması verilmiştir. Buna göre görselleştirilen sıralama analizi, Bulanık VIKOR ile VIKOR yöntemleri sonuçlarındaki sıralamalar çok benzer olduğunu göstermektedir. Bu karşılaştırmalarda sadece 4 alternatif farklı puan almıştır. TOPSIS ve VIKOR ile Bulanık TOPSIS ve TOPSIS yöntemlerinin aldığı sıralamalar arasında iyi derecede bir benzerlik görülmektedir. Bu karşılaştırmalarda 12 alternatif aynı sıralamaya sahiptir. En büyük farklılık Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR yöntemleri arasında olup 13 alternatifin sıralaması farklıdır. Tüm karşılaştırmalarda ilk 3 sıra ve son 5 sıra aynıdır, farklılaşma genelde 4-16 sıralar arasında olmaktadır. Ayrıca tüm karşılaştırmalar içinde Bulanık TOPSIS ile karşılaştırılan tüm yöntemlerde farklılık daha çok, en az farklılık VIKOR yöntemi ile olmuştur. Sonuç olarak bulanık yöntem sonuçları birbirinden oldukça farklıdır.



Şekil 11. Nihai sıralamaların karşılaştırılması.

4.2. İlişki Testi ile Karşılaştırma (Korelasyon Katsayıları)

İlişki testi ya da korelasyon katsayıları, değişkenleri karşılaştırmayı ve ne kadar benzer olduklarını matematiksel olarak belirlemeyi mümkün kılar. Sıralama benzerlik katsayıları, elde edilen sonuçları karşılaştırmaya ve ne kadar benzer olduklarını belirlemeye izin verir [1,8]. Bu bölümde Kendall Tau testi, Spearman sıra korelasyon, ağırlıklı Spearman korelasyon ve sıra benzerlik kullanılarak ÇKKV yöntemleriyle elde edilen sıralama sonuçlarını karşılaştırdık. İlk olarak bu yöntemleri tanıtıyoruz.

Eğer N büyüklüğünde bir örneklem için u_i ve v_i herhangi iki yöntemden elde edilen sıra değerleri ve ise, değişkenler arasındaki sıralamalardaki farklılık Spearman'ın sıralama korelasyon katsayısı (r_s) (Spearman's Rank Correlation Coefficient) Denklem (19) ile hesaplanabilir [55].

$$r_s = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{N}(u_i - v_i)^2}{N(N^2-1)} \tag{19}$$

Ağırlıklı Spearman'ın sıralama korelasyon katsayısı (r_w) (Weighted Spearman's Rank Correlation Coefficient) Denklem (20) hesaplanabilir. Bu yaklaşımda her iki sıralamada da üst sıralardaki konumlar daha

önemlidir. Anlamlılık ağırlığı her karşılaştırma için hesaplanır. Farklılıkların nerede ortaya çıktığını değil de ortaya çıkıp çıkmadığını inceleyen Spearman's rank korelasyon katsayısına temel farkı belirleyen unsurdur [8,56].

$$r_w = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{N}(u_i - v_i)^2\big((N-u_i+1)+(N-v_i+1)\big)}{N^4+N^3-N^2-N} \tag{20}$$

Sıra benzerlik katsayısı (r_r) (Rank Similarity Coefficient) ise belirli bir karşılaştırmanın ağırlığı, hesaplama sırasında referans sıralaması olarak kullanılan birinci sıralamadaki konumun önemine göre belirlenir [1].

$$r_r = 1 - \sum_{i=1}^{N} 2^{-u_i}\frac{|u_i - v_i|}{max(|u_i-1|,|u_i-N|)} \tag{21}$$

Kendall Tau korelasyon katsayı (t) iki farklı değişkenler arasındaki ilişkiyi karşılaştırmak için kullanılan en popüler yöntemlerden biridir. Parametrik olmayan Kendall Tau korelasyon katsayı testi, iki bağımsız değişkenin ÇÖKV yöntemlerinde gözlenen değerlerinin sıralarını karşılaştırmak için kullanıldı [57, 58]. Eğer modelimizde n, alternatiflerin sayısını gösterirse farklı sıralara sahip iki değişkeni karşılaştırmak için Denklem (22), benzer sıralamalara sahip iki değişkeni karşılaştırmak için Denklem (23) kullanılır. Bu çalışmada Denklem (22) kullandık.

$$t = \frac{p-q}{n(n-1)/2} \tag{22}$$

$$t' = \frac{p-q}{\sqrt{\left(\frac{n(n-1)}{2}-\alpha\right)\left(\frac{n(n-1)}{2}-\beta\right)}} \tag{23}$$

burada p ve q sırasıyla uyumlu çiftlerin sayısı ve uyumsuz çiftlerin sayısıdır. α ve β iki veri seti içinde aynı sıralara sahip çiftlerin sayısıdır.

Elde edilen ilişki testleri ısı haritaları yardımıyla Şekil 12'de verilmiştir. Bilindiği gibi test sonuçları 0 ile 1 arasında değerler almaktadır. Test sonucu 1'e yaklaştıkça ilişki artmakta yani yöntemler arasında sıralama sonuçları daha çok benzemektedir, 0'a yaklaştıkça ise tam tersi durum söz konusudur. Yöntemler arasında en büyük fark Kendall Tau testindedir. Spearman sıra korelasyon testi ve ağırlıklı Spearman korelasyon testi sonuçları bibirine çok benzerdir. Sıra benzerlik testi sonuçları ise sıralamaların birbirine çok benzer olduğunu gösteriyor. Kendall Tau testi kullanıldığında VIKOR ile F-VIKOR yöntemleri (0,98) için elde edilen sıralamalar arasında en yüksek ilişki gözlendi. Daha sonra TOPSIS ile VIKOR ile yöntemleri (0,87) ve TOPSIS ile F-VIKOR yöntemleri (0,87) için elde edilen sıralamalar arasında daha az korelasyon elde edildi. VIKOR ile F-TOPSIS yöntemleri (0,80) ve F-TOPSIS ile F-VIKOR yöntemleri (0,78) için elde edilen sıralamalar en az benzerliğin olduğu sonuçlardır. Spearman sıra korelasyon testi ve ağırlıklı Spearman korelasyon testi sonuçları da benzerdir. Sıra benzerlik testinde ise tüm karşılaştırmalar 1'e çok yakın değerler almıştır. F-TOPSIS ile F-VIKOR yöntemleri (0,90) için elde edilen sıralamalar arasında küçük bir benzerlik oluşmuştur.

Elde edilen sonuçların analizinde F-VIKOR ile F-TOPSIS yöntemlerinin sıralama sonuçlarının oldukça farklı olduğudur. Ayrıca TOPSIS yöntemi ile bulanık versiyonu karşılaştırıldığında daha az benzerlik gözlenirken VIKOR yöntemi ile bulanık versiyonu karşılaştırıldığında daha çok benzerlik gözlenmiştir. Sıralamalar arası benzerlik testinde VIKOR daha iyi performans gösterdiği ifade edilebilir.

Kendall's Tau	TOPSIS	VIKOR	F-TOPSIS	F-VIKOR
TOPSIS	1,00	0,87	0,84	0,87
VIKOR	0,87	1,00	0,80	0,98
F-TOPSIS	0,84	0,80	1,00	0,78
F-VIKOR	0,87	0,98	0,78	1,00

Spearman	TOPSIS	VIKOR	F-TOPSIS	F-VIKOR
TOPSIS	1,00	0,94	0,94	0,94
VIKOR	0,94	1,00	0,90	0,99
F-TOPSIS	0,94	0,90	1,00	0,89
F-VIKOR	0,94	0,99	0,89	1,00

Weighted Spearman	TOPSIS	VIKOR	F-TOPSIS	F-VIKOR
TOPSIS	1,00	0,94	0,94	0,94
VIKOR	0,94	1,00	0,90	0,99
F-TOPSIS	0,94	0,90	1,00	0,90
F-VIKOR	0,94	0,98	0,90	1,00

Rank Similarity	TOPSIS	VIKOR	F-TOPSIS	F-VIKOR
TOPSIS	1,00	0,99	0,99	0,99
VIKOR	0,99	1,00	0,99	0,98
F-TOPSIS	0,99	0,99	1,00	0,90
F-VIKOR	0,99	0,98	0,90	1,00

Şekil 12. Yöntemlerin ilişki testi ile karşılaştırılması.

4.3. Yöntemlerin Hesaplama Karmaşıklığı Açısından Karşılaştırılması

Kullanılan tüm ÇKKV yaklaşımlar için hesaplama karmaşıklığı dikkate alınarak değerlendirilmiştir. ÇKKV yöntemleri kriterlerin ve alternatiflerin sayısında herhangi bir kısıtlama olmaksızın, seçim kararını tamamlamak için aynı miktarda veriye ihtiyaç duyar. Eğer n alternatif ve k kriter dikkate alındığında, her karar vericinin vermesi gereken kararların sayısı $nk + k$'ye eşittir. Ancak aynı miktarda karar kullanılsa bile her yöntemin hesaplama karmaşıklığı farklı olabilir. Buna genellikle zaman karmaşıklığı da denir [23].

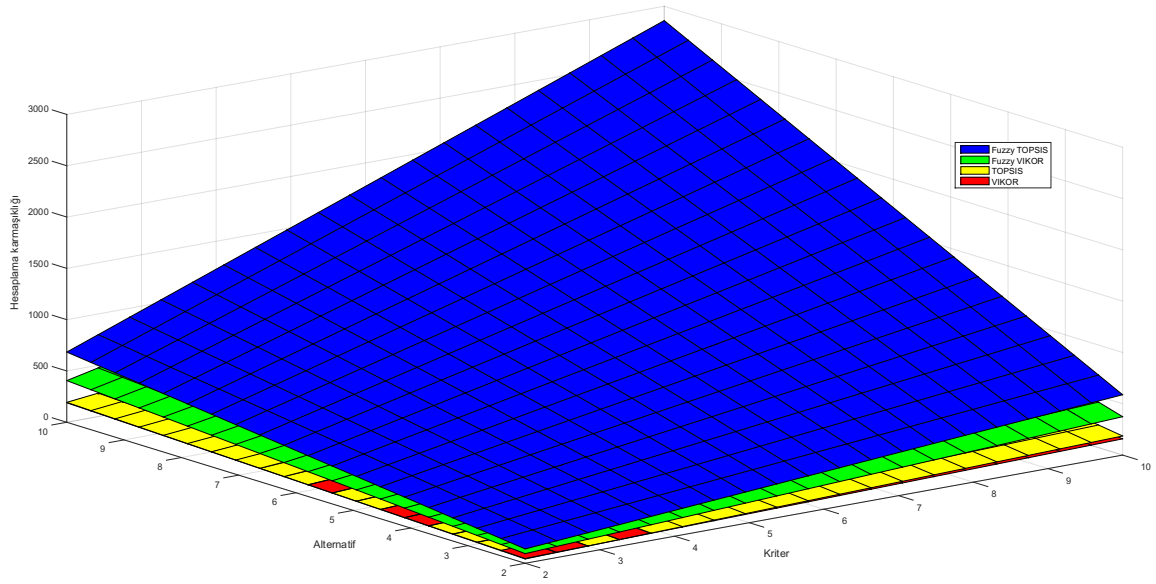
ÇKKV yöntemlerinin hesaplama karmaşıklığını belirleyen ilk çalışma Chen [51] tarafından AHP yöntemini çarpma işleminin uygulanma sayısına bağlı olarak belirlemiştir. Burada ilgili yöntemin adımlarında yapılan işlemler kriterler ve alternatif sayıları kullanılarak hesaplama yapılır. Junior, vd. [20] üstel sayıları ve mantıksal işlemleri zaman karmaşıklığının bileşenleri olarak değerlendirmiştir. Banaeian, vd., [23] ise bulanık ÇKKV yöntemlerinin zaman karmaşıklığını hesaplamak için toplama, çıkarma, çarpma, bölme, karekök ve üs alma olmak üzere tüm mantıksal matematiksel işlemlerini ele almıştır. Bizde bu çalışmada Banaeian, vd., [23] yöntemine benzer şekilde hesaplama karmaşıklığını kullandık. Ayrıca benzer şekilde yöntemlerin hesaplama karmaşıklıklarını karşılaştıran birkaç çalışma [24-27,59] vardır.

Tablo 17'de kullanılan 4 yönteminde hesaplama karmaşıklığı detaylı gösterilmektedir. Bilindiği gibi n alternatifleri, k ise kriterleri göstermektedir. Bizim çalışmamızda 21 alternatif ve 6 ana kriter vardır. Örneğin TOPSIS yönteminde işlem karmaşıklığını hesaplamak için normalizayon matrisini elde etmek için $k(n+1)$ işlemlerine, ağırlıklı karar matrisini hesaplamak için nk işlemlerine, ağırlıklı karar matrisindeki en büyük ve en küçük değerleri hesaplamak için $k+k$ işlemlerine, pozitif ideal ve negatif ideal noktaya olan uzaklıkları hesaplamak için $3nk+3nk$ işlemlerine, en uygun karar noktasını belirlemek için $2n$ işlemlerine ihtiyacımız vardır. Sonuç olarak TOPSIS yöntemi işlem karmaşıklığı $8nk+3k+2n$ ile hesaplanır.

Çalışmada kullanılan 6 ana kriter ve 21 alternatif verilerini göz önüne aldığımızda TOPSIS yönteminde 1068 işlem, F-TOPSIS yönteminde 3516 işlem, VIKOR yönteminde 916 işlem ve F-VIKOR yönteminde ise 2131 işlem gerçekleşmektedir. Hesaplama karmaşıklığı açısından VIKOR yönteminin diğer yöntemlerden daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Beklendiği üzere bulanık yöntemler, klasik yöntemlere göre işlem karmaşıklığı artmıştır. Şekil 13, bu dört yöntemin hesaplama karmaşıklığını görselleştirilmiştir.

Tablo 17. Kullanılan yöntemlerin hesaplama karmaşıklığı.

TOPSIS		F-TOPSIS		VIKOR		F-VIKOR	
Normalizasyon	$k(n+1)$	Normalizasyon	$6k(n+1)$	f_k^*, f_k^-	$k+k$	$\tilde{f}_k^*, \tilde{f}_k^-$	$3k+3k$
V_{nk}	nk	$\tilde{V}_{nk}$	$3nk$	V_{nk}	$2k(n+1)$	$\tilde{V}_{nk}$	$k(6n+1)$
v_k^+, v_k^-	$k+k$	$\tilde{v}_k^+, \tilde{v}_k^-$	$3k+3k$	P_n, R_n	$2nk+4$	$\tilde{P}_n, \tilde{R}_n$	$5nk+4$
S_n^+, S_n^-	$3nk+3nk$	$\tilde{S}_n^+, \tilde{S}_n^-$	$9nk+9nk$	Q_n	$3nk+4$	$\tilde{Q}_n$	$5nk+4$
						$BestQ_n$	$3n$
C_n^*	$2n$	$\tilde{C}_n^*$	$2n$	Test	2	Tutarlılık	2
Toplam	$8nk+3k+2n$	Toplam	$27nk+12k+2n$	Toplam	$7nk+4k+10$	Toplam	$16nk+3n+7k+10$



Şekil 13. Hesaplama karmaşıklığı.

4.4. Yöntemlerin Alternatif Değişikliklerine Adaptasyonu

ÇKKV yöntemlerinin esnekliği, değişen şartlara uyum sağlama yeteneği doğru kararlar vermek açısından oldukça önemlidir. Karar verme sürecinde gerçek hayatta farklı etkenler yeni alternatiflerin eklenmesi veya hariç tutulması gerektirebilir. Bu durumda karar verme yöntemlerinin alternatifleri tutarlı bir tercih sırası üretmesi beklenir [20]. Bu nedenle, bir veya daha fazla alternatifin değerlendirme sürecine dahil edildiğinde veya hariç tutma senaryoları altında alternatiflerin sıralamalarının tutarlılığını kontrol etmek çok önemlidir. Herhangi bir durumda sıralamanın tersine dönmesi meydana gelirse, bu, yöntemin değerlendirme sürecindeki alternatif sayısına duyarlı olduğunu ortaya koyacaktır [25,32].

Bizde 21 alternatif ve 6 kritere sahip problemimizde alternatiflerde meydana gelen değişikliği test ettik. Bu maksatla dört farklı test yapıyoruz. İlk olarak hayali bir yeni alternatif ekliyoruz, daha sonra rasgele seçilen A18 alternatif web sitesinin aynı kriterlerine sahip yeni bir alternatif A22 ekliyoruz. Bir sonraki testte tüm sonuçlarda en iyi alternatif olan A5 alternatif web sitesinin aynı kriterlerine sahip yeni bir alternatif A22 ekliyoruz. Son testte ise her iki yöntemde de en kötü alternatif olan A17 web sitesi devre dışı bırakıyoruz. Elde edilen bu dört veri seti ile problem her iki bulanık yöntemle tekrar çözülmüş ve sonuçlar Tablo 18'de verilmiştir.

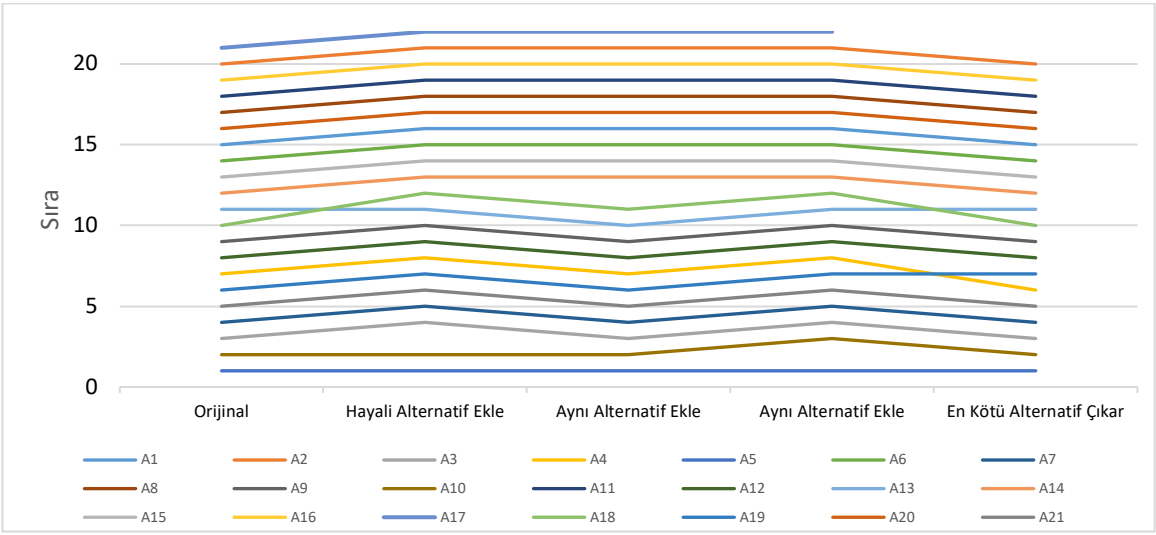
Şekil 14'te F-TOPSIS yöntemindeki test sonuçları görülmektedir. Testlerin çoğunda, sonuçlar alternatif sıralamada önemli bir değişiklik göstermedi. Bu yöntemle tüm testlerde 1. sıradaki A5 alternatif web sitesi sabit kalmıştır. Hayali alternatif eklendiğinde eklenen alternatif sayısı arttığı için genelde sıralamalar 1 artmıştır. Problemimizde olan alternatif yeni bir alternatif olarak eklendiğinde sıralamalar çok fazla değişiklik göstermedi. En büyük değişiklik A18 alternatifinde olmuştur. Şekil 15'te F-VIKOR yöntemindeki test sonuçları görülmektedir. Test sonuçları F-TOPSIS yöntemi sonuçlarına göre daha fazla değişiklik göstermiştir. Özellikle en kötü performansa sahip alternatifin hariç tutulduğu testte birçok alternatifin sırası değişmiştir. Ayrıca yeni kısıt eklendiği testte de sıralamalarda çok önemli değişiklikler olmamıştır. Bu yöntemle A5 ile aynı kriterlere sahip alternatif eklendiği test hariç 1. sırada A5 alternatif web sitesi yer almıştır.

Tablo 18. Alternatif değişikliğinin sonuçlara etkisi.

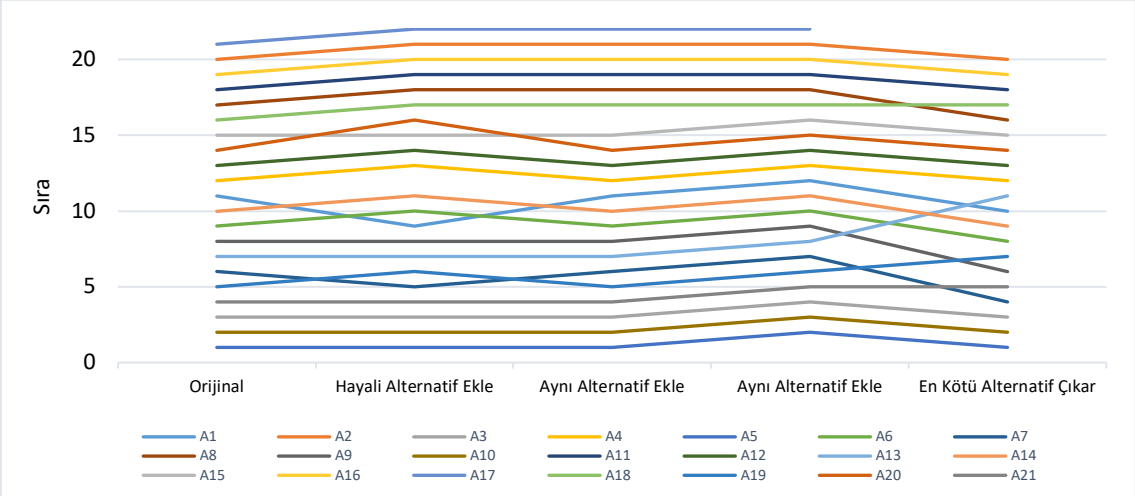
Alternatifler	F-TOPSIS					F-VIKOR				
	Orijinal	Hayali Alternatif Ekle	Aynı Alternatif (A18) Ekle	Aynı Alternatif (A5) Ekle	En Kötü Alternatif (A17) Çıkar	Orijinal	Hayali Alternatif Ekle	Aynı Alternatif (A18) Ekle	Aynı Alternatif (A5) Ekle	En Kötü Alternatif (A17) Çıkar
A1	15	16	16	16	15	11	9	11	12	10
A2	20	21	21	21	20	20	21	21	21	20
A3	3	4	3	4	3	3	3	3	4	3
A4	7	8	7	8	6	12	13	12	13	12
A5	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1
A6	14	15	15	15	14	9	10	9	10	8
A7	4	5	4	5	4	6	5	6	7	4
A8	17	18	18	18	17	17	18	18	18	16
A9	9	10	9	10	9	8	8	8	9	6
A10	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2
A11	18	19	19	19	18	18	19	19	19	18
A12	8	9	8	9	8	13	14	13	14	13
A13	11	11	10	11	11	7	7	7	8	11
A14	12	13	13	13	12	10	11	10	11	9
A15	13	14	14	14	13	15	15	15	16	15
A16	19	20	20	20	19	19	20	20	20	19
A17	21	22	22	22	-	21	22	22	22	-
A18	10	12	11	12	10	16	17	17	17	17
A19	6	7	6	7	7	5	6	5	6	7
A20	16	17	17	17	16	14	16	14	15	14
A21	5	6	5	6	5	4	4	4	5	5
		3	11	1			12	16	1	

Sonuçlar, F-TOPSIS'in alternatif sayısı artsa da azalsa da tutarlı bir sıralaması ürettiğini göstermektedir. F-VIKOR'da yönteminde ise hayali kısıt eklendiğinde bazı, en kötü alternatif hariç tutulduğunda ise sıralama önemli değişiklikler göstermiştir. F-VIKOR yönteminde değerlendirme sürecine hayali alternatif eklendiğinde, A11 alternatifi ile A9 alternatifi arasında ve A14 alternatifi ile A16 alternatifi arasında sıra değişikliği olmuştur; değerlendirme sürecinde en kötü alternatifin hariç tutulduğunda, A5 alternatifi ile A7 alternatifi arasında, A6 alternatifi ile A4 alternatifi arasında, A7 alternatifi ile A11 alternatifi arasında ve A8 alternatifi ile A6 alternatifi arasında sıra değişikliği olmuştur.

Başka bir deyişle, her iki yöntemde alternatif sayısının artması durumunda alternatif tercih sıralamasında tutarlılık olduğu belirlendi. Bir alternatifin hariç tutulduğu teste ise F-VIKOR yöntemin tutarlı olmadığı, F-TOPSIS yönteminin daha esnek bir yöntem olduğu düşünülebilir. Genel olarak değerlendirildiğinde, F-TOPSIS yönteminin F-VIKOR dan daha iyi performans göstermiştir.



Şekil 14. F-TOPSIS sonuçlarındaki değişiklik.



Şekil 15. F-VIKOR sonuçlarındaki değişiklik.

5. Sonuçlar

Bu çalışma, mobilya işletmelerinin web sitesi değerlendirme problemi için COVID-19 sonrası değişimlerin de yer aldığı altı ana kriter ile TOPSIS, Bulanık TOPSIS, VIKOR ve Bulanık VIKOR yöntemlerini karşılaştırmaktadır. Çalışma Türkiye'de faaliyet gösteren mobilya üretici ve satıların web sitelerini değerlendirmek için uygulanmış ve sonuçlar detaylı karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar ise ilişki testi, hesaplama karmaşıklığı ve alternatif sayısındaki değişikler dikkate alınarak yapılmıştır. İlişki teste Kendall Tau, Spearman, Ağırlıklı Speaman ve Sıra Benzerlik yöntemleri ile sıralama sonuçları arasındaki benzerlik test edilmiştir. Test sonuçlarında tüm yöntemler sonuçları büyük oranda benzer çıkmıştır. En büyük farklılık F-VIKOR ile F-TOPSIS yöntemlerinin sıralama sonuçlarında, en benzer sonuç ise VIKOR ile F-VIKOR yöntemleri sıralama sonuçlarında elde edilmiştir. Hesaplama karmaşıklığı ise her yöntemin sıralama sonuçlarını elde etmek için hesaplanması gereken adımlarının toplamını ifade etmektedir. Hesaplama karmaşıklığı açısından en iyi performans 916 işlem ile VIKOR yönteminde elde edilmiştir. Daha sonra sırasıyla TOPSIS, F-VIKOR, F-TOPSIS yöntemleri ile elde edilmiştir. Hesaplama karmaşıklığı açısından VIKOR yöntemleri TOPSIS yöntemlerinden daha iyi performans göstermiştir. Alternatiflerin değiştirilmesine ilişkin yöntemlerin performansı için alternatiflerin dahil edilmesi ve hariç tutulmasına dayalı dört test yapılmıştır. Sonuçlar, F-TOPSIS'in alternatif sayısındaki değişiklikten çok fazla etkilenmedi görülmektedir. F-VIKOR'da yönteminde ise hayali kısıt eklendiğinde bazı, en kötü alternatif hariç tutulduğunda ise sıralama önemli değişiklikler göstermiştir. Alternatif değişikliğine F-TOPSIS yöntemi F-VIKOR yönteminden daha iyi performans göstermiştir. Sonuç olarak ilişki testinde yöntemler benzer sonuçlar, hesaplama karmaşıklığı açısından VIKOR yöntemleri, alternatif değişikliği açısından ise TOPSIS yöntemleri daha iyi performans göstermiştir. Web sitesi değerlendirme açısından kullanılan tüm yöntemlerin karar vericiler açısından kullanılabileceği görülmüştür. Fakat yöntemlerin karşılaştırılmasında bazı avantaj ve dezavantajlarını olduğunu gözlenmiştir.

Bu çalışmanın uygulaması mobilya sektöründe web sitesi değerlendirmesi için yapılmış olsa da elde edilen sonuçlar yalnızca bu sektöre özgü değildir; diğer sektörlerde de benzer uygulamalar gerçekleştirilebilir ve genişletilebilir. Bu sayede, farklı sektörlerdeki benzer durumların analiziyle daha kapsamlı sonuçlar elde edilebilir. Ayrıca çalışmanın ana motivasyonlarından biri, ÇKKV yöntemlerinin kapsamlı bir şekilde karşılaştırılmasıdır. Bu karşılaştırma, diğer yöntemlerle birlikte özellikle yeni geliştirilen yöntemler için yapılarak, yöntemlerin performansı analiz edilebilir ve daha fazla araştırma yapılabilir. Gelecek çalışmalarda da benzer şekilde özellikle yeni geliştirilen ÇKKV yöntemlerinin klasik yöntemlerle karşılaştıran ve farklı alanlarda uygulayan çalışmalar geliştirilebilir.

Kaynaklar

[1] Sałabun W, Wątróbski J, Shekhovtsov A. Are MCDA methods benchmarkable? a comparative study of TOPSIS, VIKOR, COPRAS, AND PROMETHEE II methods. Symmetry 2020; 12(9): 1549.

[2] Abdullah L. Fuzzy multi criteria decision making and its applications: a brief review of category. Procedia-Social and Behavioral Sci 2013; 97:131-136.

[3] Kul Y, Şeker A, Yurdakul M. Bulanık çok kriterli karar verme yöntemlerinin alışılmamış imalat yöntemlerinin seçiminde kullanılması. J of The Faculty of Eng Architecture of Gazi Uni 2014; 29(3): 589-603.

[4] Ceballos B, Lamata MT, Pelta DA. A comparative analysis of multi-criteria decision-making methods. Progress in Artificial Intelligence 2016; 5: 315-322.

[5] Zamani-Sabzi H, King JP, Gard CC, Abudu S. Statistical and analytical comparison of multi-criteria decision-making techniques under fuzzy environment. Operations Research Perspectives 2016; 3: 92-117.

[6] Zanakis SH, Solomon A, Wishart N, Dublish S. Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods. Eur J of Operational Research 1998; 107(3): 507-529.

[7] Wątróbski J, Jankowski J, Ziemba P, Karczmarczyk A, Zioło M. (2019). Generalised framework for multi-criteria method selection. Omega 2019; 86: 107-124.

[8] Sałabun W, Urbaniak K. A new coefficient of rankings similarity in decision-making problems. In Int Conference on Computational Science 2020 June; (pp. 632-645). Springer, Cham.

[9] Wang CN, Nguyen NAT, Dang TT, Lu CM. A compromised decision-making approach to third-party logistics selection in sustainable supply chain using fuzzy AHP and fuzzy VIKOR methods. Mathematics 2021; 9(8): 886.

[10] Erdebilli B, Sıcakyüz Ç. An Integrated Q-Rung Orthopair Fuzzy (Q-ROF) for the Selection of Supply-Chain Management. Sustainability 2024; 16(12): 4901.

[11] Biswas S, Bandyopadhyay G, Pamucar D, Sanyal A. A decision making framework for comparing sales and operational performance of firms in emerging market. Int J of Know-based Inte Eng Sys 2022; 26(3): 229-248.

[12] Piya S, Shamsuzzoha A, Azizuddin M, Al-Hinai N, Erdebilli B. Integrated fuzzy AHP-TOPSIS method to analyze green management practice in hospitality industry in the sultanate of Oman. Sustainability 2022; 14(3): 1118.

[13] Erdebilli B, Gecer E, Yılmaz İ, Aksoy T, Hacıoglu U, Dinçer H, Yüksel S. Q-ROF fuzzy TOPSIS and VIKOR methods for the selection of sustainable private health insurance policies. Sustainability 2023; 15(12): 9229.

[14] Solangi YA, Shah SAA, Zameer H, Ikram M, Saracoglu BO. Assessing the solar PV power project site selection in Pakistan: based on AHP-fuzzy VIKOR approach. Env Sci Poll Research 2019; 26(29): 30286-30302.

[15] Yeşilkaya M, Çabuk Y. A hybrid mathematical model for international target market decision: the case of fibreboard industry. Wood Material Sci & Eng 2023; 18(6):2013-2028.

[16] Nebati EE, Vatansever EN, Makas G. SWARA, ARAS ve WASPAS yöntemleri ile yeni şube yeri seçimi: bir kargo firması örneği. Fırat Üni Müh Bil Dergisi 2023; 35(1): 217-237.

[17] Dincer H, Yüksel S, Hacioglu U, Erdebilli B. Multidimensional Analysis of Investment Priorities for Circular Economy with Quantum Spherical Fuzzy Hybrid Modeling. Int J of Inf Tech Decision Making 2024.

[18] Chang DY. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. Eur J of Operational Res 1996; 95(3): 649-655.

[19] Yu X, Guo S, Guo J, Huang X. Rank B2C e-commerce websites in e-alliance based on AHP and fuzzy TOPSIS. Expert Systems with App 2011; 38(4): 3550-3557.

[20] Junior FRL, Osiro L, Carpinetti LCR. A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection. Applied Soft Computing 2014; 21: 194-209.

[21] Büyüközkan G, Güleryüz S. An integrated DEMATEL-ANP approach for renewable energy resources selection in Turkey. Int J Prod Econ 2016; 182: 435-448.

[22] Dey B, Bairagi B, Sarkar B, Sanyal SK. Group heterogeneity in multi member decision making model with an application to warehouse location selection in a supply chain. Computers Ind Eng 2017; 105: 101-122.

[23] Banaeian N, Mobli H, Fahimnia B, Nielsen IE, Omid M. Green supplier selection using fuzzy group decision making methods: A case study from the agri-food industry. Computers Operations Res 2018; 89: 337-347.

[24] Alkahtani M, Al-Ahmari A, Kaid H, Sonboa M. Comparison and evaluation of multi-criteria supplier selection approaches: A case study. Advances in Mechanical Eng 2019; 11(2): 1687814018822926.

[25] Rashidi K, Cullinane K. A comparison of fuzzy DEA and fuzzy TOPSIS in sustainable supplier selection: Implications for sourcing strategy. Expert Systems with App 2019; 121: 266-281.

[26] Ghaleb AM, Kaid H, Alsamhan A, Mian SH, Hidri L. Assessment and comparison of various MCDM approaches in the selection of manufacturing process. Advances in Materials Sci Eng 2020; 2020: 1-16.

[27] Youssef AE. An integrated MCDM approach for cloud service selection based on TOPSIS and BWM. IEEE Access 2020; 8: 71851-71865.

[28] Baczkiewicz A, Kizielewicz B, Shekhovtsov A, Wątróbski J, Sałabun W. Methodical aspects of MCDM based E-commerce recommender system. J Theoretical App Elec Commerce Res 2021; 16(6): 2192-2229.

[29] Kropivšek J, Grošelj P, Oblak L, Jošt M. A comprehensive evaluation model for wood companies websites based on the AHP/R-TOPSIS method. Forests 2021; 12(6): 706.

[30] Pramanik PKD, Biswas S, Pal S, Marinković D, Choudhury P. A comparative analysis of multi-criteria decision-making methods for resource selection in mobile crowd computing. Symmetry 2021; 13(9): 1713.

[31] Kizielewicz B, Bączkiewicz A. Comparison of Fuzzy TOPSIS, Fuzzy VIKOR, Fuzzy WASPAS and Fuzzy MMOORA methods in the housing selection problem. Procedia Computer Sci 2021; 192: 4578-4591.
[32] Varghese B, Karande P. AHP-MARCOS, a hybrid model for selecting gears and cutting fluids. Materials Today: Proceedings 2022; 52:1397-1405.
[33] Ho W, Ma X. The state-of-the-art integrations and applications of the analytic hierarchy process. Eur J of Operational Res 2018; 267(2):399-414.
[34] Yeşilkaya M, Çabuk Y, Karayılmazlar S. TOPSIS-VIKOR yöntemleriyle Türkiye'deki illerin endüstriyel odun üretimi analizi. Bartın Orman Fak Dergisi 2022; 24(3): 476-487.
[35] Saaty TL. The analytic hierarchy process (AHP). J of the Operational Res Society 1980; 41(11):1073-1076.
[36] Saaty TL. Decision making with the analytic hierarchy process. Int J Services Sci 2008; 1(1): 83-98.
[37] Aminbakhsh S, Gunduz M, Sonmez R. Safety risk assessment using analytic hierarchy process (AHP) during planning and budgeting of construction projects. J of Safety Res 2013; 46: 99-105.
[38] Nefeslioglu HA, Sezer EA, Gokceoglu C, Ayas Z. A modified analytical hierarchy process (M-AHP) approach for decision support systems in natural hazard assessments. Computers & Geosciences 2013; 59: 1-8.
[39] Naseem MH, Yang J, Xiang Z. Prioritizing the solutions to reverse logistics barriers for the e-commerce industry in Pakistan based on a fuzzy AHP-TOPSIS approach. Sustainability 2021; 13(22): 12743.
[40] Wu J, Sun J, Zha Y, Liang L. Ranking approach of cross-efficiency based on improved TOPSIS technicus. J of Systems Eng Elec 2011; 22(4): 604-608.
[41] Hezer S, Gelmez E, Özceylan E. Comparative analysis of TOPSIS, VIKOR and COPRAS methods for the COVID-19 Regional Safety Assessment, J of Infection and Public Health 2021; 14(6): 775-786.
[42] Opricovic S, Tzeng GH. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. European J Operational Res 2004; 156(2): 445-455.
[43] Alpay S, Iphar M. Equipment selection based on two different fuzzy multi criteria decision making methods: Fuzzy TOPSIS and fuzzy VIKOR. Open Geosciences 2018; 10(1): 661-677.
[44] Ploskas N, Papathanasiou J. A decision support system for multiple criteria alternative ranking using TOPSIS and VIKOR in fuzzy and nonfuzzy environments. Fuzzy Sets and Systems 219; 377:1-30.
[45] Yoon KP, Hwang, CL. Multiple attribute decision making: an introduction. 1995, Sage publications.
[46] Shohda AM, Ali MA, Ren G, Kim JG, Abdo AM, Abdellah WR, Hassan AM. Sustainable assignment of Egyptian ornamental stones for interior and exterior building finishes using the AHP-TOPSIS technique. Sustainability 2022; 14(4):2453.
[47] Mardani A, Zavadskas EK, Govindan K, Amat Senin A, Jusoh A. VIKOR technique: A systematic review of the state of the art literature on methodologies and applications. Sustainability 2016; 8(1): 37.
[48] Opricovic S. Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning. Expert Sys. App 2011; 38(10): 12983-12990.
[49] Yavuz S, Deveci M. Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR yöntemleriyle alışveriş merkezi kuruluş yeri seçimi ve bir uygulama. Ege Academic Review 2014; 14(3): 463-479.
[50] Amiri MP. Project selection for oil-fields development by using the AHP and fuzzy TOPSIS methods. Expert Systems with App 2010; 37(9). 6218-6224.
[51] Chen CT. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. Fuzzy Sets Systems 2000; 114(1): 1-9.
[52] Lee Y, Kozar KA. Investigating the effect of website quality on e-business success: An analytic hierarchy process (AHP) approach. Decision Support Systems 2006; 42(3): 1383-1401.
[53] Lin HF. An application of fuzzy AHP for evaluating course website quality. Computers Edu 2010; 54(4): 877-888.
[54] Li R, Sun T. Assessing factors for designing a successful B2C E-commerce website using fuzzy AHP and TOPSIS-Grey methodology. Symmetry 2020; 12(3): 363.
[55] Raju KS, Duckstein L, Arondel C. Multicriterion analysis for sustainable water resources planning: a case study in Spain. Water Resources Man 2000; 14(6): 435-456.
[56] Arabameri A, Pradhan B, Pourghasemi HR, Rezaei K. Identification of erosion-prone areas using different multi-criteria decision-making techniques and GIS. Geomatics, Natural Hazards and Risk 2018; 9(1): 1129-1155.
[57] Arabameri A, Tiefenbacher JP, Blaschke T, Pradhan B, Tien Bui D. Morphometric analysis for soil erosion susceptibility mapping using novel gis-based ensemble model. Remote Sensing 2020; 12(5): 874.
[58] Chitsaz N, Banihabib ME. Comparison of different multi criteria decision-making models in prioritizing flood management alternatives. Water Resources Man 2015; 29: 2503-2525.
[59] Chakraborty S, Saha AK. A framework of LR fuzzy AHP and fuzzy WASPAS for health care waste recycling technology. App Soft Computing 2022; 127: 109388.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 151-166, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1518386

Comprehensive Performance Analysis and Evaluation of Various Maze Solving Algorithms for Optimized Autonomous Navigation and Pathfinding

Mustafa Emre ERBİL[1], Merdan ÖZKAHRAMAN[2*], Hilmi Cenk BAYRAKÇI[3]
[1,2,3] Mechatronics Engineering, Faculty of Technology, Isparta Univesity of Applied Sciences, Isparta, Türkiye
[1] mail@mustafaemreerbil.com, [*2] merdanozkahraman@isparta.edu.tr, [3] cenkbayrakci@isparta.edu.tr

(Geliş/Received: 19/07/2024; Kabul/Accepted: 11/11/2024)

Abstract: Recent advancements in technology have led to the widespread use of maze-solving algorithms in various applications, such as autonomous robots, GPS-based navigation systems, smart traffic management systems, and healthcare services. This study provides a comprehensive comparative analysis of the performance of several maze-solving algorithms, including A*, Breadth-First Search (BFS), Depth-First Search (DFS), Dijkstra, Flood Fill, Random Mouse, and Recursive Backtracker. The algorithms were evaluated based on key performance metrics such as solution speed, memory usage, and CPU consumption. The results indicate that while the DFS algorithm demonstrates the fastest solution time with minimal memory usage, it has higher CPU consumption. In contrast, the Random Mouse algorithm is the least efficient, showing the highest memory and CPU usage along with the longest solution time. The A* algorithm, although efficient in finding the shortest path, showed moderate performance in both memory and CPU usage. These findings offer valuable insights into the strengths and weaknesses of each algorithm, providing guidance for future improvements and applications in real-world scenarios. This study aims to be a valuable resource for researchers and engineers focused on enhancing the efficiency of maze-solving algorithms in various technological domains.

Keywords: Autonomous systems, maze solving algorithms, navigation technologies, pathfinding optimization, performance analysis.

Çeşitli Labirent Çözme Algoritmalarının Optimum Otonom Navigasyon ve Yol Bulma için Kapsamlı Performans Analizi ve Değerlendirilmesi

Öz: Teknolojideki son gelişmeler, otonom robotlar, GPS tabanlı navigasyon sistemleri, akıllı trafik yönetim sistemleri ve sağlık hizmetleri gibi çeşitli uygulamalarda labirent çözme algoritmalarının yaygın olarak kullanılmasına yol açmıştır. Bu çalışma, A*, Genişlik Öncelikli Arama (BFS), Derinlik Öncelikli Arama (DFS), Dijkstra, Flood Fill, Random Mouse ve Recursive Backtracker dahil olmak üzere çeşitli labirent çözme algoritmalarının performansının kapsamlı karşılaştırmalı bir analizini sunmaktadır. Algoritmalar, çözüm hızı, bellek kullanımı ve CPU tüketimi gibi ana performans metrikleri temelinde değerlendirilmiştir. Sonuçlar, DFS algoritmasının minimal bellek kullanımı ile en hızlı çözüm süresini gösterirken, daha yüksek CPU tüketimine sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, Random Mouse algoritması en verimsiz olup, en yüksek bellek ve CPU kullanımının yanı sıra en uzun çözüm süresini göstermektedir. A* algoritması, en kısa yolu bulmada verimli olmasına rağmen, bellek ve CPU kullanımında orta düzeyde performans göstermiştir. Bu bulgular, her bir algoritmanın güçlü ve zayıf yönlerine ilişkin değerli bilgiler sunmakta ve gerçek dünya uygulamalarında gelecekteki iyileştirmeler ve uygulamalar için rehberlik sağlamaktadır. Bu çalışma, labirent çözme algoritmalarının verimliliğini artırmayı hedefleyen araştırmacılar ve mühendisler için değerli bir kaynak olmayı amaçlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Otonom sistemler, labirent çözme algoritmaları, navigasyon teknolojileri, yol bulma optimizasyonu, performans analizi.

1. Introduction

The rapid advancement of technology has led to the widespread use of maze-solving algorithms. These algorithms are critically important in various fields such as autonomous robots, agricultural drones, GPS-based navigation systems for exploration and search-and-rescue operations, smart traffic management systems for optimizing traffic flow, and healthcare services for patient transportation and material distribution [1-3]. This growing importance necessitates a thorough examination and enhancement of these algorithm's performance. Autonomous robots must navigate complex paths and obstacles to increase efficiency in industrial environments such as storage facilities and factories [4]. Maze-solving algorithms play a crucial role in enhancing these

[*] Sorumlu yazar: merdanozkahraman@isparta.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0009-0003-9394-8588, [2] 0000-0002-3501-6497, [3] 0000-0001-5064-7310

capabilities. Agricultural drones utilize these algorithms to effectively navigate large farming areas and optimize agricultural activities [5, 6]. GPS-based navigation systems require these algorithms to find the fastest and safest routes in challenging and hazardous environments during exploration and search-and-rescue operations. Smart traffic management systems use optimized pathfinding solutions to regulate urban traffic flow and reduce congestion [7, 8]. In healthcare services, systems that transport patients or distribute materials in hospitals benefit from these algorithms to increase efficiency and enable quick response in emergencies.

In this study, the performance of A* (A-Star), Breadth-First Search (BFS), Depth-First Search (DFS), Dijkstra, Flood Fill, Random Mouse, and Recursive Backtracker algorithms are comparatively analyzed on the same maze. Each algorithm's performance metrics, including solution speed, memory usage, and CPU consumption, were evaluated and the results were analyzed comparatively. Additionally, the scenarios in which each algorithm is more efficient and the conditions under which their performance declines were examined in detail. Evaluating the performance of maze-solving algorithms is crucial for understanding their effectiveness in real-world applications. This assessment reveals the strengths and weaknesses of the algorithms, providing valuable insights for future development efforts. This study aims to determine which algorithm is more suitable under specific conditions by evaluating the performance of different algorithms in various applications.

The objectives of this study are as follows:

- To compare the solution speeds, memory usage, and CPU consumption of different maze-solving algorithms.
- To analyze how these algorithms perform in various application scenarios.
- To identify the strengths and weaknesses of the algorithms and determine the conditions in which they are more suitable.
- To provide recommendations for improving the efficiency of these algorithms in real-world applications based on the results obtained.

This study aims to be a valuable resource for researchers and engineers focused on enhancing the efficiency of maze-solving algorithms, particularly in autonomous systems and navigation technologies. The findings will guide the improvement of these algorithms and the development of new approaches.

2. State of the Art

The A* algorithm is a widely used method for solving pathfinding and graph traversal problems. It was developed in 1968 by Peter Hart, Nils Nilsson, and Bertram Raphael at the Stanford Research Institute. The A* algorithm combines the benefits of Dijkstra's algorithm and the Greedy Best-First Search algorithm, leveraging both approaches' strengths. This algorithm operates using a heuristic function, which is a form of guided search, to find the path from the starting point to the goal with the lowest cost [9]. A* is preferred in many applications because it is both precise and efficient. By employing the heuristic function, it accelerates the search process by evaluating only the nodes that are close to the goal. This significantly enhances the algorithm's performance and makes it effective in numerous real-world applications [10, 11]. The heuristic function speeds up the search process. The use of a properly selected heuristic guarantees the shortest path. The algorithm can quickly adapt to changing environmental conditions and recalculate paths as necessary.

The Breadth-First Search (BFS) algorithm is designed to traverse a graph or tree data structure layer by layer, aiming to locate a node with a specific property. The BFS algorithm was developed in 1959 by E. F. Moore in the context of finding the shortest path through a maze. It was independently rediscovered in 1961 by C. Y. Lee for pathfinding applications on circuit boards [12-14].

The Depth-First Search (DFS) algorithm is designed to explore all nodes in a graph or tree data structure by starting at a root node and diving as deep as possible before backtracking to discover all nodes. The foundations of DFS were established in the 19th century by French mathematician Charles Trémaux through his work on maze problems. Later, in the 1970s, John Hopcroft and Robert Tarjan formalized the algorithm and introduced various optimizations [15, 16].

The Dijkstra algorithm is a widely used algorithm for finding the shortest path between nodes in a graph [17, 18]. It was developed by the Dutch computer scientist Edsger W. Dijkstra in 1956 and published in 1959 [19]. The algorithm is designed to find the shortest paths from a starting node to all other nodes in a graph, and it can be applied to both directed and undirected graphs with non-negative edge weights. The Flood Fill algorithm is a graph or image processing algorithm used to identify contiguous regions of the same color from a starting point and fill these areas with a new color. The origins of the algorithm trace back to computer graphics and it is commonly known in paint programs as the "bucket fill" tool. The algorithm's initial uses date back to the 1970s, and it holds significant importance in the field of computer graphics [20, 21].

The Recursive Backtracker algorithm is a widely used method for maze solving and maze generation. The origins of the algorithm are generally rooted in the development of backtracking methods, with various contributions from scientists since the mid-20th century. However, the specific developer or exact date of the Recursive Backtracker algorithm's inception is not clearly defined. This algorithm is extensively utilized in computer graphics and robotics applications [22, 23].

The Random Mouse algorithm is a simple algorithm that attempts to solve a maze by following random paths. This algorithm aims to reach the target by moving in completely random directions without a specific exploration strategy. Although the origins and the inventor of the algorithm are unclear, it is known to be used for educational and research purposes in computer science and robotics [24-26]. Due to its simplicity and ease of implementation, the Random Mouse algorithm is employed for educational and research purposes. Because it does not rely on a specific strategy, it serves as a baseline for comparing the performance of heuristic and systematic algorithms. Additionally, it is used as a reference model for non-heuristic problems.

The table presents a comparative analysis of various maze-solving algorithms, highlighting their performance metrics across different test environments, as shown in Table 1. Each algorithm was tested on a simple 2D grid, a complex 2D maze, and a three-dimensional navigation scenario. The performance metrics evaluated include average solution time (in milliseconds) and memory usage (in megabytes).

Table 1. Comparative Performance Analysis of Maze Solving Algorithms Across Different Test Environments.

Tested Algorithms	Test Platform	Performance		Reference
		Average Solution Time	Memory Usage	
A*	Static 2D Grid (50x50)	36.806 seconds	Not provided	[27]
BFS	Hopper (40,000 cores) BFS time changes parallel to the number of cores	2.67 to 7.18 seconds	Not provided	[28]
DFS	Binary trees, tested on symmetric and asymmetric structures	Parallel time: 0.047 seconds, Sequential time: 0.094 seconds	Not provided	[29]
Dijkstra	Erdős-Rényi graphs with edge weights ranging from 1 to 1000, tested with 10 million nodes	25 ms	Not provided	[30]
Flood Fill	625 pixel	Solution time: 13 ms on the largest test	Not provided	[21]
Recursive Backtracker	16x16 and 32x32 2D grid	16x16: 35ms. 32x32: 65ms	16x16: 1.2 MB 32x32: 2.8 MB	[31]

As seen in Table 1, the A* algorithm demonstrates an average solution time of 36.806 seconds on a static 2D grid (50x50). The BFS algorithm, tested on the Hopper platform with 40,000 cores, reports an average solution time ranging between 2.67 and 7.18 seconds, with performance scaling in parallel to the number of cores. The DFS algorithm, tested on both symmetric and asymmetric binary trees, shows a parallel processing time of 0.047 seconds, while the sequential processing time reaches 0.094 seconds. The Dijkstra algorithm applied to Erdős-Rényi graphs (with edge weights ranging from 1 to 1000 and 10 million nodes), shows an average solution time of 25 milliseconds. For the Flood Fill algorithm, tested on a 16x16 grid, the solution time varied based on grid size, achieving 13 milliseconds on the largest test. The Recursive Backtracker algorithm reports solution times of 35 ms for 16x16 grids, and 65 ms for 32x32 grids, with memory usage ranging from 1.2 MB to 2.8 MB.

3. Method

In this study, a grid-based maze with dimensions of 51x51, generated using a Depth-First Search (DFS) algorithm, was utilized. This maze is represented as a binary matrix where each cell is either a path (0) or a wall

(1). The starting point of the maze is set at (0,0) and the ending point at (50,50). A maze of this size provides sufficient complexity and difficulty, making it ideal for testing the performance of various algorithms.

The primary reason for using such a maze is that it offers a structure that is both sufficiently complex and orderly for evaluating algorithm performance. Randomly generated mazes are effective in simulating real-world scenarios as they allow for testing across different sizes and levels of complexity. This enables a more realistic assessment of the algorithms' solution speed, memory usage, and CPU consumption. Additionally, random mazes allow for the observation of how different algorithms perform under various conditions [32].

To generate the maze, a DFS-based algorithm and the generate_maze function, written in Python, were used. The algorithm produces a random maze using a specific seed value (seed=42). This is crucial for ensuring the repeatability of the experiments; the same seed value will generate the same maze in each run. The algorithm starts from the initial point, visits all cells, and creates paths by removing the walls between randomly selected neighboring cells [33, 34]. The generated maze was visualized using the plot_solution function, as shown in Figure 1.

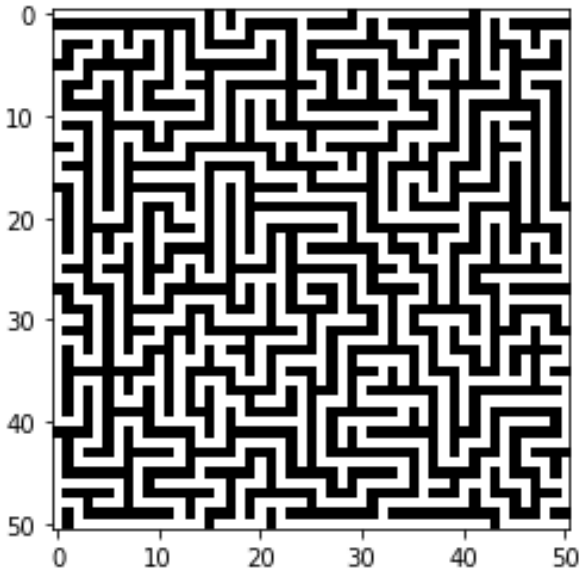


Figure 1. The maze created for the experimental study.

The maze generation process follows these steps:

- The starting point (0,0) is selected, and a stack is used to keep track of unprocessed cells.
- From the current cell in the stack, a random neighbor is chosen from the four main directions (right, left, up, down).
- If the chosen neighboring cell has not been visited yet, the wall between them is removed, and this cell is added to the stack.
- This process continues until all cells have been visited.

The flowchart of these operations is shown in Figure 2.

This method not only creates complex and challenging mazes but also provides an ideal environment for testing the performance of algorithms. The uniqueness and repeatability of the generated mazes ensure consistency in the comparative analysis of the algorithms [34, 35].

The Depth-First Search (DFS) algorithm was chosen for the maze generation process because it is simple, efficient, and easy to implement. DFS uses a deep search strategy to systematically visit all cells of the maze and create paths through random selections. It is efficient in terms of memory usage and, due to its recursive nature, can generate complex maze structures. Additionally, the use of DFS ensures that the algorithm effectively visits all cells starting from a specific point, guaranteeing that the maze is unique and complex each time. These characteristics make DFS an ideal algorithm for maze generation [32, 36].

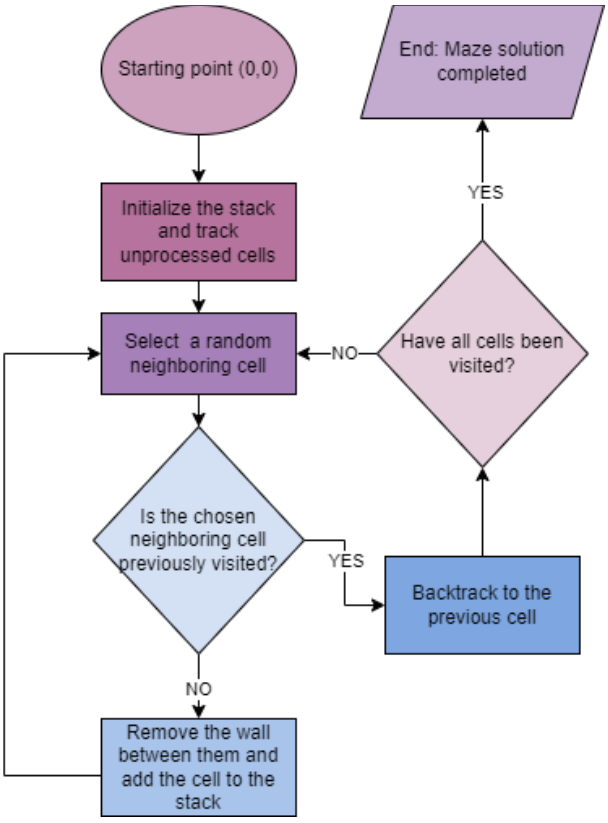


Figure 2. Flowchart of maze solve.

3.1. A* (A-Star) algorithm

This method not only creates complex The A* algorithm finds the shortest path between nodes in a graph by using both cost (g) and heuristic (h) functions. The algorithm maintains two lists: an open list (nodes yet to be evaluated) and a closed list (nodes already evaluated). It selects the node with the lowest f(n) = g(n) + h(n) value from the open list and evaluates it. When the goal node is reached, the algorithm has found the shortest path [18]. Basic functions on mathematical calculations of the A* Algorithm:

- $g(n)$: The actual cost from the start node to node n.
- $h(n)$: The estimated cost from node n to the goal node (heuristic function).
- $f(n)$: The total estimated cost of reaching the goal through node nnn. It is the sum of the two components as shown in Equation 1.

$$f(n) = g(n) + h(n) \tag{1}$$

where $g(n)$, represents the actual cost to reach a particular node, which is the sum of the transition costs at each step. $h(n)$, represents the estimated cost from node nnn to the goal, typically determined using different heuristic functions depending on the problem-solving strategy [37].

The heuristic function $h(n)$, A argely determines the efficiency of the A* algorithm. This function is used to estimate the shortest path from a node to the goal. An ideal heuristic function should be:

- Consistent: $h(n) \leq c(n,m) + h(m)$
- Admissible: $h(n) = 0$ for the goal node and should not overestimate the actual cost for all other nodes.

Manhattan distance, the sum of the horizontal and vertical steps between two points as shown in Equation 2 [37].

$$h(n) = |x1 - x2| + |y1 - y2| \tag{2}$$

Euclidean distance, the straight-line distance between two points as shown in Equation 3.

$$H(n)= (x1-x2)^2 + (y1-y2)^2 \quad (3)$$

In the best case, if the heuristic function provides a perfect estimate, the time complexity is $O(b^d)$ where b is the branching factor at each node and d is the depth of the solution. In the worst case, if the heuristic function is weak, the time complexity is $O(|E|)$, where E represents the number of edges in the graph.

The space complexity is $O(|V|)$, where V represents the number of nodes in the graph. This accounts for the total number of nodes stored in the open and closed lists. Step-by-step process of an algorithm:

- Initialization: Add the start node to the open list.
- Selecting the Node with the Lowest
- Evaluation: If the goal node is reached, return success and the path. Otherwise, move node n to the closed list and evaluate its neighbors.
- Evaluating Neighbors: For each neighbor node, calculate the g and f values:
- Updating Lists: If the neighbor node is not in the open list, add it to the open list. If a lower-cost path is found in the open list, update the values.
- Repeated Evaluation: Return to step 2 and continue until the open list is empty.

The A* (A-Star) Algorithm was implemented using the astar function in Python to solve the maze. The maze solved using the A* (A-Star) algorithm is shown in Figure 3.

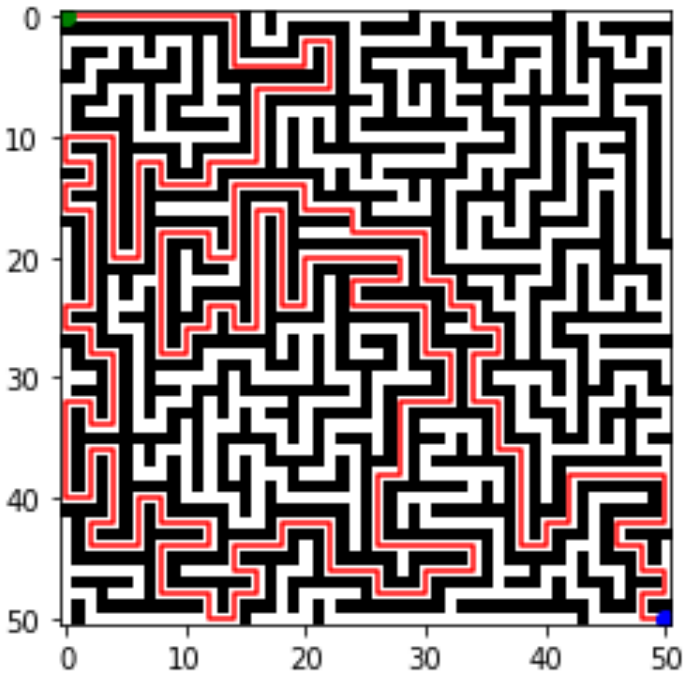


Figure 3. Maze solved using the A* (A-Star) algorithm.

3.2. BFS algorithm

The Breadth-First Search (BFS) algorithm is a fundamental and widely used algorithm for graph traversal and pathfinding problems. BFS starts at the root node and explores all nodes at the present depth level before moving on to nodes at the next depth level. This process is typically implemented using a queue data structure. The steps of the BFS algorithm are as follows:

- The start node is added to the queue and marked as visited.
- The node at the front of the queue is removed, and its neighboring nodes are added to the queue in order.
- This process continues until the goal node is found or all nodes have been visited.

The BFS algorithm is used to find the shortest path from a specific node to all other nodes by exploring nodes layer by layer. The mathematical calculations and complexity analysis of BFS are as follows:

Mathematical calculations and complexity analysis of the BFS algorithm, The time complexity of the BFS algorithm is expressed as O(V + E), where, V is the number of vertices in the graph. E is the number of edges in the graph. This time complexity arises because each vertex and each edge is visited at most once. BFS explores each vertex and edge in the graph only once. The space complexity of the BFS algorithm is O(V). This is because BFS stores and visits each vertex in the queue at most once. Therefore, the maximum number of vertices stored in memory is equal to the number of vertices in the graph. Step-by-step process of the a algorithm:

- Initialization: The starting node (s) is added to the queue and marked as visited.
- Loop: The node at the front of the queue (u) is removed. All neighbors (v) of node u are explored. If a neighboring node has not been visited, it is added to the queue and marked as visited. This process continues until the goal node is found or all nodes have been visited.

Reasons for preferring BFS, guarantees reaching the goal node if it exists. In unweighted graphs, BFS ensures finding the shortest path [14, 36, 38]. It is easy to implement and understand, using a queue that operates on the FIFO (First In, First Out) principle.

The effectiveness of the BFS algorithm stands out, especially in problems requiring the exploration of large areas and in scenarios where the shortest path needs to be found. Additionally, it has many applications in analyzing cycles and connections within graph structures. The maze solved using the BFS algorithm is shown in Figure 4.

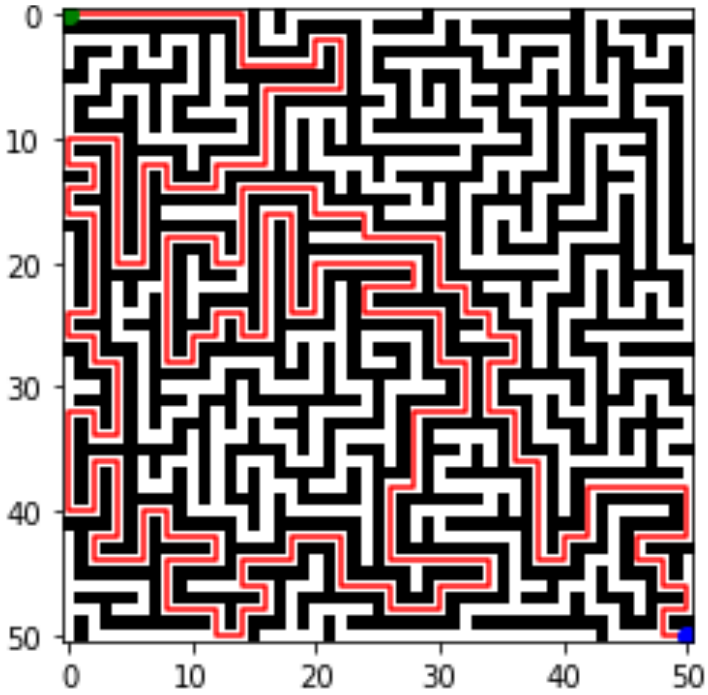


Figure 4. Maze solved using the BFS algorithm.

3.3. DFS algorithm:

The DFS (Depth-First Search) algorithm is used to visit all nodes in a graph or tree structure using a depth-first search strategy. The algorithm starts at the initial node and explores one neighboring node at a time. This process continues until there are no more neighbors to explore, at which point the algorithm backtracks to discover other nodes [33, 36]. DFS is typically implemented using a stack data structure. Here are the general steps of DFS:

- The starting node is added to the stack and marked as visited.
- The node at the top of the stack is removed, and its neighbors are visited.
- Each visited node is added to the stack, and the process continues in this manner.
- This process is repeated until all nodes have been visited.

Mathematical calculations of DFS, The time complexity of the DFS algorithm is expressed as $O(V + E)$, where, V represents the number of vertices. E represents the number of edges. This arises because each vertex and edge is visited at most once. The DFS algorithm processes nodes and edges only once, ensuring linear time complexity. The space complexity is $O(V)$ because each vertex is added to the stack at most once. This means the maximum size of the stack will be equal to the number of vertices in the graph. DFS can also be implemented using the call stack due to its recursive nature, in which case the space complexity remains $O(V)$. Step-by-step process of the a algorithm:

- Adding the start node to the stack and marking it as visited
- Removing the node at the top of the stack and visiting its neighbors
- Repeating the process until all nodes are visited

Advantages and applications of the DFS algorithm, DFS guarantees visiting all nodes in a connected graph. This is ideal for situations where all nodes need to be explored. DFS can quickly find a path or solution by performing a deep search. This is particularly advantageous when the target node is deep within the graph. The algorithm is easy to implement and understand. It can be implemented simply using recursion or a stack. The DFS algorithm is preferred in many applications, such as pathfinding on maps, network traffic analysis, and movement planning in AI games [38]. The maze solved using the DFS algorithm is shown in Figure 5.

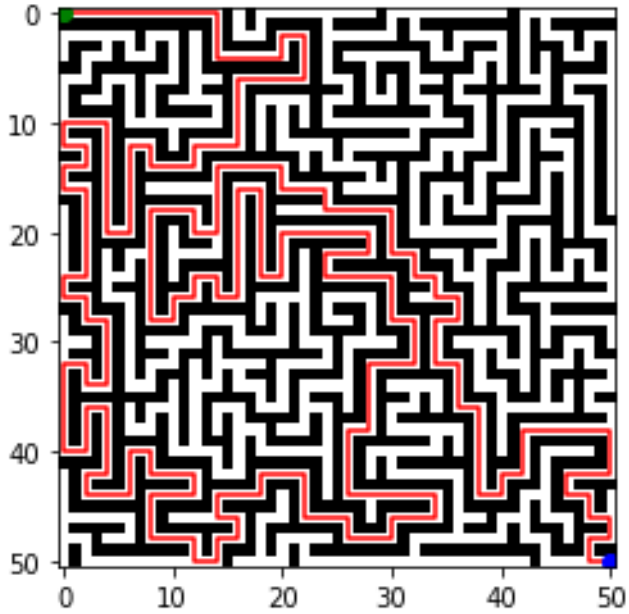


Figure 5. Maze solved using the DFS algorithm.

3.4. Dijkstra algorithm

The Dijkstra algorithm works similarly to the A* algorithm but does not use a heuristic function. The algorithm starts at the initial node and, at each step, selects the node with the shortest distance, then updates the distances to neighboring nodes through this node. This process continues until all nodes have been processed [17, 39]. The basic steps of the algorithm are as follows:

- Set the distance to the start node to zero and the distance to all other nodes to infinity.
- Add all nodes to the list of unprocessed nodes.
- Select the unprocessed node with the shortest distance.
- Update the distances to neighboring nodes through this node.
- Mark this node as processed and return to step 3.
- Repeat this process until all nodes have been processed.

Mathematical calculations of Dijkstra Algorithm, the time complexity of the Dijkstra algorithm is generally expressed as $O(V^2)$, where, V represents the number of vertices. This time complexity is applicable when a simple priority queue data structure is used [24]. When more efficient data structures, such as the Fibonacci heap, are used, the time complexity as shown in Equation 4.

$$O(V \log V + E) \quad (4)$$

Here, V represents the number of vertices. E represents the number of edges. The Fibonacci heap allows for more efficient management of the priority queue, so each node processing operation is performed in $O(\log V)$ time. This significantly reduces the overall time complexity [19]. Step-by-step process of the algorithm:

- Setting the distance to the start node to zero and the distance to all other nodes to infinity
- Adding all nodes to the list of unprocessed nodes
- Selecting the unprocessed node with the shortest distance
- Updating the distances to neighboring nodes through this node
- Marking this node as processed and returning to step 3
- Repeating the process until all nodes have been processed.

The Dijkstra algorithm guarantees the shortest path when the correct data structures are chosen. This feature enhances the algorithm's accuracy and reliability. It works efficiently in graphs with non-negative weights. In graphs without negative edge weights, it performs effectively in finding the shortest path. The Dijkstra algorithm has a wide range of applications, including pathfinding, network routing, and geographic information systems. In these areas, finding the shortest path ensures efficient resource utilization and enhances system performance [18]. The maze solved using the Dijkstra algorithm is shown in Figure 6.

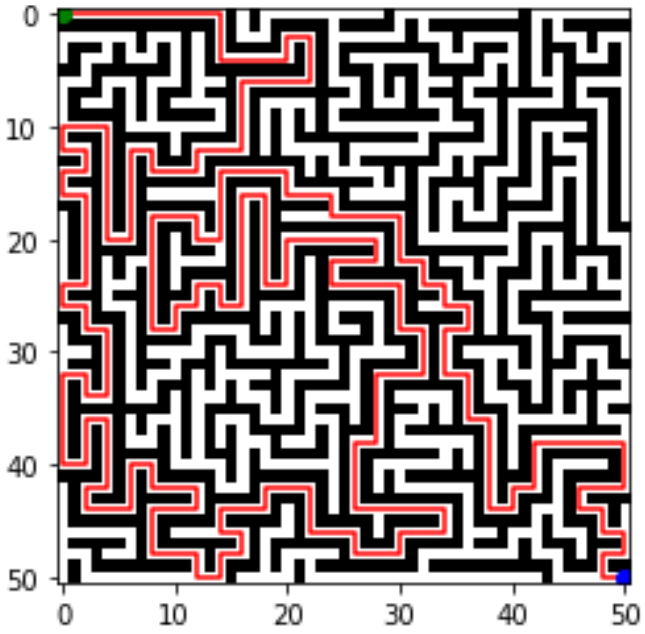


Figure 6. Maze solved using the dijkstra algorithm.

3.5. Flood Fill algorithm

The Flood Fill algorithm operates by using either four-directional or eight-directional connectivity. It starts by changing the color of the pixel at the initial point and then checks its neighboring pixels. It changes the color of neighboring pixels that are the same color, continuing this process until all connected pixels are filled with the new color [24]. The algorithm is typically implemented using stack or queue data structures. Here are the general steps of the algorithm:

- The starting pixel is added to the stack.
- The pixel at the top of the stack is removed, and its color is changed.
- The neighboring pixels are checked, and those of the same color are added to the stack.
- This process is repeated until the stack is empty.

The Flood Fill algorithm is used to fill a specific color or value starting from a given pixel in a graph or image. The algorithm visits each neighboring pixel, continuing this process until all relevant pixels are filled. Mathematical calculations of Flood Fill algorithm, The time complexity of the Flood Fill algorithm is $O(N)$, where

N represents the total number of pixels to be filled. The algorithm visits and processes each pixel at most once. The space complexity of the Flood Fill algorithm is also *O(N)*. This is because the algorithm uses stack (for DFS) or queue (for BFS) data structures, which can store all pixels in the worst-case scenario. The Flood Fill algorithm is preferred for many applications because it is easy to implement and understand. It provides fast and effective results in graphic and image processing applications [40]. It can work with different connectivity types (four or eight directions). Step-by-step process of the algorithm:

- Initial Pixel and Color Change: Assume the starting pixel is (x, y) and its color is c. The new color will be c'.
- Checking Neighboring Pixels: The algorithm checks neighboring pixels using either four-directional (up, down, left, right) or eight-directional (up, down, left, right, upper left, upper right, lower left, lower right) connectivity.

The Flood Fill algorithm starts from a specific pixel and fills all relevant pixels with the new color. The time and space complexities determine the efficiency of the algorithm, making it an ideal solution for many applications. The maze solved using the Flood Fill algorithm is shown in Figure 7.

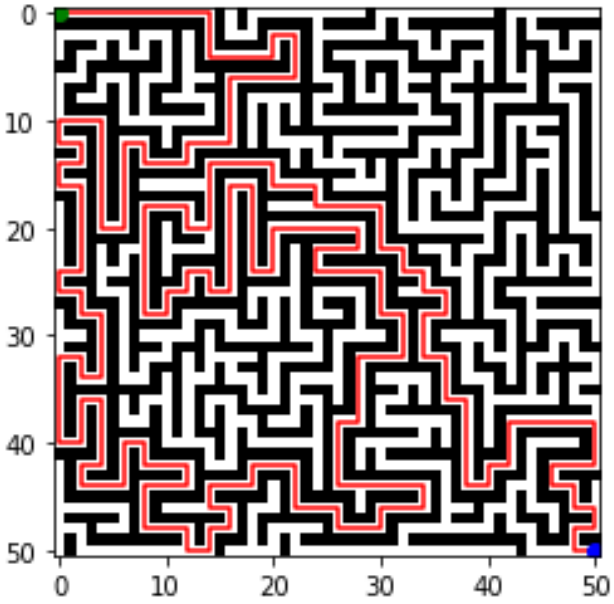


Figure 7. Maze solved using the Flood Fill algorithm.

3.6. Recursive Backtracker algorithm

The Recursive Backtracker algorithm is based on the depth-first search (DFS) method. It starts at the initial cell, randomly selects a neighboring cell, and moves to that cell. If the cell has not been visited before, it marks the cell as visited and continues this process until a dead-end is encountered. When a dead-end is reached, the algorithm backtracks to the previous cell and tries to visit other neighboring cells. This process continues until all cells have been visited [26]. Steps of the Algorithm:

- Start at the initial cell: Add the initial cell to the stack and mark it as visited.
- Randomly select a neighboring cell and move: From the current cell in the stack, randomly select a neighboring cell and move to that neighbor.
- Mark the cell as visited if it hasn't been visited before: If the new cell has not been visited, mark it as visited and add it to the stack.
- Backtrack if a dead-end is encountered: When a dead-end is reached, remove the cell from the stack, backtrack to the previous cell, and try to visit other neighboring cells.
- Repeat this process until all cells have been visited: Continue this process until all cells have been visited [22, 41].

Mathematical calculations of Recursive Backtracker Algorithm, The time complexity of the Recursive Backtracker algorithm is expressed as *O(V + E),* where V represents the number of vertices and E represents the

number of edges. This complexity arises because each vertex and edge is visited at most once. The space complexity of the algorithm is *O(V)* because each vertex is added to the stack at most once. Being based on DFS, it processes each vertex using a stack data structure, which is stored in memory. Step-by-step process of the a algorithm:

- Cell Selection and Movement: Starting from the initial cell, the algorithm randomly selects a neighboring cell and moves to it.
- Visiting and Backtracking: Each visited cell is marked as visited. When a dead-end is encountered, the algorithm backtracks.

The Recursive Backtracker algorithm is preferred for many applications because, It is easy to implement and understand. It uses a stack data structure to perform depth-first search. It provides quick results, especially in maze generation and solving tasks. It explores various paths through random selections. It can work with different types of connectivity and can be adapted to various applications. It can operate with both four-directional and eight-directional connections. The maze solved using the Recursive Backtracker algorithm is shown in Figure 8.

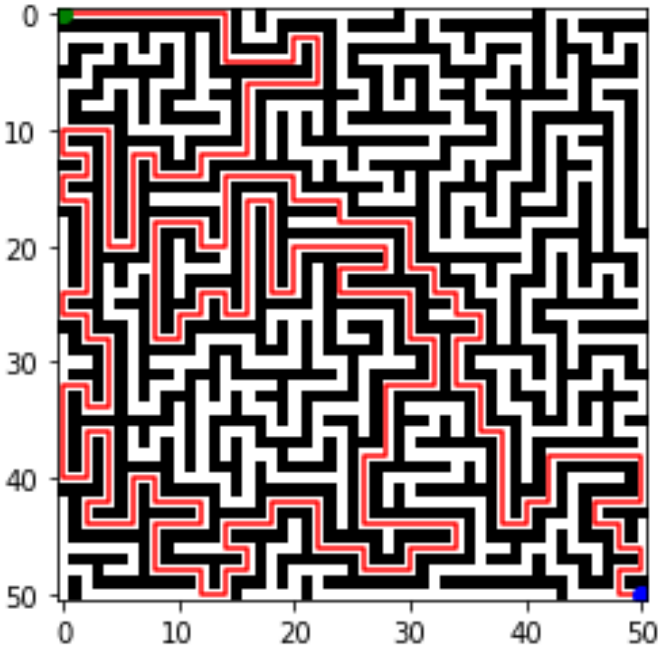


Figure 8. Maze solved using the Recursive Backtracker algorithm.

3.7. Random Mouse algorithm

The Random Mouse algorithm uses a completely random strategy without following any heuristic or systematic path. This algorithm starts from the initial point and moves by randomly selecting a direction at each step. If it reaches a dead-end or returns to a previously visited node, it randomly selects another direction and continues [25, 42]. This process continues until the target node is reached. Steps of the Algorithm:

- Start from the initial node: The algorithm starts from the initial node and marks this node as visited.
- Select a random direction and move: The algorithm randomly selects a neighboring node from the current node and moves to that node.
- Repeat the steps until the target node is reached: The algorithm continues moving by selecting random directions until it reaches the target node.

Mathematical calculations of Random Mouse Algorithm, The time complexity of the Random Mouse algorithm is not defined by a specific measure since it moves randomly. Theoretically, in the worst-case scenario, the time complexity could be $O(\infty)$ because the algorithm can take an infinite number of steps. However, in practice, the time complexity usually varies depending on the size and structure of the maze. The space complexity of the algorithm is also not defined by a specific measure. Since the algorithm moves randomly, the number of visited nodes and the path length are unpredictable. In the worst case, the algorithm may visit the entire maze,

resulting in a space complexity of *O(V),* where *V* represents the number of nodes. Step-by-step process of the a algorithm:

- Random Movement and Visiting: The Random Mouse algorithm selects a random direction and moves at each step.
- Dead-End and Backtracking: When the algorithm encounters a dead-end or returns to a previously visited node, it continues to select a random direction.

Advantages of the algorithm, the algorithm is extremely simple and easy to understand. It works by selecting random directions, requiring no complex calculations. It is easy to implement and does not require any data structures or advanced algorithm knowledge. Disadvantages of the algorithm, since it moves randomly, it may take unnecessary steps and can be inefficient, especially in large and complex mazes. The algorithm's time to reach the goal is unpredictable and can sometimes result in an infinite loop. The maze solved using the Random Mouse algorithm is shown in Figure 9.

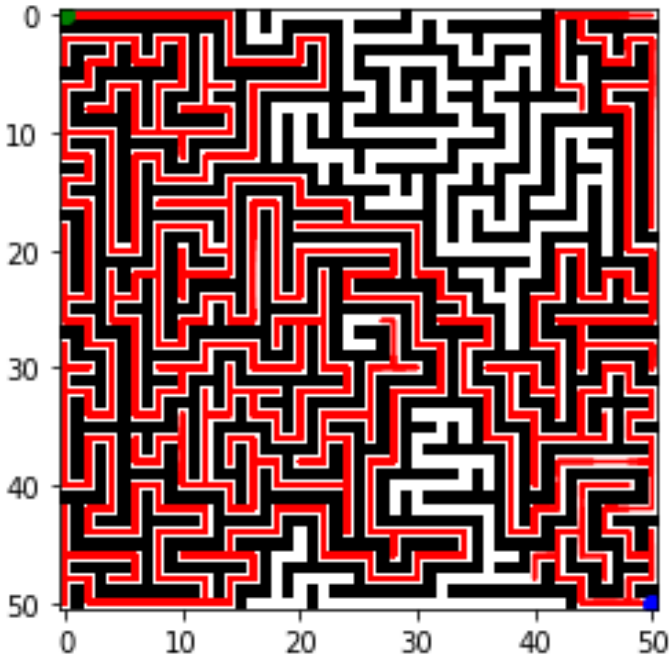


Figure 9. Maze solved using the Random Mouse algorithm.

4. Results

The performance analysis was conducted on a laptop with an Intel i7 12650H processor, 32GB DDR5 RAM, and an Nvidia Geforce RTX 4060 graphics card. The performance of each maze-solving algorithm was analyzed under the same conditions based on the following criteria:

- Solution Speed: The time it takes for the algorithm to solve the maze from the start point to the endpoint.
- Memory Usage: The amount of memory used by the algorithm during the solution process.
- CPU Consumption: The amount of CPU power used by the algorithm during the solution process.

These criteria are important for evaluating the efficiency and resource usage of the algorithm. Each algorithm was tested using the following steps:

- Algorithm Implementation: Each algorithm was implemented using the same code written in the Python programming language.
- Maze Solving: The maze created (Figure 2) had the top-left corner as the starting point and the bottom-right corner as the endpoint. The starting point was marked in green, and the endpoint in blue. The algorithm was then run to find the solution path from the green point to the blue point. The solved maze was visualized using the plot_solution function, with the path taken by the algorithm shown as a red line.
- Performance Measurement: The solution time, memory usage, and CPU consumption were measured and analyzed.

A* (A-Star) algorithm, memory usage and solution time were measured using the profile_and_visualize function in Python. To accurately measure CPU usage, the algorithm was run multiple times, and the average values were calculated. These measurements were performed using the tracemalloc, time.perf_counter, cProfile, and pstats libraries. During the solution, the algorithm used 164.63 KB of memory, took 0.007539 seconds, and CPU usage was 41.08%.

BFS Algorithm, memory usage and solution time were measured using the profile_and_visualize function in Python. To accurately measure CPU usage, the algorithm was run multiple times, and the average values were calculated. These measurements were performed using the tracemalloc, time.perf_counter, cProfile, and pstats libraries. During the solution, the algorithm used 104.69 KB of memory, took 0.005499 seconds, and CPU usage was 36.41%.

DFS algorithm, memory usage and solution time were measured using the profile_and_visualize function in Python. To accurately measure CPU usage, the algorithm was run multiple times, and the average values were calculated. These measurements were performed using the tracemalloc, time.perf_counter, cProfile, and pstats libraries. During the solution, the algorithm used 61.28 KB of memory, took 0.004622 seconds, and CPU usage was 43.30%.

Dijkstra algorithm, memory usage and solution time were measured using the profile_and_visualize function in Python. To accurately measure CPU usage, the algorithm was run multiple times, and the average values were calculated. These measurements were performed using the tracemalloc, time.perf_counter, cProfile, and pstats libraries. During the solution, the algorithm used 102.85 KB of memory, took 0.007037 seconds, and CPU usage was 44.06%.

Flood Fill algorithm, memory usage and solution time were measured using the profile_and_visualize function in Python. To accurately measure CPU usage, the algorithm was run multiple times, and the average values were calculated. These measurements were performed using the tracemalloc, time.perf_counter, cProfile, and pstats libraries. During the solution, the algorithm used 88.18 KB of memory, took 0.005994 seconds, and CPU usage was 33.42%.

Recursive Backtracker algorithm, memory usage and solution time were measured using the profile_and_visualize function in Python. To accurately measure CPU usage, the algorithm was run multiple times, and the average values were calculated. These measurements were performed using the tracemalloc, time.perf_counter, cProfile, and pstats libraries. During the solution, the algorithm used 75.59 KB of memory, took 0.005400 seconds, and CPU usage was 39.18%.

Random Mouse algorithm, memory usage and solution time were measured using the profile_and_visualize function in Python. To accurately measure CPU usage, the algorithm was run multiple times, and the average values were calculated. These measurements were performed using the tracemalloc, time.perf_counter, cProfile, and pstats libraries. During the solution, the algorithm used 23063.39 KB of memory, took 3.292647 seconds, and CPU usage was 89.90%. All test results are presented in Table 2.

Table 2. Comparison of algorithms based on conducted tests.

Tested Algorithm	Memory Usage (KB)	Time Elapsed (s)	CPU Usage (%)
A*	164.63	0.007539	41.08
BFS	104.69	0.005499	36.41
DFS	61.28	0.004622	43.30
Dijkstra	102.85	0.007037	44.06
Flood Fill	88.18	0.005994	33.42
Recursive Backtracker	75.59	0.005400	39.18
Random Mouse	23063.39	3.292647	89.90

Based on the obtained data, the memory usage, solution time, and CPU usage of the algorithms were compared. The results (Figure 10, Figure 11, and Figure 12) are presented below. The Random Mouse algorithm was excluded from comparison graphs because, in the tests, it performed significantly worse than others, with memory usage (KB), time elapsed (s), and CPU usage (%) recorded at 23063.39, 3.292647, and 89.90, respectively. These results were far below the performance of the other algorithms tested.

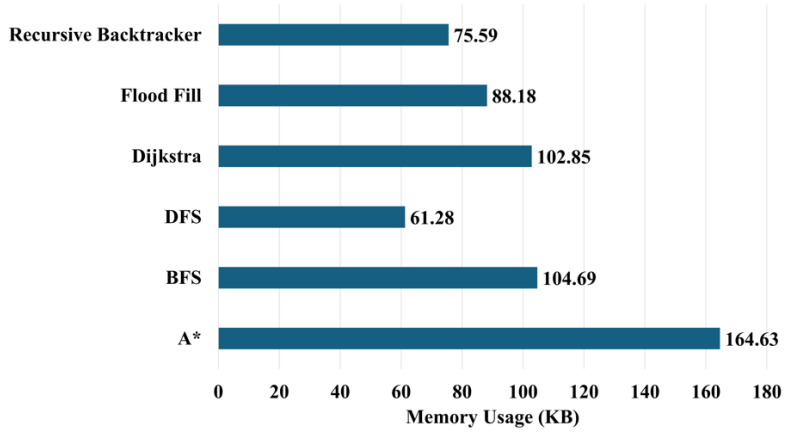


Figure 10. Memory usage of algorithms.

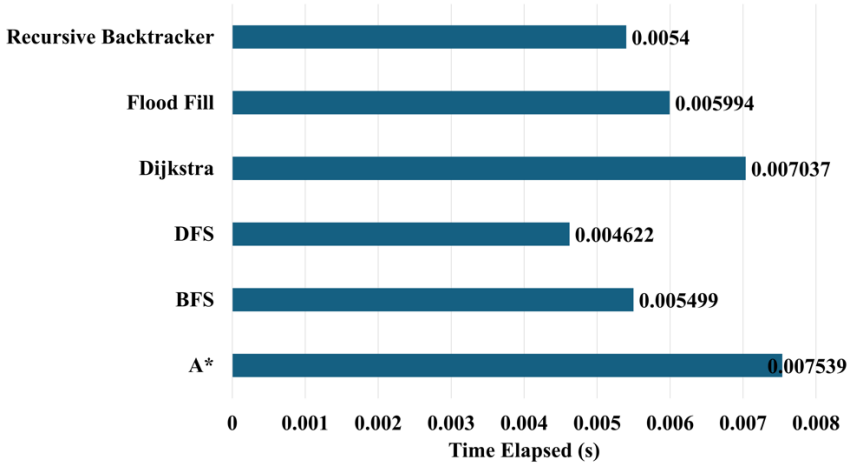


Figure 11. Solution time of algorithms.

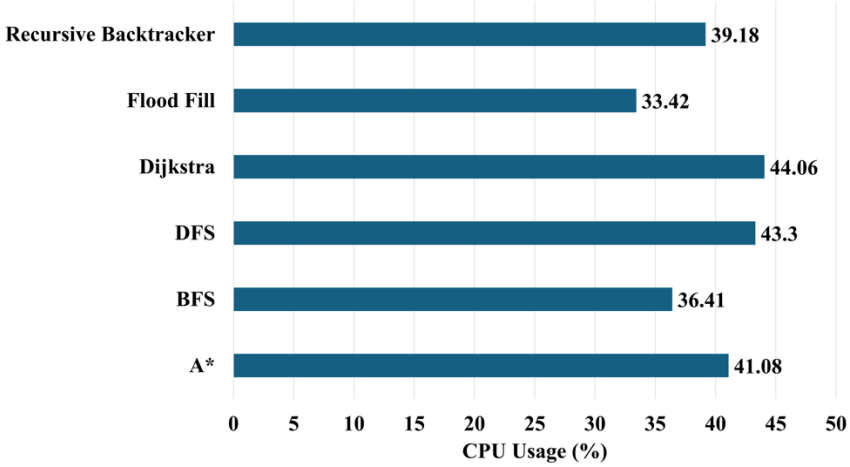


Figure 12. Cpu usage of algorithms.

5. Conclusion

The comparative analysis of maze-solving algorithms has revealed the unique strengths and weaknesses of each approach. The A* algorithm effectively finds the shortest path, utilizing a heuristic function, but shows higher memory usage and longer solution times compared to some alternatives. Its CPU usage remains moderate, making it a balanced option for certain applications. The BFS algorithm, while not the fastest, exhibits low CPU usage and performs well in terms of solution time, ranking third overall. DFS, on the other hand, stands out for its minimal memory consumption and the fastest solution time, though it incurs higher CPU usage. Dijkstra's algorithm shares similarities with A*, offering comparable performance in terms of memory and solution time but showing higher CPU consumption. Despite its lack of heuristic functions, it remains a viable option, especially in complex scenarios. The Flood Fill algorithm, known for filling all empty spaces, demonstrates low CPU usage, moderate solution time, and slightly higher memory usage, making it suitable for scenarios where CPU efficiency is critical. The Recursive Backtracker algorithm provides a good balance between speed and memory usage, making it the second most efficient in both aspects. Lastly, the Random Mouse algorithm, which relies on random movements, significantly underperforms in all key metrics: memory usage, CPU consumption, and solution time, proving to be the least efficient approach overall. Its inefficiency further emphasizes the effectiveness of the more systematic algorithms evaluated in this study. This comparative evaluation offers valuable insights for selecting appropriate algorithms based on performance requirements, paving the way for optimized autonomous navigation and pathfinding in real-world applications..

Future work could explore optimizations for these algorithms in dynamic and real-time environments, where the maze or path changes over time, requiring algorithms to adapt on the fly. Additionally, hybrid approaches that combine the strengths of multiple algorithms, such as the precision of A* with the speed of DFS, could be developed for more specialized applications. Investigating hardware acceleration and parallelization techniques, particularly for algorithms like BFS and A*, may also lead to improvements in performance for large-scale or more complex pathfinding tasks. These directions will contribute to further advancements in autonomous navigation systems and other real-world applications of pathfinding algorithms.

References

[1] Lumelsky VJ. A comparative study on the path length performance of maze-searching and robot motion planning algorithms. IEEE Trans Robot Autom 1991; 7(1): 57-66.

[2] Alamri S, Alshehri S, Alshehri W, Alamri H, Alaklabi A, Alhmiedat T. Autonomous maze solving robotics: Algorithms and systems. Int J Mech Eng Robot Res 2021; 10(12): 668-675.

[3] Kaur NKS. A review of various maze solving algorithms based on graph theory. Int J Sci Res Dev 2019; 6(12): 431-434.

[4] Covaci R, Harja G, Nascu I. Autonomous Maze Solving Robot. In: IEEE Int Conf Autom Qual Test Robot; 21 May 2020. pp. 1-4.

[5] Husain Z, Al Zaabi A, Hildmann H, Saffre F, Ruta D, Isakovic AF. Search and rescue in a maze-like environment with ant and dijkstra algorithms. Drones 2022; 6(10): 273.

[6] Budiman JS, Laurensia M, Arthaya BM. Arthaya. Maze mapping based modified depth first search algorithm simulator for agricultural environment. In: IEEE Int Conf Mechatron Robot Syst Eng; 17 November 2021. pp. 1-6.

[7] Ali SI, Duraisamy Y, Rasheed BH, Abas SM, Masood TD. Navigating Network Traffic: An Exploration of Maze Algorithm Applications in Machine Learning. Int Innov Res J Eng Technol; 2 April 2024; 9(3).

[8] Olivier T. A grid-based maze approach to humanitarian logistics. PhD, North-West University, South Africa, 2021.

[9] Hart PE, Nilsson NJ, Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. IEEE Trans Syst Sci Cybern; July 1968; 4(2): 100-107.

[10] Duchoň F, Babinec A, Kajan M, Beňo P, Florek M, Fico T, Jurišica L. Path planning with modified a star algorithm for a mobile robot. Procedia Eng 2014. 96: 59-69.

[11] Ju C, Luo Q, Yan X. Path planning using an improved a-star algorithm. In: IEEE 11th Int Conf Progn Syst Health Manage; 23 October 2020. pp. 23-26.

[12] Moore EF. The shortest path through a maze. In; Proc Int Symp Theory Switch. Harvard University Press. 1959.

[13] Lee CY. An algorithm for path connections and its applications. IRE Trans Electron Comput 1961; (3): 346-365.

[14] Permana SH, Bintoro KY, Arifitama B, Syahputra A. Comparative analysis of pathfinding algorithms a*, dijkstra, and bfs on maze runner game. Int J Inf Syst Technol 2018; 1(2): 1.

[15] Hopcroft J, Tarjan R. Algorithm 447: efficient algorithms for graph manipulation. Commun ACM 1973; 16(6): 372-378.

[16] Awerbuch B. A new distributed depth-first-search algorithm. Inf Process Lett 1985; 20(3): 147-150.

[17] Dijkstra EW. A note on two problems in connexion with graphs. Edsger Wybe Dijkstra: his life, work, and legacy. 2022; pp. 287-290.

[18] Fredman ML, Tarjan RE. Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms. J ACM 1987; 34(3): 596-615.
[19] Johnson DB. Efficient algorithms for shortest paths in sparse networks. J ACM 1977; 24(1): 1-13.
[20] Burtsev S, Kuzmin YP. An efficient flood-filling algorithm. Comput Graph 1993; 17(5): 549-561.
[21] Kumar B, Tiwari UK, Kumar S, Tomer V, Kalra J. Comparison and performance evaluation of boundary fill and flood fill algorithm. Int J Innov Technol Explor Eng 2020; 8(12): 9-13.
[22] Abu-Khzam FN, Langston MA, Mouawad AE, Nolan CP. A hybrid graph representation for recursive backtracking algorithms. In: Int Workshop Front Algorithmics. Springer 2010.
[23] Lim TH, Ng PL. Evaluating recursive backtracking depth-first search algorithm in unknown search space for self-learning path finding robot. In: Springer Artif Intell Commun Netw: Second EAI International Conference; 19-20 December 2020. pp. 531-543.
[24] Cherroun L, Boumehraz M. Path following behavior for an autonomous mobile robot using neuro-fuzzy controller. Int J Syst Assur Eng Manage 2014; (5): 352-360.
[25] Yadav S, Verma KK, Mahanta S. The Maze problem solved by Micro mouse. I Int J Eng Adv Technol 2012; 2249: 8958.
[26] Dehghani M, Hubálovský Š, Trojovský P. Cat and mouse based optimizer: A new nature-inspired optimization algorithm. Sensors 2021; 21(15): 5214.
[27] Wang H, Lou S, Jing J, Wang Y, Liu W, Liu T. The EBS-A* algorithm: An improved A* algorithm for path planning. PloS ONE 2022; 17(2): e0263841.
[28] Buluç, A, Madduri K. Parallel breadth-first search on distributed memory systems. In: Proc Int Conf High Perform Comput Netw Storage Anal 2011.
[29] Sangamesvarappa V. Parallelizing Depth-First Search for Pathway Finding: A Comprehensive Investigation. Rev Intell Artif 2023; 37(4).
[30] Aviram N, Shavitt Y. Optimizing Dijkstra for real-world performance. arXiv preprint arXiv:1505.05033, 2015.
[31] Abu-Khzam FN, Daudjee K, Mouawad AE, Nishimura N. An easy-to-use scalable framework for parallel recursive backtracking. arXiv preprint arXiv:1312.7626, 2013.
[32] Xie S, Wu P, Liu H, Yan P, Li X, Luo J, Li Q. A novel method of unmanned surface vehicle autonomous cruise. Ind Robot Int J 2016; 43(1): 121-130.
[33] Mahmud MS, Sarker U, Islam MM, Sarwar H. A greedy approach in path selection for DFS based maze-map discovery algorithm for an autonomous robot. In: IEEE 15th Int Conf Comput Inf Technol 2012.
[34] Foltin M. Automated maze generation and human interaction. Brno: Masaryk Univ Fac Inform 2011.
[35] Pame YG, Kottawar VG, Mahajan YV. A Novel Approach to Maze Solving Algorithm. IEEE Int Conf Emerg Smart Comput Inform 2023.
[36] Iloh PC. A Comprehensive and comparative study of DFS, BFS, and A* search algorithms in a solving the maze transversal problem. Int J Soc Sci Sci Stud 2022; 2(2): 482-490.
[37] Sturtevant NR. Benchmarks for grid-based pathfinding. IEEE Trans Comput Intell AI Games 2012; 4(2): 144-148.
[38] Li K. Maze solving robot based on graph algorithm. in AIP Conf Proc. AIP Publishing 2024.
[39] Wang H, Yu Y, Yuan Q. Application of Dijkstra algorithm in robot path-planning. IEEE Second Int Conf Mechan Autom Control Eng 2011.
[40] Kalisiak M, van de Panne M. RRT-blossom: RRT with a local flood-fill behavior. In: Proc IEEE Int Conf Robot Autom 2006.
[41] Kondrak G, Van Beek P. A theoretical evaluation of selected backtracking algorithms. Artif Intell 1997; 89(1-2): 365-387.
[42] Niemczyk, R, Zawiślak S. Review of maze solving algorithms for 2d maze and their visualisation. In: Springer Int Conf Students PhD Young Sci Eng XXI Century 2018.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 167-182, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1523926

Sinir Ağı Dil Modelleri ve Evrensel Cümle Kodlayıcı Kullanarak Havayolu Müşteri Yorumlarının Duygu Analizi

Semih Osman SAKA[1*], Zafer CÖMERT[2]
[1] Uzaktan Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi, Samsun Üniversitesi, Samsun, Türkiye
[2] Yazılım Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Samsun Üniversitesi, Samsun, Türkiye
[*1] semih.saka@samsun.edu.tr, [2] zcomert@samsun.edu.tr

(Geliş/Received: 29/07/2024; Kabul/Accepted: 04/10/2024)

Öz: Duygu analizi, metin tabanlı verilerin duygusal tonlarını belirlemede kullanılan önemli bir doğal dil işleme (NLP) tekniğidir. İşletmeler, müşteri memnuniyetini artırmak ve hizmet kalitesini iyileştirmek için müşteri yorumlarından elde edilen duygusal içgörülerle stratejik kararlar alabilir. Bu çalışmada ise havayolu müşteri yorumlarından oluşan bir veri seti kullanılmıştır. Veri seti, her bir yorumun doğrulama durumu, içerik, değerlendirme puanı, öneri durumu, duygu analizini içermektedir ve toplamda 1100 örnekten oluşmaktadır. Çalışmada dört farklı model incelenmiştir. Bu modellerden CNN-LSTM, sıfırdan öğrenme stratejisiyle eğitilmiştir. Ayrıca, iki farklı sinir ağı dil modeli (Neural Network Language Model, NNLM) ve evrensel cümle kodlayıcı (Universal Sentence Encoder, USE) transfer öğrenme yaklaşımıyla eğitilmiştir. CNN-LSTM modeli %92,06 doğruluk oranı ile yüksek performans göstermiştir. *nnlm-en-dim50* modeli %90,87 doğruluk oranı elde ederken, *nnlm-en-dim128* modeli %92,46 doğruluk oranı ile öne çıkmıştır. En yüksek performansı ise %95,63 doğruluk oranı ile USE modeli göstermiştir. Bu sonuçlar, derin öğrenme ve transfer öğrenme tekniklerinin duygu analizinde etkili araçlar olduğunu göstermektedir. Çalışma, işletmelerin müşteri memnuniyetini artırmak ve hizmet kalitesini iyileştirmek için duygu analizi teknolojilerini nasıl etkin bir şekilde kullanabileceklerine dair önemli içgörüler sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, farklı veri setleri ve daha geniş örneklem büyüklükleri ile modellerin performanslarının daha detaylı incelenmesi önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: Derin öğrenme, yapay öğrenme, doğal dil işleme, duygu analizi.

Sentiment Analysis of Airline Customer Reviews Using Neural Network Language Models and Universal Sentence Encoder

Abstract: Sentiment analysis represents a fundamental technique within the domain of natural language processing (NLP), employed for the purpose of discerning the emotional tenor of text-based data. Businesses may make strategic decisions by employing emotional insights derived from customer reviews to enhance customer satisfaction and improve service quality. In this study, a dataset comprising reviews from airline customers was employed. The dataset comprises the verification status, content, rating score, recommendation status, and sentiment analysis of each review, with a total of 1100 examples. The study examined four distinct models. The CNN-LSTM model was trained using a training-from-scratch strategy. Furthermore, two distinct neural network language models (Neural Network Language Model, NNLM) and the Universal Sentence Encoder (USE) were trained using a transfer learning approach. The CNN-LSTM model exhibited robust performance, achieving an accuracy rate of 92.06%. The *nnlm-en-dim50* model achieved an accuracy rate of 90,87%, while the *nnlm-en-dim128* model demonstrated a notably higher level of accuracy at 92.46%. The USE model exhibited the highest performance, with an accuracy rate of 95.63%. These findings suggest that deep learning and transfer learning techniques are effective tools for sentiment analysis. The study offers valuable insights into how businesses can utilize sentiment analysis technologies to enhance customer satisfaction and service quality. It is recommended that future studies investigate the performance of these models with different datasets and larger sample sizes.

Key words: Deep learning, artificial learning, natural language processing, sentiment analysis.

1. Giriş

Duygu analizi (sentiment analysis), metin tabanlı verilerin duygusal tonunu belirlemek için kullanılan bir doğal dil işleme (NLP) tekniğidir. Özellikle sosyal medya, müşteri geri bildirimleri, ürün incelemeleri ve haber yorumları gibi büyük miktarda metin verisinin analizinde önemli bir rol oynar. İşletmeler, müşteri memnuniyetini artırmak ve hizmet kalitesini geliştirmek için bu yorumlardan elde edilen duygusal içgörüleri kullanarak stratejik kararlar alabilirler [1]. Duygu analizi, metin verilerindeki olumsuz, olumlu veya nötr duyguları otomatik olarak

[*] Sorumlu yazar: semih.saka@samsun.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-6241-5485, [2] 0000-0001-5256-7648

tespit ederek işletmelere, müşteri deneyimlerini daha derinlemesine anlama ve buna yönelik iyileştirmeler yapma imkânı sunar. Bu sayede, işletmeler müşteri memnuniyetini artırmaya yönelik stratejik kararlar alabilirler [1].

Son yıllarda, derin öğrenme algoritmalarının gelişimiyle birlikte duygu analizinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Derin öğrenme, büyük veri kümelerinden karmaşık örüntüleri ve ilişkileri öğrenme kapasitesi sayesinde, duygu analizinin doğruluğunu ve etkinliğini artırmıştır. Makine öğrenmesi, derin öğrenme özellikle Convolutional Neural Networks (CNN), Long Short-Term Memory (LSTM), dikkat mekanizmaları ve hibrit yaklaşımlarla metin verilerinin duygusal analizinde yüksek performanslar elde edilmiştir. Bazı önemli çalışmalara bu bölüm altında kısaca yer verilmiştir. Uslu ve Akyol Türkçe haber metinlerini Destek Vektör Makineleri (SVM), Rastgele Orman (RF) ve Naive Bayes (NB) sınıflandırıcılarıyla analiz etmiş; bu analizde %91 doğruluk oranıyla en iyi performansı NB göstermiştir [2]. Tuzcu çevrimiçi kitap satış sitesinin kullanıcı yorumları üzerinde duygu analizi yapmıştır. Python ile MLP algoritması ve RapidMiner ile NB, SVM ve LR algoritmaları uygulanmıştır. 1400 yorumla oluşturulan veri setinde, MLP %89, NB %77,57, SVM %80,93 ve LR %84,07 doğruluk oranı elde etmiştir. Daha doğru analizler için demografik bilgiler ve daha büyük veri setlerinin kullanımı önerilmiştir [3]. Acı ve Çırak CNN ve Word2Vec kullanarak TTC-3600 veri kümesi üzerinde gerçekleştirdikleri metin sınıflandırma çalışmasında, Python ve Tensorflow ile kodladıkları modellerle gövdelenmiş veride %93,3, ham veride ise %90,1 doğruluk oranı elde etmişlerdir. CNN ve Word2Vec, klasik makine öğrenmesi yöntemlerine kıyasla daha yüksek bir performans göstermiştir [4]. Demircan ve arkadaşları hepsiburada.com'dan alınan ürün incelemeleri ve puanları kullanarak Türkçe duygu analizi modelleri geliştirmiştir. Olumlu, olumsuz ve nötr müşteri yorumları SVM, RF, karar ağacı (DT), LR ve k-en yakın komşu (kNN) algoritmalarıyla sınıflandırılmıştır. SVM ve RF en iyi performansı göstermiştir [5]. Chen ve ekibi ABD yüksek mahkeme belgelerini sınıflandırmak için makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemlerini karşılaştırmıştır. 30.000 dava belgesinde, RF modeli Word2Vec, GloVe, BERT tabanlı TextCNN, BiLSTM ve BiLSTM-Attention yöntemlerine karşı üstün performans sergilemiştir. RF, doğruluk (accuracy), geri çağırma (recall), kesinlik (sensitivity) ve F1 skoru açısından daha başarılı sonuçlar elde etmiştir [6]. Barfar çevrimiçi propagandanın tespiti için dilbilimsel ve oyun teorisine dayalı bir model geliştirmiştir. 205.000 makaleden oluşan veri seti, LightGBM algoritması ile C-indeksi 0,9 ve F1 skoru 0,84 ile yüksek performans göstermiştir. Model, propagandist içerik tespitinde dilsel özelliklerin önemini vurgulamaktadır [7]. Liu ve arkadaşları kısa metinler için CRFA yöntemini önermiştir. CRFA, CNN ve Recurrent Neural Network (RNN) tabanlı yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk sağlamıştır [8]. Colón-Ruiz ve Segura-Bedmar ilaç incelemelerinde duygu analizi yapmak için CNN, Bi-LSTM, CNN ve LSTM kombinasyonlarını, ayrıca BERT ve Bi-LSTM modellerini kullanmışlardır. BERT tabanlı modeller en iyi performansı göstermiş, ancak bu modellerin eğitim süreleri daha uzun olmuştur [9]. Lyu ve Liu, metin sınıflandırmada hibrit modeller geliştirmiştir. CNN ve RNN kullanarak iki Çince ve beş İngilizce veri seti üzerinde çalışmışlardır. Önerilen yöntem, FastText ve HAN yöntemlerine kıyasla daha yüksek doğruluk sağlamıştır [10]. Onan ve ekibi anahtar kelime çıkarma yöntemlerinin metin sınıflandırma ve topluluk öğrenme üzerindeki etkisini incelemiştir. Reuters-21578 veri seti kullanılarak yapılan çalışmada, Bagging topluluk öğrenimi ve rastgele orman algoritması ile en yüksek tahmin performansı %93.80 olarak elde edilmiştir [11]. Göker ve Tekdere FATİH projesi ile ilgili 444 yorumu sınıflandırmıştır. NB, kNN, Karar Ağacı (DT), Sequential Minimal Optimization (SMO) ve RBF Network algoritmaları uygulanmış ve en yüksek doğruluk oranı SMO algoritması ile elde edilmiştir [12]. Kılınç ve arkadaşları akademik makaleleri sınıflandırmıştır. 2000 makale özeti iki sınıfta toplanmış ve %96,67 doğruluk oranı ile kNN algoritması en iyi performansı göstermiştir [13]. Kowsari ve arkadaşları HDLTex yöntemiyle derin sinir ağları kullanarak 46.985 makale veri setinde belgeleri sınıflandırmıştır. Derin öğrenme, geleneksel yöntemlere göre performansı artırmıştır [14]. Alparslan ve Dursun Türkçe metinleri sınıflandırmak için CNN kullanmıştır. TTC-4900 ve MY-15130 veri setlerinde CNN tabanlı model, NB, kNN, SVM ve RF'ye göre daha başarılı olmuştur [15]. Guo ve arkadaşları, metin sınıflandırmada Etiket Karmaşası Modeli (LCM) önermiştir. Üç İngilizce ve iki Çince veri setinde LCM, mevcut modellerin performansını artırmıştır [16]. Alzoubi ve arkadaşları Türkçe müşteri taleplerini sınıflandırmıştır. 225239 müşteri talebi verisinde LSTM algoritması %84 doğruluk oranı ile en yüksek performansı sağlamıştır [17]. Kaşıkçı ve Gökçen e-ticaret sitelerini sınıflandırmıştır. kNN ve NB kullanılarak iki sınıf oluşturulmuş, NB %85,30 doğruluk oranı elde etmiştir [18]. Hajibabaee ve ekibi sosyal medyada saldırgan dil tespiti için TF-IDF, Word2Vec ve FastText gömme yöntemlerini kullanarak çeşitli sınıflandırıcıları karşılaştırmıştır. TF-IDF ile AdaBoost, SVM ve MLP modelleri en yüksek F1 skorunu elde etmiştir [19]. Gürbüz ve arkadaşları oteller için çevreci yorumları sınıflandırmıştır. 211.790 yorumda karar ağaçları %94,59 başarı oranı ile en iyi performansı göstermiştir [20]. Neogi ve arkadaşları çiftçi protestoları ile ilgili tweetleri sınıflandırmıştır. Bag of Words ve TF-IDF teknikleri kullanılarak RF %96,6 doğruluk oranı ile en başarılı olmuştur [21]. Çelik ve Koç Türkçe haber sitelerinden elde edilen 12000 haber metnini sınıflandırmıştır. FastText vektör modeli ve SVM ile %95,75 başarı oranı elde edilmiştir [22]. Soni ve ekibi TextConvoNet adını verdikleri yeni bir CNN tabanlı model önermiştir. Bu model, Binary SST-2, Amazon Review, R8, Twitter User Airline Sentiment ve Covid Tweets

veri setlerinde mevcut modellere kıyasla daha üstün performans sergilemiştir [23]. Jang ve arkadaşları IMDB film yorumları üzerinde Bi-LSTM+CNN hibrit modeli önermiştir. Önerilen model, yüksek doğruluk ve F1 skoru sağlamıştır [24]. Lai ve arkadaşları Recurrent Convolutional Neural Network (RCNN) ile 20Newsgroups ve Fudan Set veri setlerinde metin sınıflandırma hata oranını %33 ve %19 düşürmüştür [25]. Gasparetto ve arkadaşları NB, SVM, FastText, BiLSTM, XML-CNN, BERT ve XML-R modelleri ile EnWiki-100 ve RCV1-57 veri setlerinde BERT ve XLNet'in en iyi performansı elde ettiğini tespit etmiştir [26]. Chen ve arkadaşları Lao dilindeki 2411 haber makalesini kNN ile sınıflandırmıştır. %71,4 doğruluk oranı ile veri normalizasyonu ve boyut azaltma işlemleri performansı artırmıştır [27]. Bahassine ve arkadaşları Arapça metinleri sınıflandırmak için ImpCHI modelini önermiştir. 5070 belge ile ImpCHI ve SVM %90,50 F1 skor değeri ile en iyi sonucu sağlamıştır [28]. Reusens ve arkadaşları beş görevi kapsayan 20 veri seti ve 11 model mimarisi ile basit modellerin bazı durumlarda karmaşık modellerden daha iyi performans gösterdiğini bulmuştur [29]. Wang ve arkadaşları N-gram ve CNN teknolojisini birleştirerek kısa metinler için daha yüksek doğruluk oranları elde etmiştir [30]. Bhattacharya ve ekibi, zararlı yorumları sınıflandırmak için LSTM ve CNN tabanlı hibrit bir model kullanmış ve %98,91 doğruluk oranıyla en yüksek performansı elde etmiştir [31]. İlkuçar ve Artun beş yıldızlı Fethiye otellerine ait müşteri yorumlarını analiz ederek, duygu durumlarını anlamak için makine öğrenmesi tekniklerini kullanmışlardır. 2022 yılında Tripadvisor ve Otelpuan'dan alınan 1160 yorumu içeren bir veri seti kullanılmıştır. Çalışmada, yorumlar üzerinde duygu analizi yapmak için ANN, LSTM ve CNN modelleri uygulanmıştır. Sonuçlar, müşterilerin genel olarak otel personeli ve otelin konumları hakkında olumlu duygulara sahip olduğunu göstermektedir. Modeller arasında ANN, %81 doğruluk oranıyla en iyi performansı sergilerken, CNN %73, LSTM ise %72 doğruluk oranı ile takip etmiştir [32].

Bu çalışma, derin öğrenme ve makine öğrenmesi tekniklerini kullanarak duygu analizi alanında önemli katkılar sağlamayı hedeflemektedir. Öncelikle, farklı derin öğrenme ve makine öğrenmesi modellerinin müşteri yorumları üzerinde nasıl performans gösterdiğini kapsamlı bir şekilde karşılaştırarak, hangi yöntemlerin hangi koşullarda daha etkili olduğunu belirlemektedir. Ayrıca, sıfırdan öğrenme ve transfer öğrenme stratejilerinin karşılaştırmalı analizi, işletmelerin veri kısıtlamaları altında en uygun çözümü seçmelerine yardımcı olma potansiyeli taşır. Bu çalışma, aynı zamanda hibrit modellerin duygu analizindeki etkinliğini ortaya koyarak, daha yüksek doğruluk oranları ve verimlilik sağlamayı amaçlamaktadır.

Makalenin geri kalan bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölümde materyal ve yöntemler, üçüncü bölümde bulgular, dördüncü bölümde tartışma, beşinci bölümde ise sonuç ve öneriler yer almaktadır.

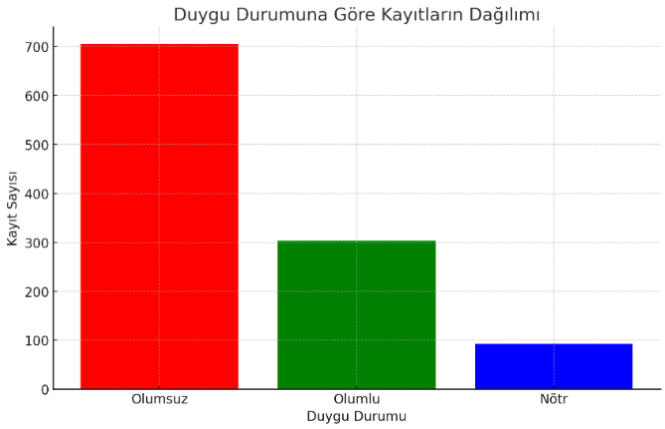
2. Materyal ve Metotlar

Bu bölüm, çalışmada kullanılan veri seti, derin öğrenme ve makine öğrenmesi modelleri ile deneysel prosedürleri detaylandırmaktadır. Çalışmanın güvenilirliğini ve geçerliliğini sağlamak amacıyla kullanılan yöntemler ve uygulamalar ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2.1. Veri Seti

Veri seti, hava yolu deneyimlerine ait müşteri yorumlarını içermektedir ve her bir satırda bir müşterinin doğrulama durumu, yorum içeriği, değerlendirme puanı, firmayı önerip önermediği ve duygu durumu bilgileri yer almaktadır. Veriler araştırmacıların kullanımı için açık erişimli olarak Mendeley Data platformunda yayımlanmıştır. "*Verify*" sütunu müşteri yorumunun doğruluğunu, "*Review*" sütunu müşteri yorum metnini, "*Rating"* sütunu müşterinin verdiği puanı, "*Recommended*" sütunu müşterinin havayolunu tavsiye edip etmediğini ve "*Sentiment"* sütunu yorumun duygu analizini göstermektedir. Bu veri seti, müşteri memnuniyeti ve havayolu hizmet kalitesini değerlendirmek için zengin bir bilgi kaynağı sunmaktadır [33].

Veri setinin duygu durumu dağılımı incelendiğinde, toplamda 1100 kaydın bulunduğu gözlemlenmiştir. Şekil 1'de kayıtların sınıflar arası dağılımına yer verilmiştir. Burada olumsuz ifadesi müşterinin memnun olmadığı; olumlu ise müşterinin memnun olduğu duygu durumunu ifade etmektedir. Olumsuz ya da olumlu olarak ifade edilemeyen müşteri yorumları ise nötr duygu durumu altında değerlendirilmiştir. Kayıtların 705'i olumsuz, 303'ü olumlu ve 92'si nötr duygu durumunu yansıtmaktadır. Bu dağılım, müşteri yorumlarının büyük çoğunluğunun olumsuz veya olumlu olduğunu göstermektedir. Olumsuz duygu durumu en yüksek orana sahipken, olumlu ve nötr yorumlar daha az sıklıkla görülmektedir. Bu bulgu, havayolu hizmet kalitesinin genel olarak müşteri beklentilerini karşıladığı, ancak iyileştirme alanlarının da mevcut olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 1. Veri setindeki örneklerin duygu durumu dağılımı.

Deneysel çalışmalar sırasında nötr örneklerin sayısının derin öğrenme ile anlamlı bir analiz yapmaya yetmeyecek kadar az olduğu tespit edildiğinden, bu örnekler veri setinin genel dengesini ve sonuçların güvenilirliğini olumsuz etkilememesi amacıyla analizlerden çıkarılmıştır. Sonuç olarak 705 olumsuz ve 303 olumlu örnek olmak üzere toplam 1008 örnek deneysel çalışmalar kapsamında kullanılmıştır.

Tablo 1. Veri setine ait örnek bir görünüm.

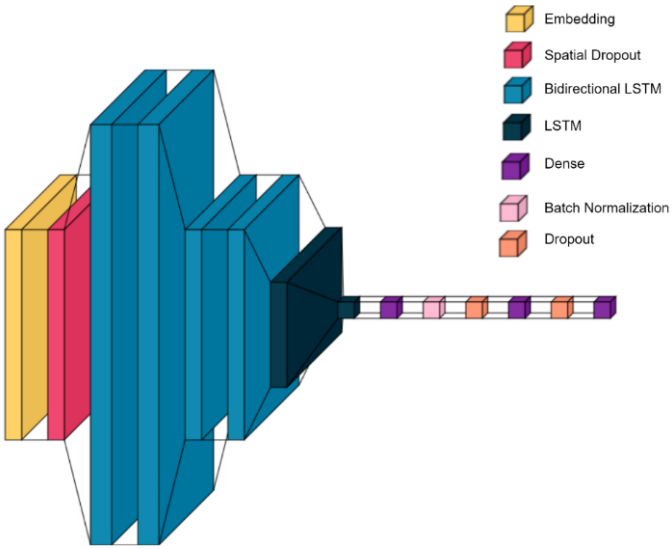
Verify	review	rating	recommended	sentiment
Yes	Tried booking 3 tickets …	2	no	0
Yes	Flew Business Class with my wife...	1	no	0
Yes	Besides losing my baggage, I arrived …	1	no	0
Yes	Air Canada is the only airline flying non-stop …	9	yes	2
Yes	Bereavement Policy is a scam. First sentence …	1	no	0

Tablo 1, çalışmada kullanılan veri setine ait örnek bir görünüm sunmaktadır. Her bir kayıt için doğrulama (verify), yorum (review), oylama (rating), öneri (recommended) ve duygu durum durumu (sentiment) gösterilmektedir.

2.2. CNN-LSTM Modeli

CNN, özellikle görüntü işleme ve bilgisayarla görme alanlarında yaygın olarak kullanılan bir derin öğrenme mimarisidir. CNN'ler, verilerin yerel özelliklerini yakalamak için özel olarak tasarlanmış katmanlar içerir. Temel yapı taşları arasında evrişim katmanları, aktivasyon fonksiyonları (genellikle ReLU), havuzlama katmanları ve tam bağlantılı katmanlar bulunur. Evrişim katmanları, görüntüdeki küçük bölgelere filtreler uygulayarak özellik haritaları oluşturur. Havuzlama katmanları, bu özellik haritalarının boyutunu azaltarak hesaplama yükünü ve aşırı uyumu azaltır. Genellikle maksimum havuzlama veya ortalama havuzlama kullanılır. Tam bağlantılı katmanlar, sınıflandırma veya regresyon görevleri için nihai çıktıyı üretir. Bu katmanlar, tüm özellik haritalarını düzleştirerek tek bir vektör halinde giriş alır ve son karar katmanına iletir [34-36]. CNN'ler, özellikle büyük veri kümeleri ve güçlü hesaplama kaynakları ile yüksek doğruluk oranları sağlar. Şekil 2'de önerilen özelleştirilmiş model ve bu modelin içerdiği katmanlara yer verilmiştir.

Bu modeldeki en önemli katman uzun-kısa süreli bellek (LSTM) katmanıdır. LSTM katmanı, özellikle sıralı veri ile çalışan derin öğrenme modellerinde yaygın olarak kullanılan bir tür RNN katmanıdır. LSTM'ler, uzun vadeli bağımlılıkları öğrenme ve koruma yetenekleri sayesinde zaman serileri, metin verileri ve diğer ardışık veriler üzerinde başarılı performans gösterirler [37–39].



Şekil 2. CNN-LSTM modelinin mimarisi.

LSTM'nin temel birimi olan hafıza hücresi, bilgiyi zaman içinde saklar ve manipüle eder. Hücre durumu C_t olarak adlandırılır. LSTM, bilgiyi hücre durumu boyunca kontrol etmek için üç farklı kapı kullanır: (1) Unutma Kapısı (*Forget Gate*): Hücre durumundan hangi bilgilerin atılacağını belirler. (2) Giriş Kapısı (*Input Gate*): Yeni bilgi eklemek için hücre durumunu günceller. (3) Çıkış Kapısı (*Output Gate*): Hücre durumunun hangi kısmının çıktı olarak kullanılacağını belirler. Her kapı, sigmoid aktivasyon fonksiyonu (σ) ve bir ağırlık matrisi kullanarak hesaplanır. Unutma kapısı f_t Denklem 1'deki gibi hesaplanır:

$$f_t = \sigma\left(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f\right) \tag{1}$$

Burada W_f unutma kapsının ağırlık matrisi, b_f unutma kapısının bias vektörü, h_{t-1} önceki gizli durum, x_t şu an ki girdi ve σ sigmoid aktivasyon fonksiyonudur. Giriş kapısı $\tilde{C}_t$ ise Denklem 2'deki gibi hesaplanır:

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i \tag{2}$$

$$\tilde{C}_t = \tan h\left(W_C \cdot \left[h_{\{t-1\}}, x_t\right] + b_C\right)$$

Burada W_i giriş kapısının ağırlık matrisi, b_i giriş kapısının bias vektörü, W_C hücre durumu adaylarının ağırlık matrisi, b_C hücre durumu adaylarının bias vektörü, $\tan h$ hiperbolik tanjant fonksiyonudur. Hücre durumu C_t ise Denklem 3'deki gibi güncellenir:

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \tilde{C}_t \tag{3}$$

Çıkış kapısının çıktısı o_t ve güncellenmiş gizli durum h_t Denklem 4'deki gibi hesaplanır:

$$o_t = \sigma(W_0 \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o \tag{4}$$

$$h_t = o_t \cdot \tan h\,(C_t)$$

Burada W_0 çıkış kapısının ağırlık matrisi, b_o çıkış kapısının bias vektörüdür.

2.3. NNLM

Neural Network Language Model (NNLM), kelimelerin bağlamını dikkate alarak dil modelleri oluşturan bir yapay sinir ağı modelidir. Kelime vektörlerini kullanarak doğal dil işleme görevlerinde anlamlı ve ilişkili temsilimler sağlar [10]. Bu kapsamda iki farklı model çalışmada kullanılır:

1) *nnlm-en-dim50*, Google'ın TensorFlow Hub'da sağladığı modeli, İngilizce dilinde 50 boyutlu bir metin gömme (embedding) modelidir. Bu model, metin verilerini 50 boyutlu yoğun vektörlere dönüştürerek NLP görevlerinde kullanılır. Model, geniş bir metin veri kümesi üzerinde eğitilmiştir ve kelime anlamlarını temsil eden vektörler oluşturur. Bu vektörler, metin sınıflandırma, duygu analizi ve benzeri NLP görevlerinde kullanılabilir.
2) *nnlm-en-dim128*, Google tarafından geliştirilen ve NLP görevlerinde kullanılan bir dil modelidir. Bu model, İngilizce metinlerdeki kelimeleri ve cümleleri anlamlandırmak için NNLM mimarisini kullanır ve her kelimeyi 128 boyutlu bir vektörle temsil eder. *nnlm-en-dim128*, kelime vektörlerini oluştururken kelimelerin bağlamını dikkate alarak daha anlamlı ve ilişkili temsilimler üretir. Bu model, metin sınıflandırma, duygu analizi, makine çevirisi ve diğer NLP görevlerinde etkili bir şekilde kullanılabilir. Eğitim sürecinde geniş bir İngilizce metin veri kümesi kullanılarak kelimeler arasındaki anlamsal ilişkiler öğrenilmiştir. 128 boyutlu vektörler, modelin hafızasını ve işlem süresini optimize ederek hızlı ve verimli sonuçlar elde etmeyi sağlar. *nnlm-en-dim128*, özellikle dil anlama ve metin işleme uygulamalarında yüksek performans göstermesiyle bilinir.

2.4. USE

*Universal Sentence Encoder (*USE*)*, metni yüksek boyutlu vektörlere kodlayan bir modeldir. Bu vektörler, cümlelerin anlamsal bilgisini yakaladıkları için çeşitli NLP görevlerinde kullanışlıdır. USE, derin öğrenme tekniklerini kullanarak cümle benzerliği, kümeleme ve sınıflandırma gibi görevler için etkili bir şekilde kullanılabilecek gömüler üretir [40]. Cümle gömme fonksiyonu Denklem 5'deki gibi tanımlanır:

$$E = f(S) \tag{5}$$

Burada E gömme vektörünü, S giriş cümlesini ve f model tarafından öğrenilen gömme fonksiyonunu temsil eder. Her bir cümle S bir dizi token $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ olarak tokenize edilir, burada n cümledeki token sayısıdır. Tokenler, bir gömme matrisi W kullanılarak token gömelere dönüştürülür:

$$T_i = W \cdot t_i \tag{6}$$

Denklem 6'da T_i, $i - inci$ tokenin gömüsüdür. Token gömeler, bağlamsal gömeler üretmek için çeşitli sinir ağı katmanlarından (örn. Transformer veya Deep Averaging Network) geçirilir:

$$C_i = NN(T_i) \tag{7}$$

Denklem 7'de C_i, $i - inci$ tokenin bağlamsal gömesidir. Token gömeleri, tek bir sabit boyutlu vektöre dönüştürmek için bir havuzlama mekanizması (örn. ortalama veya maksimum havuzlama) Denklem 8'deki gibi uygulanır:

$$E = pooling(\{C_1, C_2, \dots, C_n\}) \tag{8}$$

Ortalama Havuzlama, Denklem 9'da tüm token gömmelerinin ortalamasını alır:

$$E = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} C_i \tag{9}$$

Maksimum Havuzlama, her boyut için tüm token gömmeleri arasından maksimum değeri alır:

$$E_j = \max_{i \in \{1,\dots,n\}} C_{i,j} \tag{10}$$

Denklem 10'da E_j, gömme vektörü E_j'nin $j-inci$ boyutudur.

3. Bulgular

Deneysel çalışmalar, NVIDIA P6000 24 GB ekran kartına ve Intel (R) Xeon (R) Gold 6132 3.2 GHz işlemciye sahip bir iş istasyonu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Python 3.10.9 programlama dili kullanılmıştır.

Tablo 2. Performans metrikleri.

Metrikler	**Formula**	**Kısa açıklama**
Doğruluk	$\frac{DP + DN}{DP + YP + YN + DN}$	Modelin tüm tahminlerinin ne kadar doğru olduğunu, doğru sınıflandırılan verilerin toplam veriye oranı ile gösterir.
Hassasiyet	$\frac{DP}{DP + YN}$	Pozitif sınıfların ne kadar iyi tahmin edildiğini, doğru pozitif tahminlerin toplam pozitif tahminlere oranı ile ölçer.
Özgüllük	$\frac{DN}{DN + YP}$	Negatif sınıfların ne kadar iyi tanındığını, doğru negatif tahminlerin toplam negatiflere oranı ile ifade eder.
F1 Skor	$\frac{2DP}{2DP + YP + YN}$	Hassasiyet ve geri çağırmanın dengeli bir ölçüsü olup, doğru pozitif tahminlerin ortalama performansını değerlendirir.

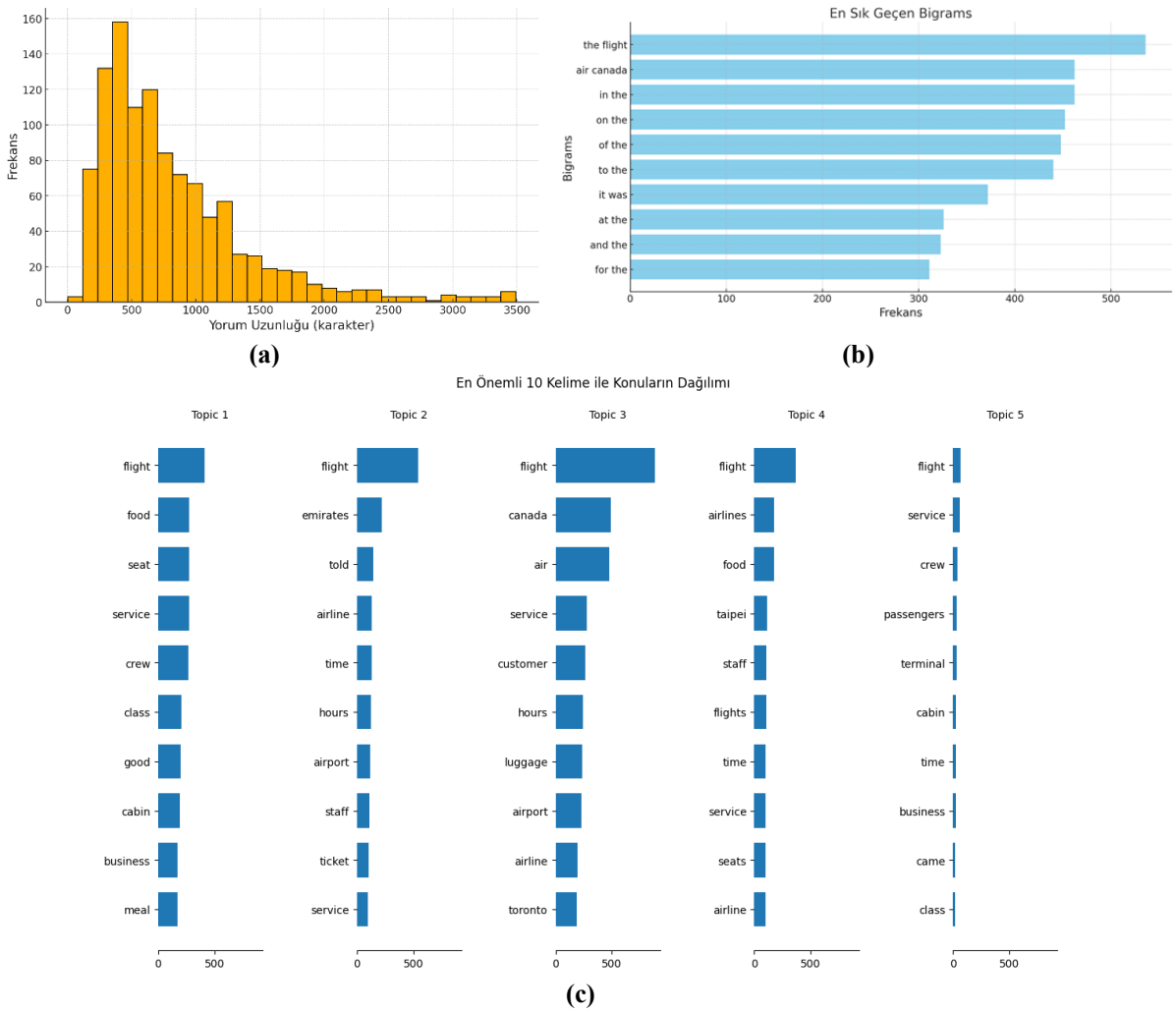
Tablo 2'de model performansını değerlendirmek üzere kullanılan performans metrikleri tanımlanmıştır. Doğru pozitif (DP), çalışmamızda olumsuz yorumların doğru bir şekilde tespit edildiği durumu temsil eder. Doğru negatif (DN), olumlu yorumların doğru olarak tanımlandığı örneklerin sayısını ifade eder. Yanlış pozitif (YP), olumlu bir yorumun yanlışlıkla olumsuz olarak sınıflandırıldığı durumu gösterir. Yanlış negatif (YN) ise, olumsuz bir yorumun yanlış bir şekilde olumlu olarak sınıflandırılması anlamına gelir. Bu terimler, modelin sınıflandırma performansını değerlendirirken doğru ve yanlış sınıflandırmaların nasıl yapıldığını açıkça gösterir.

Deneysel çalışmaların ilk adımında veri setinin analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çerçevede Şekil 3'te yorum uzunlukları, bigrams ve konu başlıklarına ait grafiklere yer verilmiştir.

Şekil 3(a)'da gösterilen yorum uzunluğu analizi, müşteri yorumlarının karakter sayısına göre dağılımını inceleyerek hizmet hakkında ne kadar ayrıntılı geri bildirim verildiğini anlamamıza yardımcı olur. Yorumlar 3 ile 3491 karakter arasında değişirken, ortalama uzunluk 820 karakterdir. Medyan değer 638 karakter olup, yorumların çoğunluğu 406 ile 1060 karakter arasında yoğunlaşmaktadır. Bu dağılım, müşterilerin genellikle ayrıntılı geri bildirim verdiğini göstermektedir. Uzun yorumlar, daha güçlü duygular ve detaylı deneyimler içerir, bu da müşteri memnuniyetini değerlendirmede ve hizmet kalitesini iyileştirmede önemli bilgiler sunar.

Şekil 3 (b)'de gösterilen bigram diyagramı bazı kelimelerin frekansına dayalı olarak görselleştirmek sağlamaktadır. Veri seti analizi sırasında bigramlar, yorumlardaki kelime çiftlerinin sıklığını incelemek amacıyla belirlenmiştir. Her bir yorumdaki ardışık iki kelimeden oluşan bigramlar, veri setinde ne sıklıkla tekrarlandığına göre sıralanmıştır. Bigram frekansları, yorumlarda sıkça vurgulanan konuları ve kelime öbeklerini ortaya çıkarmada kullanılmıştır. "*The flight*" bigramı 536 kez geçerek en yaygın kullanılan öbek olmuştur, bu da uçuş deneyimlerinin sıkça tartışıldığını gösterir. "*Air Canada*" ve "*in the*" bigramları 462 kez geçmiştir, bu da havayolu şirketi hakkında yoğun geri bildirim olduğunu belirtir. Diğer yaygın bigramlar arasında "*on the"*, "*of the*", ve "*to the*" yer almakta, her biri 440 defadan fazla geçmektedir. Bu bigramlar, müşterilerin hizmetle ilgili genel deneyimlerini ve sıkça karşılaşılan konuları anlamamıza yardımcı olmaktadır.

Şekil 3 (c)'de müşteri yorumları üzerinden *Latent Dirichlet Allocation* (LDA) yöntemi kullanılarak belirlenen beş ana konu ve bu konuların öne çıkan kelimeleri gösterilmektedir. Bu yöntem, metinlerin altında yatan temaları keşfetmek için kullanılan bir makine öğrenmesi tekniğidir. Bu çalışmada belirlenen beş ana konu, "uçuş deneyimi", "hizmet kalitesi", "yiyecek ve içecek servisi", "personel", ve "zaman yönetimi" konularıyla ilişkilidir.



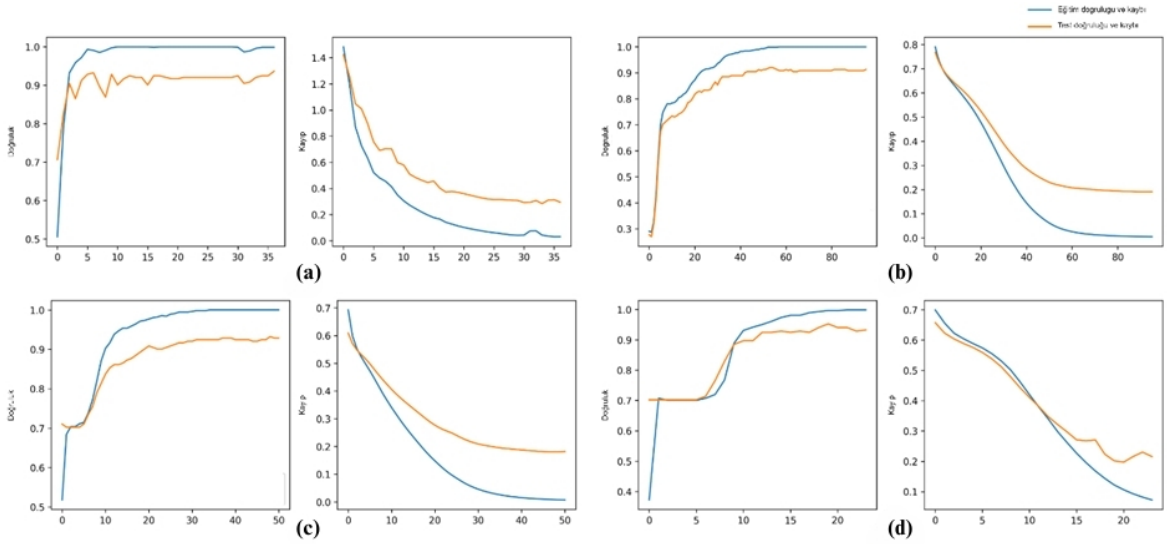
Şekil 3. Veri seti analizi. (a) Yorum uzunlukları (karakter olarak), (b) Bigrams grafiği, (c) Konu başlıklarının keşfedilmesi.

Bu başlıklar, yorumlarda en sık kullanılan kelimelere dayalı olarak çıkarılmıştır. Konu başlıklarının belirlenmesi, duygu analiziyle yakından ilişkilidir çünkü müşterilerin belirli temalar etrafında olumlu, olumsuz veya nötr duygularını ifade ettikleri konuları daha iyi anlamaya olanak sağlar. Her bir konu, ilgili kelimelerle temsil edilmektedir. Örneğin, "*Topic 1"* için "*flight"*, "*food"*, "*seat*", "*service"* ve "*crew"* gibi kelimeler öne çıkmaktadır. Diğer konular da benzer şekilde, "*airline"*, "*time"*, "*hours"*, "*staff"*, "*terminal"* gibi kelimelerle temsil edilmektedir. Bu bulgular, müşteri yorumlarının belirli ana temalar etrafında toplandığını ve bu temaların hizmet kalitesi, uçuş deneyimi, yiyecek ve içecek servisi gibi unsurları kapsadığını göstermektedir. Bu analiz, müşteri memnuniyetinin anahtar bileşenlerini anlamak için önemli içgörüler sağlamaktadır.

Deneysel çalışmanın ikinci adımında özelleştirilmiş ve önceden eğitilmiş modellerin ve sıfırdan ve transfer öğrenme yaklaşımı ile eğitilmesi ve doğrulanması sağlanmıştır. Eğitim için hiper-parametrelerin ayarlanması kapsamında; Embedding katmanı, giriş boyutunu "*len(word_index) + 1"* ve çıkış boyutunu 128 olarak belirlenmiştir. Giriş sekanslarının uzunluğu 100'dür. Spatial Dropout ve LSTM katmanları için Dropout oranı 0,2 olarak ayarlanmıştır. Dense katmanlarında sırasıyla 64 ve 32 nöron bulunur ve ReLU aktivasyon fonksiyonu kullanılır. Batch Normalization katmanı ağda yer alır ve Dropout oranı her iki dense katmanından sonra 0,2'dir. Çıkış katmanı Softmax aktivasyon fonksiyonunu kullanır. Kayıp fonksiyonu olarak Sparse Categorical Crossentropy ve optimizasyon algoritması olarak Adam seçilmiştir.

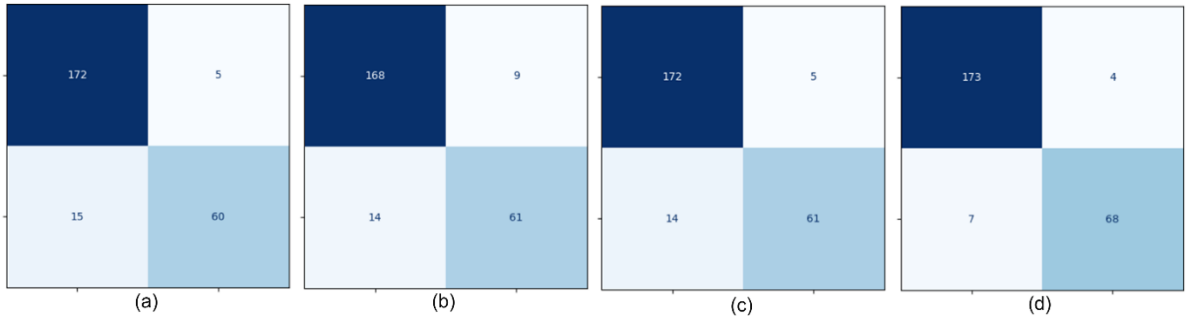
Modellerin doğrulaması için dışarda-tutma (hold-out) yöntemi tercih edilmiştir. Bu doğrultuda, veri seti %75 eğitim ve %25 test olacak şekilde rastgele örneklem seçimiyle ikiye bölünmüştür. Eğitim kümesi, modellerin

öğrenme süreçlerinde kullanılmış, test kümesi ise performanslarının değerlendirilmesi amacıyla ayrılmıştır. Bu yöntem, modellerin yeni ve görülmemiş veriler üzerindeki başarısını objektif bir şekilde ölçmeye olanak tanımıştır. Ayrıca, tüm modellerin aynı eğitim ve test kümeleri üzerinde eğitilmesi ve doğrulanması sağlanarak, modeller arasında adil bir karşılaştırma yapılması hedeflenmiştir. Bu yaklaşım, modellerin veri seti üzerindeki genel performansını belirlemek ve olası ezberleme sorunlarını önlemek için etkili bir strateji sunmuştur. Bu çerçevede eğitim ve doğrulama eğrileri Şekil 4'te gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 4. Eğitim ve doğrulama eğrileri (a) CNN-LSTM (b) *nnlm-en-dim50* (c) *nnlm-en-dim128* (d) USE.

Dört farklı modelin eğitim sonuçları incelendiğinde, CNN-LSTM modeli ile eğitilen ilk modelin eğitim ve doğrulama oranı oldukça yüksek olmasına rağmen, doğrulama kaybı değerlerinde dalgalanmalar gözlemlenmiştir, bu da modelin overfitting eğilimi gösterebileceğini düşündürmektedir. *nnlm-en-dim50* modeli, daha istikrarlı doğrulama oranı ve kaybı sergilemiş, 80 epoch sonunda %91 doğrulama oranına ulaşmıştır. Bu model, doğrulama kaybının sürekli azaldığı ve eğitim kaybının düşük olduğu görülmektedir, bu da iyi bir genel performans ve düşük overfitting riskini göstermektedir. *nnlm-en-dim128* modelinde, doğrulama oranı %93 ile en yüksek seviyeye ulaşmış ve doğrulama kaybı eğitimin sonunda stabilize olmuştur. Bu model, daha büyük embedding boyutu sayesinde daha zengin özellikler yakalayabilmiş ve genel performansını artırmıştır. Ancak, eğitim doğruluğu neredeyse %100'e ulaşmış ve doğrulama kaybı düşük seviyelerde kalarak ezberleme riskine işaret etmiştir. USE modelinde ise doğrulama oranı %88 seviyesinde kalmıştır. Eğitim ve doğrulama kaybı değerlerinde belirgin bir düşüş görülmüş, ancak doğrulama performansında dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bu model, diğer modellerle karşılaştırıldığında daha düşük doğrulama oranına sahip olmasına rağmen, belirli bir dengeye ulaşmıştır. Genel olarak, *nnlm-en-dim128* modeli en yüksek doğrulama oranını elde etmiş olup, *nnlm-en-dim50* modeli ise daha istikrarlı ve düşük ezberleme riski ile en dengeli performansı sergilemiştir. CNN-LSTM ve USE modelleri, bazı dalgalanmalara ve ezberleme belirtilerine rağmen, genel olarak kabul edilebilir performanslar sunmuştur.



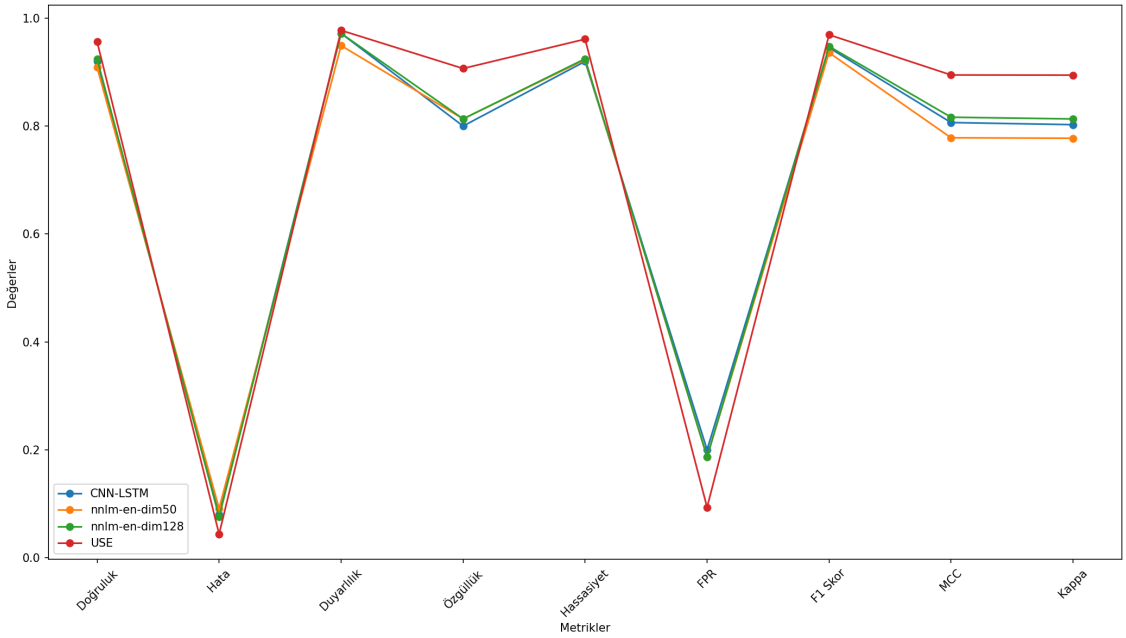
Şekil 5. Hata matrisleri, a) CNN-LSTM (b) *nnlm-en-dim50* (c) *nnlm-en-dim128* (d) USE.

Eğitim sonrası doğrulama testi üzerinde elde edilen hata matrislerine Şekil 5'de yer verilmiştir. Dört modelin hata matrisleri incelendiğinde, CNN-LSTM modeli (a) 172 doğru pozitif ve 60 doğru negatif tahmine ve 15 yanlış negatif ve 5 yanlış pozitif tahmini bulunmaktadır. *nnlm-en-dim50* modeli (b), 168 doğru pozitif ve 61 doğru negatif tahmin ile benzer bir performans sergilemekte, ancak 14 yanlış negatif ve 9 yanlış pozitif tahmin yapmaktadır. *nnlm-en-dim128* modeli (c), 172 doğru pozitif ve 61 doğru negatif tahminle neredeyse mükemmel bir performans göstermektedir ve sadece 14 yanlış negatif ve 5 yanlış pozitif tahmin yapmaktadır. USE modeli (d) ise 173 doğru pozitif ve 68 doğru negatif tahmin ile en iyi performansı sergilemekte, yalnızca 7 yanlış negatif ve 4 yanlış pozitif tahmin yapmaktadır. Genel olarak, *nnlm-en-dim128* ve USE modelleri daha dengeli ve yüksek performans sergileyen modeller olarak öne çıkmaktadır. CNN-LSTM modeli, yüksek doğruluk oranlarına rağmen yanlış negatif sayısının fazla olması nedeniyle performansını biraz düşürmektedir. *nnlm-en-dim50* modeli ise, diğer modellere kıyasla daha fazla yanlış pozitif tahmine sahip olmasına rağmen genel performansı oldukça iyidir. Hata matrislerine bağlı olarak elde edilen performans metrikleri Tablo 3'te sunulmuştur.

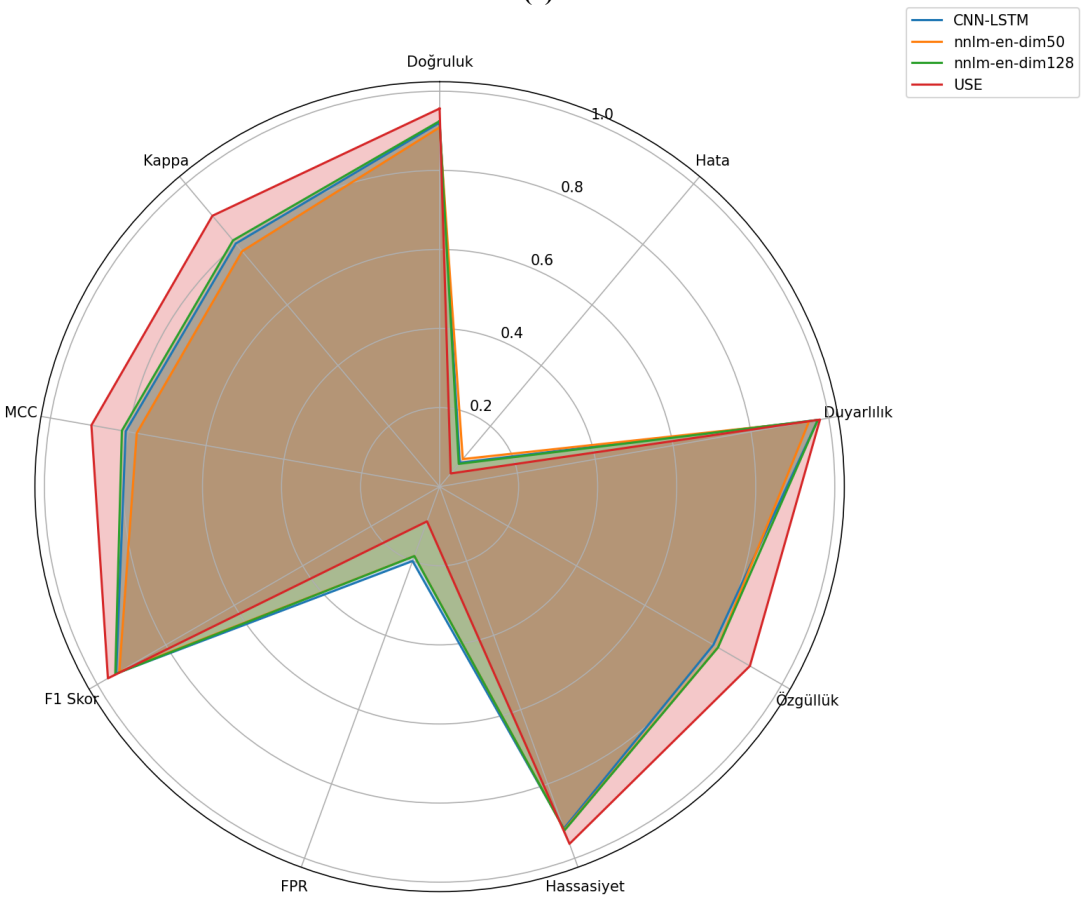
Tablo 3. Modellere ait performans sonuçları.

Metrikler	CNN-LSTM	nnlm-en-dim50	nnlm-en-dim128	USE
Doğruluk	0,9206	0,9087	0,9246	0,9563
Hata	0,0794	0,0913	0,0754	0,0437
Duyarlılık	0,9718	0,9492	0,9718	0,9774
Özgüllük	0,8000	0,8133	0,8133	0,9067
Hassasiyet	0,9198	0,9231	0,9247	0,9611
Yanlış Pozitif Oranı (FPR)	0,2000	0,1867	0,1867	0,0933
F1 Skor	0,9451	0,9359	0,9477	0,9692
MCC*	0,8065	0,7783	0,8164	0,8947
Kappa	0,8026	0,7774	0,8132	0,8944
* Matthews Korelasyon Katsayısı				

Tablo 3'teki performans metriklerine göre dört farklı modelin değerlendirilmesi yapılmıştır. CNN-LSTM modeli, %92,06 doğruluk oranı ve %7,94 hata oranı ile oldukça iyi performans göstermektedir. Bu modelin duyarlılığı %97,18, özgüllüğü ise %80,00 olup, hassasiyeti %91,98 ve F1 skoru %94,51 olarak hesaplanmıştır. MCC değeri 0,8065, Kappa değeri ise 0,8026'dır. *nnlm-en-dim50* modeli ise %90,87 doğruluk oranı ve %9,13 hata oranı ile performans göstermektedir. Duyarlılık %94,92, özgüllük %81,33, hassasiyet %92,31, F1 skoru %93,59 olup, MCC değeri 0,7783 ve Kappa değeri 0,7774'tür. *nnlm-en-dim128* modeli %92,46 doğruluk oranı ve %7,54 hata oranı ile dikkat çekmektedir. Bu modelin duyarlılığı %97,18, özgüllüğü %81,33, hassasiyeti %92,47, F1 skoru %94,77, MCC değeri 0,8164 ve Kappa değeri 0,8132'dir. Son olarak, USE modeli %95,63 doğruluk oranı ve %4,37 hata oranı ile en yüksek performansı göstermektedir. Duyarlılığı %97,74, özgüllüğü %90,67, hassasiyeti %96,11 ve F1 skoru %96,92 olan USE modeli, MCC değeri 0,8947 ve Kappa değeri 0,8944 ile diğer modellerden üstün olduğunu kanıtlamaktadır. Şekil 6(a)'da, CNN-LSTM, *nnlm-en-dim50, nnlm-en-dim128* ve USE modellerinin çeşitli performans metrikleri üzerinden karşılaştırılması gösterilmektedir. Doğruluk, hata, duyarlılık, özgüllük, F1 skoru, MCC ve Kappa değerleri incelenmiştir. CNN-LSTM ve USE modelleri arasında genel olarak benzer performanslar görülmekle birlikte, özellikle duyarlılık ve özgüllük metriklerinde tüm modellerin belirgin farklılıklar sergilediği gözlemlenmektedir. Yanlış pozitif oranı (FPR) ve hata oranlarında bazı düşüşler olsa da genel doğruluk ve diğer metriklerde modellerin güçlü performanslar sergilediği anlaşılmaktadır. Sonuçlar, CNN-LSTM'nin diğer modellere göre daha dengeli bir performans sunduğunu göstermektedir. Şekil 6(b)'de, CNN-LSTM, *nnlm-en-dim50*, *nnlm-en-dim128* ve USE modellerinin performans metriklerinin radar grafiği formatında karşılaştırılması sunulmuştur. Radar grafiği, her modelin farklı metriklerdeki performansını tek bir görselde toplu olarak inceleme imkânı sunar ve modellerin birbirine göre avantajlı ve dezavantajlı olduğu alanları net bir şekilde görmeyi sağlar. Bulgular, CNN-LSTM modelinin, özellikle duyarlılık ve özgüllük metriklerinde diğer modellere göre daha dengeli ve tutarlı performans sergilediğini göstermektedir. Diğer yandan, F1 skoru ve MCC gibi kritik metriklerde USE modelinin güçlü sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

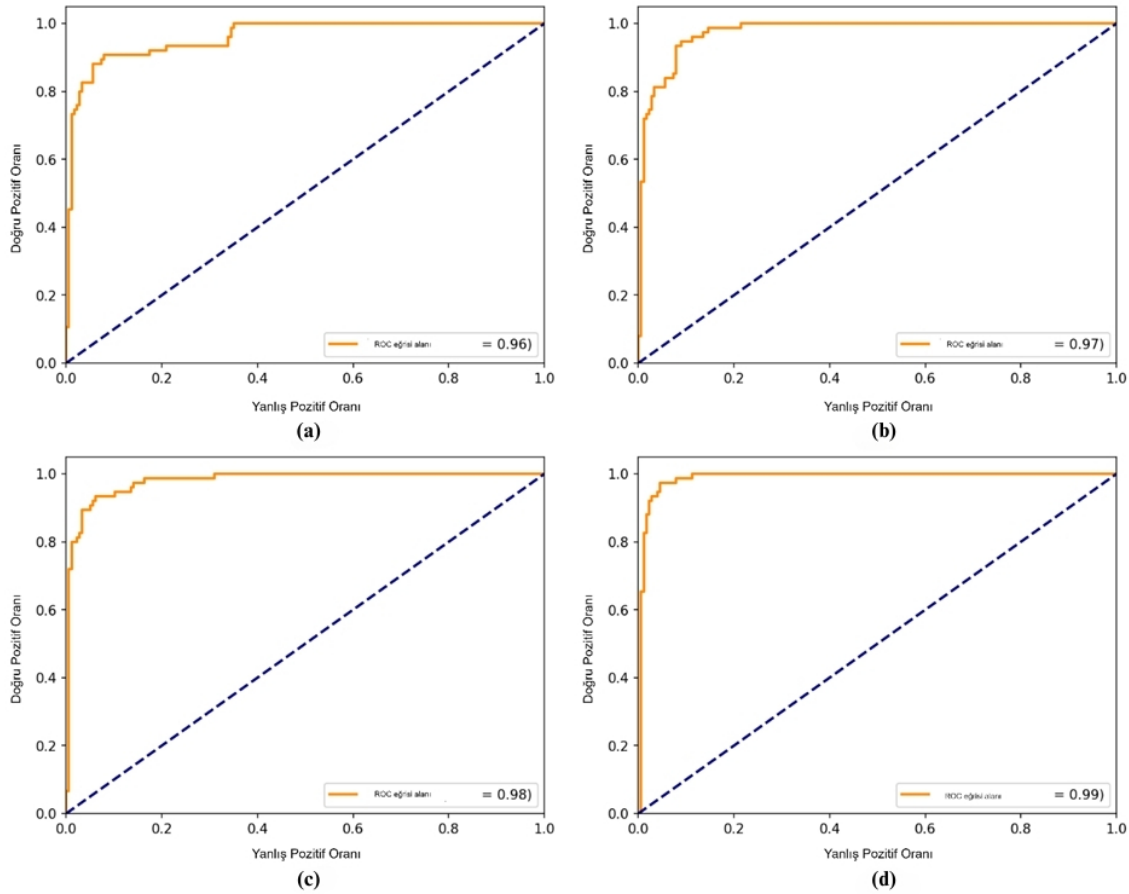


(a)



(b)

Şekil 6. (a) Modellerin performans metrikleri karşılaştırması, (b) Modellerin radar grafiğinde performans metriklerinin karşılaştırılması.



Şekil 7. ROC eğrileri (a) CNN-LSTM (b) *nnlm-en-dim50* (c) *nnlm-en-dim128* (d) USE.

Şekil 7'de modellere ait Alıcı İşletim Karakteristiği (Receiver Operating Characteristic, ROC) eğrileri gösterilmektedir. ROC eğrisi, modelin sınıflandırma performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir grafiktir ve Doğru Pozitif Oranı (True Positive Rate) ile Yanlış Pozitif Oranı (False Positive Rate) arasındaki ilişkiyi gösterir. ROC eğrisi altında kalan alan (AUC - Area Under the Curve) ne kadar büyükse, modelin sınıflandırma performansı o kadar iyidir. CNN-LSTM modelinin ROC eğrisi altında kalan alanı (AUC) 0,96 olarak hesaplanmıştır. Bu, modelin yüksek doğrulukla çalıştığını ve sınıflandırma performansının oldukça iyi olduğunu göstermektedir. *nnlm-en-dim50* modelinin AUC değeri 0,97 olup, bu modelin de yüksek bir performans sergilediğini göstermektedir. *nnlm-en-dim128* modelinin AUC değeri ise 0,98 olarak bulunmuş, bu da modelin sınıflandırma görevinde üstün bir performans gösterdiğini ifade etmektedir. USE modeli ise 0,99 AUC değeri ile en yüksek performansı göstermiştir, bu da modelin sınıflandırma doğruluğunun oldukça yüksek olduğunu ve çok iyi bir performans sergilediğini göstermektedir. Genel olarak, ROC eğrileri ve AUC değerleri, tüm modellerin duygu analizinde etkili olduğunu ve yüksek doğruluk oranlarıyla çalıştığını göstermektedir. Ancak, USE modeli en yüksek AUC değeri ile diğer modellerden daha üstün bir performans sergilemektedir. Bu bulgular, USE modelinin metin tabanlı duygu analizi görevlerinde en iyi performansı sağladığını ve diğer modellere göre daha güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir. CNN-LSTM, *nnlm-en-dim50* ve *nnlm-en-dim128* modelleri de başarılı performanslar sergilemekte olup, farklı uygulama senaryolarında kullanılabilir.

Transfer öğrenme, önceden eğitilmiş bir modelin yeni bir görev için yeniden kullanılmasını sağlayan bir stratejidir. Bu yaklaşım, geniş veri kümelerinde eğitilmiş modellerin bilgilerini aktararak, özellikle sınırlı veri kümelerinde etkili sonuçlar elde eder. Sıfırdan öğrenme ise bir modelin tamamen yeni ve mevcut veri setiyle eğitildiği, tüm parametrelerin bu veri setine dayalı olarak optimize edildiği bir stratejidir. Transfer öğrenme, eğitim süresini kısaltırken genellikle daha yüksek performans sağlar; sıfırdan öğrenme ise modelin veri setine özgü ince ayar yapabilmesi açısından avantajlıdır. Bu çalışmada, CNN-LSTM modeli sıfırdan öğrenme yaklaşımı ile eğitilmiş ve %92,06 doğruluk oranına ulaşmıştır. Öte yandan, *nnlm-en-dim50*, *nnlm-en-dim128* ve USE modelleri

ise transfer öğrenme yaklaşımı ile eğitilmiştir ve sırasıyla %90,87, %95,63 ve %95,63 doğruluk performansı göstermiştir.

4. Tartışma

Tablo 4'te, çeşitli duygu analizi yöntemlerinin farklı veri setleri üzerindeki performansları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, metin tabanlı duygu analizinde kullanılan yöntemlerin çeşitliliğini ve bu yöntemlerin performansını değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Örneğin, CNN ve Word2Vec metodunun TTC-3600 veri kümesi üzerinde %93,3 doğruluk oranı elde ettiği görülmektedir. Bu yöntem, özellikle büyük veri setlerinde yüksek doğruluk oranları sağlamaktadır. Benzer şekilde, CNN ile TF-IDF, DK Filtre ve Kök Bulma metotlarının kullanıldığı TTC-4900 ve MY-15130 veri setlerinde sırasıyla %91,70 ve %94 doğruluk oranları elde edilmiştir. Bu sonuçlar, CNN tabanlı yöntemlerin metin sınıflandırma görevlerinde etkinliğini göstermektedir. LSTM yöntemi, 225.239 örnek ve 14 sınıf içeren özel bir veri seti üzerinde %84 doğruluk oranı ile daha düşük bir performans sergilemiştir. Bu durum, LSTM'nin büyük ve karmaşık veri setlerinde performansının sınırlı olabileceğini göstermektedir. Öte yandan, FastText ve SVM kombinasyonu, 12.000 örnek ve 6 sınıf içeren özel bir veri setinde %95,75 doğruluk oranı ile yüksek performans göstermektedir. Bu da FastText ve SVM yöntemlerinin metin sınıflandırmada güçlü araçlar olduğunu ortaya koymaktadır. BERT modeli, EnWiki-100 ve RCV1-57 veri setlerinde sırasıyla %75,28 ve %73,48 doğruluk performansı göstermiştir. Bu durum, BERT modelinin büyük ve çeşitli sınıflara sahip veri setlerinde bileşenlerinin optimizasyon gereksinimlerine işaret etmektedir. Bi-LSTM modeli, IMDB veri setinde %91,41 doğruluk oranı ile dikkat çekici bir performans sergilemiştir. Son olarak, TextConvoNet modeli, farklı veri setleri üzerinde geniş bir performans aralığı sergilemiştir. Örneğin, Reuters-21578 veri setinde %99,20 doğruluk oranı ile en yüksek performansı elde etmiştir. Bu durum, TextConvoNet'in genel metin sınıflandırma görevlerinde oldukça başarılı olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, literatürde yer alan çeşitli duygu analizi yöntemleriyle karşılaştırıldığında, sıfırdan eğitilen CNN-LSTM ve transfer öğrenme yaklaşımı ile eğitilmiş üç farklı önceden eğitilmiş modelin performansını inceleyerek önemli katkılar sunmaktadır. Literatürde CNN ve Word2Vec gibi klasik yöntemlerin yanı sıra, FastText-SVM ve BERT gibi derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar incelenmiştir. Bu çalışmalarda genellikle %84 ile %99 arasında değişen doğruluk oranları elde edilmiştir. Önerilen çalışmada, transfer öğrenme yöntemiyle eğitilen USE modelinin %95,63 doğruluk oranı ile literatürdeki pek çok çalışmaya kıyasla üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, CNN-LSTM modelinin %92,06 doğruluk oranı ile geniş veri setleri üzerinde etkili bir yöntem olduğu ortaya konulmuştur. Bu bulgular, çalışmamızın hem CNN-LSTM'nin sıfırdan öğrenme stratejisi hem de transfer öğrenme tekniklerinin, metin tabanlı duygu analizinde yüksek doğruluk oranlarına ulaşılmasında etkili yaklaşımlar olduğunu göstererek literatüre önemli katkılar sağladığını göstermektedir.

Bu bulgular, duygu analizinde kullanılan çeşitli yöntemlerin performanslarını karşılaştırarak, belirli veri setlerine ve uygulama senaryolarına göre hangi yöntemlerin daha uygun olabileceğine dair önemli bilgiler sunmaktadır. Tartışma başlıkları olarak, yöntemlerin veri setine göre değişen performansları, özel ve açık erişimli veri setlerinin etkisi, yöntemlerin karmaşıklığı ve optimizasyon gereksinimleri ile ilgili konular ele alınabilir. Bu değerlendirmeler, metin tabanlı duygu analizi çalışmalarında en uygun yöntemin seçilmesine yönelik stratejik kararlar alınmasına yardımcı olacaktır.

Tablo 4. İlgili çalışmaların karşılaştırması.

Metotlar	**Veri Seti**	**Örnek sayısı**	**Sınıf sayısı**	**Açık Erişim**	**Doğruluk (%)**
CNN ve Word2Vec Metodu [4]	TTC-3600 Veri Kümesi	3600	6	Evet	93,3
CNN + TF-IDF + DK Filtre + Kök Bulma [15]	TTC-4900	4900	7	Evet	91,70
	MY-15130	15170	2	Evet	94,00
LSTM [17]	Özel veri seti	225239	14	Hayır	84,00
FastText + SVM [22]	Özel veri seti	12000	6	Hayır	95,75
kNN [27]	Özel veri seti	2411	7	Hayır	71,40
BERT [26]	EnWiki-100	329600	100	Evet	75,28
	RCV1-57	758100	57		73,48
SMO [12]	Özel veri seti	444	2	Hayır	88,73
Adaboost + TF IDF [19]	Özel veri seti	24783	3	Hayır	94,00
Bi LSTM [24]	IMDB	50000	2	Evet	91,41
kNN [18]	Özel veri seti	279	2	Hayır	83,87
RCNN [25]	20News	13919	4	Evet	96,49
	Fudan	19636	20		95,20
	ACL	202979	5		49,19
	SST	11855	5		47,21
RT + Bag of Words [21]	Özel veri seti	18000	3	Hayır	96,62
TextConvoNet [23]	Binary SST-2 Dataset	8732	2	Evet	82,20
	Amazon Review for Sentiment Analysis Dataset	20000	2	Evet	90,90
	Reuters-21578	7112	8	Evet	99,20
	Twitter User Airline Sentiment Dataset	13000	3	Evet	88,40
	Covid Tweets Dataset	7500	5	Evet	83,90
MLP [3]	Özel veri seti	1400	2	Hayır	86,00
Bu çalışma, CNN-LSTM, NNLM, Transfer Learning	Havayolu incelemeleri veri kümesi	1100	3	Evet	95,63

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmanın ana hedefleri, havayolu müşteri yorumlarının duygu analizi için farklı yapay zekâ ve derin öğrenme modellerinin performansını değerlendirmek ve bu değerlendirmelerden elde edilen bulgularla müşteri memnuniyetini artıracak stratejik öneriler sunmaktır. Çalışmada CNN-LSTM, *nnlm-en-dim50*, *nnlm-en-dim128* ve *USE* modelleri kullanılmış ve bu modellerin metin sınıflandırma görevlerindeki başarıları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

CNN-LSTM modeli %92,06 doğruluk oranı ile oldukça başarılı bir performans göstermiştir. Ancak, bu modelin duyarlılığı %97,18 iken özgüllüğü %80,00 olarak hesaplanmıştır. Yanlış pozitif oranı %20,00 olan modelin F1 skoru ise %94,51'dir. Bu model, yüksek doğruluk oranına sahip olmasına rağmen bazı durumlarda aşırı uyum problemi göstermiştir. *nnlm-en-dim50* modeli %90,87 doğruluk oranı ile biraz daha düşük performans sergilemiştir. Bu modelin duyarlılığı %94,92 ve özgüllüğü %81,33'tür. Yanlış pozitif oranı %18,67 olan modelin F1 skoru %93,59 olarak hesaplanmıştır. *nnlm-en-dim50* modeli, test doğruluğu ve kaybı açısından daha istikrarlı bir performans göstermiştir. *nnlm-en-dim128* modeli %92,46 doğruluk oranı ile en yüksek doğruluğa sahip modellerden biri olmuştur. Bu modelin duyarlılığı %97,18, özgüllüğü %81,33 ve yanlış pozitif oranı %18,67'dir. F1 skoru %94,77 olan *nnlm-en-dim128* modeli, büyük gömme boyutu sayesinde daha zengin özellikler yakalayarak performansını artırmıştır. *USE* modeli %95,63 doğruluk oranı ile en yüksek performansı sergilemiştir. Bu modelin duyarlılığı %97,74, özgüllüğü %90,67 ve yanlış pozitif oranı %9,33'tür. F1 skoru %96,92 olan *USE* modeli, diğer modellere göre daha düşük hata oranı ve yüksek doğruluk ile öne çıkmıştır.

Sonuç olarak, CNN-LSTM, *nnlm-en-dim50*, *nnlm-en-dim128* ve *USE* modelleri duygu analizi için etkili araçlar olarak değerlendirilmiştir. *USE* modeli, en yüksek doğruluk oranı ve en düşük hata oranı ile en iyi performansı göstermiştir. *nnlm-en-dim128* modeli de yüksek doğruluk oranı ile dikkat çekmektedir. Bu sonuçlar, işletmelerin müşteri memnuniyetini artırmak ve hizmet kalitesini iyileştirmek için duygu analizi teknolojilerini etkin bir şekilde kullanmalarına yardımcı olacak önemli içgörüler sunmaktadır.

Gelecek çalışmalar için öneriler şunlardır: farklı veri setleri ve daha geniş örneklem büyüklükleri ile modellerin performanslarının yeniden değerlendirilmesi, modellerin hiperparametre optimizasyonlarının daha detaylı incelenmesi ve farklı yapay zekâ tekniklerinin entegrasyonu ile duygu analizinde daha yüksek doğruluk oranlarının elde edilmesi mümkün olabilir. Ayrıca, müşteri yorumlarının dil ve kültürel farklılıklarını göz önünde bulunduran modellerin geliştirilmesi de müşteri memnuniyeti analizinde önemli bir adım olacaktır. Bu öneriler, duygu analizi çalışmalarının daha ileriye taşınması ve işletmelerin müşteri geri bildirimlerinden daha derinlemesine içgörüler elde etmesi için yol gösterici nitelikte olacaktır.

Kaynaklar

[1] Cömert Ö, Yücel N. Müşteri Duyarlılığını Keşfetmek İçin Yapay Zeka Destekli Analiz ile Çevrimiçi Ürün İncelemelerinden Anlamlı Bilgiler Elde Etme. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 35(2): 679-690.

[2] Uslu O, Akyol S. Türkçe Haber Metinlerinin Makine Öğrenmesi Yöntemleri Kullanılarak Sınıflandırılması. Estudam Bilişim Dergisi 2021; 2(1): 15–20.

[3] Tuzcu S. Çevrimiçi Kullanıcı Yorumlarının Duygu Analizi ile Sınıflandırılması. Estudam Bilişim Dergisi 2020; 1(2): 1–5.

[4] Acı Ç, Çırak A. Türkçe Haber Metinlerinin Konvolüsyonel Sinir Ağları ve Word2Vec Kullanılarak Sınıflandırılması. Bilişim Teknolojileri Dergisi 2019; 12(3): 219-228.

[5] Demircan M, Seller A, Abut F, Akay MF. Developing Turkish sentiment analysis models using machine learning and e-commerce data. Int J Cognit Comput Eng 2021; 2: 202-207.

[6] Chen H, Wu L, Chen J, Lu W, Ding J. A comparative study of automated legal text classification using random forests and deep learning. Inf Process Manag 2022; 59(2): 102798.

[7] Barfar A. A linguistic/game-theoretic approach to detection/explanation of propaganda. Expert Syst Appl 2022; 189: 116069.

[8] Liu Y, Li P, Hu X. Combining context-relevant features with multi-stage attention network for short text classification. Comput Speech Lang 2022; 71: 101268.

[9] Colón-Ruiz C, Segura-Bedmar I. Comparing deep learning architectures for sentiment analysis on drug reviews. J Biomed Inform 2020; 110: 103539.

[10] Wang R, Li Z, Cao J, Chen T, Wang L. Convolutional recurrent neural networks for text classification. In: IEEE 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN);14-17 July 2019; Budapest, Hungary. pp. 1-6.

[11] Onan A, Korukoğlu S, Bulut H. Ensemble of keyword extraction methods and classifiers in text classification. Expert Syst Appl 2016; 57: 232-247.

[12] Göker H, Tekedere H. FATİH Projesine Yönelik Görüşlerin Metin Madenciliği Yöntemleri İle Otomatik Değerlendirilmesi. Bilişim Teknolojileri Dergisi, 10(3), 291-299.

[13] Kılınç D, Borandağ E, Yücalar F, Tunalı V, Şimşek M, Özçift A. KNN Algoritması ve R Dili ile Metin Madenciliği Kullanılarak Bilimsel Makale Tasnifi. Marmara Fen Bilimleri Dergisi 2016; 28(3): 89-94.

[14] Kowsari K, Brown DE, Heidarysafa M, Jafari Meimandi K, Gerber MS, Barnes LE. HDLTex: Hierarchical Deep Learning for Text Classification. In 2017 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications; 18-21 December 2017; Cancun, Mexico. pp. 364-371.

[15] Alparslan G, Dursun M. Konvolüsyonel Sinir Ağları Tabanlı Türkçe Metin Sınıflandırma. Bilişim Teknolojileri Dergisi 2023; 16(1): 21-31.

[16] Guo B, Han S, Han X, Huang H, Lu T. Label Confusion Learning to Enhance Text Classification Models. In: AAAI 2021 35th AAAI Conference on Artificial Intelligence; 2021; AAAI. Vol 14B. pp. 12929-12936.

[17] Alzoubi YI, Topcu AE, Erkaya AE. Machine Learning-Based Text Classification Comparison: Turkish Language Context. Appl Sci 2023; 13(16): 9428.

[18] T Kaşıkçı T, Gökçen H. Metin Madenciliği İle E-Ticaret Sitelerinin Belirlenmesi. Bilişim Teknolojileri Dergisi. 2013;7(1):0.

[19] Hajibabaee P, Malekzadeh M, Ahmadi M, Heidari M, Esmaeilzadeh A, Abdolazimi R, James Jr H. Offensive Language Detection on Social Media Based on Text Classification. In: IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC); 26-29 Jan 2022; Las Vegas, NV, USA. pp. 92-98 .

[20] Gürbüz M, Sürmeli D, Taşkın K, Cebeci Hİ. Otellere için paylaşılan çevre ile alakalı yorumların metin madenciliği ile analizi: Antalya otelleri üzerine bir araştırma. Business & Management Studies: An International Journal 2024; 12(1): 218-239.

[21] Neogi AS, Garg KA, Mishra RK, Dwivedi YK. Sentiment analysis and classification of Indian farmers' protest using twitter data. Int J Inf Manage Data Insights 2021; 1(2): 100019.

[22] Çelik Ö, Koç BC. TF-IDF, Word2vec ve Fasttext Vektör Model Yöntemleri ile Türkçe Haber Metinlerinin

Sınıflandırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi 2021; 23(67): 121-127.

[23] Soni S, Chouhan SS, Rathore SS. TextConvoNet: a convolutional neural network based architecture for text classification. Appl Intell 2023; 53(11): 14249-14268.

[24] Jang B, Kim M, Harerimana G, Kang SU, Kim JW. Bi-LSTM model to increase accuracy in text classification: Combining word2vec CNN and attention mechanism. Appl Sci 2020; 10(17): 5841.

[25] Lai S, Xu L, Liu K, Zhao J. Recurrent convolutional neural networks for text classification. In: Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence; 2015. AAAI.

[26] Gasparetto A, Marcuzzo M, Zangari A, Albarelli A. Survey on Text Classification Algorithms: From Text to Predictions. Information 2022; 13(2): 1-39.

[27] Chen Z, Zhou LJ, Li X Da, Zhang JN, Huo WJ. The Lao text classification method based on KNN. Procedia Comput Sci 2020; 166:523-528.

[28] Bahassine S, Madani A, Al-Sarem M, Kissi M. Feature selection using an improved Chi-square for Arabic text classification. J King Saud Univ Comput Inf Sci 2020; 32(2): 225-231.

[29] Reusens M, Stevens A, Tonglet J, De Smedt J, Verbeke W, Vanden Broucke S, Baesens B. Evaluating text classification: A benchmark study. Expert Syst Appl 2024; 254:124302.

[30] Wang H, He J, Zhang X, Liu S. A Short Text Classification Method Based on N -Gram and CNN. Chin J Electron 2020; 29(2): 248-254.

[31] Bhattacharya S, Shankar BG, Pitchaimanickam B, Nithya AA. Toxic Comments Classification using LSTM and CNN. In: 2024 3rd International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC); 5-7 June 2024; Salem, India. pp.214-221.

[32] İlkuçar M, Artun C, Misafir Yorumlarının Makine Öğrenmesi Yardımıyla Duygu Analizi: Fethiye Beş Yıldızlı Oteller Örneği. J Bus Digit Age 2023; 6: 33–41.

[33] Syed AA. Airline reviews dataset for Abstractive Summarization and Sentiment Classification. Mendeley Data 2023; doi: 10.17632/pc6fxc95h5.1 .

[34] Budak Ü, Cömert Z, Çıbuk M, Şengür A. DCCMED-Net: Densely connected and concatenated multi Encoder-Decoder CNNs for retinal vessel extraction from fundus images. Med Hypotheses 2020; 134:109426.

[35] Togacar M, Comert Z, Ergen B, Budak U. Brain Hemorrhage Detection based on Heat Maps, Autoencoder and CNN Architecture. In: 2019 1st International Informatics and Software Engineering Conference; 6-7 November 2019; Ankara, Türkiye. pp. 1-5.

[36] Toğaçar M, Ergen B, Cömert Z. Classification of flower species by using features extracted from the intersection of feature selection methods in convolutional neural network models. Measurement 2020; 158:107703.

[37] Toğaçar M, Cömert Z, Ergen B. Intelligent skin cancer detection applying autoencoder, MobileNetV2 and spiking neural networks. Chaos Solitons Fractals 2021; 144:110714.

[38] Budak Ü, Çıbuk M, Cömert Z, Şengür A. Efficient COVID-19 Segmentation from CT Slices Exploiting Semantic Segmentation with Integrated Attention Mechanism. J Digit Imaging 2021; 34: 263–272

[39] Toğaçar M, Ergen B, Cömert Z. BrainMRNet: Brain tumor detection using magnetic resonance images with a novel convolutional neural network model. Med Hypotheses 2020; 134:109531.

[40] AL-Smadi M, Hammad MM, Al-Zboon SA, AL-Tawalbeh S, Cambria E. Gated recurrent unit with multilingual universal sentence encoder for Arabic aspect-based sentiment analysis. Knowl Based Syst 2023; 261:107540.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 183-198, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1528554

Elazığ İli Örneğine Ait On-Grid Çatı Üstü Güneş Enerji Santralinin Yıllık Gerçek Üretim Verilerinin PV*SOL Simülasyon Değerleri ile Karşılaştırılması

Osman ÖZDEMİR[1*], Ertuğrul ÇELİK[2]
[1] Elektrik ve Enerji Bölümü, Keban Meslek Yüksek Okulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
[2] Makine Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Munzur Üniversitesi, Tunceli, Türkiye
[*1] oozdemir@firat.edu.tr, [2] ecelik@munzur.edu.tr

(Geliş/Received: 05/08/2024; Kabul/Accepted: 18/12/2024)

Öz: Geçmişten bugüne kadar insanoğlunun temel gereksinimlerinin karşılanması için enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Dünyada nüfusun hızlı bir şekilde yükselmesi, teknolojik faaliyetlerin gelişimiyle birlikte enerji tüketimi gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde artan enerji talebini karşılamak için fosil yakıtlar ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal süreçler aracılığıyla sürekli olarak yenilenen ve fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında düşük emisyon değerlerine sahip olan çevre dostu enerji üretim kaynaklarıdır. Güneş enerjisi sistemlerindeki teknolojik ilerlemeler, maliyetlerin düşmesi ve verimliliğin artması, güneş enerjisini yenilenebilir enerji kaynakları arasında güçlü bir alternatif haline getirmektedir. Özellikle arazi ve çatılara kurulan Güneş Enerji Santrallerinin (GES) sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmada Elazığ ili sınırları içinde sanayi bölgesinde bir işletmenin çatısına kurulmuş şebekeye bağlı çatı (on-grid) üstü GES sistemi ele alınmıştır. Çatı üstü GES toplam 165 adet, 545 Watt gücünde monokristal panellerden oluşmakta olup toplam gücü 89,9 kWp'tir. Sistem performansını artırmak amacıyla seçilen alan için en iyi yönelimi ve eğim açısını bulmak amacıyla PV*SOL yazılımı kullanıldı. Bu çalışmada mevcut GES sisteminin bir yıllık enerji üretim verileri aylara göre incelenerek, PV*SOL simülasyonunda elde edilen benzetim sonuçları ile karşılaştırılarak PV*SOL yazılımının doğruluk oranı değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda PV*SOL simülasyon programından elde edilen veriler ile çatı üstü GES gerçek verileri arasında %0,03 fark olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında, uygulaması yapılan enerji sisteminin teknik ve ekonomik olarak uygun olduğu söylenebilir.

Anahtar kelimeler: Yenilenebilir enerji, on-grid fotovoltaik sistem, pv*sol.

Comparison of Annual Real Production Data of the On-Grid Rooftop Solar Power Plant in Elazığ Province Example with PV*SOL Simulation Values

Abstract: From past to present, energy has been needed to meet the basic needs of humanity. Today, fossil fuels and renewable energy sources are used to meet the increasing energy demand. Renewable energy sources are environmentally friendly sources that are constantly renewed by natural processes and produce energy with low emission values compared to fossil fuels. Technological advances in solar energy systems, decreasing costs and increasing efficiency make solar energy a strong alternative among renewable energy sources. In this study, a grid-connected rooftop SPP system installed on the roof of a business in the industrial zone within the borders of Elazığ province was discussed. The rooftop SPP consists of a total of 165 monocrystalline panels with a power of 545 Watts and its total power is 89.9 kWp. PV*SOL software was used to find the best orientation and inclination angle for the selected area in order to increase system performance. In this study, the annual energy production data of the current solar power plant system was examined by months and the data obtained from the PV*SOL simulation was compared with the real data in the field. As a result of the study, it was determined that there was a 0.03% difference between the data obtained from the PV*SOL simulation program and the real data of the rooftop solar power plant.

Key words: Renewable energy, on-grid photovoltaic systems, pv*sol.

1. Giriş

Türkiye, coğrafi konumu ve meteorolojik koşullarını en iyi şekilde değerlendirerek, 2035 yılına kadar dışa bağımlılığı azaltmaya yönelik yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını hedeflemektedir. Bu hedeflerden güneş enerjisi kurulu gücü 52,9 GW, rüzgar enerjisi kurulu gücü 29,6 GW, hidroelektrik enerji kurulu gücü 35,1 GW, jeotermal ve biyokütle enerji kurulu gücü 5,1 GW'tır [1]. Bu kaynaklardan güneş enerjisiyle ilgili belirlenen 2035 yılı kurulu güç değerine ulaşmak için yaklaşık olarak 42 GW kapasite artırımına gereksinim duyulmaktadır. Bu bağlamda ülkemizde güneş enerjisinin daha yaygın şekilde kullanılması için tüketicileri teşvik edici düzenlemeler yapılmaktadır [2]. GEPA verilerine göre ülkemizin güneşlenme süresi 2737 saat ve güneşten gelen ortalama enerji miktarı 1527 kWh/m²/yıldır [3]. Bu açıdan güneş sektörünün önde gelen ülkelerinden Almanya'ya

* Sorumlu yazar: oozdemir@firat.edu.tr Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0001-9725-5111, [2] 0000-0003-4429-279X

göre daha iyi durumdadır [4]. Güneş enerji sektöründe elektrik üretim amacıyla kullanılan PV paneller üzerindeki teknolojik ARGE çalışmaları sayesinde PV panel üretici şirket sayısı fazlaca artış göstermiştir. Bu nedenle ürünlerde meydana gelen hızlı fiyat düşüşü, net sıfır emisyon hedefi, sürdürülebilir enerji politikalarının etkisiyle ilginin ve yatırımların artması dünyada ve ülkemizde kaynakların popülaritesini arttırmıştır [5,6].

Genel olarak güneş paneli olarak adlandırılan PV modüllerin çalışma prensibi, gelen güneş ışığının emilmesi ve sonrasında ise ışığın doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmek için yarı iletkenler kullanma esasına dayanır [7]. Günümüzde yaygın olarak polikristal ve monokristal paneller kullanılmaktadır. Güneş enerji sistemleri uygulamada şebekeye bağlı (on-grid) ve şebekeden bağımsız (off-grid) olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. On-grid sistemler elektrik iletim-dağıtım hatlarına bağlantı sağlayarak çalışırken, off-grid sistemler şebekeden bağımsız şekilde güç üretirler [8]. Off-grid PV sistemleri, invertör ve akü depolaması yapılarak oluşturulan PV modül serileri veya dizilerinden oluşur. On-grid PV sistemleri ise MPPT ve invertör kontrol ekipmanları kullanılarak şebeke senkronizasyonu sağlayan iki kontrol cihazından oluşur [9]. Güneş enerji sistem tasarımı yaparken kurulum yapılacak yerin topoğrafik yapısı, ortalama güneşlenme süresi, sahaya yerleştirilecek panellerin türü, invertör seçimi, MPTT sayısı gibi santralin verimini etkileyen birçok etken göz önüne alınmalıdır [10]. GES sisteminde kullanılan donanım seçimi, miktarı, panellerin konumlandırması, sistem maliyeti ve sistemin amortisman süresi gibi özelliklerin tespit edilmesi için fizibilite yapılarak projenin uygulanabilirliği belirlenmelidir. Bu amaç doğrultusunda solar PV sistem tasarımını yapmak için dünya çapında aktif olarak kullanılan simülasyon programları mevcuttur. Bunlara Homer Pro - Homer Energy (ABD), PV F-Chart - F-Chart (ABD), pvPlanner - SolarGis (Slovakya), PVsyst - Pvsyst SA (İsviçre), RETscreen - Natural Resources Canada (Kanada), Sistem Danışmanı Modeli (SAM)- Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL)- (ABD), Solar Pro - Laplace Systems (Japonya), PV*SOL (Almanya) gibi yaygın olarak kullanılan simülasyon yazılımları örnek olarak verilebilir [11]. Bu yazılımlar uygulama alanında karşılaşılabilecek maddi hataların önceden doğru tespit edilmesi, fotovoltaik sistemin kurulum yapılacağı yerin üç boyutlu (3D) sistem tasarımı ve sistem maliyet hesabının daha hızlı ve kolay biçimde yapılmasına olanak sağlamaktadır [12,13].

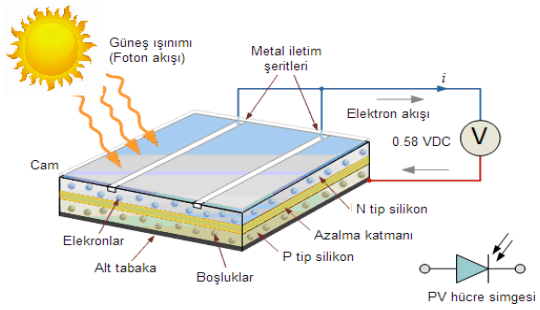
Literatürde güneş enerji sistemlerinin verimlilik ve etkinliğini arttırmak amacıyla farklı benzetim programları kullanılarak yapılan çalışmalar mevcuttur. Kumar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Hindistan'da ortalama yıllık 1086,24 kWh tüketime sahip mühendislik fakültesinin mekanik departmanına yönelik olarak, PVsyst simülasyon programını kullanarak şebekeden bağımsız güneş enerjisi sisteminin tasarımını, performans oranını, kayıp miktarını incelemişler ve saha uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre güneş paneli aracılığıyla sağlanan enerji 1143,6 kWh olup, kullanıcıya sağlanan enerji ise ihtiyaç duyulan yükten daha az değer olan 1068,12 kWh'tir. Bu durumun yazılımdaki fotovoltaik panel modül tipi ve üretim ayrıntılarının belirsizliği nedeniyle kaynaklandığı öngörüsünde bulunmuşlardır [14]. Serat ve arkadaşları, Afganistan'ın Gazne kentinde yapmış oldukları çalışmada PVsyst yazılımını kullanarak, şebekeye bağlı (on-grid) güneş enerjisi çatı üstü fotovoltaik (PV) sisteminin tasarım ve ekonomik analizine odaklanmışlardır. Araştırma bulguları, tasarlanan şebekeye bağlı güneş çatı üstü PV sisteminin, 10 kW spesifik bir güneş PV kapasitesine sahip olduğunu ve tahmini yıllık 19323 kWh enerji çıkışı üretebileceğini göstermişlerdir [15]. Arafat ve Dwivedi, Bhopal şehri Madhya Pradesh eyaletindeki şebekeye bağlı 100 kWp güce sahip PV sistemin tasarım ve performans analizini araştırmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre sistemin performans oranı, sistemin geri ödemesi, sistemden elde edilen güç hakkında veriler elde etmişlerdir. Şebekeye bağlı 100 kW'lık bir güneş enerjisi sisteminin tasarımı ve simülasyonu için PVsyst'i kullanarak doğru performans değerlendirmesi, tasarım optimizasyonu, finansal analiz ve gelecekteki olasılıkların araştırılmasından fayda sağlanabileceğini ifade etmişlerdir [16]. Chandrakant Dondariya ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmayı Hindistan'ın Ujjain ilinde şebekeye bağlı (on-grid) 6,4 kWp güç kapasitesine sahip çatı güneş fotovoltaik sistemi incelemişlerdir. Bu çalışmada, PV*SOL yazılımı kullanarak, nominal güç değeri 320 Wp olan 20 adet monokristal güneş panellerinin elektrik üretim değerlerini ve performans ölçümlerini belirlemişlerdir. Sonuç olarak sistemin yıllık 1528,125 kWh/kWp enerji üretimi gerçekleştirmesiyle, tesisin elektrik tüketiminin yaklaşık olarak %41'inden fazlasını karşılamış olduğunu tespit etmişlerdir [17]. Ateş yaptığı çalışmada Türkiye'deki Köprübaşı Meslek Yüksekokulu'nda 3 yıl boyunca kullanılan 30 kWp'lik bir çatı PV sisteminin enerji performans ve ekonomik gelir analizini değerlendirmiştir. PV modülünün elektrik çıktısı, enerji dengesi denklemleri yazılarak modellenmiş ve elektrik üretimi saatlik olarak hesaplanmıştır. Ölçülen sonuçlar, IBM SPSS Statistics yazılımı kullanılarak benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve aralarındaki Pearson Korelasyon katsayısının 0,993 olduğunu göstermiştir [18]. Çiçek ve Erdinç yaptıkları çalışmada PV-batarya hibrit sistem içeren bir otoparkta elektrikli araçların ekonomik açıdan en iyi şekilde şarj edilmesi için bir karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Önerilen modelin doğruluğunu kanıtlamak için çeşitli durum çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu durum çalışmalarından elde edilen sonuçlar, PV-batarya hibrit sisteminin toplam elektrik maliyetini düşürdüğünü göstermektedir [19]. Pamuk ve Ay yaptıkları çalışmada Zonguldak

Bülent Ecevit Üniversitesi Farabi yerleşkesinde yer alan 14 adet binanın çatısına kurulabilecek fotovoltaik enerji miktarını PV*SOL yazılımı ile tespit etmişlerdir [20]. Balkan ve Görel bu çalışmalarında Afyonkarahisar ili Dinar ilçesi Gençali köyü mevkiine kurulmuş olan bir off-grid fotovoltaik sistemin Lüytob üretim verileri ile PV*SOL programına ait üretim değerlerini karşılaştırmışlardır. Üretim değerleri incelendiğinde PV*SOL yazılım programının vermiş olduğu üretim sonucuna göre %3,309798 oranında hata payının bulunduğu sonucuna ulaşmışlardır [21]. Martin yaptığı çalışmada Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi Elbistan Meslek Yüksekokulu binalarının güneye bakan çatılarına kurulabilecek bir çatı üstü güneş enerjisi santralinin simülasyonunu PV*SOL programı ile yapmıştır [22]. Biberci bu çalışmada, Konya'da bulunan bir tarım alanının sulanmasında ihtiyaç duyulan elektrik enerjisi için şebekeye bağlı bir güneş fotovoltaik (PV) sisteminin tekno-ekonomik analizini PV*SOL programı ile gerçekleştirmiştir [23].

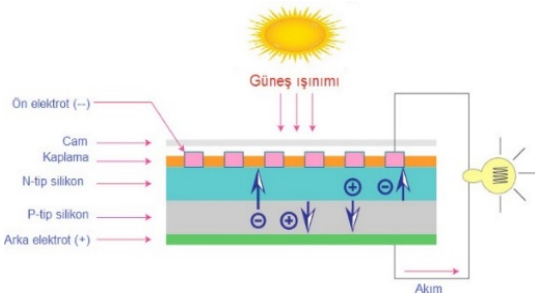
Bu çalışmada monokristal panellerden oluşan 89,9 kWh güç değeri olan on-grid çatı üstü GES sistemi ele alınacaktır. Sistem tasarımı PV*SOL programı ile yapılmış olup ile çalışma kapsamında GES sistemine ait 2023 yılına ait 1 yıllık gerçek değerleri ile PV*SOL simülasyon programının fizibilite değerleri karşılaştırılacaktır. PV*SOL programı, güneş panellerinin enerji çıktısının modellenmesi, sistemin enerji gereksinimlerinin tahmin edilmesi ve sistemde kullanılan ekipmanların ekonomik uygulanabilirliğinin doğruluğunu belirlemek için kullanılacaktır.

2. Fotovoltaik Panel Çalışma Prensibi

PV hücresi, güneş ışığının anında elektrik enerjisine dönüştürüldüğü fotovoltaik etki prensibine göre çalışan güneş enerjisi üretim sisteminin temel birimidir [18]. Hücreler kare, dikdörtgen gibi geometrik şekillerden oluşan n ve p tipi olarak adlandırılan yarı iletken malzemelerden oluşmaktadır [19]. Güneşten yeryüzüne gelen ışınım, elektromanyetik parçacıklar olarak adlandırılan fotonlardır. Bu fotonlar, güneşten yayılan farklı dalga boylarına ve enerji miktarına sahiptirler. Güneş ışını fotovoltaik bir hücreye yansıdığı zaman gelen ışınımın bir kısmı hücre tarafından emilirken, bir kısmı ise geri yansıtılır. Güneş ışınının panel yüzeyine çarparak emilmesiyle p tipi yarı iletken maddeden elektron koparılarak enerji kazanan bu elektronlar n tipi yarı iletken maddeye doğru yönelirler. Bu süreç sonucunda yarı iletkenin bir tarafında pozitif, diğer tarafında ise negatif yük birikimi oluşmaktadır. Böylece, serbest kalan elektronlar belirli bir yönde hareket ederek elektrik akımını meydana getirir. PV panelin çalışma prensibi ve yapısına ait görsel Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiştir [26].



Şekil 1. PV panel çalışma prensibi.



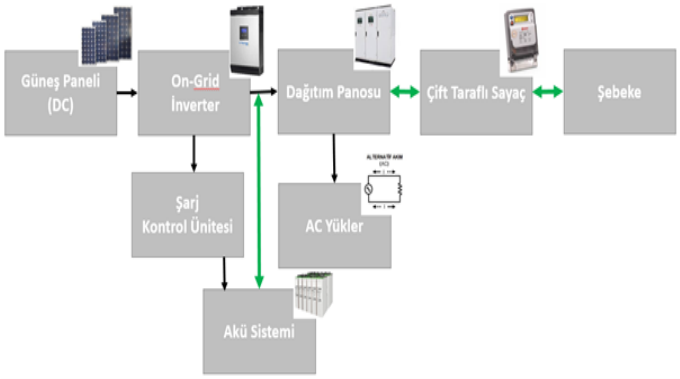
Şekil 2. PV yapı.

2.1. PV Enerji Sitemleri

Elektrik şebekesine bağlanma durumu ve kullanım amacına göre çeşitli kategorilere ayrılmaktadır. Genel olarak ise şebekeye bağlı (on-grid), şebekeden bağımsız (off-grid) sitemler kullanılmaktadır.

2.1.1. Şebekeye bağlı (On-grid) sistemler

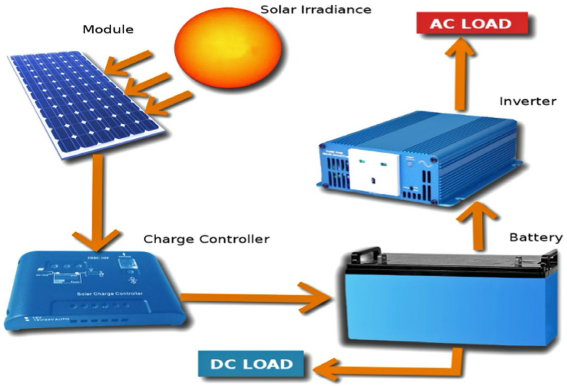
Bir fotovoltaik (PV) sistemin bir güç çevirici ünitesi aracılığıyla elektrik şebekesine bağlanması, güneş panellerinin veya dizilerinin güç şebekesi ile birlikte çalışmasını sağlar. Bu özellik, şebekeye bağlı bir PV sisteminin tanımlayıcı bir özelliğidir. PV güneş panellerinin veya dizilerinin, genellikle şebekeye bağlı PV sistemi olarak bilinen yerel ana güç şebekesine entegrasyonu, elektrik gücünün şebekeye geri beslenmesine olanak tanır. Bu tür güneş enerjisi sistemlerine genellikle "şebeke bağlantılı" veya "şebeke üstü" adı verilir [26]. On-grid sistemde yer alan ekipmanlara ait görsel Şekil 3'te verilmiştir [27].



Şekil 3. Şebekeye bağlı pv sistem diyagramı (On-grid).

2.1.2. Şebekeden bağımsız (Off-Grid) Sistemler

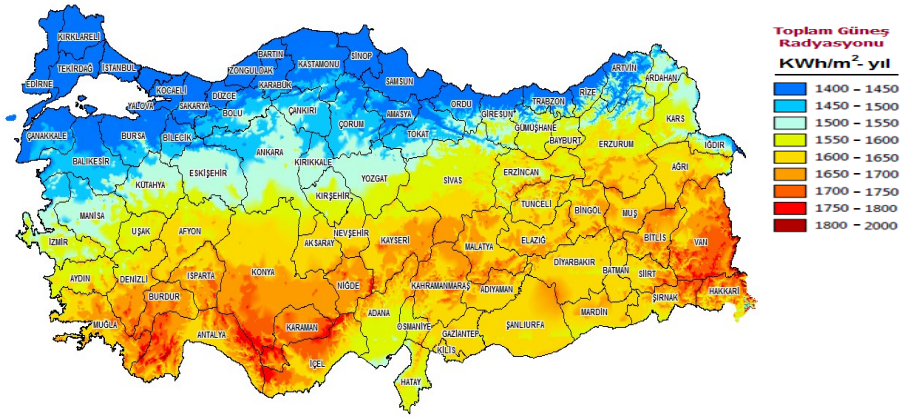
Elektrik şebekenin bulunmadığı dağ evi, bağ evi, ulaşım araçları (karavan, yat), çiftliklerde şebekeden bağımsız sistemler (off-grid) kullanılmaktadır. Off-grid PV sisteminin ana bileşenleri arasında PV dizisi, maksimum güç noktası takibi (MPPT), şarj kontrol cihazı, akü yedeklemesi ve invertör bulunmaktadır. PV sisteminin çalışması, güneş ışınımının eğimli PV paneller üzerine çarpmasıyla başlar; paneller bu ışınımı elektrik enerjisine dönüştürür ve akımı veya voltajı ayarlamak için MPPT'ye iletir [28]. Panellerden üretilen enerjinin tüketilen enerji miktarından fazla olması durumunda yedek enerji kaynağı olarak piller kullanılabilir. Pillerde veya akülerde depolanan enerji iklim şartlarının elektrik üretimine uygun olmadığı (ışınım miktarının az veya hiç olamadığı) sürelerde ve gece boyunca kullanılabilir. Ev aletlerinin çalışabilmesini sağlamak amacıyla doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) dönüştürülmesi için DC/AC invertör kullanılmaktadır. Off-grid sisteme ait çalışma diyagramı Şekil 4'te gösterilmiştir [28].



Şekil 4. Şebekeden bağımsız bir pv sisteminin yerleşimi (Off-Grid).

2.2. Türkiye'nin Güneşlenme Potansiyeli

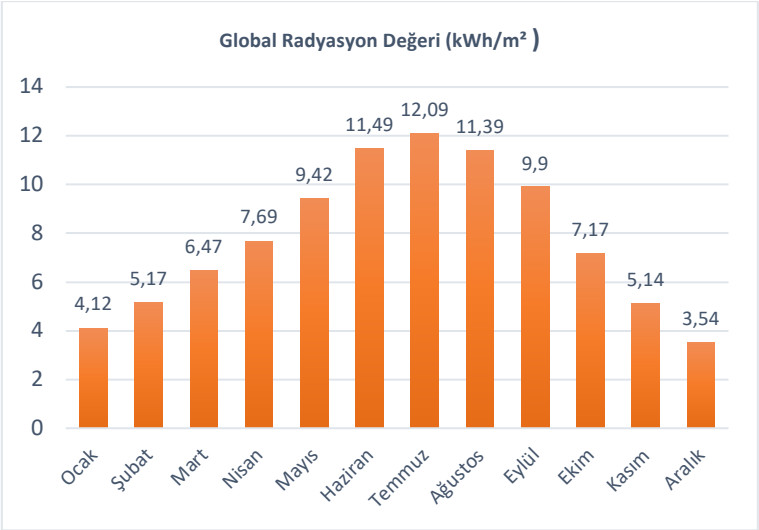
Türkiye coğrafi konum olarak 783562 km² yüzey ölçüm alanına sahip Kuzey Yarım Kürede 36°-42° kuzey paralelleri, 26°-45° doğu boylamları arasında yer almaktadır [29]. Türkiye'de ılıman iklim kuşağı görülmekte ve yıllık ortalama güneş ışınım enerji potansiyeli açısından coğrafi olarak iyi bir konumda yer almaktadır. Türkiye'nin Güneş' ten faydalana bilirlik durumunu gösteren Güneş Enerji Potansiyel Atlası (GEPA) verilerine ait görseller Tablo 1 ve Tablo 2'de yer almakta, Türkiye'ye ait güneşlenme potansiyel haritası ise Şekil 5'te belirtilmiştir [3].



Şekil 5. Türkiye güneşlenme potansiyel atlası (Gepa).

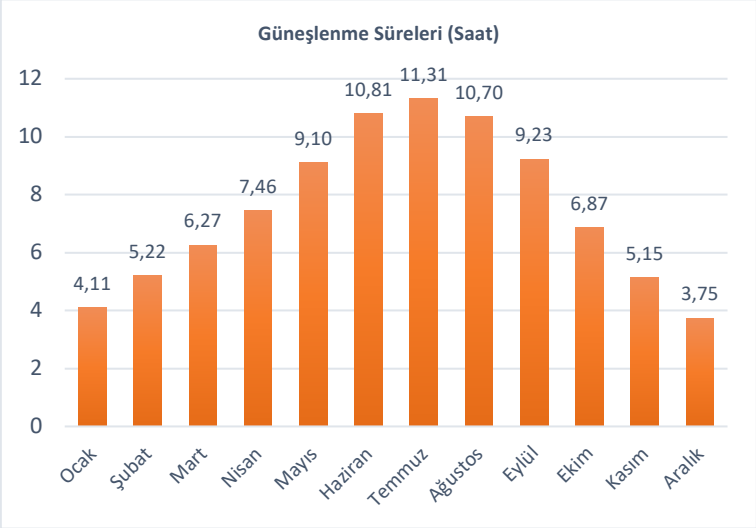
Şekil 5'te Türkiye'nin güneş ışınlarından en yüksek fayda görebileceği koordinatlar açık ve koyu renk tonlarıyla belirtilmiştir. Renk ton değişimleri toplam güneş radyasyon değerlerine göre yapılmakta olup bu değerlere göre en fazla güneş enerjisi potansiyeline Güneydoğu Anadolu Bölgesi sahipken en düşük enerji potansiyeline sahip bölgemiz ise Karadeniz Bölgesi'dir.

Türkiye'nin coğrafi konumu nedeniyle yüksek miktarda güneş enerjisi imkânı vardır. Şekil 6'da GEPA veri grafikleri incelendiğinde global radyasyon değerinin Haziran ayı ortalama günlük 6,57 kWh/m² ile maksimum, Aralık ayı ortalama günlük 3,75 kWh/m² değeri ile minimum olduğu görülmektedir. GEPA verilerine göre Türkiye'nin aylık ortalama günlük ışınım şiddeti 4,18 kWh/m² ve ortalama yıllık global radyasyon değerinin ise 1524,18 kWh/m² olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Türkiye global radyasyon değerleri (kWh/m²).

Şekil 7'de ki GEPA veri grafikleri incelendiğinde Temmuz ayı günlük 11,31 saatlik güneşlenme zaman değeri ile maksimum, günlük 3,75 saatlik güneşlenme zaman değeri ile minimum olduğu görülmektedir. Türkiye'nin aylık güneşlenme süre ortalaması günlük 7,5 saat, yılık ise 2737,5 saattir [30].

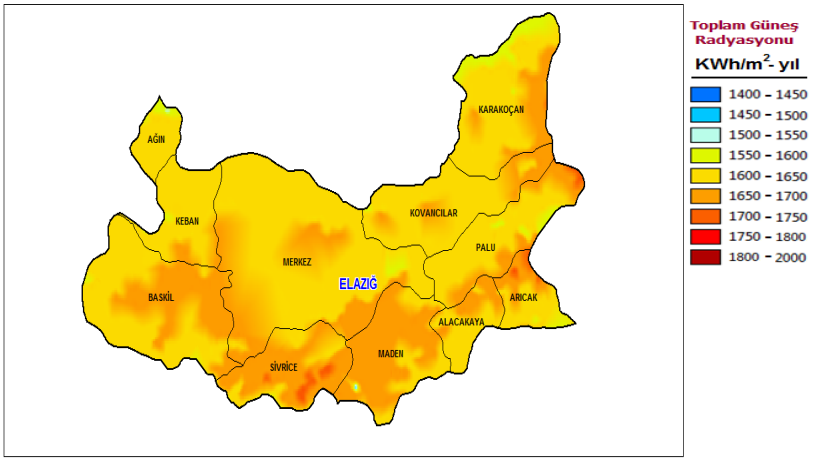


Şekil 7. Türkiye güneşlenme süreleri (saat).

Bu nicelikler ışığında ülkemiz yenilenebilir enerji kaynağı güneşten yararlanma noktasında güneşlenme süresi ve global radyasyon değerleri açısından önemli bir potansiyel güce sahiptir [25].

2.3. Elazığ'ın Güneşlenme Potansiyeli

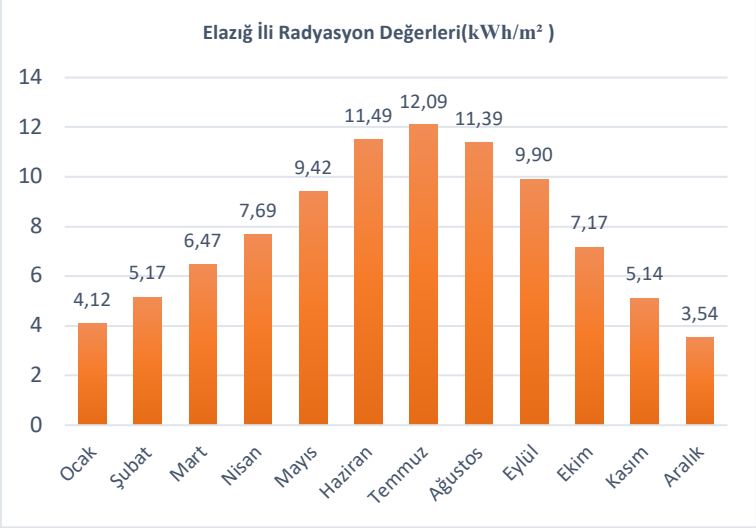
Elazığ ili Doğu Anadolu Bölgesi'nin güneybatısında, Yukarı Fırat Bölümü'nde yer almaktadır. Yüzölçümü 9151 km^2 olup bu alanı ile Türkiye toprak alanının %1,2'sini oluşturmaktadır. Elazığ ili 40º 21-38º 30 doğu boylamı, 38º 17 - 39º 11 kuzey enlem coğrafi koordinatları arasında yer almaktadır. Elazığ'da karasal iklim görülmekte ve bir alanın güneşten aldığı enerji miktarı o yerin enlem değerlerine göre değişmektedir. Elazığ, bulunduğu enlem değerlerine göre güneş ışınları, 21 Haziran tarihinde 74° 13' ve 21 Aralık tarihinde ise 27° 17' olarak yüzeyine ulaşmaktadır. Şekil 5'te gösterilen global radyasyon değerlerinin Haziran ayında en üst seviyeye ulaşması, Aralık ayında ise en alt seviyeye düşmesinde geliş açıları önemlidir [32]. Elazığ'ın Güneş ışınım haritası Şekil 8'de verilmektedir [3].



Şekil 8. Elazığ ili güneşlenme potansiyel atlası.

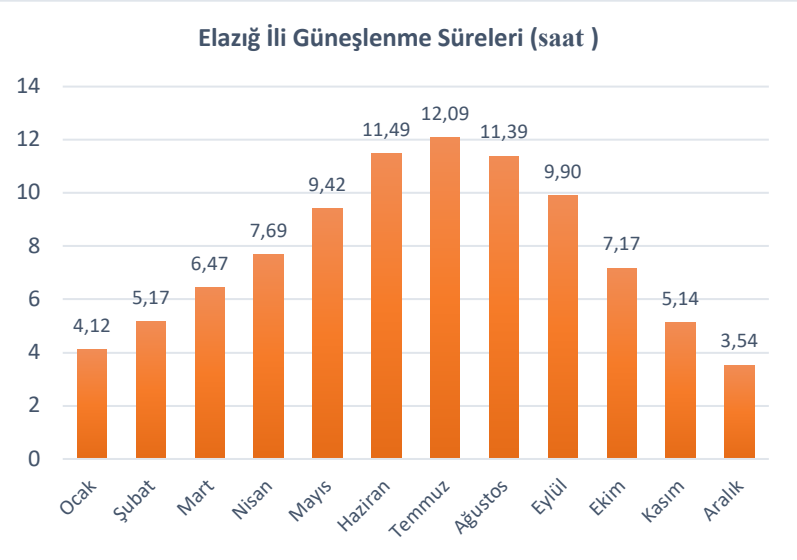
Elazığ'ın güneş radyasyon verileri, bulunulan yere ve konuma göre yıllık 1600-1700 kWh/m^2 güneş ışınım potansiyeline sahip olduğu Şekil 8'de belirtilmiştir.

Elazığ coğrafi konumu itibariyle güneş enerjisinden yüksek miktarda yararlanma imkânına sahiptir. Şekil 9'da GEPA veri grafikleri incelendiği zaman Haziran ayı ortalama günlük 6,84 kWh/m² global radyasyon değeri ile maksimum, Aralık ayı ortalama günlük 1,71 kWh/m² global radyasyon değeri ile minimum olduğu görülmektedir. GEPA verilerine göre Elazığ ilinin aylık ortalama günlük ışınım şiddeti 4,35 kWh/m² ve ortalama yıllık global radyasyon değerini ise 1564 kWh/m² olarak görülmektedir. Bu veriler doğrultusunda Elazığ iline ait verilerin Türkiye'nin ortalamasının üstünde veri değerlerine sahip olması Elazığ bölgesinin enerji potansiyeli açısından önemli bir konumda yer aldığını bize göstermektedir.



Şekil 9. Türkiye global radyasyon değerleri (kWh/m²).

Şekil 10'da Elâzığ iline ait GEPA veri grafikleri incelendiğinde Temmuz ayı günlük 12,01 saatlik güneşlenme zaman değeri ile maksimum, Aralık ayı günlük 3,56 saatlik güneşlenme zaman değeri ile minimum olduğu görülmektedir. Elâzığ'ın ortalama güneşlenme süresi günlük 7,75 saat, yıllık ise 2828,8 saat (365x7,75) değerleriyle Türkiye ortalama güneşlenme sürelerinin üzerinde yer almaktadır.



Şekil 10. Türkiye güneşlenme süreleri (saat).

3. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma kapsamında Elazığ ili sınırları içerisinde Küçük Sanayi Bölgesinde 38°37’ 32" kuzey enlemi ve 39° 16’35" doğu boylamı koordinatlarında bulunan şebekeye bağlı 89,9 kW güç değerine sahip kurulumu bir yıl önce tamamlanmış çatı üstü güneş enerji santralinin üretim değerleri incelenecektir. Çatı üstü GES işletmenin günlük elektrik tüketim ihtiyacını karşılamak amacıyla kurulmuştur. Güneş enerji santralinin kurulumunda 165 adet 545 Wp gücünde 144 hücreli monokristal paneller, 2 adet 50 kW ABB marka invertör, 11 adet MPTT (1. Panel (6 adet) + 2. Panel (5 adet)) kullanılmıştır. GES kurulumunun yapıldığı işletmenin görseli ile kullanılan monokristal panel, invertöre ait teknik özellikler Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13 ve Tablo 1 ve Tablo 2’de gösterilmiştir.



Şekil 11. Çatı üstü güneş enerji santrali.



Şekil 12. Monokristal güneş paneli (545 Wp).



Şekil 13. İnvertör (50 kW).

Tablo 1. PV panel teknik özellikleri.

Maksimum Güç (Pmax)	545 Wp
Modül Verimi (%)	21,09
Maksimum Güç Noktası Akımı (Impp)	13,04 A
Kısa Devre Akımı (Isc)	13,93 A
Maksimum Güç Noktası Voltajı (Vmpp)	41,8 V
Açık Devre Voltajı (Voc)	49,75 V
Maksimum Sistem Voltajı DC	1500 V
Çalışma Sıcaklığı Aralığı -40 / +85 °C	(%/°C) -0,45 %/ °
Modül Boyutları	2,279 mm. ± 2 mm. 1,134 mm. ± 2 mm. x 35± 1 mm.
Nominal Hücre Çalışma Sıcaklığı	45 °C ± 2 °C
Sıcaklık Katsayısı αIsc (%/°C)	0,045 %/ °C
Sıcaklık Katsayısı βVoc (%/°C)	-0,275 %/ °C
Sıcaklık Katsayısı ϒPmax (%/°C)	-0,350 %/ °C

Tablo 2. İnverter teknik özellikleri.

V_{dc} (Çalışma aralığı)	300-950 V
$V_{dc\ MPP}$ (MPP gerilim aralığı)	480-800 V
$V_{dc\ max}$ (Maksimum gerilim)	1000 V
$I_{dc\ max}$ (Maksimum DC akım değeri)	108 A
$I_{sc\ max}$ (Maksimum kısa devre akımı)	165 A
$P_{acr\ (cos\theta=1)}$	50000 W
$P_{acr\ (cos\theta=\pm\ 0.9)}$	45000 W
$P_{ac\ max\ (cos\theta=\pm\ 0.9)}$	55000 W
Frekans	50-60 Hz

3.1. PV*SOL Simülasyon Programı İle Tesisin Veri Analizi

Elazığ ilinde Yeni Küçük Sanayi bölgesinde bulunan işletmeye ait makinaların ihtiyaç duyduğu elektrik tüketimini karşılamak amacıyla yapılmış on-grid çatı üstü güneş enerji santralinin fizibilite çalışması PV*SOL simülasyon programı kullanılarak yapılmıştır.

PV*SOL programında sistem analizi yapılırken makine öğrenme analizi, zaman serisi analizi ve regresyon analizi gibi metotlar kullanılmaktadır. PV*SOL programını kullanırken, tasarlanan sistemi yazılıma entegre edebilmek için önemli parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sayede işletmeye kurulacak güneş enerji sisteminin elektriksel ve mekanik bileşenlerinin kapsamlı bir şekilde simülasyonunu gerçekleştirmemizi sağlar [33]. Dünya genelinde son yıllarda PV enerji sistem verimlerini maksimum seviyeye çıkaracak şekilde tasarlamak ve kurulumunu gerçekleştirmek için teknik personeller PV*SOL yazılımını yoğun bir şekilde kullanmaktadır [34].

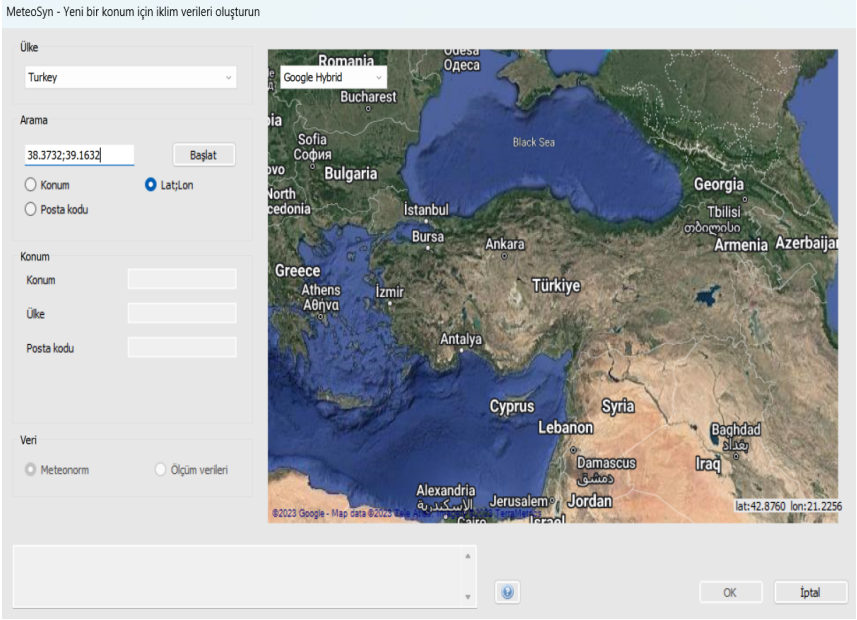
PV sistemlerinde bazı temel ölçütler performans, maliyet tahminleri ve projenin uygun yüklenici gereksinimleriyle teslim edilmesi önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, fotovoltaik sistem analizi gerçekleştirmek için incelenen ana ölçütler olarak verim (Y_f) ve performans oranı (Pr) verilebilir. Y_f, PV invertörünün çıkışında üretilen enerji (E_D) ile PV sisteminin nominal gücü arasındaki oranı ifade etmektedir ve bu oran Denklem 1'de gösterilmiştir [35]. Elde edilen verim değeri, ideal koşullar (STC) altında bir sistemin, belirli bir dönemde belirli bir ideal olmayan koşula maruz kalan bir sistemle aynı miktarda enerji üretmesinin ne kadar süreceğini belirlemek açısından önem taşımaktadır. Çalışmalarda ve simülasyon yazılımlarında ise bu süre genellikle bir yıl veya bir ay olarak kabul edilmektedir.

$$Y_f = \frac{E_D(\text{kWh})}{\text{Installed power (kWp)}} \quad (1)$$

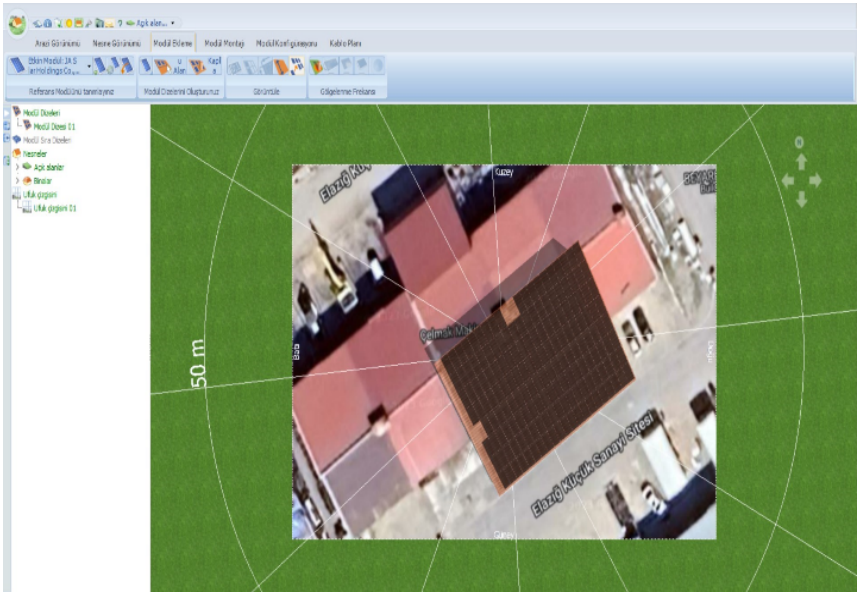
Performans oranı (P_r) sistemi ilgilendiren kayıpları hesaba katan bir faktördür ve kısa sürede genel verimi gösterir. Bir başka ifadeyle gerçekleşen üretimin hesaplanan (beklenen) üretime oranı olup 2 nolu denklem ile ifade edilmiştir [36].

$$P_r = \frac{\text{Gerçekleşen Üretim (kWh)}}{\text{Beklenen Üretim (kWh)}} \quad (2)$$

PV*SOL programı kullanılarak on-grid çatı üstü GES sisteminin akü, pil kullanımı olmadan ortalama aylık ve günlük enerji üretim verileri elde edilmiştir. PV*SOL yazılım programının ilk aşaması olarak Google Earth programından tesisin coğrafi koordinatları olan 38° 37'32'' ve 39° 16'32'' girilerek iklim değerleri simülasyona entegre edilmiştir (Şekil 14). PV*SOL programı iklim veri tasarımı yaparken, MeteoSyn iklim veritabanı (1991-2010) olan güneşlenme verilerinden yararlanmaktadır. İkinci aşama olarak Google Earth programından tesisin birebir boyut ölçümü 17*18 m, binanın çatı eğimi 14° ve bina yönü güney doğu, panelin yerleşim açısı 153°, panel eğimi 12° ve panellerin montajı çatıya paralel olacak şekilde yerleşim planı yapılarak tesisin üç boyutlu (3D) modeli tasarlanmıştır (Şekil 15).

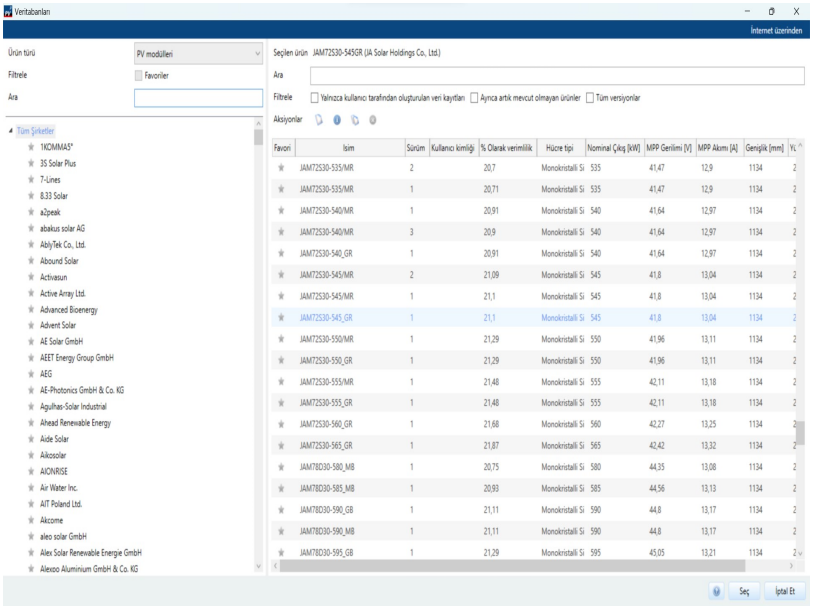


Şekil 14. Meteorolojik veri elde edilişi.

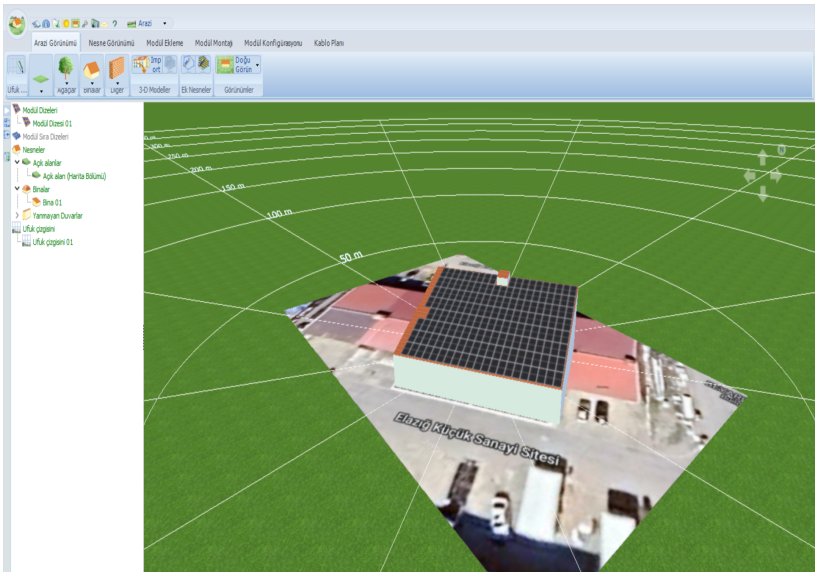


Şekil 15. Binanın konumlandırılması.

Bu, tüm paneller optimum şekilde çalıştığında 89,9 kW birleşik elektrik gücü üretebilecekleri anlamına gelir. Güç çıkışı, kurulumun ideal koşullar altında, örneğin güneş parlak bir şekilde parladığı durumlarda üretebileceği elektrik miktarının bir ölçüsüdür. Güç çıkışının, kurulumun maksimum potansiyel kapasitesi olduğunu ve üretilen gerçek elektriğin güneş ışığı miktarı, gölgeleme ve panellerin verimliliği gibi faktörlere bağlı olarak değişebileceğini unutmamak önemlidir. Bu sebeple üçüncü aşama olarak verimlilik kayıpları, gölgeleme etkisi, kablo kayıpları ve iklim koşulları PV*SOL programına girilmiştir. Son aşama olarak sahada kullanılan panel, invertör markası ve sayısı ile ve invertör-MPTT dizisinin şekli simülasyon program kayıtlarından seçilmiştir. Şekil 16'da 545 Wp gücüne sahip monokristal panel seçiminin yapıldığı ekran ara yüzü ile Şekil 17'de panellerin yönünün belirlenerek çatı üstüne montajının yapılmış olduğu ekran ara yüzü gösterilmiştir.



Şekil 16. Monokristal panel seçimi.

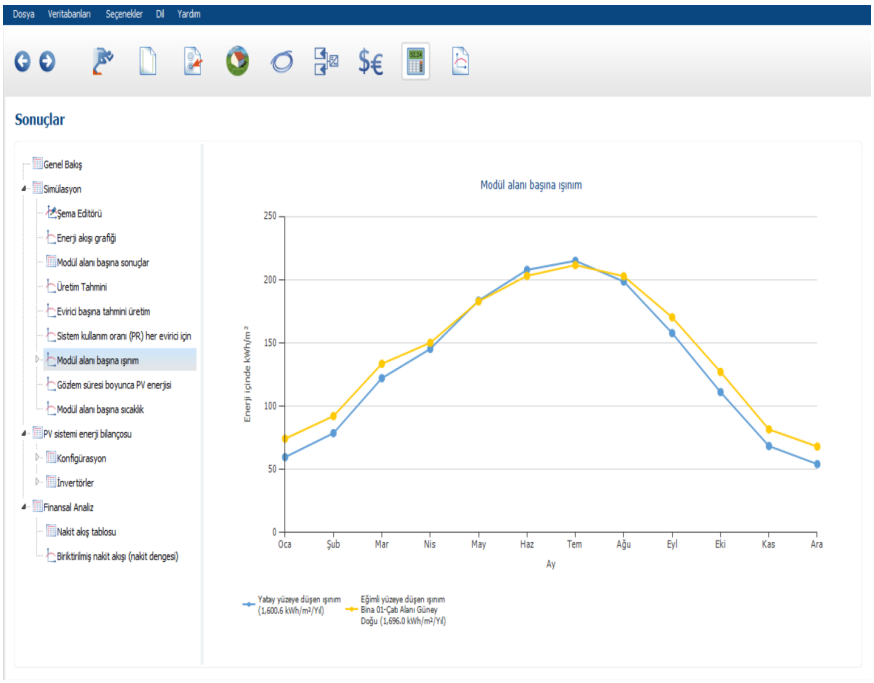


Şekil 17. Monokristal panel yönü ve yerleşimi.

Sonuç olarak bu kullanılan benzetim programı sayesinde GES'nin ekonomik analizi, kablolama, amortisman maliyeti, sistem girdi verileri elde edilmiş ve neticesinde sistemin performans tahmin analizi gerçekleştirilmiştir.

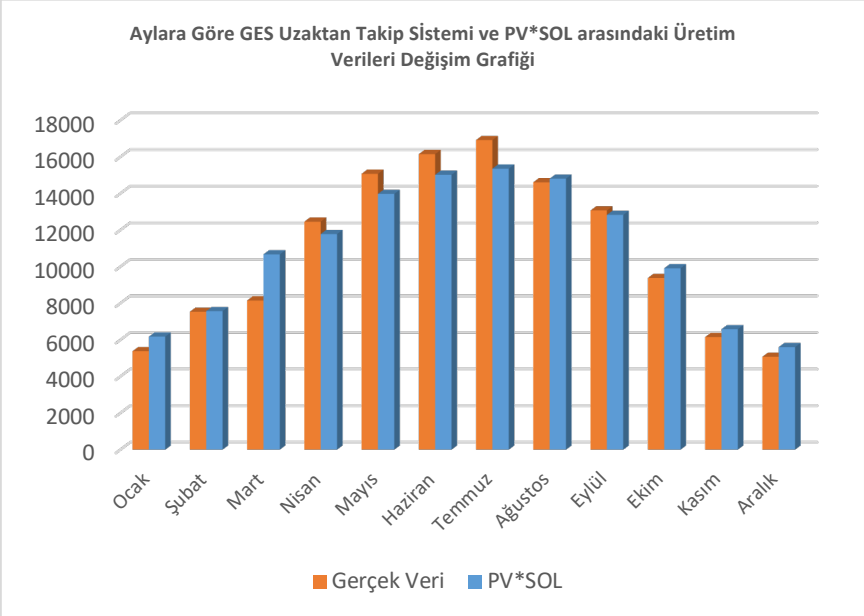
4. Bulgular ve Tartışma

Yapılan çalışma ile şebekeye bağlı çatı üstü GES sisteminin PV*SOL simülasyonu sayesinde tasarım aşamasından raporlama aşamasına kadar santralin verimliliği üzerine temel bir yaklaşım elde edilmiştir. Elazığ ilinde küçük sanayi bölgesinde on-grid sistemde kullanılan monokristal paneller üzerine gelen yıllık toplam ışınım miktarı 1696 kWh/m^2/yıl, yüzeye düşen ışınım miktarı ise 1600,6 kWh/m^2/yıldır (Şekil 18).



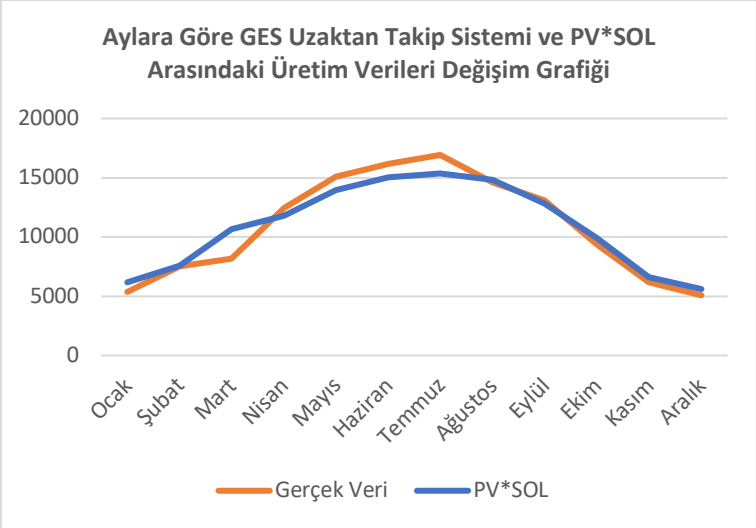
Şekil 18. Yüzeye ve panel üzerine gelen ışınım miktarı.

PV*SOL programı ile GES'nin aylara göre belirlenmiş yıllık üretim tahmini 130326 kWh/yıldır (Şekil 19). Şekil 19 incelendiğinde aylık olarak en az üretim değeri 5607,3 kWh/aylık ile Aralık ayına ait olduğu görülürken, en fazla üretim değeri ise 15359,17 kWh/ay ile Temmuz ayını göstermektedir. Bunun sebebi aylara göre panellerin güneşlenme süresi ve paneller üzerine güneş geliş açısının değişmesidir.



Şekil 19. GES Uzaktan takip sistemi ile pv*sol üretim değerlerinin aylık karşılaştırılması.

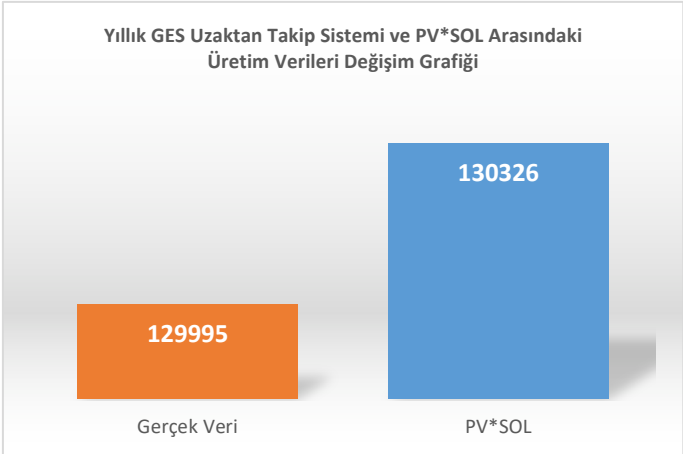
Tesise ait GES uzaktan takip sisteminden alınan gerçek yıllık enerji üretim verisi 129995 kWh/yıldır. Şekil 20 incelendiğinde en fazla üretimin Temmuz ayında, en az üretimin ise Aralık ayında olduğu görülmüştür.



Şekil 20. GES uzaktan takip sistemi ile pv*sol üretim değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 19 ve Şekil 20 incelendiğinde gerçek üretim aylık değerlerinin güneş ışınımın ve güneşlenme sürelerinin fazla olduğu Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos aylarında PV*SOL programına göre yüksek olduğu, güneşlenme süresinin ve güneşlenme zamanının daha az olduğu Ekim, Kasım, Aralık, Ocak, Şubat, Mart aylarında ise PV*SOL tahmin değerlerinin gerçek üretim değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir.

PV*SOL ile gerçek üretim değerleri arasındaki aylık farkların yıllık üretim olarak birbirini dengeleyerek yıllık toplamda birbirine yakın değer sonuçlarının elde edildiği Şekil 21'de gösterilmiştir.



Şekil 21. GES uzaktan takip sistemi ile pv*sol üretim değerlerinin yıllık karşılaştırılması.

5. Sonuçlar

Bu çalışma ile Elazığ ili Yeni Küçük Sanayi Sitesi bölgesinde bulunan Çelmak Ltd. Şti. işletmesinde bulunan makine-teçhizat elektrik tüketim değerlerini karşılamak amacıyla yapılmış 89,9 kWp kurulu güce sahip çatı üstü güneş enerji santralinin (on-grid) güneş enerji potansiyeli PV*SOL simülasyon programı ile 3D tasarımı yapılarak gerçek üretim verileriyle karşılaştırılmıştır. GES alanının kurulum yeri koordinatları, kullanılan her biri 545W gücünde toplam 165 adet monokristal fotovoltaik panel, 50 kW gücünde invertör seçimi yapılarak GES saha potansiyelinin elektrik enerjisine dönüştürülme verileri elde edilmiştir. PV*SOL ile yapılan simülasyon çalışma sonuçları ile saha uygulamasında GES uzaktan takip sisteminden alınan bir yıllık değerler karşılaştırılmıştır.

PV*SOL ile elde edilen bir yıllık üretim miktarları sırasıyla 130326 MW, GES uzaktan takip sistemi ile elde edilen ise 129995 MW'tır. Bu elde edilen veri sonuçları karşılaştırıldığında %99,7 benzerlik taşıdığı görülmektedir.

Çalışmamızda kıyaslama yapılan güneş enerji santralinin yönü güneydoğu olup tek cephelidir. Mevcut uygulamalar arasında iki yönlü çatı uygulamaları, güneş takip sistemi montajı yapılan santraller, iklim koşullarının anlık değişimlerinin görüldüğü yerleşim yerlerinden uzakta bulunan güneş enerji santralleri (off-grid) yer almaktadır. PV*SOL gibi simülasyon programlarıyla mevcut güneş enerji santralleri üzerinde fizibilite çalışmaları yapılmalıdır. Böylece GES teorik ve saha uygulamalarının benzeşim oranını en üst seviyeye çıkmasını sağlayabilecek bu veriler enerji sektöründe yer alan firmalara ve yatırımcılara yol gösterme hususunda yardımcı olacaktır. On-grid sistem örneğimizde benzeşim oran hatası %0,03 olurken, Balkan ve Görel'in [21] yapmış olduğu off-grid sistem örneğinde bu oran %3,309798'dir. Bu da on-grid ve off-grid sistemlerinde benzeşim programının en doğru sonucu verebilmesi için PV-SOL programlarının geliştirilmeye ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Bununla birlikte uygulama örneğimizde amortisman yılı 9,5 yıl olarak görülmektedir. Organize Sanayi bölgelerinde yer alan büyük elektrik tüketimine sahip işletmelerin GES sistemi kurarak 5-7 senelik amortisman maliyet süresinden sonra elektrik fatura ödemelerinin azaltılarak yatırım maliyetini geri kazanmanın yanında panel üreticileri tarafından öngörülen 25 yıl boyunca karbon salınım miktarını azaltma yönünde etki yapacağı bilinmektedir. Simülasyon ile saha değerleri arasındaki amortisman süresindeki farkın PV*SOL yazılımı mevcut kayıtlarındaki elektrik fiyat endeksinin gerçek değerleriyle uyuşmamasından ötürü olduğu düşünülmektedir.

On-grid ve off-grid güneş enerjisi santrallerinin yaygınlaşması, yurt içi mevcut şebeke ağında oluşan elektrik yük miktarını azaltarak enterkonnekte elektrik ağına pozitif etki sağlayacaktır. Güneş enerji santrallerinde bu pozitif etkiden en üst düzeyde faydalanmak için PV*SOL gibi simülasyon programları kullanılmalıdır. Böylelikle GES sistemlerinde kullanılan ekipmanların türü, sayısı, panellerin konumlandırılması gibi etkenlerin kısa bir zaman aralığında doğru bir şekilde tasarımının yapılması sistem verim değerlerini maksimum noktaya getirilmesine katkı sunacaktır.

Kaynaklar

[1] https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf/Erişim 27.11.2023.

[2] https://odsdanismanlik.com/tr/gunes-enerjisi-tesvik-belgesi-danismanligi/ Erişim 28.11.2023.

[3] https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/ Erişim 29.11.2023.

[4] Kumruoğlu LC, Ateş SB. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli ve iskenderun için örnek üretim projeksiyonu. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi 2022; 37(1): 293-305.

[5] Abdullah AZ, Amlus MH, Azizan N, Sali IM, Rahim MH. Performance Analysis of Different Type PV Module for 3 kW Residential Roof Top PV System using PVSyst Simulation tool. J Phys : Conf Ser 2022; 2312(1): 012042.

[6] Wang X, Tian X, Chen X, Ren L, Geng C. A review of end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology. Sol Energy Mater Sol Cells 2022; 248, 111976.

[7] Dewi RG, Siagian UWR, Asmara B, Anggraini SD, Ichihara J, Kobashi T. Equitable, affordable, and deep decarbonization pathways for low-latitude developing cities by rooftop photovoltaics integrated with electric vehicles. Appl Energy 2023; 332, 120507.

[8] Hariri MMH, Desa MMK, Masri S, Zainuri MAA. Grid-connected PV generation system—Components and challenges: A review. Energies 2020; 13(17), 4279.

[9] Karthikeyan V, Rajasekar S, Das V, Karuppanan P, Singh AK. Grid-connected and off-grid solar photovoltaic system. Smart Energy Grid Design for Island Countries: Challenges and Opportunities 2017; 125-157.

[10] Akkas OP, Erten MY, Cam E, Inanc N. Optimal site selection for a solar power plant in the Central Anatolian Region of Turkey. Int J Photoenergy 2017; 1, 7452715.

[11] https:///tr.dsisolar.com/info/7-most-popular-solar-pv-system-design-and-simu-34957124.html/ Erişim 30.11.2023.

[12] Özcan Ö, İzgi E. Şebekeye bağlı fotovoltaik çatı sisteminin karşılaştırmalı performans analizi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2020; 23(3): 127-140.

[13] Sharma R, Gidwani L. Grid connected solar PV system design and calculation by using PV* SOL premium simulation tool for campus hostels of RTU Kota. In 2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 20-21 April 2017, Kollam, India.

[14] Kumar R, Rajoria CS, Sharma A, Suhag S. Design and simulation of standalone solar PV system using PVsyst Software: A case study. Mater Today Proc 2021; 46: 5322-5328.

[15] Serat Z, Fatemi SAZ, Shirzad S. Design and Economic Analysis of On-Grid Solar Rooftop PV System Using PVsyst Software. Arch Adv Eng Sci 2023; 1(1): 63-76.

[16] Arafat NM, Dwivedi VK. Desıgn And Sımulatıon Of Grıd Connected 100 kW Solar Power System By UsıngPvsyst. Int Res J Modernization Eng Technol Sci 2023; 5(8): 2582-5208.

[17] Dondariya C, Porwal D, Awasthi A, Shukla AK, Sudhakar K, Manohar SR, Bhimte A. Performance simulation of grid-connected rooftop solar PV system for small households: A case study of Ujjain, India. Energy Rep 2018; 4: 546-553.
[18] Ateş AM. Years energetic and economic analysis of a 30kWp rooftop PV power plant. Mühendis ve Makine 2023; 64(710): 175-194.
[19] Çiçek A, Erdinç O. PV-batarya hibrit sistemi içeren elektrikli araç otoparkının şarj yönetimi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2019; 15: 466-474.
[20] Ay E, Pamuk N. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Farabi Yerleşkesindeki Elektrik Enerjisi İhtiyacının Güneş Enerjisi Santralleri Kurularak Elde Edilmesi ve Ekonomik Analizi. Black Sea J Eng Sci 2023; 6(3): 173-184.
[21] Balkan A, Görel G. Güneş enerji santrallerinde PV*SOL yazılımının güvenilirliğinin değerlendirilmesi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2024; 14(3): 949-957.
[22] Martin K. Elbistan Meslek Yüksekokulu Çatı Üstü Güneş Enerjisi Santrali Kurulum Simülasyonu: Performans Analizi. KİÜ Fen, Mühendislik ve Teknoloji Dergisi 2024; 1(1): 33-42.
[23] Biberci MA. Techno-economic analysis of a solar-powered agricultural irrigation system using PV*Sol software A case study in Konya. Int J Agric Environ Food Sci 2023; 7(1): 156-162.
[24] Erge T, Sick F. Photovoltaics in buildings: a design handbook for architects and engineers. Routledge, 2014.
[25] Al-Ezzi AS, Ansari MNM. Photovoltaic solar cells: a review. Appl Syst Innov 2022; 5(4): 67.
[26] Öztürk HH. Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler". TMMOB EMO, Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, 18–21 Ekim 2017, İzmir, Türkiye.
[27] https://www.frmenergy.com/GES/3/On_Grid_Depolamali_Solar_Sistemler/ Erişim 01.12.2023.
[28] Ghafoor A, Munir A. Design and economics analysis of an off-grid PV system for house hold electrification. Renew Sustain Energy Rev 2015; 42: 496-502.
[29] Kaynar NK. Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisinin Amasya ilindeki potansiyeli. Bilge Int J Sci Technol Res 2020; 4(2): 48-54.
[30] Ceylan O, Taşdelen K. Isparta ili için fotovoltaik programlarının simülasyon sonuçlarının doğruluğunun incelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 18(3): 895-903.
[31] Varlı H, Tuna M, Tombul M. Bölgesel Güneş Enerji Potansiyeli ve Enerji Santrali Yatırımı Değerlemesi: Sincan Örneği. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2022; 34(2): 657-666.
[32] Atasoy A, Çitçi DM. Değişen iklim koşullarının Elâzığ ovası ile yakın çevresinin ekosistemine etkileri. Doğu Coğrafya Dergisi 2011; 14(21): 33-52.
[33] Biberci MA. Techno-economic analysis of a solar-powered agricultural irrigation system using PV* Sol software: A case study in Konya. J Agric Environ Food Sci 2023; 7(1): 156-162.
[34] Bocullo V, Martišauskas L, Pupeikis D, Gatautis R, Venčaitis R, Bakas R. UAV photogrammetry application for determining the influence of shading on solar photovoltaic array energy efficiency. Energies 2023; 16(3): 1292.
[35] De Souza Silva JL, Costa TS, de Melo KB, Sakô EY, Moreira HS, Villalva MG. A comparative performance of PV power simulation software with an installed PV plant." 2020 IEEE international conference on industrial technology (ICIT). 26-28 February 2020, Buenos Aires, Argentina.
[36] Deniz Ö. Öğrenci Eğitimi Bağlamında Çatı Üstü PV Sistemlerinin Simülasyon Tabanlı Görselleştirilmesi ve Analizi. Teknik Bilimler Dergisi 2024; 14(2): 11-18.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 199-209, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1530113

Hava Ön Isıtma ve Hava Hızının Havalı Güneş Kollektörünün Isıl Performansına Etkisi

Nergiz ÜLKER[1*], Hüsamettin BULUT[2]
[1,2] Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye
[*1] nergizulker@harran.edu.tr, [2] hbulut@harran.edu.tr

(Geliş/Received: 08/08/2024; Kabul/Accepted: 24/10/2024)

Öz: Günümüzde artan enerji fiyatları ve fosil yakıtların olumsuz etkileri, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisinin uygulamalarda verimli bir şekilde kullanılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, kurutma ve mahal ısıtması gibi uygulamalarda kullanılan havalı güneş kollektöründe, hava ön ısıtmasının farklı kütlesel hava debilerinde kollektör çıkış sıcaklığı ve ısıl verimi üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler üç farklı kütlesel hava debisinde (0,063, 0,127 ve 0,254 kg/s) ve günlerde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, hava ön ısıtmasının kütlesel hava debisine bağlı olarak havalı güneş kollektöründe sıcaklık farkını ve ısıl verimi etkilediğini göstermiştir. Düşük kütlesel hava debilerinde daha yüksek sıcaklık farkları elde edilirken, yüksek kütlesel hava debilerinde ısıl veriminin arttığı gözlemlenmiştir. En iyi ısıl performans olarak 0,127 kg/s kütlesel hava debisinde hava ön ısıtma ile dış hava sıcaklığına göre ortalama kollektör giriş sıcaklığı 5,1°C ve kollektör çıkış sıcaklığı 18,1°C artırılmış ve kollektör ısıl verimi %84 olarak hesaplanmıştır. Hava ön ısıtma uygulandığında, kollektörün giriş ve çıkış sıcaklık farkının, hava ön ısıtma olmadığı durumlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak hava ön ısıtmanın kollektör ısıl performansını artırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Ön ısıtma, hava hızı, güneş enerjisi, havalı güneş kollektörü, ısıl verim.

The Effect of Air Preheating and Air Velocity on Thermal Performance of Solar Air Collector

Abstract: Today, increasing energy prices and the negative effects of fossil fuels reveal that solar energy, should be used efficiently in applications. In this study, the effect of air preheating on the collector outlet temperature and thermal efficiency at different mass air flow rates in an air solar collector was experimentally investigated. The experiments were carried out at three different mass air flow rates (0.063, 0.127 ve 0.254 kg/s) and days. The results show that air preheating affects the temperature difference and thermal efficiency of the air solar collector depending on the mass air flow rate. While higher temperature differences were obtained at lower mass air flow rate, it was observed that the thermal efficiency increased at higher mass air flow rates. As the best thermal performance, with air preheating at a mass air flow rate of 0.127 kg/s, the average collector inlet temperature was increased by 5.1°C and the collector outlet temperature was increased by 18.1°C compared to the outside air temperature and the collector thermal efficiency was calculated as 84%. When air preheating is applied, the inlet and outlet temperature difference of the collector is higher than without air preheating. As a result, it was determined that air preheating improves the thermal performance of the collector.

Key words: Preheating, air velocity, solar energy, air solar collector, thermal efficiency.

1. Giriş

Dünyadaki enerji kaynaklarının çoğunluğunu oluşturan ve hızla azalan fosil yakıtlara karşı en umut verici ve ivme kazanan seçenek, yenilenebilir enerji kaynaklarıdır [1]. Güneş enerjisi, küresel enerji ihtiyacını çevreyi olumsuz etkilemeden karşılama konusunda geniş bir potansiyele sahip en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Güneş enerjisinin ısıl uygulamalarında en temel eleman güneş kollektörleri olup uygulama sıcaklıklarına göre dört kategoriye ayrılmaktadır: Düz plakalı kollektörler, vakumlu tüplü kollektörler, yoğunlaştırıcılı kollektörler ve hibrit kollektörler [2]. Havalı veya sıvılı güneş kollektörleri, ısıtma uygulamalarında kullanılmak üzere güneş enerjisini ısıl enerjiye dönüştürmede kullanılan en etkin ve yaygın cihazlardır. Havalı güneş kollektörleri sıcak hava üreterek, ısıl uygulamalarda fosil yakıt kullanımını azaltarak daha az CO_2 salınımı sağlamaktadır [3-5].

Havalı güneş kolektörlerinde yüzeye gelen güneş ışınımını ısı enerjisi formunda absorbe eden yutucu plaka ve enerjinin aktarıldığı proses havası önemli bileşenlerdir. Havalı güneş kollektörlerinde, havanın düşük termodinamik özelliklere sahip olması sebebiyle, sıvılı kollektörlere kıyasla ısıl verim düşük olmaktadır. Farklı malzemeden yapılmış yutucu plaka kullanılması, yutucu plakaya kanatçıklar eklenmesi veya hava akışının türbülanslı hale getirilmesi düşük ısıl verim probleminin çözümünde sıkça kullanılan yöntemlerdir [3]. Kanatçıklar

* Sorumlu yazar: nergizulker@harran.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1]0000-0002-6079-4792, [2]0000-0001-7123-1648

veya saptırma plakaları, havalı güneş kollektörlerinde yutucu plakadan proses havasına doğru olan ısı transferini artırmak amacıyla kullanılır [6]. Literatürde, düz plakalı havalı güneş kollektörleri üzerine yapılan birçok akademik çalışma, kollektör verimini artırmak amacıyla yutucu plaka yüzeylerinde değişiklikler yapma ile ilgilidir. Yutucu plaka ile hava akışı arasındaki ısı transferi, laminer alt tabakanın oluşması ile azalmaktadır. Kanatçıklı yapılar, laminer alt tabakayı bozarak termal direnci azaltır ve kanatçıklı yapılar türbülans etkisi yaratarak ısı transferini artırır [7]. Chabane ve ark. [8], düz plakalı havalı güneş kollektörüne 5 adet kanatçık ilave ederek kollektörün ısıl performansını deneysel olarak incelemiştir. İki farklı hava hızı için ısıl verimde ortalama %10'luk bir artış elde edilmiştir. Kumar ve Chald [9], balıksırtı şeklindeki oluklardan oluşan kanatçıklı yapıyı havalı güneş kollektörüne entegre ederek ısıl verim yaklaşık %20 oranında artırılmıştır. Sureandhar ve ark. [7], değişken kavisli ve oluklu kanatçık düzeninin havalı güneş kollektörünün çıkış sıcaklığı ve ısıl verimliliği üzerindeki etkisini incelemiştir. Kollektör giriş ve çıkış sıcaklıkları arasında ortalama 28°C sıcaklık farkı ortaya çıkmış ve yaklaşık %50 oranında ısıl verim elde edilmiştir.

Havalı güneş kollektörlerinin performansını artırmak için kullanılan yöntemlerden biri de absorber kanalındaki akış yolunun değiştirilmesidir. Bu yöntemle, akışkanın temas alanı artırılır ve böylece yutucu plaka ile temas eden hava arasındaki ısı transferi de artırılmış olur. Tek geçişli kolektörlerde, hava enerjisinin bir kısmını üst yüzeylerde kaybederek kolektörün ısıl verimini düşürmektedir. Bu sorun, çift geçişli akış kanalının tasarımıyla çözülmüştür. Çift geçişli akış ile, plakanın üzerindeki hava yutucu plakanın ısı kaybını önleyerek ısıl verimi artırmaktadır. Tyagi ve ark. [10], çift geçişli havalı güneş kollektöründe 0,014-0,042 kg/s arasında değişen kütlesel debiler için akış modelini deneysel olarak incelemiştir. Çift geçişli kolektör kullanımı ile %33,2 oranında ısıl verim elde edilmiştir. Ayrıca, hava hızının artırılmasıyla termal verimliliğin daha da artırılabileceği belirtilmiştir. Ferouali ve arkadaşları [11], düz plakalı, kanatçıklı ve V oluklu yutucu plakaya sahip tek geçişli ve ters akışlı çift geçişli havalı güneş kolektörlerinin termal performansını sayısal modelleme ile karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Ters akışlı çift geçişli kolektörde, V oluklu yutucu plaka ile düz plaka kullanılarak termal verimlilik sırasıyla %8,66 ve %1,27 oranında artırılmıştır. Kanatçık sayısının artırılmasıyla kolektör çıkış sıcaklığının yükseltilebileceği vurgulanmıştır. Koyuncu [12], mahsul kurutma uygulamaları için altı farklı tasarıma sahip havalı güneş kollektörlerinin ısıl performansını incelemiştir. Araştırmada, tek plastik camlı ve düz plakalı kollektörün, çift plastik camlı kollektöre göre %9 oranında daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, kollektör üretiminde yüksek verim elde edebilmesi için kollektörün tek kapaklı ve önden geçişli tipte olması gerektiği belirtilmiştir.

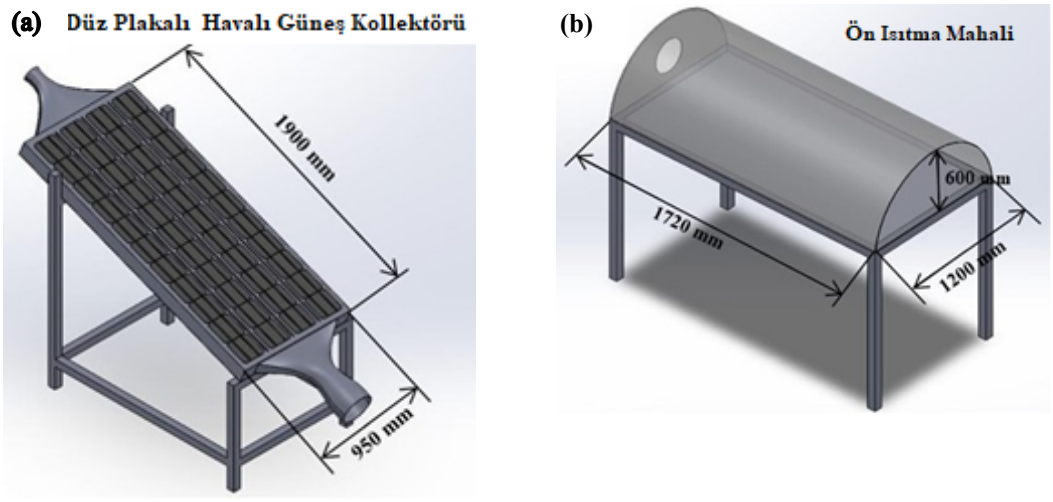
Düz plakalı havalı güneş kollektörleri, tarım ürünlerini kurutmak için uygun çalışma sıcaklığı olan 40 °C ile 70 °C aralığında sıcak hava üretebilmektedir. Düz plakalı kolektörlerin daha karmaşık yapıda olan yoğunlaştırmalı kolektörlere göre tekno-ekonomik açıdan daha uygun olması nedeniyle mahal ısıtma ve tarımsal mahsul kurutma gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Güneş enerjisi, günde ortalama 6-7 saat mevcut olduğundan, kollektörlerin güneş enerjisinden en iyi şekilde yararlanabilmesi için termal açıdan verimli olması gerekmektedir. Bu nedenle, kollektör tasarımlarının ve sistem uygulamalarının termal performansa yönelik olarak optimize edilerek artan enerji ihtiyacını karşılaması gerekmektedir [4, 12]. Doğan [13], kurutma uygulamalarında kullanılmak üzere yeni bir kollektör tasarlamıştır. Ön hava kurutmalı olarak tasarlanan kollektörde hava, kollektör girişinde evaporatörden geçirilerek nemi alınmıştır. Böylece nem oranı düşük ve sıcaklığı yüksek olan havanın kurutulacak olan ürünün nemini absorbe ederek daha kısa sürede kuruttuğu tespit edilmiştir. Çerçi ve Daş [14], yaptıkları çalışmada hava hızının ve ön ısıtmanın havalı güneş kolektörünün ısıl performansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Ön ısıtmanın kolektör verimini artırdığı, ancak artan hava hızının verimde düşüşe neden olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, özellikle düşük sıcaklık gerektiren uygulamalarda, hava ön ısıtmalı güneş kollektörlerinin enerji verimliliğini artırabileceğini göstermiştir. Alıç ve arkadaşları [15], gıda kurtumada kullanılan havalı güneş kollektörlerinin termal ve akış özelliklerini hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile sayısal olarak incelemiştir. Analizler üç farklı hava debisi için yapılmıştır. Böylece farklı kütlesel debi ve yutucu plaka boyutlarının kollektör verimi üzerinde yarattığı etki ortaya konmuştur. Alıç ve Daş [16], hava ısıtmalı güneş kollektörlü bir gıda kurutma sistemi tasarlayarak sistemde kurutulan elma ürünü için yaş/kuru nem içerikleri ve kuruma sürelerini incelemişlerdir. Çalışma sonunda, ürünün 420 dakikada kuruduğu belirlenmiş ve deneysel sonuçlar sayısal analiz sonuçları ile kıyaslanarak doğrulanmıştır.

Bu deneysel çalışmada, literatürde belirtilen ısıl performans artırma yöntemlerine alternatif olarak, daha basit ve ekonomik bir çözüm sunan bir sistem tasarlanmıştır. Sistemde doğal sera etkisinden yararlanılarak oluşturulan bir ön ısıtma mahallinin, kollektör çıkış havası sıcaklığına ve verimine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, sistem 10:30-17:00 saatleri arasında çalıştırılarak sıcaklık ve ışınım değerleri ölçülüp dataloggerda kaydedilmiştir. Böylece kollektörün, düşük sıcaklık uygulamaları için yeterli hava çıkış sıcaklığı sağlayarak enerji verimliliğini artırma potansiyeli değerlendirilmiştir. Bu sistemin karmaşık ve maliyetli yöntemlerin aksine, özellikle kurutma uygulamaları için uygun bir çözüm olacağı düşünülmektedir.

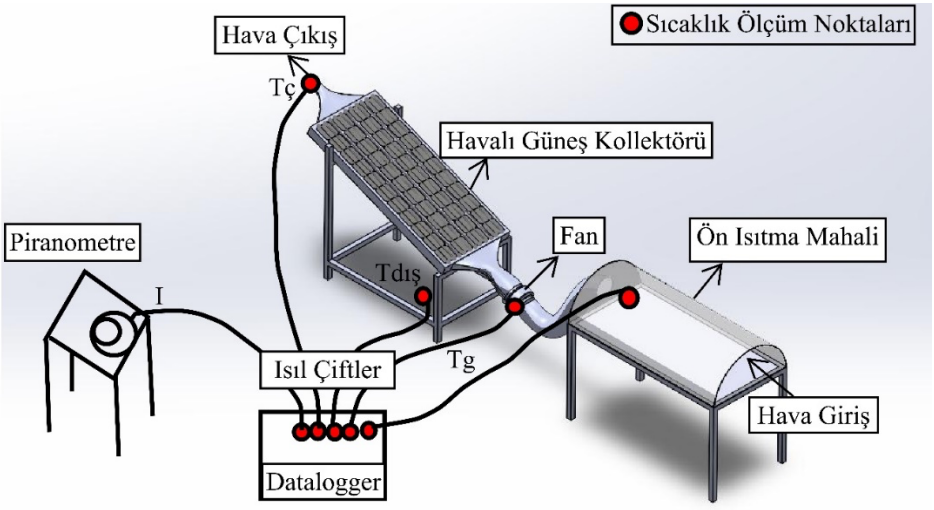
2. Materyal ve Yöntem

2.1. Deney seti

Deney seti, Şanlıurfa Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nün açık alan güneş enerjisi laboratuvarında (Enlem: 37°10,087', Boylam: 38°59,749', Rakım: 511 m) kurulmuştur. Deneysel sistem, ön ısıtma mahali, düz plakalı havalı güneş kollektörü ve bir fandan oluşmaktadır. Kollektörde, gelen ışınımı absorbe etmek amacıyla mat siyah boyalı galvanizli sac kullanılmıştır. Metal galvanizli sacın üzerine, üst ısı kayıplarını azaltmak için 5 mm kalınlığında cam yerleştirilmiştir. Çevreye ısı kayıplarını azaltmak amacıyla kasanın alt ve yan bölgeleri, cam yünü ile yalıtılmıştır. Ön ısıtma mahali, kollektör girişine esnek bir hava kanalı aracılığıyla bağlanmıştır. Havalı güneş kollektörü, açık alanda ve bulunulan yerin enlem derecesindeki (37°) bir eğimle Güney yönüne bakacak şekilde bir platform üzerine yerleştirilmiştir. Düz plakalı havalı güneş kollektörünün ve ön ısıtma mahalinin boyutları Şekil 1'de verilmiştir. Deneysel sistem ve ölçüm noktaları şematik olarak Şekil 2'de gösterilmiştir.



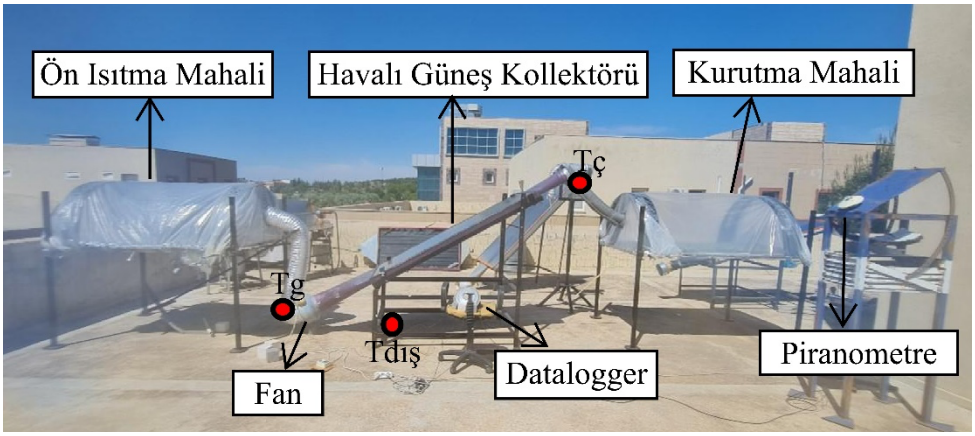
Şekil 1. Sistemin şematik resmi ve boyutları: a) düz plakalı havalı güneş kollektörü, b) ön ısıtma mahali.



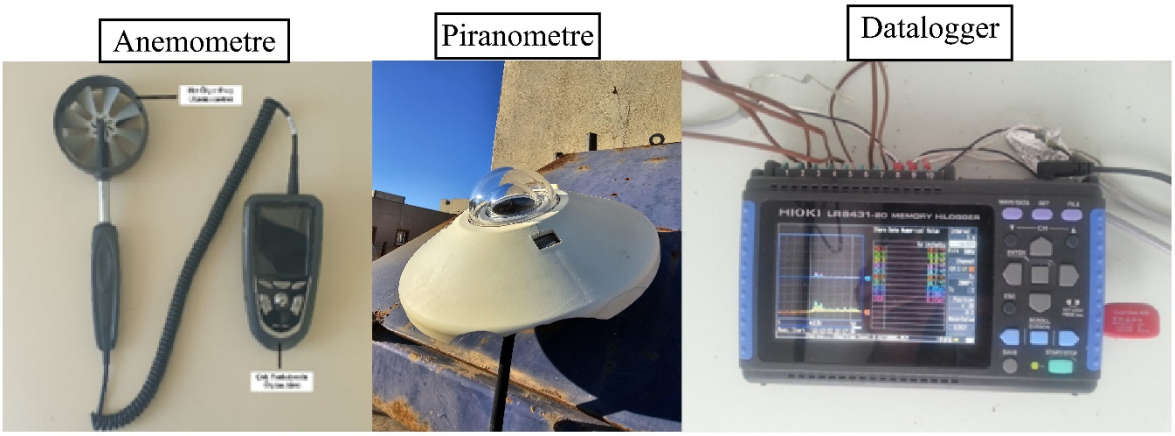
Şekil 2. Ön ısıtmalı havalı güneş kollektörünün şematik resmi ve ölçüm noktaları.

Kollektörün giriş ve çıkış sıcaklıkları ile dış hava sıcaklığı, ölçüm noktalarına yerleştirilen T tipi ısıl çiftler kullanılarak ölçülmüştür. Sistemdeki hava debisi, fan üzerindeki bir fan hız anahtarı kullanılarak değiştirilmiştir.

Hava hızı, KIMO markasına ait AMI-300 model 0,25-35 m/s hız ölçüm aralığına sahip pervane tipi bir anemometre ile kollektör çıkışında ölçülmüştür. Kollektör yüzeyine gelen güneş ışınımı ise KIPP&ZONEN markasına ait CM11 model bir piranometre ile ölçülmüştür. Tüm sıcaklık ve güneş ışınımı verileri HIOKI markasına ait LR8431-20 model, 10 kanallı dataloggerda kaydedilmiştir. Periyodik veri ölçümü, okuması ve kaydetme özelliği bulunan bu cihaz ile deneysel veriler kaydedilmiştir. Şekil 3'te deney seti, Şekil 4'te ölçüm cihazları gösterilmiştir.



Şekil 3. Deney seti.



Şekil 4. Ölçüm cihazları.

Düz plakalı havalı güneş kollektörünün ısıl verimi, kollektörde kullanılan havaya aktarılan faydalı ısıl enerjinin, aynı zaman diliminde kollektör yüzeyine güneş ışınımı ile gelen ortalama ısıl enerjiye oranı olarak tanımlanmaktadır. Kollektörlerin ısıl verimi Denklem 1 ile hesaplanmıştır.

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_ç - T_g)}{I A_k} \quad (1)$$

Burada, $\dot{m}$ (kg/s) kollektörden geçen havanın kütlesel debisini, C_p (J/kg°C) havanın özgül ısısını, $T_ç$ (°C) havanın kollektörden çıkış sıcaklığını, T_g (°C) havanın kollektöre giriş sıcaklığını, I kollektör yüzeyine gelen toplam güneş ışınımını (W/m^2) ve A_k (m^2) ise kollektör yüzey alanını ifade etmektedir. Kütlesel debi, Denklem 2 ile hesaplanmıştır.

$$\dot{m} = \rho V A_ç \quad (2)$$

Burada ρ (kg/m^3) havanın yoğunluğunu, V (m/s) havanın çıkış hızını, $A_ç$ (m^2) ise havanın kollektörden çıkış kesit alanını ifade etmektedir.

2.2. Hata analizi

Deneylerdeki belirsizlikler, doğrudan ölçümlerden kaynaklananlar ve dolaylı türetilenler olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Doğrudan ölçümler, kütlesel debi, sıcaklık, basınç ve güneş ışınımının ölçümünde yapılan hatalardan kaynaklanmaktadır. Dolaylı belirsizlik ise enerji ve ekserji verimliliklerindeki sapmaları içermektedir. Belirsizlik analizi kavramı Kline ve McClintock (1953) tarafından tanıtılmıştır [17]. Bu çalışmadaki belirsizlik analizi, Holman denklemi (Denklem 3) kullanılarak hesaplanmıştır [18].

$$U_F = \left[\left(\frac{\partial F}{\partial z_1}u_1\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z_2}u_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial F}{\partial z_n}u_n\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Deneylerden elde edilen veriler uygun araçlarla ölçülüp kaydedilmiş ve bu verilerin belirsizlikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Deneysel ölçümler için hata analizi.

Hata Oranı	**Belirsizlik Oranı, %**
Isıl Çiftler: ± 0,25 °C	Kollektör Giriş Sıcaklığı = ±0,5
	Kollektör Çıkış Sıcaklığı = ±0,5
Anemometre: ± 0,03 m/s	Hava Hızı = ±1
	Kütlesel Debi = ±1,5
Piranometre: ± 10 W/m^2	Güneş Işınımı = ±0,5
	Kollektör Isıl Verimi = ±2,1

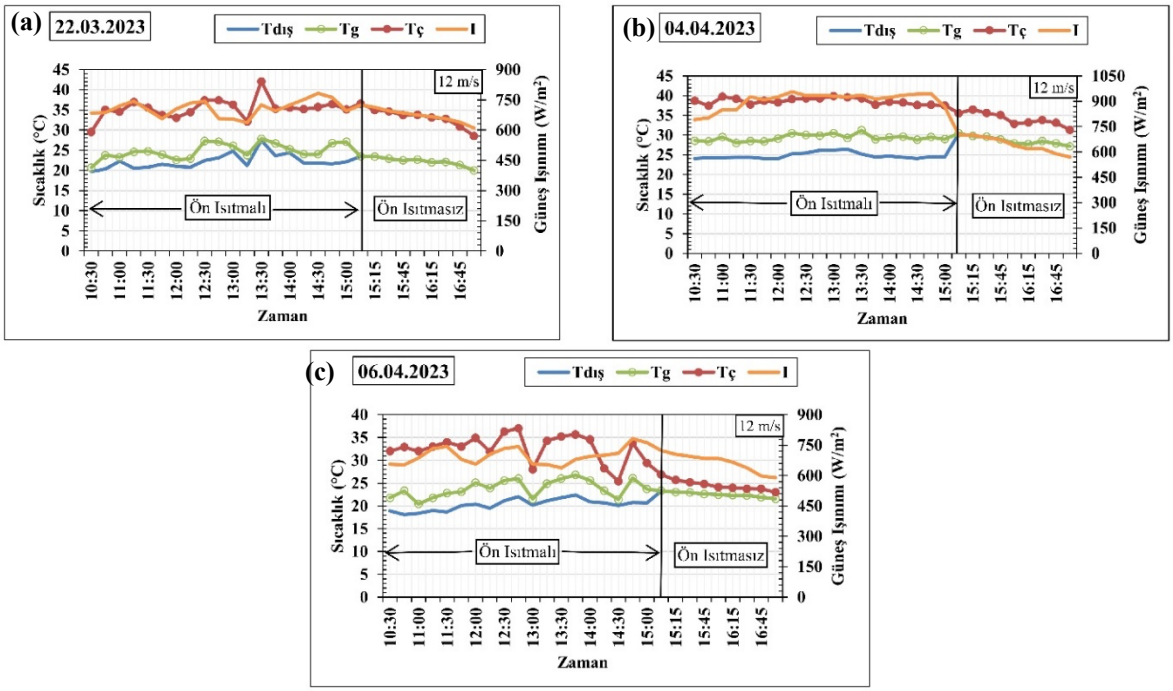
3. Bulgular ve Tartışma

Ön ısıtmanın havalı güneş kollektöründe etkisini daha iyi değerlendirebilmek amacıyla Şanlıurfa'da yaz aylarına göre dış hava sıcaklıklarının çok yüksek olmadığı ve güneşlenme süresinin daha az olduğu ve Mart ve Nisan aylarında ölçümler alınmıştır. Deneyler, 12 m/s (ṁ=0,254 kg/s), 6 m/s (ṁ=0,127 kg/s) ve 3 m/s (ṁ=0,063 kg/s) olmak üzere üç farklı hava hızında (debisinde) ve her bir kütlesel hava debisi için üç ayrı günde gerçekleştirilmiştir. Hava ön ısıtmalı ve ön ısıtmasız deneyler aynı gün içinde ve aynı kollektör üzerinde yapılmıştır. Ön ısıtmalı deneylerde fan, saat 10:30-15:00 arasında kollektöre ön ısıtma mahalinden havayı vermiştir. Saat 15:00-17:00 arası ise aynı kollektöre doğrudan dış hava verilerek ön ısıtmasız deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. 0,254 kg/s, 0,127 kg/s ve 0,063 kg/s kütlesel hava debileri için ölçülen günlük ortalama ışınım değerleri sırasıyla 717 W/m^2, 876,5 W/m^2 ve 918,3 W/m^2 ölçülmüştür. Her üç kütlesel hava debisi için, beklendiği gibi öğle vaktinde güneş ışınımının artmasıyla kollektör çıkış sıcaklığı en yüksek değerine ulaşmıştır. Öğleden sonra ise güneş ışınımının azalmasıyla birlikte sıcaklıklar da düşmüştür.

0,254 kg/s kütlesel hava debisi için dış hava sıcaklığı, havanın kollektöre giriş ve kollektörden çıkış sıcaklığı ile ışınım değerlerinin gün içinde değişimi Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5'ten güneş ışınımı ve sıcaklık değerlerinin her gün farklı olduğu görülmektedir. Şekil 5 (a)'da verilen 22.03.2023 tarihli ölçüm grafiğine göre, düşük ışınım şiddeti nedeniyle dış hava sıcaklığının düşük olduğu gözlemlenmiştir. Deney süreci boyunca en yüksek dış hava sıcaklığı 27,5°C olarak ölçülmüştür. Ön ısıtma sonucunda, kollektör giriş havasının dış hava sıcaklığına göre ortalama 2,8°C daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Düşük ışınım değerleri ve dış hava sıcaklığının düşük olması nedeniyle daha fazla bir sıcaklık farkı elde edilememiştir. Ancak, yine de dış havadan daha yüksek sıcaklıktaki havanın, kollektöre girişi sağlanmıştır. Ortalama dış hava sıcaklığının 21,7°C olduğu sırada, kollektörün ortalama çıkış sıcaklığı 34°C olarak ölçülmüştür. Bu durumda, dış hava sıcaklığına göre ortalama 12,3°C sıcaklık farkı elde edilmiştir.

Şekil 5 (b)'de verilen 04.04.2023 tarihli ölçüm grafiğide, güneş ışınım değerinin ilk ölçüme göre daha yüksek olması nedeniyle daha yüksek sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Dış hava sıcaklığı ortalama 24,7°C iken, ön ısıtma sonucunda ortaya çıkan sıcaklık farkı ortalama 4,7°C olarak ölçülmüştür. Kollektörün ortalama çıkış sıcaklığı ise 38,4°C olarak kaydedilmiştir. Bu durumda, ön ısıtmanın etkisiyle dış hava sıcaklığına göre ortalama 13,7°C sıcaklık farkı oluşmuştur.

Son olarak, Şekil 5 (c)'de verilen 06.04.2023 tarihli ölçüm grafiğinde düşük güneş ışınımı nedeniyle hava sıcaklığı düşük seviyelerde bulunmaktadır. Ortalama dış hava sıcaklığı 20°C iken, ortalama kollektör çıkış sıcaklığı 31,1°C olarak ölçülmüştür. Böylece, ortalama 11,1°C sıcaklık farkı elde edilmiştir. Ön ısıtma sonucunda dış hava sıcaklığına göre yaklaşık 3,1°C sıcaklık farkı elde edilmiştir. Ön ısıtmasız sistemde, kollektör çıkış sıcaklığı ile dış hava sıcaklığı arasında ortalama 6,2°C sıcaklık farkı oluşmuştur. Sonuç olarak, ön ısıtmalı ve ön ısıtmasız çalıştırılan kollektörün çıkış sıcaklıkları arasında ortalama 5°C sıcaklık farkı belirlenmiştir. 0,254 kg/s kütlesel hava debisi için üç farklı güne ait ölçümlerin ortalama değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Tablodan elde edilen verilere göre, ön ısıtma durumunda ortalama ısıl verim %65, ön ısıtmasız durumda ise %51 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. 12 m/s hava hızı ($\dot{m}$ = 0,254 kg/s) için havalı güneş kollektöründe sıcaklık değişimi: a)22.03.2023 tarihli ölçüm, b) 04.04.2023 tarihli ölçüm, c) 06.04.2023 tarihli ölçüm.

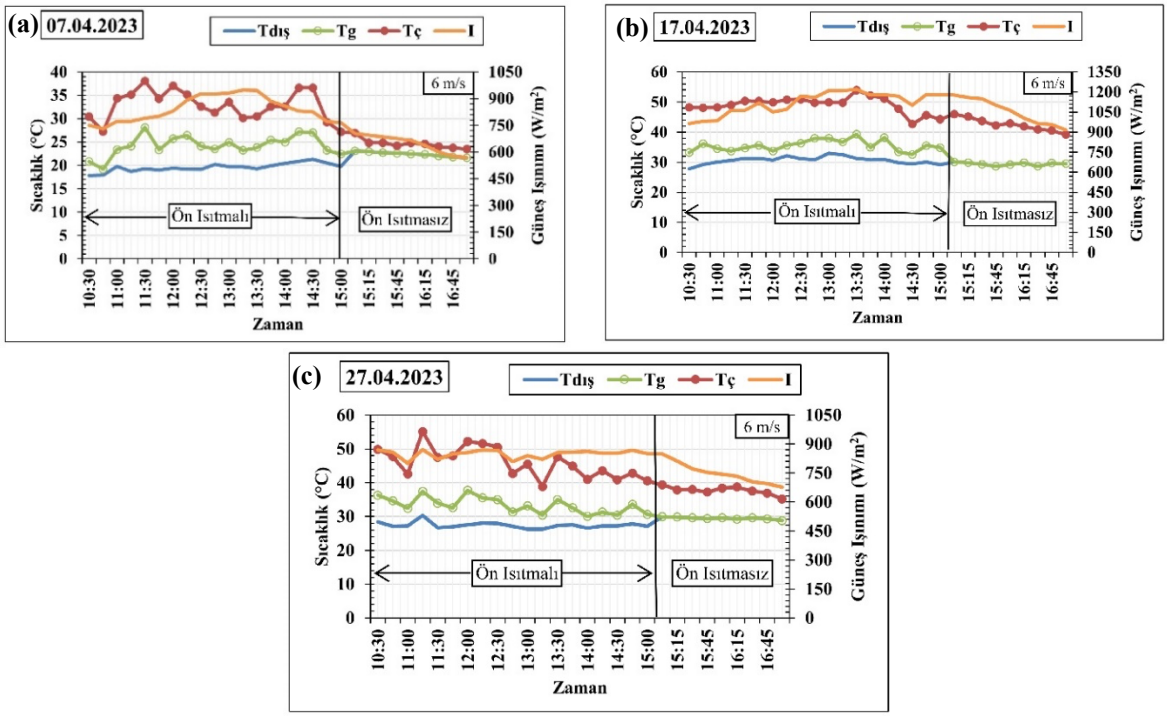
Tablo 2. 12 m/s ($\dot{m}$ = 0,254 kg/s) hava hızında havalı güneş kollektöründe elde edilen ölçümlerin ortalaması.

Ön Isıtmalı, V=12 m/s ($\dot{m}$ = 0,254 kg/s)						
Tarih	**Saat**	**Dış Hava Sıcaklığı [°C]**	**Kollektör Giriş Sıcaklığı [°C]**	**Kollektör Çıkış Sıcaklığı [°C]**	**Güneş Işınımı [W/m²]**	**Isıl Verim [%]**
22.03.2023	10:30-15:00	21,7	24,5	34	700	57
04.04.2023	10:30-15:00	24,7	29,4	38,4	900	75
06.04.2023	10:30-15:00	20	23,1	31,1	720	64
	Ortalama	22,1	25,7	34,5	773	65
Ön Isıtmasız, V=12 m/s ($\dot{m}$ = 0,254 kg/s)						
Tarih	**Saat**	**Dış Hava ve Kollektör Giriş Sıcaklığı [°C]**		**Kollektör Çıkış Sıcaklığı [°C]**	**Güneş Işınımı [W/m²]**	**Isıl Verim [%]**
22.03.2023	15:00-17:00	22,2		33,2	674	43
04.04.2023	15:00-17:00	28,6		34,1	643	61
06.04.2023	15:00-17:00	22,4		24,5	665	50
	Ortalama	24,4		30,6	661	51

Şekil 6'da 0,127 kg/s kütlesel hava debisine ait sıcaklık ve güneş ışınımı değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Şekil 6 (a)'da verilen 07.04.2023 tarihli ölçüm grafiğinde, ortalama 19,5°C dış hava sıcaklığına karşılık, ortalama kollektör çıkış sıcaklığı 33,6°C olmuştur. Böylece, ortalama 14,1°C sıcaklık farkı ortaya çıkmıştır. Ön ısıtma sonucunda ise dış hava sıcaklığına göre ortalama 5°C sıcaklık farkı elde edilmiştir. Ön ısıtmasız durumda kollektör giriş ve çıkış sıcaklık farkı 2,3°C'dir. Bu sıcaklık farkının az olması çevredeki ani rüzgâr değişimleri ve bulutlanmanın ışınım koşullarını etkilemiş olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle kollektör verimi de azalmıştır.

Şekil 6 (b)'de 17.04.2023 tarihli ölçüm grafiğinde, ortalama dış hava sıcaklığı 30,6°C iken, ortalama kollektör çıkış sıcaklığı 50,1°C olarak ölçülmüştür. Bu durumda, 19,5°C sıcaklık farkının yanı sıra en yüksek çıkış sıcaklığı da elde edilmiştir. Ön ısıtma sonucunda, kollektör giriş havasının dış hava sıcaklığına göre ortalama 4,7°C daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Şekil 6 (c)'de 27.04.2023 tarihli ölçüm grafiğinde ise ortalama dış hava sıcaklığı 27,4°C iken, ortalama kollektör çıkış sıcaklığı 48,5°C olarak ölçülerek 21,1°C sıcaklık farkı oluşmuştur. Bu durum, elde edilen en yüksek sıcaklık farkıdır. Ön ısıtma sonucunda dış havaya göre yaklaşık 6°C sıcaklık farkı elde edilmiştir. Ön ısıtmasız sistemde, kollektör çıkış sıcaklığında dış hava sıcaklığına göre ortalama 7,8°C sıcaklık farkı ortaya çıkmıştır. Böylece, 0,127 kg/s kütlesel hava debisi için ön ısıtmalı ve ön ısıtmasız sistemin kollektör çıkış sıcaklıkları arasında ortalama 10,4°C sıcaklık farkı elde edilmiştir. Üç farklı güne ait 0,127 kg/s kütlesel hava debisi için ölçüm sonuçlarının ortalamaları Tablo 3'te verilmiştir. Tablodan elde edilen verilere bakıldığında ortalama ısıl verimin ön ısıtmalı durumda %20 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 6. 6 m/s ($\dot{m} = 0{,}127$ kg/s) hava hızında havalı güneş kollektöründeki sıcaklık değişimi: a) 07.04.2023 tarihli ölçüm, b) 17.04.2023 tarihli ölçüm, c) 27.04.2023 tarihli ölçüm.

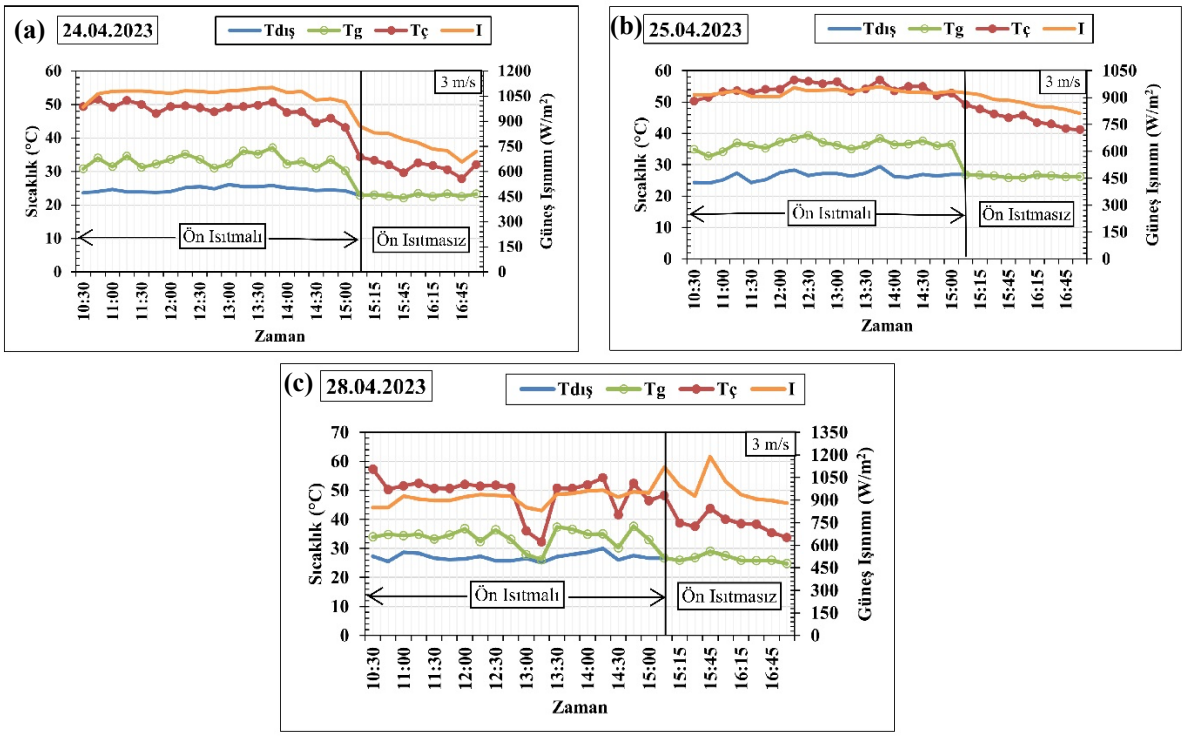
Şekil 7'de, 0,063 kg/s kütlesel hava debisi için parametrelerin zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekil 7 (a)'da verilen 24.04.2023 tarihli ölçüm grafiğinde, ortalama dış hava sıcaklığı 25,1°C iken, ortalama kollektör çıkış sıcaklığı 52,4°C olarak ölçülmüştür. Ön ısıtma sonucunda dış hava sıcaklığına göre ortalama 9°C sıcaklık farkı elde edilmiştir.

Şekil 7 (b)'de verilen 25.04.2023 tarihli ölçüm grafiğine bakıldığında, ortalama dış hava sıcaklığı 24,6°C iken, ortalama kollektör çıkış sıcaklığı 46,4°C olarak ölçülmüştür. Ön ısıtma sonucunda kollektör giriş havasının sıcaklığında dış hava sıcaklığına göre ortalama 7,6°C sıcaklık farkı elde edilmiştir.

Tablo 3. 6 m/s ($\dot{m}$ = 0,127 kg/s) hava hızında havalı güneş kollektöründe elde edilen ölçümlerin ortalaması.

Ön Isıtmalı, V=6 m/s ($\dot{m}$ = 0,127 kg/s)						
Tarih	**Saat**	**Dış Hava Sıcaklığı [°C]**	**Kollektör Giriş Sıcaklığı [°C]**	**Kollektör Çıkış Sıcaklığı [°C]**	**Güneş Işınımı [W/m²]**	**Isıl Verim [%]**
07.04.2023	10:30-15:00	20	24,4	33,6	835	77
17.04.2023	10:30-15:00	30,6	35,4	50,1	1115	84
27.04.2023	10:30-15:00	27,4	33,4	48,5	860	90
	Ortalama	26,0	31,1	44,1	937	84
Ön Isıtmasız, V=6 m/s ($\dot{m}$ = 0,127 kg/s)						
Tarih	**Saat**	**Dış Hava ve Kollektör Giriş Sıcaklığı [°C]**		**Kollektör Çıkış Sıcaklığı [°C]**	**Güneş Işınımı [W/m²]**	**Isıl Verim [%]**
07.04.2023	15:00-17:00	22,3		24,6	645	27
17.04.2023	15:00-17:00	29,4		42,4	1054	79
27.04.2023	15:00-17:00	29,4		37,7	748	72
	Ortalama	27,0		34,9	816	64

Son olarak, Şekil 7 (c)'de verilen 28.04.2023 tarihinde yapılan ölçüm grafiğinde, ortalama dış hava sıcaklığı 27,4°C olarak belirlenmişken, ortalama kollektör çıkış sıcaklığı 51,2°C olarak ölçülmüştür. Ön ısıtma sonucunda dış havaya göre yaklaşık 6°C sıcaklık farkı elde edilmiştir. Ön ısıtmasız sistemde, kollektör çıkış sıcaklığında dış hava sıcaklığına göre ortalama 13,3°C sıcaklık farkı olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, ön ısıtmalı sistemin çıkış sıcaklığında, ön ısıtmasız sistemin çıkış sıcaklığına göre ortalama 11°C daha yüksek sıcaklık elde edilmiştir. 0,063 kg/s kütlesel hava debisi için üç farklı güne ait ölçümlerin ortalaması Tablo 4'te verilmiştir. En yüksek kollektör çıkış sıcaklıkları, 0,063 kg/s kütlesel hava debisinde ön ısıtmalı sistemde sağlanmıştır. Ayrıca kollektör ısıl veriminde ön ısıtmasız sisteme göre % 21 daha yüksek bir ısıl verim elde edilmiştir.



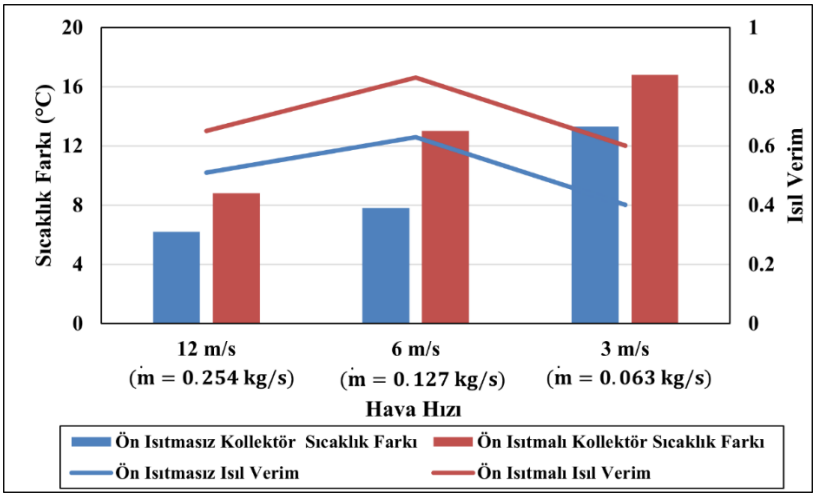
Şekil 7. 3 m/s ($\dot{m}$ = 0,063 kg/s) hava hızında havalı güneş kollektöründeki sıcaklık değişimi: a) 24.04.2023 tarihli ölçüm, b) 25.04.2023 tarihli ölçüm, c) 28.04.2023 tarihli ölçüm.

Tablo 4. 3 m/s ($\dot{m}$ = 0,063 kg/s) hava hızında havalı güneş kollektöründe elde edilen ölçümlerin ortalaması.

Ön Isıtmalı, V=3 m/s ($\dot{m}$ = 0,063 kg/s)						
Tarih	**Saat**	**Dış Hava Sıcaklığı [°C]**	**Kollektör Giriş Sıcaklığı [°C]**	**Kollektör Çıkış Sıcaklığı [°C]**	**Güneş Işınımı [W/m²]**	**Isıl Verim [%]**
24.04.2023	10:30-15:00	25,1	34,1	52,4	1051	73
25.04.2023	10:30-15:00	24,6	32,2	46,4	907	56
28.04.2023	10:30-15:00	27,4	33,2	51,2	927	51
	Ortalama	25,7	33,2	50,0	962	60
Ön Isıtmasız, V=3 m/s ($\dot{m}$ = 0,063 kg/s)						
Tarih	**Saat**	**Dış Hava ve Kollektör Giriş Sıcaklığı [°C]**		**Kollektör Çıkış Sıcaklığı [°C]**	**Güneş Işınımı [W/m²]**	**Isıl Verim [%]**
24.04.2023	15:00-17:00	22,8		31,5	769	40
25.04.2023	15:00-17:00	26,3		44,7	870	37
28.04.2023	15:00-17:00	26,4		39,4	985	41
	Ortalama	25,2		38,5	874,7	39

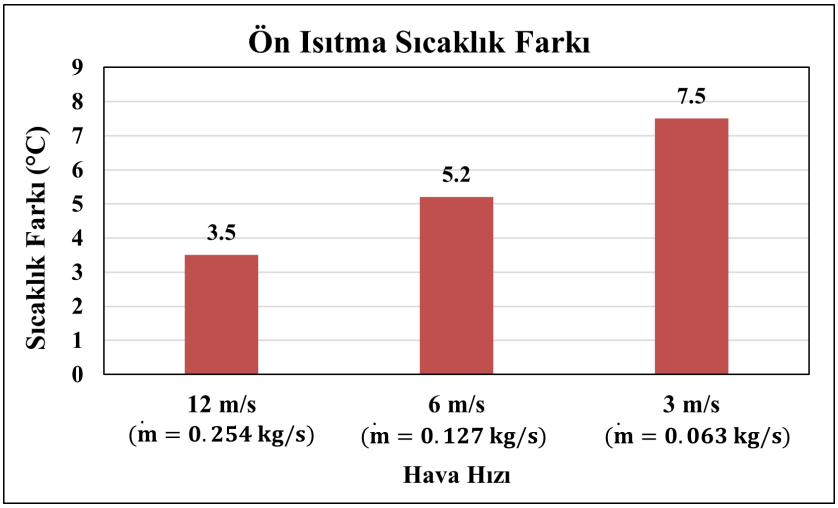
Farklı kütlesel hava debileri için kollektörün ısıl verimi ile kollektör giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki ortalama sıcaklık farkının değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Havanın kollektörden çıkış sıcaklığı, her kütlesel hava debisi için yapılan üç günlük ölçümde öğle vakti en yüksek değerine ulaşmıştır. En yüksek sıcaklık farkı ise 0,063 kg/s, 0,127 kg/s ve 0,254 kg/s hava debisi için sırasıyla, 32,4 °C, 17,5°C ve 12,7 °C olarak belirlenmiştir. Havanın akış hızının artmasıyla birlikte sıcaklık farkının azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, kolektör içindeki havanın sıcak yüzeylerle nispeten daha uzun süre temas etmesiyle açıklanabilmektedir [19, 20]. Ancak, havanın kollektör çıkış sıcaklığında meydana gelen bu azalmanın niceliksel etkisi, akış hızının bir sonucu olduğundan dolayı kollektör verimi ile orantılı olmayabilir [21].

Kütlesel hava debisinin artmasıyla birlikte, ortalama kollektör veriminin de artma eğiliminde olduğu görülmektedir. 0,254 kg/s, 0,127 kg/s ve 0,063 kg/s hava debisi için maksimum kollektör verimleri, ön ısıtmanın olduğu durumlarda sırasıyla %65, %84 ve %60 olarak bulunmuştur. Sonuçlardan görüldüğü üzere, en düşük kollektör verimi en düşük kütlesel hava debisinde elde edilmiştir. Bunun nedeni, kütlesel hava debisinin düşük olduğu durumlarda yutucu plakanın ve kollektörden geçen hava sıcaklığının artmasıdır. Yüksek plaka sıcaklıkları nedeniyle çevreye ısı kayıpları arttığından dolayı ısıl verim daha düşük çıkmaktadır. Kütlesel hava debisinin yüksek olduğu durumlarda ise yutucu plakada toplanan ısı hızla havaya geçmektedir. Bu nedenle kollektörden geçen havanın sıcaklığı daha düşük olmaktadır. Böylece kollektörden çevreye ısı kaybı azalmakta ve ısıl verim değeri de artmaktadır. Dolayısıyla kollektör verimini hava debisi, sıcaklık farkı ve gelen güneş ışınımı etkilediğinden optimum kütlesel hava debisini seçmek ve yüksek sıcaklık farklarını elde etmek önemlidir.



Şekil 8. Farklı kütlesel hava debisine ait ortalama sıcaklık farkı ve ısıl verimin ön ısıtmalı ve ön ısıtmasız durumlar için değişimi.

Şekil 9'da, ön ısıtma sonucunda dış havaya göre meydana gelen sıcaklık farkları gösterilmiştir. En yüksek sıcaklık farkı, en düşük kütlesel hava debisi olan 0,063 kg/s'de kaydedilmiştir. Ölçüm alınan günlerde, daha yüksek ışınım değerleri olduğundan dolayı doğal sera etkisi daha fazla görülmüş ve bu da ortaya çıkan sıcaklık farkını artırmıştır. Genel olarak, tüm kütlesel hava debilerinde dış hava sıcaklığına göre daha yüksek sıcaklıklar elde edilmiş ve böylece kollektöre daha yüksek sıcaklıkta hava girişi sağlanmıştır.



Şekil 9. Ön ısıtma sıcaklık farklarının hava hızına göre değişimi.

4. Sonuç

Şanlıurfa iklim koşullarında kurutma uygulamaları için tasarlanan havalı güneş kollektör sisteminde, ön ısıtma mahalinin kollektör çıkış sıcaklığı ve ısıl verim üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bahar aylarında ani sıcaklık değişimlerini minimize ederek kurutma mahalindeki sıcaklığın düşmesini önlemek amacıyla doğal sera etkisinden faydalanılan bir ön ısıtma mahali sisteme entegre edilmiştir. Ön ısıtmanın hava hızına göre değişen etkilerini inceleyebilmek için 12 m/s (ṁ=0,254 kg/s), 6 m/s (ṁ=0,127 kg/s) ve 3 m/s (ṁ=0,063 kg/s) olmak üzere üç farklı hava hızında (debisinde) deneyler gerçekleştirilmiştir.

Havanın kollektörden ortalama çıkış sıcaklığı 0,063 kg/s için 50°C, 0,127 kg/s için 44,1°C ve 0,254 kg/s için 34,5°C tespit edilmiştir. Düşük kütlesel hava debisinde kollektörden çıkan hava daha yüksek sıcaklığa sahiptir. Bu durum, kollektörün yüksek sıcaklık istenen uygulamalarda düşük kütlesel hava debilerinde çalıştırılması gerektiğini ortaya koymuştur. Kütlesel hava debisinin artması, havaya kazandırılan faydalı ısıl enerjiyi ve kollektör verimini artırmıştır. Kollektörde elde edilen en yüksek ısıl verim 0,127 kg/s kütlesel hava debisinde %84 olarak belirlenmiştir. Ön ısıtma ile 0,063 kg/s kütlesel hava debisinde dış hava sıcaklığından ortalama 7,5°C daha sıcak bir kollektöre giriş sıcaklığı oluşturulmuştur. Böylece kollektöre giriş sıcaklığı artırılmış ve daha yüksek kollektör çıkış sıcaklığı elde edilmiştir.

Kolektör verimi ve çıkış sıcaklığı göz önüne alındığında optimum kütlesel hava debisi 0,127 kg/s olarak belirlenmiştir. Çalışma ile bölge ekonomisine önemli katkı yapan gıdaların daha kısa sürede ve temiz enerji kullanılarak kurutulması için ön ısıtmalı havalı güneş kollektörü ile verimli bir kurutma sisteminin kurulabileceği ortaya konmuştur.

Gelecek çalışmalarda, iki adet düz plakalı güneş kollektörü üzerinde ön ısıtmalı ve ön ısıtmasız deneyler eş zamanlı olarak ve farklı mevsim koşullarında gerçekleştirilebilir. Bu sayede, sistemlerin mevsimsel performans farkları daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirilebilir. Ayrıca, ön ısıtmalı havalı güneş kollektörlerinin tarımsal ürünlerin kurutulmasındaki etkisi araştırılabilir. Termal performansı artırmak amacıyla, düz plakalı güneş kollektörlerine faz değiştiren malzemeler gibi enerji depolama malzemeleri entegre edilerek elde edilecek sonuçlar incelenebilir.

Kaynaklar

[1] Konuklu Y, Ersoy O, Paksoy HÖ, Evcimen S, Çelik S, Toraman ÖY. Termal enerji depolama materyali olarak diyatomit/faz değiştiren madde kompozitlerinin üretilmesi. NÖHÜ Müh Bilim Derg, 2017; 6(1): 238-243.

[2] Chopra K, Tyagi V, Pandey A, Sari A. Global advancement on experimental and thermal analysis of evacuated tube collector with and without heat pipe systems and possible applications. Appl Energy, 2018; 228: pp. 351-389.

[3] Ghritlahre HK., Verma M., Parihar JS, Mondloe DS, Agrawal S. A detailed review of various types of solar air heaters performance. Sol Energy, 2022; 237: 173-195.

[4] Pathak SK, Tyagi V, Chopra K, Kalidasan B, Pandey AK, Goel V, Saxena A, Ma Z. Energy, exergy, economic and environmental analyses of solar air heating systems with and without thermal energy storage for sustainable development: A systematic review. J Energy Storage, 2023; 59: 106521.

[5] Oğuz M, Akkurt Ş. Kayseri ilinin yenilenebilir enerji potansiyeli. NÖHÜ Müh Bilim Derg, 2017; 6(2): 362-374.

[6] Sharma SL, Debbarma A. A review on thermal performance and heat transfer augmentation in solar air heater. Int J Sustainable Energy, 2022; 41(11): 1973-2019.

[7] Sureandhar G, Srinivasan G, Muthukumar P, Senthilmurugan S. Investigation of thermal performance in a solar air heater having variable arc ribbed fin configuration. Sustainable Energy Technol Assess, 2022; 52: 102069.

[8] Chabane F, Moummi N, Benramache S. Experimental study of heat transfer and thermal performance with longitudinal fins of solar air heater. J Adv Res, 2014; 5(2): 183-192

[9] Kumar R, Chand P. Performance enhancement of solar air heater using herringbone corrugated fins. Energy, 2017; 127: 271-279.

[10] Tyagi R, Ranjan R, Kishore K. Performance studies on flat plate solar air heater subjected to various flow patterns. Appl Sol Energy, 2014; 50: 98-102.

[11] El Ferouali H, Zoukit A, Salhi I, El Kilali T, Doubabi S, Abdenouri N. Thermal efficiency and exergy enhancement of solar air heaters, comparative study and experimental investigation. J Renewable Sustainable Energy, 2018; 10(4).

[12] Koyuncu T. Performance of various design of solar air heaters for crop drying applications. Renewable Energy, 2006; 31(7): 1073-1088.

[13] Doğan, H. Kurutmada kullanılan hava ısıtma kollektörlerinin deneysel karşılaştırılması. Teknoloji, 2001;4.

[14] Çerçi, KN, Daş M. Modeling of heat transfer coefficient in solar greenhouse type drying systems. Sustainability, 2019; 11(18): 5127.

[15] Alıç, E., Daş, M, Kavak Akpınar, E. Numerical investigation of thermal efficiency of solar air heater at different flow rates. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University,2023; 38(1): 617-628.

[16] Alıç, E, Daş M. Güneş enerjisi destekli kurutma sisteminde ürün nem oranının hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi. KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2019; 22: 78-87.

[17] Kline SJ. Describing uncertainties in single-sample experiments. Mech Eng, 1983; 75: 3-8.

[18] Holman JP. Experimental methods for engineers eighth edition, 2021.

[19] Li S, Wang H, Meng X, Wei X. Comparative study on the performance of a new solar air collector with different surface shapes. Appl Therm Eng, 2017; 114: 639-644.

[20] Kurtbas I, Durmuş A. Efficiency and exergy analysis of a new solar air heater. Renewable Energy, 2004; 29(9): 1489-1501.

[21] Debnath S, Das B, Randive P, Pandey K. Performance analysis of solar air collector in the climatic condition of North Eastern India. Energy, 2018; 165: 281-298.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 211-222, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1534269

Matematiksel Yöntemlerle Güçlendirilmiş Yeni Bir Yüksek Güvenlikli Metin Şifreleme Algoritmasının Tasarımı ve Uygulanması

Hüseyin DEMİR[1*], Hünkar ACAR[2]
[1,2]Yazılım Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Samsun Üniversitesi, Samsun, Türkiye
[*1] huseyin.demir@samsun.edu.tr, [2] 211118053@samsun.edu.tr

(Geliş/Received: 16/08/2024; Kabul/Accepted: 24/10/2024)

Öz: Bu çalışmada iyi bilinen geleneksel DES (Data Encryption Standard), AES (Advanced Encryption Standard) ve Hill vb. şifreleme yöntemlerinde meydana gelen eksiklikleri gidermek amacı ile geleneksel yöntemlerden farklı olarak yenilikçi ve mevcut şifreleme yöntemlerindeki boşluklara cevap verebilecek karma bir şifreleme yönteminin tasarımı verilmiştir. Bu yöntem sayesinde daha güvenilir, esnek ve performanslı bir şifreleme yöntemi elde edilecektir. Böylece daha karmaşık ve öngörülemez bir şifreleme süreci sağlayarak saldırılara karşı dayanıklılık artacaktır. Bu sayede günlük konuşmalar ve askeri haberleşmeler gibi çeşitli alanlarda kullanılabilecek güvenliği yüksek bir şifreleme algoritması oluşturulacaktır. Bu yöntem klasik ve modern şifreleme tekniklerinin bir kombinasyonu olarak ortaya çıkmaktadır. Klasik rotor makinelerinin mekanik yapısı ile modern simetrik algoritmaların matematiksel temellerini bir araya getiren bu yöntem hem tarihsel şifreleme metodolojilerini canlandırmakta hem de günümüz güvenlik gereksinimlerini karşılamaktadır. Bu güvenlik gereksinimleri ve yükseklik düzeyi olasılık hesabı ile gösterilecektir. Ayrıca, modüler aritmetik ve rotor mekanizmalarının entegrasyonu, karmaşıklığı ve öngörülemezliği artırarak, kriptanaliz tekniklerine karşı hem etkili bir şifreleme hem de daha güçlü bir savunma mekanizmasına sahip bir karma yöntem sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Lineer cebir, kaydırma algoritmaları, karıştırma algoritmaları, XOR İşlemi, blok şifreleme, şifrelemenin olasılık hesabı.

Design and Implementation of a New High Security Text Encryption Algorithm Strengthened by Mathematical Methods

Abstract: In this study, a hybrid encryption method is designed to address the shortcomings in well-known traditional encryption methods such as DES (Data Encryption Standard), AES (Advanced Encryption Standard), and Hill cipher. Unlike conventional methods, this new approach offers an innovative solution that fills the gaps in existing encryption techniques. The result is a more secure, flexible, and efficient encryption method. By providing a more complex and unpredictable encryption process, the resilience against attacks will be significantly increased. Consequently, a highly secure encryption algorithm will be created, suitable for various fields such as daily communications and military communications. This method emerges as a combination of classical and modern encryption techniques. By integrating the mechanical structure of classical rotor machines with the mathematical foundations of modern symmetric algorithms, this method not only revives historical encryption methodologies but also meets the security requirements of today. In this study, the security requirements of encryption and the height level will be discussed with probability calculation. Furthermore, the integration of modular arithmetic and rotor mechanisms increases complexity and unpredictability, offering an effective encryption and a stronger defence mechanism against cryptanalysis techniques through this hybrid method.

Keywords: Linear algebra, shift algorithms, mixing algorithms, XOR operation, block cipher, probability calculation of encryption.

1. Giriş

Kriptoloji, verilerin güvenli bir şekilde iletilmesi ve saklanması amacıyla matematiksel tekniklerin kullanıldığı bir bilim dalıdır. Kriptografinin matematiksel temelleri ve şifreleme algoritmalarının kullanılması tarihte ilk çağlarından beri kullanılmış, ilkel hallerden, bilgisayarların kullanıldığı sistematik çağa gelmiştir. Yöntemlerin gelişim sürecini ve bu yöntemlerin günümüz verilerini güvenli bir şekilde koruma işlevi ise önemini korumaktadır [1]. Günümüzde kriptoloji, özellikle internet üzerindeki veri trafiği, finansal işlemler, kişisel bilgilerin korunması ve askeri haberleşmeler gibi kritik alanlarda vazgeçilmez hale gelmiştir. Modern kriptografi, bu süreçleri gerçekleştirmek için çeşitli algoritmalar ve protokoller geliştirmiştir. Bu algoritmalar arasında en bilinenlerinden biri RSA'dır; bu yöntem, büyük asal sayıların çarpanlarına ayrılmasının zorluğuna dayalı olarak güvenlik sağlar [2]. AES (Advanced Encryption Standard) ise hız ve güvenlik dengesi açısından yaygın olarak tercih edilen simetrik bir şifreleme algoritmasıdır [3]. DES ve geliştirilmiş versiyonu 3DES gibi blok şifreleme

[*] Sorumlu yazar: huseyin.demir@samsun.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 000-0003-3606-878X, [2] 0009-0009-7930-5694

algoritmaları da veri güvenliğini sağlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Bu yöntemler, farklı alanlarda veri güvenliğini sağlamak için matematiksel temellere dayalı algoritmik teknikler kullanmaktadır [5, 6].

Antik çağlardan günümüze kadar farklı şifreleme yöntemleri geliştirilmiştir. Tarihte en bilinenlerden biri, Gaius Julius Caesar tarafından Galya savaşlarında kullanılan Ceaser Şifrelemesidir; bu şifreleme yöntemi, basit bir kaydırma algoritmasına dayanır [7]. Günümüz savaşlarının etkisi ise özellikle siber ortamın savaş alanı kapsamına girmesi ve bu durumun kriptolojinin evrimine olan katkısı son derece etkilidir. Siber savaşların artan tehdidi, şifreleme tekniklerinin sürekli olarak yenilenmesini ve güçlendirilmesini gerektiren tıpkı eski savaşlarda meydana gelen bir ortam yaratmaktadır [8]. Orta Çağ'da ise polialfabetik bir şifreleme yöntemi olan Vigenère Şifrelemesi, uzun yıllar kırılamamış ve güçlü bir çözüm olarak kabul edilmiştir [9]. Ancak modern dönemde, kriptografik yöntemlerin güçlendirilmesi amacıyla matematiksel temellerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar dikkat çekmektedir. Örneğin, integral ve doğal dönüşümlerin şifreleme alanında kullanılması üzerine yapılan araştırmalar, kriptografide yeni yaklaşımlar sunmaktadır [10]. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi ile Multimedia Tools ve Applications dergisinde yer alan her iki çalışmada da integral dönüşümüne dayalı şifreleme tekniklerinin veri güvenliğine katkıları incelenmiştir [11, 12]. Diğer taraftan Laplace Dönüşümü, kriptosistemlerin tasarımında iyi bir uygulama alanı olmasına rağmen, bazı çalışmalarda kriptanaliz çalışmaları yeterli düzeyde yapılmadığından dolayı birçok şifreleme algoritması güvenli iletişim için yetersiz kalmaktadır. Yapılan bu çalışmada, Laplace Dönüşümü tabanlı şifreleme sistemlerinin güvenlik analizleri için genel bir saldırı senaryosu önerilmiş ve bu senaryo yeni bir şifreleme yöntemi üzerinde uygulanmıştır [12]. Ayrıca Lucas Dizisi ve Fibonacci Dizisi gibi matematiksel diziler kullanılarak yeni şifreleme yöntemlerinin geliştirildiği çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Bu diziler, veri şifreleme süreçlerinde alternatif çözümler sunarak güvenliği artırmayı hedeflemektedir [13]. Ek olarak genetik kod yöntemlerini kullanarak yeni bir veri şifreleme algoritması tasarlayan farklı yaklaşım çalışmalarda mevcuttur. Çalışmada, genetik algoritmaların temel prensipleri ve uygulamaları üzerine odaklanılmıştır. Araştırma, veri güvenliğini artırmak için genetik algoritmaların kullanıldığı yeni bir şifreleme yöntemi geliştirilmesi sürecini detaylandırmaktadır [14].

Bu çalışmanın temel amacı, veri güvenliğini sağlamak için yenilikçi bir şifreleme algoritması geliştirmektir. Çalışmada, şifreleme sürecinin karmaşıklığını artırarak güvenliği güçlendiren matematiksel yöntemler bir araya getirilmiştir. Bu yöntemler arasında lineer cebir, matris işlemleri, kaydırma algoritmaları, karıştırma algoritmaları ve XOR işlemi gibi teknikler bulunmaktadır. Böylece, şifreleme algoritmasının kırılmasını zorlaştıran ve güvenlik seviyesini artıran bir yapı oluşturulmuştur. Bu çalışma, sadece metin şifreleme süreçlerine odaklanmakta ve bu bağlamda geliştirilen yeni bir metin şifreleme algoritmasını sunmaktadır. Geliştirilen algoritmanın hem günlük konuşmaların güvenliğini sağlamak hem de askeri haberleşmeler gibi kritik güvenlik gerektiren alanlarda kullanılabilirliği hedeflenmiştir.

Mevcut şifreleme algoritmalarının zayıf noktaları analiz edilerek bu eksiklikler giderilmiş ve geliştirilmiş bir yapı önerilmiştir. Özellikle, matris işlemleri ve kaydırma algoritmaları ile şifreleme süreci karmaşıklaştırılmış, XOR işlemi ise şifre çözümlemeyi zorlaştıran ek bir güvenlik katmanı olarak eklenmiştir. Bu sayede metin şifreleme sürecinin kırılma olasılığı minimize edilmiştir.

Amacımız, bu çalışma ile veri güvenliğini sağlamaya yönelik yenilikçi ve etkili bir çözüm sunmaktadır. Bu sebeple, diğer şifreleme algoritmalarının karmaşıklığından kaynaklanan zorluklar giderilmiş ve anlaşılması kolay, ancak güvenliği yüksek bir şifreleme algoritması önerilmiştir. Bu algoritmanın, günlük haberleşmelerden savunma sanayine kadar geniş bir kullanım alanı bulması hedeflenmektedir.

2. Geliştirilen Şifreleme Algoritması

Geliştirilen şifreleme algoritması, veri güvenliğini artırmak için bir dizi matematiksel işlem ve teknik içermektedir. Algoritma, temel olarak blok şifreleme mantığı ile çalışır ve şifreleme işlemi 12 karakterlik bloklar halinde gerçekleştirilir. Aşağıda algoritmanın temel prensipleri ve süreçleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır:

2.1. Anahtar yönetimi

Algoritma, simetrik anahtar şifreleme yöntemi kullanmaktadır. Bu, şifreleme ve deşifreleme işlemleri için aynı anahtarın kullanıldığı anlamına gelir. Anahtarın güvenliği, algoritmanın genel güvenliğini doğrudan etkiler. Anahtar, rastgele üretilir ve şifreleme işlemi başlamadan önce taraflar arasında güvenli bir şekilde paylaşılır.

2.2. Blok şifreleme

Algoritma, veriyi 12 karakterlik bloklara böler. Her blok, şifreleme işlemi için bağımsız olarak işlenir. Bu yaklaşım, büyük veri setlerinin işlenmesini daha yönetilebilir hale getirir ve paralel işleme imkanını artırır.

2.3. Matematiksel işlemler

Şifreleme işlemi birkaç matematiksel işlemden oluşur: ilk olarak her blok, bir matris temsilcisi olarak işlenir, böylece veriler bloklar halinde matrislere dönüştürülerek matematiksel manipülasyonların uygulanmasını kolaylaştırılır. Bu aşamada, matris çarpması ve dönüşüm işlemleri kullanılarak veri karmaşıklığı artırılır. Daha sonra blok verisi üzerinde kaydırma işlemleri uygulanarak, veri desenleri karıştırılır. Bu işlemler, verinin analizi ve şifre çözme sürecini zorlaştırır. Güvenlik açısından verinin daha da karmaşık hale gelmesi için karıştırma algoritmaları kullanılır. Bu, verinin anlamlı yapılarının ve kalıplarının bozulmasına yardımcı olur. Son olarak şifreleme sürecinde XOR (Exclusive OR) işlemi, veriyi anahtar ile kombinlemek için kullanılır. Bu işlem, verinin bit düzeyinde değiştirilmesini sağlar ve şifreleme işleminin güvenliğini daha da artırır.

2.4. Şifreleme süreci

Şifreleme sürecinde ilk adım, giriş verisinin 12 karakterlik bloklara ayrılmasıdır. Bu bloklar, matris şeklinde yapılandırılarak işlem yapılabilir hale getirilir. Matrislerin üzerinde kaydırma ve karıştırma algoritmaları uygulanır. Kaydırma işlemi, her matrisin satırlarının belirlenen sayıda sola veya sağa kaydırılması şeklinde gerçekleştirilir. Bu işlem, verinin düzenini bozarak güvenliği artırır. Karıştırma aşaması ise matrisin sütunlarındaki elemanların rastgele bir şekilde yer değiştirmesiyle yapılır. Sonraki adımda, her blok matris, belirlenen bir anahtar ile XOR işlemine tabi tutulur. Bu işlem, şifreleme sonucunu daha karmaşık hale getirir ve verinin güvenliğini güçlendirir. Nihayet, tüm bloklar birleştirilerek şifrelenmiş veri oluşturulur. Bu kombinasyon hem kaydırma ve karıştırma işlemlerinin hem de modüler aritmetiğin getirdiği matematiksel karmaşıklıkla güçlü bir güvenlik sağlar.

2.5. Deşifreleme süreci

Deşifreleme, bilgi güvenliği ve gizlilik açısından kritik bir rol oynar ve veri şifreleme sistemlerinin etkili bir şekilde çalışmasını sağlar. Deşifreleme işlemi, şifreleme sürecinin tersidir: Şifrelenmiş metin veya veri, deşifreleme işlemine başlanmadan önce elde edilir ve sonra veri 12 karakterlik bloklara bölünür. Şifreleme sırasında kullanılan anahtar veya anahtar bilgisi, deşifreleme işleminde de kullanılır. Anahtar, veriyi doğru şekilde deşifrelemek için gereklidir. Böylece, şifrelenmiş bloklar anahtar ile XOR ile ters işlemine tabi tutulur. Daha sonra şifreleme algoritmasının tersine çalışacak bir algoritma uygulanır. Bu, şifrelenmiş veriyi çözmek için gerekli matematiksel işlemleri içerir. Bu işlem sırasında kaydırma ve karıştırma algoritmaları ters yönde uygulanır ve matrisler geri dönüştürülür ve verinin orijinal hali elde edilir. Sonunda deşifrelenmiş bloklar birleştirilir ve işlem tamamlandığında, orijinal metin veya veri elde edilir ve okunabilir hale gelir.

2.6. Güvenlik analizi

Geliştirilen algoritma, mevcut şifreleme yöntemlerinin zayıf noktalarını ele alacak şekilde tasarlanmıştır. Matris işlemleri, kaydırma ve karıştırma teknikleri, XOR işlemi ile birleştirilerek veri güvenliğini artırır. Matematiksel temellere dayanan bu yöntemler, algoritmanın karmaşıklığını artırır ve güvenliğini sağlar.

Bu algoritmanın, günlük konuşmalardan askeri haberleşmelere kadar geniş bir uygulama yelpazesi hedeflenmiştir. Şifreleme ve deşifreleme süreçleri, anlaşılması kolay ve etkili bir güvenlik çözümü sunmak amacıyla tasarlanmıştır.

2.7. Şifreleme koşulları ve anahtar matrisinin özellikleri

Algoritmanın belirli koşulları ve gereksinimleri bulunmaktadır. Bu gereksinimler, belirli bir anahtar ile şifreleme işlemi yapıldıktan sonra deşifreleme işleminin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. İlerleyen bölümlerde bu koşullar matematiksel olarak detaylandırılacaktır; burada ise yüzeysel olarak açıklanacaktır.

İlk koşul, anahtarın belirli bir örnek teşkil eden tablodaki karakterlerin sayısal değerlerine bakılarak 4x4 boyutunda bir matris haline getirilmesidir. Aynı şekilde, şifrelenmek istenen metin de bu tablodan alınan sayısal değerlerle 3x4'lük bir matris haline getirilip hazır tutulur. Şifreleme işlemi, bu iki matrisin kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Şifreleme işlemi, anahtar matris (4 × 4) ile 12 karakterlik düz metni 3 × 4'lük bir matris haline getirip çarpmakla başlar. Daha sonra, elde edilen 3 × 4'lük matrisin değerlerinin 63'e göre mod değeri alınır. Bunun nedeni, Tablo 1' de gösterildiği 63 karakterin bulunması ve değerlerin bu aralıkta kalmasını sağlamaktır.

Bu noktada önemli bir koşul, deşifreleme işleminin anahtar matris kullanılarak yapılacak olması nedeniyle, anahtar matrisin determinantının sıfırdan farklı olması gerekliliğidir. Bu, matrisin tersinin alınabilmesi için

zorunludur. Anahtar matrisin tersi varsa deşifreleme işlemi yapılabilir. Bir diğer koşul ise anahtar matrisin determinantı ile 63 değeri arasında asal olmasıdır. Bu, modüler tersin bulunarak anahtar matrisin tersinin ek matrisi ile çarpılması ve mod 63 alınarak düz metnin elde edilmesi için gereklidir.

Bu koşullar sağlandıktan sonra, anahtar değerinin sayısal değerleri toplanır ve mod 10 değeri alınır. Elde edilen bu sonuç, matrislerin çarpımından elde edilen sonucun mod 63 işleminden sonra, değerlerin S1 ve S2 rotorlarından geçmeden önce bu rotorların kaydırma işleminde kullanılır. Örneğin, sonuç 5 ise bu, rotorlardaki sayıların 5 kaydırılması anlamına gelir. Bu adım, sonuçların daha karmaşık hale getirilmesini sağlar. Daha sonra, mod değeri kullanılarak sıfırdan dokuza kadar olan karıştırma algoritması uygulanır ve bu rotorlardan çıkan değerler indekslerine göre karıştırılır.

Son aşamada, anahtar herhangi bir işleme tabi tutulmadan S3 rotorlarından geçirilir ve bu değerler, yukarıda bahsedilen işlemlerden elde edilen değerlerle birlikte XOR işlemine tabi tutulur. Bu işlemlerin sonucunda, şifrelenmiş metin elde edilir. Burada gizlilik tamamen anahtarın gizliliğine bağlıdır; algoritma bilinse dahi anahtar olmadan deşifreleme işlemi yapılamaz.

Tablo 1. Sayı ve harf değerleri modeli.

Sayı	Sayı Değeri	Sayı	Harf Değeri	Sayı	Harf Değeri	Sayı	Harf Değeri	Sayı	Harf Değeri	Sayı	Harf Değeri
0	0	11	A	22	L	33	W	44	h	55	s
1	1	12	B	23	M	34	X	45	i	56	t
2	2	13	C	24	N	35	Y	46	j	57	u
3	3	14	D	25	O	36	Z	47	k	58	v
4	4	15	E	26	P	37	a	48	l	59	w
5	5	16	F	27	Q	38	b	49	m	60	x
6	6	17	G	28	R	39	c	50	n	61	y
7	7	18	H	29	S	40	d	51	o	62	z
8	8	19	I	30	T	41	e	52	p		
9	9	20	J	31	U	42	f	53	q		
10		21	K	32	V	43	g	54	r		

Tablo 2. Düz metin ve anahtar değerleri.

Düz Metin		Anahtar	
Harf	Değeri	Harf	Değeri
s	55	m	49
a	37	a	37
b	38	t	56
a	37	e	41
h	44	m	49
l	1	A	11
		t	56
		i	45
		K	21

Şifreleme işleminin doğru ve güvenli bir şekilde yapılabilmesi için aşağıdaki iki temel koşulun sağlanması gerekmektedir. İlk olarak anahtar matrisinin determinantı sıfırdan farklı olmalıdır. Bu koşul, şifrelemenin ve deşifrelemenin matematiksel olarak geçerli olabilmesi için gereklidir. Şifreleme ve deşifreleme işlemlerinde matrisin tersi kullanılır, dolayısıyla matrisin tersi alınabilmelidir. Aksi takdirde bu durum şifreleme sürecinin geçersiz olmasına neden olur. Bir diğer şart ise matrisin determinantı, kullanılan modül değeri ile aralarında asal olmalıdır. Bu, matrisin tersinin bulunabilmesi ve şifreleme sürecinin matematiksel geçerliliği için önemlidir. Şifreleme ve deşifreleme işlemlerinde, determinantın modüler tersinin alınması gerektiğinden, bu ters değerin modül ile aralarında asal olması gerekir. Bu işlem ile şifrelenmiş verilerin doğru şekilde geri dönüştürülmesini sağlanır. Bu iki şartın kontrolü yapıldıktan sonra öncelikle anahtar matrisi oluşturma ve şifreleme süreci tamamlanmalıdır. Fakat anahtar matrisini oluştururken, anahtarın boyutunun şifreleme algoritmasının

gereksinimlerine uygun olması gerektiğine dikkat edilmelidir. Örneğin, 4 × 4 boyutunda bir matris oluşturmak için anahtar karakterlerini sayısal değerlere dönüştürüp matrise yerleştirmek gerekir. Eğer anahtar, 4 × 4 matris için yeterli uzunlukta değilse, eksik kalan kısımlar en baştan itibaren tekrar kullanılarak tamamlanır.

3. Deneysel Çalışma

Şimdi düz metin "sabah1" ifadesini anahtar kelime "matemAtiK" olmak üzere yukarıda anlatılan sürece göre işleme tabi tutalım. Burada düz metin ve anahtar ifadelerinin karakterlerinin sayısal değerleri Tablo 2 ile verilmiştir.

Anahtar matrisinin sayısal değerlerinin toplamı, mod 10 işlemine tabi tutulur. Bu sonuç, genellikle şifreleme sürecindeki çeşitli parametreleri belirlemede kullanılır. Örneğin, bu değer S1, S2 ve S3 rotorlarında veya karıştırma algoritmalarında kayma ve indeks karıştırma işlemlerinin nasıl yapılacağını belirlemek için bir metrik olarak kullanılabilir. Örnek olarak, anahtar matrisindeki sayısal değerlerin toplamı 45 ise ve bu toplam mod 10 işlemine tabi tutulduğunda sonuç 5 olacaktır. Bu sonuç, ilgili şifreleme rotorlarının ve algoritmalarının ayarlarını yapılandırmada kullanılır.

Bu koşulların ve hesaplamaların doğru bir şekilde uygulanması, güvenli ve etkili bir şifreleme algoritması geliştirmek için esastır. Şifreleme ve deşifreleme süreçlerinin matematiksel geçerliliği, bu temel prensiplere uygunlukla sağlanır.

Böylece anahtar "matemAtiK" olmak üzere anahtarın Tablo 2 ile verilen değerlerinden 4x4 lük bir matris oluşturulur. Böylece bu matrisin determinant değeri -2393684 olarak bulunur.

Böylece, determinant değerinin sıfırdan farklı olma şartı sağlanmaktadır. Diğer taraftan mod değeri ile determinant değerleri aralarından asal olup olmadıkları modüler aritmetik uygulanarak kontrol edilirse gerçekten mod değeri ile $\det(A)$ değerleri aralarından asal olduklarından dolayı diğer şartın da sağlandığı gösterilmiş olur. Böylece her iki şart sağlanmış olduğundan şifreleme işlemine devam edilirse ilk olarak anahtar matris ile Tablo 2'de verilen sayısal değerlerden oluşan düz metin matrisinin matris çarpımları yapılır ve değer matrisi değerleri mod 63 ile hesaplanır. Böylece mod 63 işlemine göre çıkan değerler 19, 6, 35, 56, 26, 36, 48, 8, 41, 49, 43, 10 olarak bulunur.

Daha sonra da indeks karıştırma ve kaydırma işlemleri uygulanır. Karıştırma işlemine başlamadan önce mod 10'a göre anahtar matrisinin tek veya çift olduğunu kontrol etmek önemlidir. Eğer mod 10 sonucunda elde edilen değer tek ise, indeks ve karıştırma işlemlerinden elde edilen sonuçları XOR işleminde tersine çevirmek gerekir. Eğer mod 10 sonucunda elde edilen değer çift ise, indeks ve karıştırma işlemlerinden elde edilen sonuçları XOR işleminde olduğu gibi kullanmak gerekir. Bu süreç, şifreleme algoritmasının güvenliğini ve doğruluğunu sağlamak için gereklidir. O halde Tablo 2 ile belirtilen anahtar değerleri toplanıp çıkan sonucun mod 10 değeri alınarak devam edilir. Buna göre, 49 + 37 + 56 + 41 + 49 + 11 + 56 + 45 + 21 = 365 olmak üzere 365 mod 10 = 5 olarak hesaplanır. Dolayısıyla Tablo 3 ile verilen karıştırma algoritması, yukarıda belirtilen kurallara göre dizilerin içindeki değerlerin yer değiştirilmesini sağlar ve aşağıdaki kurallara göre indeksler değiştirilir:

Tablo 3. İndeks karıştırma algoritma modeli.

Indeks	Yer değiştiren indeks değerleri
0:	Aynen kalır
1:	2-7, 8-11 indeksleri yer değiştirir.
2:	0-5, 3-7 indeksleri yer değiştirir.
3:	3-4, 1-6 indeksleri yer değiştirir.
4:	5-9, 10-11 indeksleri yer değiştirir.
5:	1-2, 4-9 indeksleri yer değiştirir.
6:	4-10, 5-11 indeksleri yer değiştirir.
7:	0-1, 2-4 indeksleri yer değiştirir.
8:	3-11, 6-7 indeksleri yer değiştirir.
9:	7-8, 2-9 indeksleri yer değiştirir.

Karıştırma işlemi sonucunda elde edilen değerler 19, 35, 6, 56, 49, 36, 48, 8, 41, 26, 43, 10 olarak bulunur. Daha sonra bu değerler, S1 ve S2 rotorlarından geçer. Başlangıçta S1 ve S2 rotorlarının değerleri rastgele belirlenmiştir. Anahtar değerinin sayısal değerlerinin toplamının mod 10 ile elde edilen sonucu doğrultusunda, buradaki sayılar kayma işlemine tabi tutulur. Örneğin, mod 10 sonucunda 5 elde edildiğinde, S1 rotorundaki

değerler 5 birim kaydırılırken, S2 rotorundaki değerler 5+1=6 birim kaydırılır. Bu ek kayma işlemi, mod 10 sonucunun sıfır (0) olduğu durumlarda bile uygulanır, bu yüzden her durumda artı bir (+1) kayma eklenir.

Bu şekilde, algoritmanın çalışma mantığı belirli bir düzen içinde verilerin işlenmesini ve şifreleme sürecini sağlar.

Tablo 4. S1 rotor kaydırma ve yeni değerleri modeli.

S1 Eski Rotor	S1 Yeni Rotor
0: 4	0: 9
1: 8	1: 2
2: 0	2: 6
3: 5	3: 3
4: 1	4: 7
5: 9	5: 4
6: 2	6: 8
7: 6	7: 0
8: 3	8: 5
9: 7	9: 1

Tablo 5. S2 rotor kaydırma ve yeni değerleri modeli.

S2 Eski Rotor	S2 Yeni Rotor
0:9	0:8
1:5	1:0
2:4	2:3
3:6	3:2
4:8	4:7
5:0	5:1
6:3	6:9
7:2	7:5
8:7	8:4
9:1	9:6

Bu işlemde, verilen eski değerler şifreleme algoritmasının rotorlar aracılığıyla nasıl dönüştürüldüğünü anlamak için detaylandırılmıştır. İşlem adımları şu şekildedir:

3.1 Eski değerlerin dönüştürülmesi

İlk olarak, her bir eski değeri S1 yeni ve S2 yeni rotorları kullanarak dönüştüreceğiz. Bu işlemde önce S1 yeni rotorundan, ardından S2 yeni rotorundan geçilerek sonuçlar elde edilecektir. Bu şekilde rotor dönüşüm adımları aşağıdaki gibi uygulanır.

- Örnek: Eski değeri 19 olan bir değeri ele alalım.
- S1 Yeni Rotoru: Değer 1 olduğunda, S1 yeni rotorunda 1 değeri, 2 değerine karşılık gelir.
- S2 Yeni Rotoru: Elde edilen 2 değeri, S2 yeni rotorunda da 3 değerine karşılık gelir.
- Sonuç olarak, 1 değeri 1'den 3'e dönüştürülür.
- Aynı işlemi diğer değerler için de uygulayacağız. Buna göre eski değeri 9 olan değer için işlemi uygularsak:
- S1 Yeni Rotoru: Değer 9 olduğunda, S1 yeni rotorunda 9 değeri, 1 değerine karşılık gelir.
- S2 Yeni Rotoru: Elde edilen 1 değeri, S2 yeni rotorunda 0 değerine karşılık gelir.

Sonuç olarak, 9 değeri 0'e dönüştürülür. En sonunda 19 giren değer rotorlardan 30 olarak çıkar.

Eski değerlerin tamamı üzerinde bu dönüşüm işlemi yapılır ve yeni değerler elde edilir. Bu işlemde sırasıyla elde edilen yeni değerler şunlardır: 30, 27, 4, 74, 50, 24, 51, 1, 53, 94, 52, 36.*

Bu dönüşüm işlemi, belirli bir algoritmanın parçası olarak verilerin güvenli bir şekilde şifrelenmesi amacıyla gerçekleştirilir. Fakat ilk önce anahtar değerimizin sayısal değeri S3 rotorundan geçmesi gereklidir. Anahtar değerlerinin işlenmesi şu adımlarla gerçekleştirilir:

3.2 Anahtarın sayısal toplamı ve mod 10 hesaplaması:

Anahtarın sayısal değerleri toplanır ve bu toplamın mod 10 değeri hesaplanır. Bu değer, Tablo 6 ile gösterilen S3 rotorundaki kaydırma miktarını belirler. Elde edilen kaydırma miktarı bir sonraki aşama olan XOR işlemi için tek veya çift olma durum kontrolüne göre S3 rotorundan geçen sayıların tersten ya da aynen yazılmasını da belirler.

Mod 10 sonucuna göre:

- Tek ise: S3 rotorundan çıkan değerler XOR işleminde tersten yazılır.
- Çift ise: S3 rotorundan çıkan değerler XOR işleminde aynen yazılır.

Bu adımlar, şifreleme sürecinin anahtar yönetimini ve verilerin güvenliğini sağlar.

Tablo 6. S3 rotor kaydırma ve yeni değerleri modeli.

S3 Eski Rotor	S3 Yeni Rotor
0: 4	0: 3
1: 2	1: 0
2: 8	2: 1
3: 5	3: 9
4: 6	4: 7
5: 3	5: 4
6: 0	6: 2
7: 1	7: 8
8: 9	8: 5
9: 7	9: 6

Anahtar Tablo değerleri: 49, 37, 56, 41, 49, 11, 56, 45, 21
S3 Rotorundan Çıkan Değerler: 76, 98, 42, 70, 76, 0, 42, 74, 10

Bu çalışmada verilen değerlerin şifreleme işlemi şu şekilde gerçekleştirilmiştir: Öncelikle, matris çarpımı ve karıştırma algoritmalarından elde edilen yeni değerler hesaplanmıştır. Bu değerler sırasıyla 30, 27, 4, 74, 50, 24, 51, 1, 53, 94, 52, 36 olarak elde edilmiştir. Ardından, bu değerler S3 rotorundan geçirilmiştir. S3 rotorunun kaydırma miktarı ve rotor değerleri göz önüne alındığında, elde edilen değerler 76, 98, 42, 70, 76, 0, 42, 74, 10 olarak bulunmuş fakat sonucun doğru hesaplanabilmesi için bu değerler tersten yazılarak 10, 74, 42, 0, 76, 70, 42, 98,76 şeklinde düzeltilmiştir. Çünkü mod 10 değerinden çıkan sonucun tek olmasından dolayı S3 rotorundan çıkan değerler tersten yazılmalıdır. Bu işlemlerden elde edilen sonuçlar Tablo 7 ile gösterilmektedir. Bu değerlerin ASCII' deki karşılığına bakarak elde edilen karakterleri görebiliriz.

Tablo 7. XOR işlem modeli.

Yeni değerler	30	27	4	74	50	24	51	1	53	94	52	36	
S3 Rotorundan çıkan değerler	10	74	42	0	76	70	42	98	76	10	74	42	(Tersten yazılır)
XOR Sonuçları	20	81	46	74	126	94	25	99	121	84	126	14	

XOR Sonuçları: Son olarak, elde edilen S3 rotor değerleri ile yeni değerlere XOR işlemi uygulanarak şifrelenmiş metin oluşturulmuştur. Bu işlem sonucunda elde edilen XOR sonuçları 20, 81, 46, 74, 26, 94, 25, 99, 121, 84, 126, 14 şeklindedir. Bu adımlar, verilerin güvenli bir şekilde şifrelenmesini sağlar ve sonuç, standart ASCII karakter tablosuna karşılık gelen metinle eşleşir. Örnek olarak şifrelenmiş değer içerisinde 20 sayısı standart ASCII tablosunda '\x14' hex karakterine, 81 sayısı ise Q karakterine tekabül eder. Diğer şifrelenmiş değerde bulunan sayılarda standart ASCII tablosundan tekabül ettiği karakterlere bakılarak yazılır. Bu şifrelenmiş değerler, mod 63 uygulanmaksızın, ASCII tablosundaki karşılık geldiği karakterle eşlenirse, şifrelenmiş metin

“14Q.J~^19cyT~0e” olmak üzere bu şifre metnin açılmış hali “14 Q. J ~ ^ 19 c y T ~ 0e“olarak elde edilir. Burada, dikkat edilirse, ASCII tablosunda 0-31 ve 127 değerlerine karşılık gelen herhangi bir karakter olmadığından bu değerlerin hex karşılıkları alınmıştır.

Sonuç olarak, XOR işlemi sonucunda şifrelenmiş metin elde edilmiştir. Anahtar uzunluğumuz 9 karakter ve düz metin uzunluğumuz 6 karakterdir. Matris çarpımının doğası gereği, 3 × 4’lük bir matris ile 4 × 4’lük bir matris çarpıldığında, 3 × 4’lük bir matris elde edilir. Bu nedenle, şifreleme sürecinde her zaman 12 karakterli bir çıktı elde ederiz. Anahtar uzunluğunun 9 karakter olması, anahtarın 3 kez tekrar etmesine neden olmaktadır. Ancak, matris çarpımı, mod 63 işlemi, indeks karıştırma algoritmaları ve S1, S2, S3 rotorları sayesinde farklı değerler elde edilebilmektedir. Bu açıklanan süreç, şifreleme işlemini gerçekleştirmektedir.

3.3 Deşifreleme işlemi

Deşifreleme işlemi ise şifreleme adımlarının tersine gerçekleştirildiği ve şifrelenmiş metni veya veriyi anlaşılır bir biçime dönüştürmek için belirli adımları içerir. Bu süreç aşağıda ifade edilen işlemler kümesi ile uygulanır. İşlem verinin gizliliğini ve güvenliğini korurken, doğru anahtar ve algoritma kullanılarak geri dönüşüm imkânı sağlar.

Deşifreleme işlemini gerçekleştirebilmek için öncelikle şifreleme sırasında kullanılan anahtara ve şifrelenmiş metne sahip olmamız gerekmektedir. Tablo 2 ile verilen anahtar ifadesi “matematik” değerleri XOR işlemine tabi tutularak sonuçlar Tablo 7 ile gösterilmiştir. Böylece bu değerlere göre şifrelenmiş metin olarak “14Q.J~^19cyT~0e” elde edilmiştir.

İlk adımda, şifrelenmiş metnin ASCII değerleri elde edilir. Bu işlem, şifreleme aşamasında kullanılan XOR işlemlerinin tersini uygulayarak orijinal değerleri geri elde etmeyi sağlar. Ancak, bu adım öncesinde anahtarın tablodaki değerlerine bakılmalı, bu değerler toplanmalı ve mod 10 değeri hesaplanmalıdır. Elde edilen mod 10 sonucu, S3 rotorundaki kaydırma miktarını belirleyecektir. Tablo 7 ile verildiği gibi bu kaydırma, şifreleme sırasında S3 rotorunun nasıl kaydırıldığını anlamak ve deşifreleme sürecinde doğru şekilde uygulamak için kritik öneme sahiptir.

Buna göre Tablo 2 ile verilen anahtar değerleri ile Tablo 6 ile verilen S3 rotor kaydırma işlemi ve yeni değerler kullanılarak deşifreleme işlemini uygulamaya devam edeceğiz. Böylece kaydırma işlemi için anahtar değerin tablo değerleri toplanır ve mod 10 değeri alınır. Bu değerlerin toplamı 49 + 37 + 56 + 41 + 49 + 37 + 56 + 45 + 21 = 391 olmak üzere mod 10 değeri 391 mod 10 = 1 olarak bulunur. Daha sonra bulunan 1 değeri, S3 rotorunda işleme tabi tutulup 1 kaydırma işlevini yerine getirerek yeni değerler elde edilir. Yeni değerler tekrar aynı şekilde 49, 37, 56, 41, 49, 11, 56, 45, 21 ve S3 rotorundan çıkan anahtar yeni değerleri de 76, 98, 42, 70, 76, 0, 42, 74, 10 olacak şekilde tekrar elde edilir.

Şifrelenmiş metnin ASCII değerlerini elde edilmesinin nedeni ise şifrelemede kullanılan XOR işlemini tersine çevirerek orijinal verilere ulaşmak içindir. Bu işlem, şifreleme sırasında uygulanan matematiksel ve algoritmik adımların tersini içerir. Öncelikle, anahtarın sayısal değerlerinin toplamı hesaplanır ve bu toplamın mod 10 değeri alınarak, deşifreleme sırasında S3 rotorundaki kaydırma miktarı belirlenir. Örneğin, “matematik” anahtarının ASCII değerlerinin toplamı 365 olarak bulunur. Bu değerin mod 10 sonucu 5 değeridir, yani S3 rotoru için 5 kaydırma yapılacaktır. Bu kaydırma sonucunda S3 rotorundan geçen değerler tersten yazılır.

Deşifreleme adımlarında, şifrelenmiş metindeki her bir değer, S3 rotorundan geçirilir ve kaydırma sonucunda elde edilen yeni değerlerle işlem yapılır. Bu yeni değerler, XOR işlemi kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılır. Sonuç olarak, şifrelenmiş metni geri elde edebilmek için XOR işlemi ve kaydırma adımlarının tersine uygulanır. Değerlerin tekrar etmesi, anahtarın yeterli olamaması nedeniyle bazı verilerin aynı kalmasına yol açabilir. Bu işlem, verinin güvenliğini sağlamak için kullanılan karmaşık algoritmaların etkinliğini test etmek açısından önemlidir.

XOR (eXclusive OR), yani “özel veya” işlemi, dijital mantıkta önemli bir işlemdir ve özellikle kriptografi gibi alanlarda sıkça kullanılır. XOR işleminin temel mantığı, iki girişin karşılaştırılması üzerine kuruludur. Giriş değerleri farklı ise sonuç 1, girişler aynı ise sonuç 0 olur. Bu sayede, iki bitlik veriyi karşılaştırarak onları şifreleme, hata bulma gibi işlemlerde kullanılabilir hale getirir. XOR işleminin tanımı:

Tablo 8. XOR işlem şeması.

Birinci bit	İkinci bit	XOR işlemi sonucu oluşan bit
1	0	1
0	0	0
1	1	0
0	1	1

Tablo 8 ile gösterilen işlem, özellikle şifreleme algoritmalarında (örneğin OTP- One Time Pad) kullanılır. Örneğin onluk sayı sisteminden iki sayı 45 ve 24 olmak üzere, bu sayılarının decimal (onluk) hallerini XOR işlemine sokalım. Ancak önce bu sayıları binary (ikilik) sisteme çevirmemiz gerekiyor, çünkü XOR işlemi binary değerler üzerinden yapılır. Bu sayıların sırasıyla ikilik sistemdeki karşılıkları Denklem 1 ile gösterilmiştir.

$$45 = 101101_2$$
$$24 = 011000_2 \quad (1)$$

Bu sayılar XOR işlemine tabi tutulduğunda ikilik tabanda 110101 değeri elde edilir. Elde edilen ikilik taban değerinin onluk tabanda karşılığı ise 53 sayına tekabül eder. Benzer işlemler her bir yeni değere uygulanırsa elde edilen XOR sonuçları Tablo 9 ile verilmiştir. Buna göre bulunan kaydırma oranı kullanılarak S3 rotoru tersten yazılmak suretiyle elde edilen değerler XOR ile işleme tabi tutularak yeni değerler "30, 27, 4, 74, 50, 24, 51, 1, 53, 94, 52, 36" olarak bulunmaktadır.

Tablo 9. XOR işlem modeli.

XOR Sonuçları	20	81	46	74	126	94	25	99	121	84	126	14	
S3 Rotorundan çıkan değerler	10	74	42	0	76	70	42	98	76	10	74	42	(Tersten yazılır)
Yeni Değerler	30	27	4	74	50	24	51	1	53	94	52	36	

S1 ve S2 rotorlarının kaydırma işlemleri, anahtarın mod 10 ile hesaplanan değerine göre belirlenir. Anahtarın ASCII değerlerinin toplamı alındıktan sonra bu toplamın mod 10 değeri hesaplanır. Bu mod 10 sonucu, S1 ve S2 rotorlarının kaydırma miktarını belirler. Kaydırma işlemi, rotorlardaki indekslerin konumlarını değiştirir. Bu sayede verinin şifrelenmesi veya deşifre edilmesi sürecinde rotorların etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar.

Tablo 4 ve Tablo 5 ile gösterilmiş olan bu değerler şifreleme işleminin tersi yönünde işleme tabi tutulup, daha sonra indeks karıştırma işleminden geçerek Tablo 2 ile verilmiş olan değerlerin orijinal halinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu yol, S2 rotorundan başlayarak geriye doğru S1 rotoruna giderek ilk değerleri elde etmemize yardımcı olur.

Şifrelenmiş metnin üzerindeki değerler, indeks karıştırma işleminden geçmiştir. Bu değerler Tablo 3 ile gösterilmiştir. Bu nedenle, bu değerlerin orijinal, karıştırma öncesi halleriyle elde edilmesi gerekmektedir. Bunun için, anahtar değerinin tablo değerlerinin toplamı hesaplanır ve mod 10 işlemi uygulanarak bir sonuç elde edilir. Bu sonuç, hangi karıştırma algoritmasının uygulandığını belirlemede kullanılır. Örneğin, anahtar değerinin toplamı 365 olup, bu değerin mod 10 işlemi sonucu 5 elde edilmiştir. Bu durumda, 5 değerine göre belirlenen karıştırma algoritması uygulanmıştır.

Tablo 3 ile indeks karıştırma algoritmasının kuralları verilmiştir. Deşifreleme işlemi yaparken tersten hareket edildiği için yukarıdaki işlemde anahtardan elde edilen mod 10 değeri ile çıkan sonuç değeri ile kural belirlenir, daha önceden karıştırılan değerler bu vasıta ile eski karıştırılmamış indekslerine geri getirilir. Çıkan değer 5, kuralı ise Tablo 3 ile gösterildiği gibi 1-2, 4-9 indeksleri yer değiştirmiştir. Bunu göz önünde bulundurarak eski değerlere doğru gidilir. Böylece en son 19, 6, 35, 56, 26, 36, 48, 8, 41, 49, 43, 10 değerleri elde edilir. (Bu değerler daha sonra kullanılarak düz metin elde edilecektir.)

Deşifreleme işlemi, şifrelenmiş veriyi geri dönüşüm sağlayarak orijinal düz metne ulaşmak için belirli adımları içerir. İlk olarak, anahtar matrisinin determinantı hesaplanır. Bu hesaplama modüler aritmetik işlemleri için kritik bir rol oynar. Şöyle ki matrisin determinantı sıfırdan farklı olması bize matrisin tersinin varlığını sağlayacaktır. Diğer taraftan determinant değeri ile 63 mod değeri aralarında asal olmalıdır. Bu özellik ise modüler tersin varlığını sağlamak için gereklidir. Bu iki şartın sağlandığı şifreleme aşamasında gösterilmişti. Böylece bu asal ilişki sağlandığından, determinantın modüler tersi bulunabilir ve bu değer, anahtar matrisinin tersini

hesaplamak için kullanılır. Daha sonra, şifrelenmiş değerler, anahtar matrisinin tersi ile çarpılır. Çarpım işlemi sonucunda elde edilen her bir değere mod 63 işlemi uygulanır. Bu adım, genellikle matrislerin belirli bir aralıkta kalmasını garantiler ve verilerin uyumlu bir şekilde analiz edilmesine olanak tanır. Sonuç olarak, bu işlemler neticesinde elde edilen değerler düz metne dönüştürülür. Bu adımlar, şifrelenmiş metni geri çözmek ve orijinal metni elde etmek için gerekli olan standart kriptografik işlemleri içerir. Bu işlemleri, işlem sırasına uygun olarak uygularsak determinant değeri ile anahtar matrisin ek matrisini kullanarak anahtar matrisin tersini genelleştirilmiş Öklid Algoritmasına göre mod 63 uygulayarak buluruz [1]. Böylece elde edilen yeni matris:

$$\begin{pmatrix} -41314 & -1638 & 79158 & -47594 \\ -76194 & 81338 & -7028 & -2548 \\ -31780 & -1260 & -31174 & 55454 \\ 103160 & -69724 & -45682 & -16562 \end{pmatrix} \quad (1)$$

olarak bulunur. Böylece başvuru matrisi olarak artık yeni elde edilen (1) matrisi kullanılacaktır. Şimdi şifrelenmiş verinin elde edilmesi için şifrelenmiş değer matrisi ile elde edilen başvuru matrisi çarpılır. Çarpım sonucunda elde edilen matris, başlangıçtaki verinin şifrelenmiş hali olarak kabul edilir. Burada, şifrelenmiş matrisin elemanlarının belirli bir aralıkta kalmasını sağlamak amacıyla, her bir eleman mod 63 işlemine tabi tutulur. Bu yöntem, özellikle sınırlı sayıda olasılığın bulunduğu tablolarda kullanılır ve veri bütünlüğünün korunmasına yardımcı olur. Böylece bu işlemle çıkan düz metin matrisi yeniden elde edilir. Tablo 2 ile verilmiş düz metin "sabah1" deşifrelenmiş metin olarak elde edilir.

Görüldüğü üzere birçok karmaşık işlemden geçmiş, çeşitli matematiksel yöntemlerle işleme tabi tutulup hesaplanmış yollarla şifreleme ve deşifreleme işlemi yapılmıştır. Böylece "matemAtiK" anahtarı ile şifrelediğimiz "sabah1" düz metnini tekrar anahtar kullanarak deşifreleme işlemine tabi tutup aynı düz metin elde edilmiştir.

4. Güvenliği Artırılmış Şifrelemenin Olasılık Hesabı

Bu bölümde ilk olarak şifreleme aşamasında oluşması muhtemel olan olasılık hesaplarını yaparak çalışmanın güvenilirlik seviyesinin üst seviyede olduğunu ve şifreleme yapısının frekans analizine karşı güçlü bir direnç sağladığının matematiksel hesaplarını vereceğiz. Bu hesaplamayı çalışmamızın güvenilirliğini arttırmak için kullandığımız kaydırma ve yer değiştirme işlemlerine bağlı olarak yapacağız. Bu işlemleri gösterebilmek için sırasıyla aşağıdaki olasılık hesapları yapılmalıdır.

4.1. Anahtar seçimi olasılığı: İlk olarak, anahtar seçiminde 63 karakterden oluşan bir tablo olduğunu ve anahtar uzunluğunun 9 karakter olduğunu belirtelim. Bu duruma göre olasılık hesaplarını yapıp karıştırma algoritması, S1 ve S2 rotorlarının da kriptografi algoritmasına katmış olduğu olasılığı analiz edelim. Bu durumda her karakterin olasılığı bulunur.

Burada her karakter bağımsız olarak seçildiği için olasılık 63 tabandaki her bir seçim için 1/63 ihtimali ile çarpılır. Böylece karakterlerin olasılığı toplam $(1/63)^9$ olmak üzere düşük ihtimalli bir olasılığı ifade eder.

4.2. Matris çarpımı ve mod 63: Şifreleme algoritmasında anahtar 4x4'lük, düz metin ise 3x4'lük bir matris olarak tanımlanmıştır. Şifreleme sürecinin bu aşamasında, iki matrisin çarpımı gerçekleştirilir. Matris çarpımı sonucunda elde edilen her bir eleman, mod 63 işlemi ile işlenir. Bu adım, şifreleme sürecinin temel taşlarından biridir ve şifrelenmiş verinin rastgelelik düzeyini artırarak frekans analizine karşı ek bir koruma sağlar.

Çarpım sonucu elde edilen her bir matris elemanına mod 63 işlemi uygulandığında, sonuçlar 0 ile 62 arasında bir değer aralığına indirgenir. Bu işlem, büyük sayıların daha küçük ve kontrol edilebilir bir alanda tutulmasını sağlarken, şifrelenmiş metindeki sembollerin frekanslarının homojen bir şekilde dağılmasına katkıda bulunur. Böylece, frekans analizine karşı direnç oluşturulmuş olur.

4.3 Karıştırma algoritması olasılık hesabı: Her karıştırma adımı, bir mod 10 sonucuna göre uygulanır ve 0'dan 9'a kadar olan değerlerden biri çıkabilir. Bu, 1/10 olasılığa sahiptir. Bu durumda karıştırma işlemi uygulanacak ve karışıklık indekslerine bağlı olarak permütasyon yapılacaktır.

Bir adımda, belirli indeksler arasında 4 farklı yer değiştirme uygulanmaktadır (örneğin, 0-5, 3-7 gibi).

Bu işlemde her iki indeks arasında farklı yer değişimleri vardır. Bir adımda 4 indeks yer değiştirdiği için, bu adımda olasılıkları hesaplarken 4! kullanılırız, çünkü bu 4 indeksin tüm permütasyonları dikkate alınmalıdır. 4! = 24 değerine eşittir. Dolayısıyla, her karıştırma adımında mevcut 4 indeksin farklı dizilimlerinden biri seçileceği için, bu adımın toplam karıştırma olasılığı ise 1/240 olarak bulunur.

4.4. S1 ve S2 rotorlarının olasılığı: S1 ve S2 rotorları, anahtar değerlerine bağlı olarak mod 10 ile belirlenen bir kaydırma işlemi gerçekleştirir. Her iki rotor için de kaydırma olasılığı, mod 10 işleminin sonucuna göre belirlenir ve S1 ve S2 rotoru için her bir olasılık değeri 1/10 olarak bulunur.

S1 ve S2 rotorlarının kaydırma işlemleri bağımsız olduğundan, her rotor kendi kaydırma olasılıkları çerçevesinde işlem yapar. Bu işlem, her rotorun farklı bir kayma miktarı ile çalışmasına olanak sağlar. Örneğin, S1'in bir kaydırma yapması ve S2'nin iki kaydırma yapması gibi farklı durumlar, olasılık hesaplamasına ek bir katman getirir. Bu adım, frekans analizine karşı algoritmanın güvenliğine önemli bir katkı sağlar, çünkü her rotor, her seferinde farklı sonuçlar üretebilir.

4.5. S3 rotoru ve XOR işlemi olasılığı: S3 rotorunda da benzer şekilde mod 10 ile belirlenen kaydırma işlemi yapılır. Bu, 1/10 olasılığa sahiptir. Ancak bu rotorun farkı, mod 10 sonucuna göre elde edilen değerin ters çevrilip çevrilmeyeceğidir. Bu işlemde iki olasılık vardır: Değer ya aynı kalır ya da tersine çevrilir yani 1/2 değerini alır. Bu durumda her bir kaydırma sonucunun olasılığı S3 rotoru için 1/20 olarak bellidir.

Bu aşamada, mod 10 sonucuna bağlı olarak kaydırma sonrası elde edilen değerlerin bir kısmı tersine çevrilir. Ardından, XOR işlemi devreye girer ve bu kaydırmalar ile elde edilen değerler, algoritmanın sonraki adımlarında kullanılmak üzere işlenir.

4.6. Frekans analizine karşı direnç: Algoritmanın frekans analizine karşı direncini değerlendirmek için, şifreleme sürecindeki her adımın şifreli metin üzerindeki etkisini ve genel olasılık dağılımını incelemeliyiz:

Matris Çarpımı ve Mod 63 İşlemi: Matris çarpımının ardından uygulanan mod 63 işlemi, şifreli karakterlerin olasılık dağılımını homojen hale getirir. Her bir şifreli karakterin 0 ile 62 arasında eşit olasılıkla ortaya çıkması sağlanır. Bu homojen dağılım, şifreli metinde belirgin frekans paternlerinin oluşmasını engeller ve frekans analizini zorlaştırır.

Karıştırma Algoritması ve Permütasyonlar: Karıştırma algoritması, mod 10 sonucuna göre belirlenen ve her biri farklı permütasyonlara sahip yer değiştirmeleri içerir. Örneğin, 4 indeksin yer değiştirmesiyle oluşan permütasyonların sayısı 4!= 24 olarak bellidir. Bu yüksek permütasyon sayısı, şifreli metindeki karakter dizilimlerini büyük ölçüde çeşitlendirerek frekans analizine karşı ek bir koruma sağlar.

S1, S2 ve S3 Rotorları: Rotorlar, anahtar değerlerine bağlı olarak farklı kaydırma işlemleri uygularlar. S1 ve S2 rotorlarının kaydırma olasılıkları 1/10, S3 rotorunun ise 1/20 olarak tanımlanır. Bu rotorlar, şifreleme sürecine ek rastgelelik katarak kriptanaliz saldırılara karşı direnci artırır.

XOR İşlemi: Son aşamada gerçekleştirilen XOR işlemi, önceki adımlardan elde edilen değerleri anahtar ile birleştirerek şifreli metnin düzenini daha da karmaşık hale getirir. Bu işlem, düz metin ile şifreli metin arasındaki doğrudan ilişkileri gizleyerek frekans analizinin etkinliğini azaltır.

4.7. Toplam olasılık hesaplaması: Şifreleme algoritmasının toplam olasılık değerini hesaplayabilmek için 4.1, 4.3, 4.4 ve 4.5 alt bölümlerinde verilen olasılık değerlerinin çarpımı bize toplam olasılıkların değerini verecektir. Böylece toplam olasılık değeri 1.33×10^{-22} olarak hesaplanır.

Bu hesaplama sonucunda algoritmanın kırılma olasılığı oldukça düşük seviyelere ineceği açıkça ortaya konmuştur. Her adımın karmaşıklığı ve şifrelenmiş metnin frekans düzenlerinin bozulması, olası saldırılara karşı yüksek bir direnç seviyesi sağlar.

Sonuç olarak, algoritmanın her aşamasında uygulanan olasılık hesaplamaları, şifreleme yapısının frekans analizine karşı güçlü bir direnç sağladığını matematiksel olarak kanıtlamaktadır. Bu, algoritmanın güvenlik seviyesinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

5. Sonuç

Bu çalışmada, şifreleme ve deşifreleme süreçlerinin detaylı incelenmesi, kullanılan algoritmaların mantığının ve adımlarının açıklanması amaçlanmıştır. Şifreleme ve deşifreleme işlemleri, modern kriptolojinin temelini oluşturan matris çarpımı, modüler aritmetik ve rotor sistemleri gibi matematiksel ve teknik bileşenleri içerir. İlk aşamada, şifrelenecek metin belirli bir anahtar kullanılarak şifrelenmiştir. Şifreleme işlemi için ilk aşamada anahtar matris kullanımı için belirlenen kelimenin ASCII değerleri ve bunların belirli bir tabloya göre mod 10'na göre sonuçları ile işleme tabi tutularak rotorlar vasıtasıyla kaydırma işlemi uygulanarak yeni değerler elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen yeni değerler, belirli bir algoritma ile karıştırılarak ve mod 63'e göre şifrelenmiş metin oluşturulmuştur. Bu süreçte XOR işlemleri sayesinde verilerin güvenli bir şekilde şifrelenmesini sağlamıştır. Daha sonra ise çalışmanın en önemli kısmını oluşturan şifrelenmiş metni geri çözmek için deşifreleme işlem kısmıdır. Bu kısım birçok önemli aşamalardan oluşmaktadır. İlk olarak deşifreleme sürecindeki anahtar matrisinin

determinantı hesaplanmalıdır. Çünkü bu matrisin determinantının modüler tersinin kontrolü ve determinant ile mod 63 arasındaki asal ilişkiyi ortaya koyması açısından çok önemlidir. Böylece anahtar matrisin tersinin bulunması formülü kullanılarak, şifrelenmiş metni geri çözme işlemi başlatılmıştır. Daha sonra da modüler ters aritmetik uygulanması ile şifrelenmiş değerler düz metne dönüştürülmek üzere, mod 63'e göre yeniden düzenlenmiştir.

Bu çalışmamızda, hesaplamalar için Python 3.8.10 sürümü kullanılmıştır ve mevcut şifreleme yöntemlerinin zayıf yönlerinin işlemlere etkisini azaltarak oluşturulan yeni yöntem sayesinde daha sağlam ve güvenilir bir yapı oluşturulmuştur. Bu sayede, güvenlik ve performans gereksinimlerini karşılayan, yenilikçi ve etkili bir şifreleme yöntemi sunulmuştur. Geliştirdiğimiz karma teknik, özellikle büyük ölçekli veri güvenliği, iletişim güvenliği ve kaynak kısıtlı sistemlerde etkili çözümler sunarak hem teorik hem de pratik açıdan literatüre değerli bir katkı sağlamaktadır. Ayrıca çalışmamız kriptografi alanında önemli bir yenilik olarak değerlendirilebilir ve bu yönü ile de ileriye dönük araştırmalara da ilham verecektir.

Kaynaklar

[1] Akleylek S, Akyıldız E ve Çimen C. Şifrelerin matematiği: Kriptografi. ODTÜ Yayıncılık, 2007.
[2] Beşkirli A, Özdemir D ve Beşkirli M. Şifreleme yöntemleri ve RSA algoritması üzerine bir inceleme. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2019; (Özel Sayı), 284-291.
[3] Topaloğlu N, Calp MH ve Türk B. Bilgi Güvenliği Kapsamında Yeni Bir Veri Şifreleme Algoritması Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. Bilişim Teknolojileri Dergisi 2016; 9(3) 291-300.
[4] Birer GC. Kriptoloji. Bilim ve Teknik 2022; 17-31.
[5] Gümüş E. Kuantum kriptografi ve anahtar dağıtım protokolleri. Akademik Bilişim'11- XIII. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri; 2-4 Şubat 2011; İnönü Üniversitesi, Malatya. 547-552.
[6] Avaroğlu E. Bilgi güvenliğinin temel yapı taşı: Kriptoloji. Düşünce Dünyasında Türkiz 2017; 8(43), 53-65
[7] Freeman P. Julius Caesar. İstanbul: Kronik Kitap, 2019.
[8] Çiftçi H. Her Yönüyle Siber Savaş. Ankara: TÜBİTAK Yayınları, 2013.
[9] Chindhe AD. and Kiwne S. Application of Natural Transform in Cryptography. Journal of New Theory, 2017; (16), 59-67.
[10] Gençoğlu MT. Kriptolojide İntegral Dönüşümünün Kullanımı. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2016; 28(2), 217-220.
[11] Gencoglu MT. Embedded image coding using laplace transform for Turkish letters. Multimed Tools Appl 78 2019; 17521–17534.
[12] Gençoğlu MT. Cryptanalysis of a new method of cryptography using Laplace transform hyperbolic functions. Communications in Mathematics and Applications 2017; 8(2), 183–189.
[13] Güney Duman M and Duman M. Encryption and Decryption of the Data by Using the Terms of the Lucas Series. Duzce University Journal of Science and Technology 2021; 9(3), 1-7.
[14] Zengin M and Albayrak Z. Designing a new data encryption algorithm using a genetic code method.Acta Polytechnica Hungarica 2022; 19(2), 235-252.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 223-232, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1538296

Effect of Infill Density and Infill Pattern on Mechanical Properties of 3D-printed PLA Produced by FFF

Özlem AKÇAY[1*], Ali ARI[2]
[1] Department of Automotive Technology, Kahramankazan Vocational School, Başkent University, Ankara, Türkiye
[2] Department of Weapon Industry Technician, Vocational School of Higher Education, OSTİM Technical University, Ankara, Türkiye
[*1] ozlemakcay@baskent.edu.tr, [2] ali.ari@ostimteknik.edu.tr

(Geliş/Received: 09/09/2024; Kabul/Accepted: 03/01/2025)

Abstract: With the rapid advancements in Additive Manufacturing (AM) technology, examining the mechanical properties of products utilized in this process has become increasingly important. The mechanical properties of 3D-printed products are significantly influenced by the choice of printing methods and printing parameters. Despite ongoing progress, research exploring these effects remains limited. Therefore, the aim of this study is to examine the effects of these production parameters on samples produced with PLA material with different infill densities and infill patterns using the fused filament fabrication technique, one of the AM methods. For this purpose, test samples with five patterns (cubic, tri-hexagon, octet, grid, and zigzag) and two densities (50%, 60%) were produced. In addition, 100% infill density was created with a solid infill pattern and selected as a reference. Mechanical tensile and Charpy tests were conducted on all samples. The results indicate that infill parameters have significant effects on the energy absorption and tensile strength of 3D-printed products. Printing patterns influence the tensile strength of printed structures, with octet-patterned structures showing the maximum tensile strength at 42 MPa and the highest energy absorption value at 16.94 kJ.mm^{-2}. Furthermore, it was found that the tensile strength increases with increasing infill density. The values obtained from the mechanical tests in this study will serve as a reference for selecting the correct infill parameters in the slicing program for 3D-printed products requiring high-strength.

Key words: Additive manufacturing, poly lactic acid (PLA), infill density, infill pattern, tensile and charpy test.

FFF Kullanılarak Üretilen 3D Baskılı PLA'nın Mekanik Özellikleri Üzerinde Dolgu Yoğunluğu ve Dolgu Deseninin Etkisi

Öz: Eklemeli imalat (AM) teknolojisinin gelişmesiyle bu teknolojide kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek giderek daha önemli hale gelmektedir. Farklı baskı yöntemleri ve üretim parametrelerinin kullanılması, 3D-baskılı malzemelerin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Ancak bu konuda araştırmalar hala sınırlıdır. Dolayısıyla, bu çalışmanın hedefi, AM metodu kullanılarak farklı dolgu yoğunluklarına ve dolgu desenlerine sahip PLA malzeme ile üretilen numuneler üzerinde bu dolgu işlem parametrelerinin etkilerini incelemektir. Bu amaçla beş dolgu desenine (cubic, tri-hexagon, octet, grid and zig zag) ve iki dolgu yoğunluğuna (50%, 60%) sahip test numuneleri üretilmiştir. Ek olarak %100 dolgu yoğunluğu, desensiz katı dolguya sahip olacak şekilde oluşturulmuş ve referans olarak seçilmiştir. Tüm numunelere mekanik çekme testi ve Charpy testi uygulanmıştır. Sonuçlar, doldurma parametrelerinin üç boyutlu olarak basılmış yapıların enerji emilimi ve çekme dayanımı üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Baskı desenleri, basılan yapıların çekme dayanımını etkiler, özellikle octet desenli yapıların, 42 MPa ile en iyi çekme dayanımı ve 16,94 kJ.mm^{-2} ile en yüksek enerji emilim değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca dolgu yoğunluğunun artması ile çekme mukavemetinin de arttığı belirlenmiştir. Bu çalışmanın mekanik test sonucunda elde edilen değerleri, yüksek mukavemetli mekanik özelliklere ihtiyaç duyan 3B baskı ürünlerinde kullanılacak dilimleme uygulamasında doğru dolgu parametrelerini seçmede bir referans olacaktır.

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, poly lactic acid (PLA), dolgu yoğunluğu, dolgu deseni, çekme ve darbe test.

1. Introduction

Additive manufacturing technology is known as a production method that provides the model designed in a computer-aided environment to be processed layer by layer in a single part, unlike traditional production methodologies and presented as a three-dimensional products [1]. This technology has become widely used in recent years due to its advantages over existing methods in producing difficult geometrically complex parts [2]. Additive manufacturing, which is a practical method that allows direct transition from the design stage to the manufacturing stage, has attracted great interest in many sectors such as automotive, aerospace, construction, and

[*] Corresponding author: ozlemakcay@baskent.edu.tr. ORCID Number of authors: [1] 0009-0002-2316-6540, [2] 0000-0003-2702-2982

medicine [3]. The AM method, which provides freedom and improvement in design, has shown excellent potential both in quickly producing complex-shaped parts and in reducing product development costs [4].

With the development of the AM method, many different production processes have been developed based on materials, techniques, and the technology used [5]. Selective laser sintering (SLS), fused filament fabrication (FFF), Stereolithography (SLA), 3D inkjet printing (binder jetting), and laminated object manufacturing (LOM) are examples of 3D printing techniques [6]. Among these techniques, one of the most used is Fused Deposition Modeling [7]. Due to its purchasing capability, printing speed, eco-friendliness, and the presence of various desktop printer models, it is the most popular 3D printing method [8].

FFF method has become one of the widely used additive manufacturing methods due to its ease of use, low cost, flexible selection of polymeric materials, and fewer post-processing operations [9]. Knowing the mechanical properties of structures produced by this method is crucial for efficient operation in their areas of use [10]. The mechanical behavior is influenced by the properties of the printed material and the printing parameters [11]. Examples of these parameters include build direction, line width, infill density, and printing speed [12]. Mechanical testing methods are used to determine the influences of these parameters [13]. Research on determining the mechanical behavior of materials produced using the FFF method has significantly increased [14].

Z. Ali et al [15]. investigated the influences of build direction and infill parameters (density, pattern) on unreinforced and carbon fiber-reinforced composites. According to the results obtained, they found that a 50% filler density and a triangular infill pattern outperformed other types of filler. They concluded that reinforced and unreinforced composites exhibited lower tensile strength in the flat build direction than in the side direction but had higher toughness. S. Garg et al [16]. aimed to examine the mechanical behaviors of samples produced with different filler parameters. To determine the optimal conditions, they tested samples produced with three different infill patterns (Grid, Triangle, and Gyroid) and various infill densities (40%, 60%, 80%, and 100%). They found that the grid pattern had the maximum tensile strength and provided better interlayer adhesion than the other two patterns. M. Naik et al [17]. studied the mechanical testing of Multi-Infill Pattern (MIP) samples produced with additive manufacturing. They used PLA as the material for producing test specimens and examined the material's thermal stability using Thermal Gravimetric Analysis (TGA). In this study, they selected straight and edge orientations as build directions. The MIP specimens they produced consist of lattice, triangle, and rectangle patterns with infill densities of 25%, 50%, 75%, and 100%. The results showed that the printing orientation affected the fracture toughness of the MIP specimen. They observed higher fracture toughness and fracture toughness-to-mass ratio in the edge-oriented MIP specimen. Additionally, they concluded that a MIP specimen had higher fracture toughness compared to a single infill pattern specimen. M. Rismalia et al [18]. conducted a study on the influences of different production parameters (density, pattern) in PLA material. Test samples were produced with selected filler densities (25%, 50%, and 75%) and filler patterns (grid, triangle-hexagon, concentric), and mechanical tests were performed on these samples. The results of the mechanical tests showed that as the filler density increased, the tensile properties also increased. They determined that the concentric infill pattern had the highest tensile properties.

Literature studies have been examined and, according to these studies, mechanical properties have a significant impact on how well the material works. The production parameters have a great impact as well as the importance of the production technique used to create cellular structures using thermoplastic materials. Because it is effective in performing fewer operations, saving time and reducing production costs.

In this study, the aim was to examine the influences of infill parameters on PLA samples with different infill densities and various infill patterns using additive manufacturing. For this purpose, samples with two infill densities (50%, 60%) and five different infill patterns (cubic, grid, tri-hexagon, octet, zigzag) were produced on a 3D printer. In addition, samples with 100% infill density were selected as a reference due to their solid infill being generated by Ultimaker Cura slicing software. The produced samples underwent mechanical tensile testing, and Charpy testing, and the surfaces of the broken samples were examined using a scanning electron microscope (SEM). All tests were repeated three times.

2. Materials and Methods

In this work, the mechanical properties of samples produced using the additive manufacturing method with PLA material having different infill densities and infill patterns were examined, and the stages of the study is presented in Figure 1.

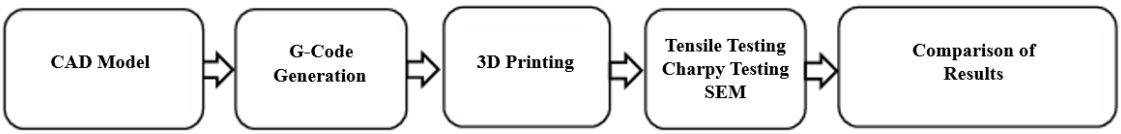


Figure 1. Stages of study.

Orange PLA thermoplastic filament with a diameter of 1.75 mm, produced by Tinylab, was chosen as the printing material to be used in the study, and its mechanical properties are given in Table 1. This material was chosen due to PLA being the most used polymer in 3D printing.

Table 1. Mechanical properties of PLA filament [19].

Properties	Units	Value
Melting Point	°C	190-220
Density	g/cm^3	1.20-1.25
Diameter of Filament	mm	1.75
Tensile Yield Strength	MPa	62.63
Elongation at Break	%	4.43
Flexural Strength	MPa	65.02
Flexural Modulus	MPa	2504.4
Impact Strength	KJ/m^2	4.28

2.1. 3D modeling and G-Code generation

The Solidworks software, a computer-aided design (CAD) program, was used to model the test samples. Tensile samples were designed in the dimensions specified by ISO 527-2 standard (170 x 20 x 6 mm), while Charpy test samples were designed using ISO 179-1 standard dimensions (80 x 10 x 4 mm) without notches [20]-[21] (see Figure 2).

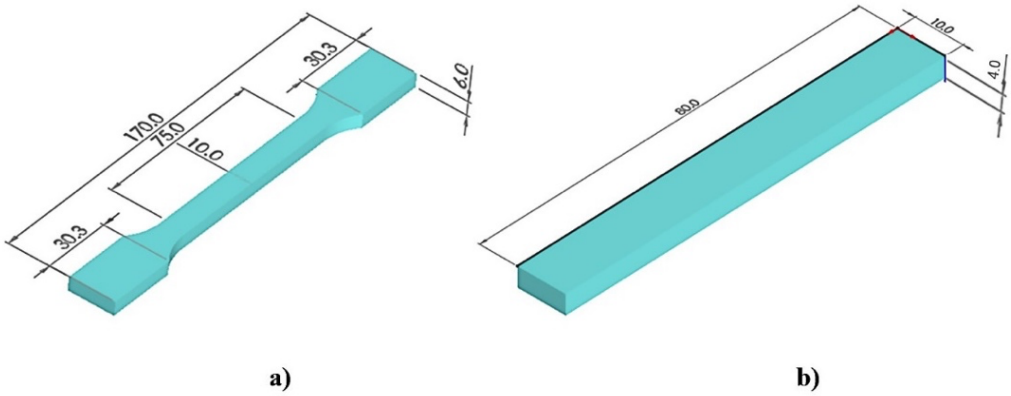


Figure 2. CAD model dimensions; a) Tensile test b) Charpy test.

The CAD files of the designed samples have been converted to the appropriate STL format for the 3D printer. Then, the 3D model was transferred to slicing software in STL format. Ultimaker Cura software was used for the slicing interface program. Test specimens in the Cura program were arranged to have infill densities (50%, 60%) along with different infill patterns (grid, octet, cubic, zigzag, and tri-hexagon) as shown in Figure 3. Within the slicing program, production parameters such as nozzle diameter, infill pattern directions, printing temperature, plate temperature, and printing speed are the same for all samples, while infill density and infill pattern are set as variable parameters. After slicing, the G-codes required to produce the specimens' adjusted printing parameters were generated. The parameters specified in Table 2 were used in the generation of the G-codes for the specimens, and these G-codes were introduced to the 3D printer.

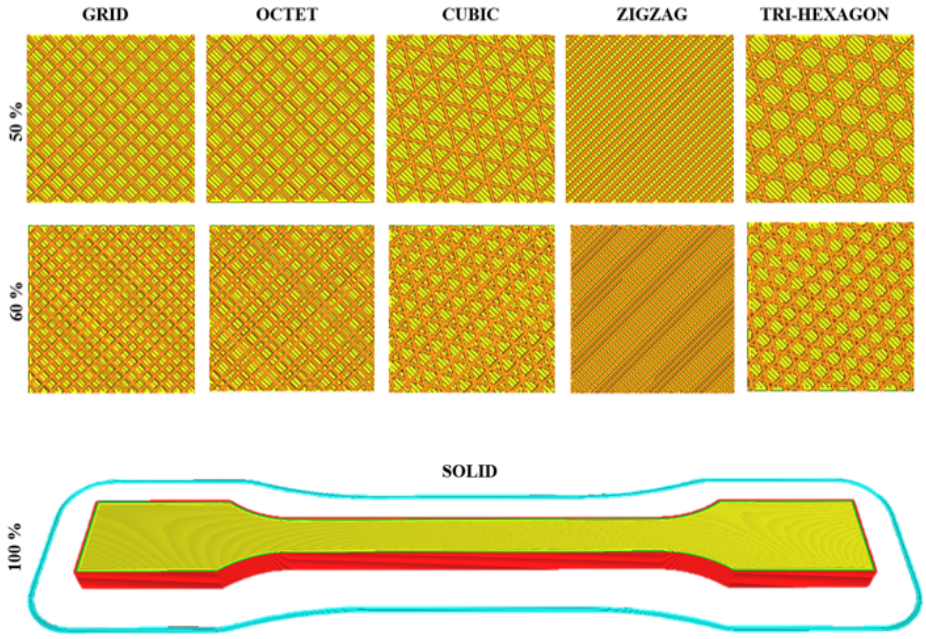


Figure 3. Infill density and infill patterns used for making the specimens.

Table 2. 3D printing parameters used in the production of test specimens.

	Parameter	Units	Value
Infill	Infill Pattern Raster Angle	 °	cubic, grid, tri-hexagon, octet, zigzag ±45
Nozzle	Nozzle Diameter Material Diameter	mm mm	0,4 1,75
Material	Filament Type Filament Color Printing Temperature Plate Temperature	 °C °C	PLA Orange 220 50
Speed	Printing Speed	mm/s	50
Cooling	Fan Speed	%	100

2.2. 3D printing with FFF

The G-codes of the test specimens were transferred to the 3D printer shown in Figure 4 (Creality Ender 3 V2 Neo brand) for production. On the build platform of this printer, layers were obtained by melting PLA filament at 220°C printing temperature by the extruder and stacking them on the 50°C plate. Specimens were obtained by adding these layers on top of each other. For all tests, three specimens were produced using PLA material in the 3D printer at a printing speed of 50 mm/s with grid, octet, cubic, zigzag, and tri-hexagon infill patterns along with

different infill densities (%50, %60). In addition, solid infill test specimens with 100% infill density were selected as a reference and produced.



Figure 4. Creality Ender 3 V2 Neo 3D printer.

2.3. Mechanical testing

A BESMAK BMT 100S branded tensile testing machine was used to determine the tensile strengths of the produced samples. The tensile module was tested at 23°C ambient temperature, 2 mm/min speed, and 50% humidity according to ISO 527-2 standard. To determine the energy absorption of the materials, Charpy testing of specimens produced according to the ISO 179-1 standard was conducted using the TESTFORM Charpy test machine. Following the tensile test, SEM images of the fractured surfaces were taken with a HITACHI-TM3030 PLUS machine to examine the fracture behaviors of the parts.

3. Results and Discussion

3.1. Tensile test results

The stress-strain curve along with the Young's modulus and tensile strength graphs obtained from the tensile test of samples produced using PLA material are shown in Figures 5-7.

The 100% solid infill density chosen as reference offers the maximum stress-strain. As shown in Figure 5, stress-strain curves fluctuate according to the filler density and pattern. Generally, the curve indicates that as infill density increases, the tensile properties also increase.

When examining the results of 50% density samples, octet has the maximum stress-strain curve, while grid has the minimum value. The strength order among specimens with 50% infill density is octet > tri-hexagon > cubic > zigzag > grid infill patterns.

According to the results of test specimens produced with 60% infill density, it is determined that the octet has the highest tensile strength, while the grid has the lowest strength, and the octet infill pattern is approximately 23.2% better than the grid. When comparing the infill pattern varieties in terms of strength order, octet shows approximately 14.34% better tensile strength than tri-hexagon, 1.7% better than cubic, 1.4% better than zigzag, and 9% better than grid.

Comparing all specimens, the octet 60% yielded the best result, followed by the octet 50%. Thus, it has been shown that octet samples have higher tensile strength according to other fill pattern types. This situation demonstrates the influence of pattern varieties on strength.

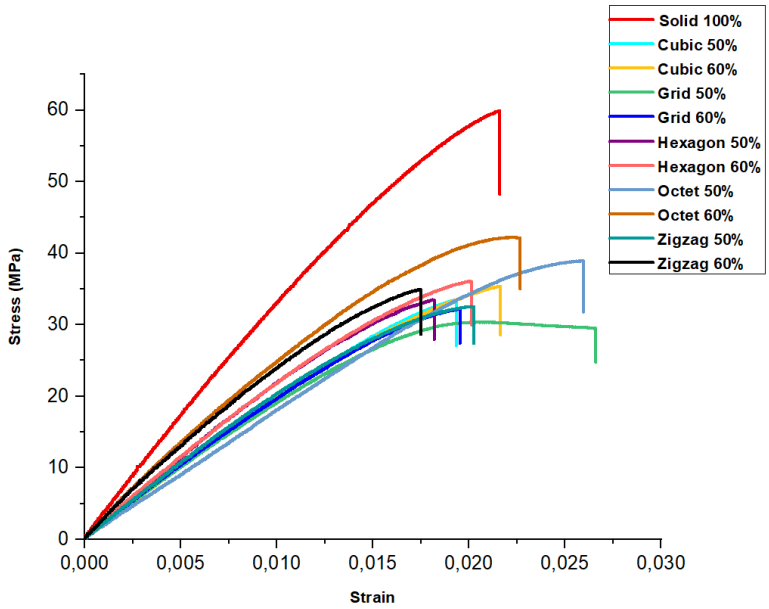


Figure 5. Stress-strain curves.

From the Young's modulus graph of the test samples in Figure 6, it is noted that the octet 60% offers the highest Young's modulus with 2744 MPa. Based on the result obtained, it is seen that the octet 60% offers additional resistance against elastic deformation compared to grid, cubic, tri-hexagon, and zigzag infill patterns. Additionally, Figure 8 indicates that as the infill density increases, Young's modulus also increases.

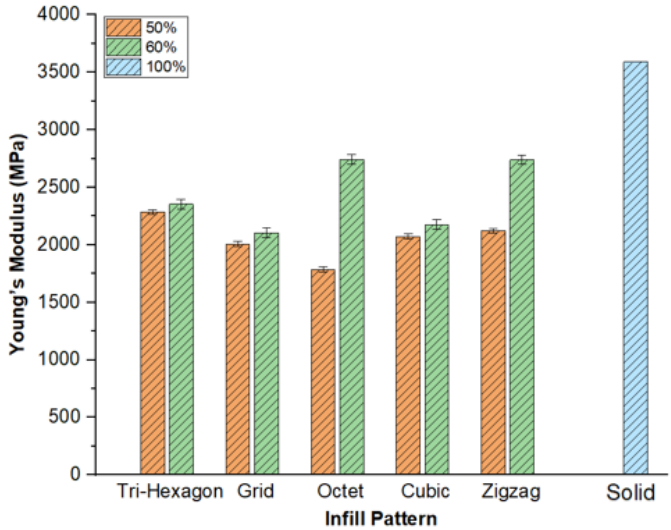


Figure 6. Young's Modulus graph.

From the tensile strength graph shown in Figure 7, it can be observed that the octet has tensile strengths of 38.95 MPa and 42.23 MPa at 50% and 60% infill densities, respectively. It has been determined that the octet has a higher tensile strength according to the tri-hexagon, cubic, zigzag, and grid fill patterns. This can be attributed to the octet structure performing better or the structures having lower void content. Therefore, the higher tensile strength is achieved by more bond formation. Additionally, the graph shows that when the filling density increases, the tensile strength also increases. Tensile test results are presented in Table 3.

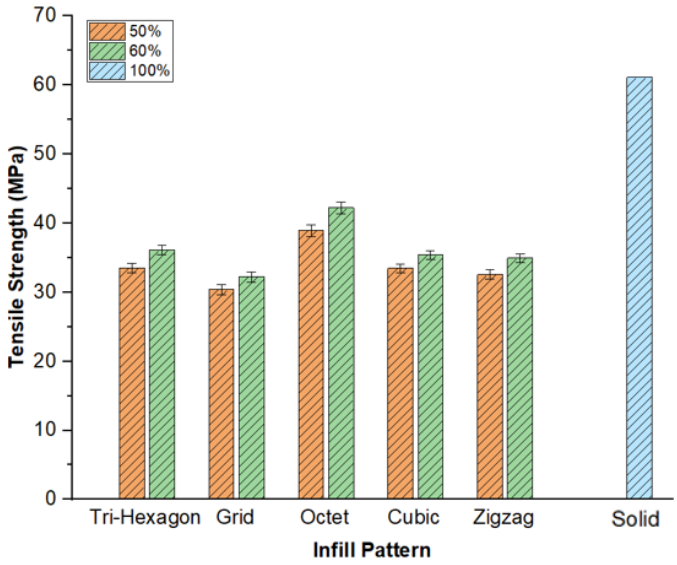


Figure 7. Tensile strength graph.

Table 3. Results of the tensile strength.

Infill Density and Pattern	50%	60%	100%
Solid	-	-	61.10
Tri-Hexagon	33.51	36.08	-
Grid	30.39	32.22	-
Octet	38.95	42.23	-
Cubic	33.47	35.40	-
Zigzag	32.55	34.94	-

3.2. Charpy test results

Charpy test results graph shown in Figure 8. Among the samples with density of 50%, it is observed that the pattern with the maximum energy absorption value is octet, and the pattern type with the minimum energy absorption value is tri-hexagon. Also, it is observed that the energy absorption values of the grid and cubic are close to tri-hexagon. It has been found that the octet has an 11.4% better energy absorption value compared to the tri-hexagon infill pattern. The second-best result zigzag infill pattern shows a 7.8% better energy absorption value compared to the tri-hexagon.

When comparing the values of Charpy samples with a 60% infill rate, again, the octet showed better energy absorption capability compared to other infill pattern types. The minimum value is 13.53 $kJ.mm^{-2}$, belonging to the grid. It has been concluded that Octet's energy absorption value is 20.13% better than the grid. The order of energy absorption values among the test specimens with 60% infill density is octet > zigzag > tri-hexagon > cubic > grid filler pattern.

When all the charpy test data of the specimens are examined, the test specimen with the highest energy absorption value is solid 100% with 18.12 kJ.mm^{-2}. The second highest value is the octet 60%, which has a 6.5% less energy absorption value compared to the solid 100%. It has been shown that the octet has a higher energy absorption value compared to other infill pattern types and that the use of the octet infill pattern is more suitable in conditions requiring energy absorption.

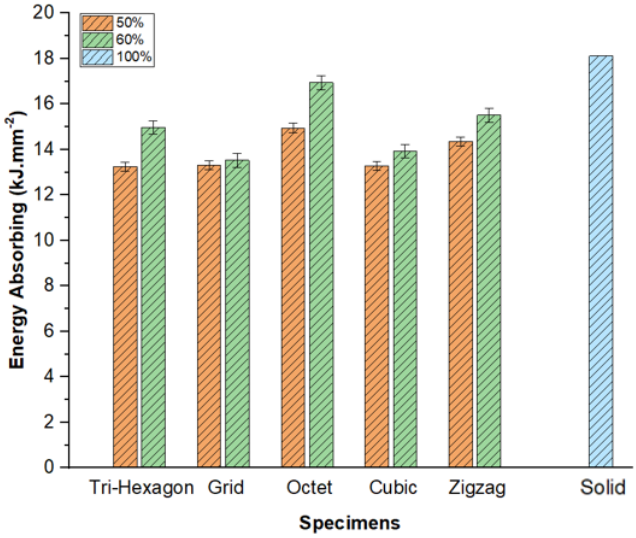


Figure 8. Graph of Charpy test results.

3.3. Investigation of fracture behavior of specimens

In Figure 9, the fracture surfaces of the specimens were examined after the tensile test. In the SEM image of the sample produced with 100% infill rate in Figure 9. (a-b), it was determined that the filaments fused well with each other during 3D printing and there were no gaps in the interlayers. When Figure 9 (c-d) was examined, it was found that the cubic structure with 50% and 60% infill densities reached the most efficient tensile strength result during printing due to the absence of gaps between the layers. When the SEM images of the octet structure shown in Figure 9 (e-f) were examined, it was observed that the specimens with 50% infill density broke more elastically, and therefore it was determined that the infill rate of the octet structure affects the elongation percentage of the octet 60% sample. When examining the grid materials shown in Figure 9 (g-h), it was determined that the interlayer adhesion of the specimens with 50% infill density was better than the specimen with 60% infill density, and this interlayer adhesion affected the elongation value of the material. When the images of the tri-hexagon specimens in Figure 9 (i-j) were examined, it was found that the interlayer adhesions were like each other and contributed to determining the tensile strength and elongation values obtained by the materials most efficiently during the tensile test. When the SEM images of the zigzag structured specimens in Figure 9 (k-l) were examined, it was found that although the interlayer adhesion of the materials with both infill densities was similar, there was inconsistency in the interlayer adhesions due to the infill pattern.

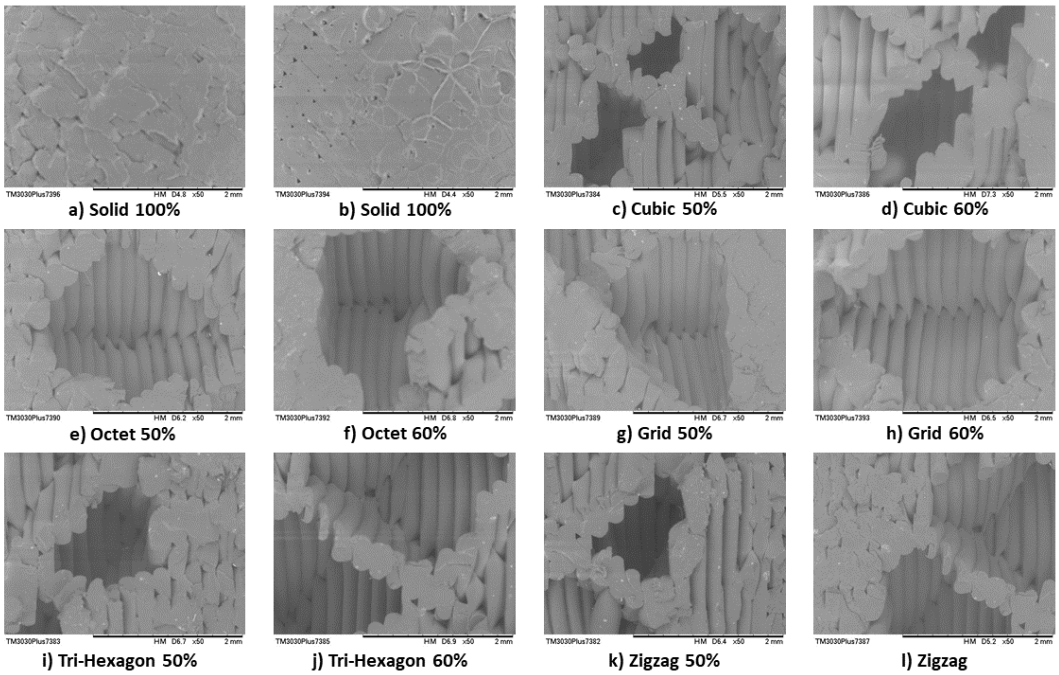


Figure 9. SEM images of fracture surfaces of tensile test.

4. Conclusions

In the study, the mechanical properties of samples produced with PLA material with different infill densities and infill patterns using the additive manufacturing method were investigated.

- It was determined that the printing patterns have a significant impact on tensile strength, especially the octet pattern which has the highest strength (42 MPa). This is due to the octet structure performing better or creating larger bonds due to less void content in the structures.
- Generally, it has been determined that as the infill density increases, the tensile strength also increases, and the denser the infill pattern is, the better tensile strength it has. However, there are samples that have better tensile strength than those with 60% infill density despite having 50% infill density. (see Table 3) This is due to the fact that the types of filling patterns form strong bonds and create better durability. For example, an octet with 50% infill density has better tensile strength than grid, tri-hexagon, cubic, and zigzag patterns with 60% infill density.
- According to Charpy test results, the octet 60% had the closest value to the solid 100% in terms of energy absorption with approximately 16.94 kJ.mm-2.

In conclusion, production parameters have a significant impact on determining the mechanical properties of materials. In particular, infill density and infill pattern greatly affect the mechanical properties of 3D printed products. Changes in these production parameters alter the structural strength of the sample. Increasing the infill density and using patterns with more bonds enhance tensile strength, while patterns with lower infill density and a porous structure create gaps between layers, leading to variations in tensile strength. Therefore, this study presents a new approach to utilizing different infill densities and various infill patterns for materials with superior mechanical properties. These enhanced mechanical properties will be effective in developing parts used in various industries to provide expectations and designing products optimally.

References

[1] Saleh M, Anwar S, Al-Ahmari AM, Alfaify A. Compression Performance and Failure Analysis of 3D-Printed Carbon Fiber/PLA Composite TPMS Lattice Structures. Polymers 2022; 14(21): 1–22.

[2] Yang Y, Huang W, Ma YE, Wang S, Chen X, Meng Y. Mechanical Properties and Failure Modes of Additively Manufactured Ti6Al4V Lattice Structures under Quasi-Static Compressive Loading. Int J Appl Mech 2022; 14(9).

[3] Dudescu MC, Racz L, Popa F. Effect of infill pattern on fatigue characteristics of 3D printed polymers. Mater Today Proc 2023; 78 263–269.

[4] Abd El Aal MI, Awd Allah MM, Abd Alaziz SA, Abd El-baky MA. Biodegradable 3D printed polylactic acid structures for different engineering applications: effect of infill pattern and density. J Polym Res 2024; 31(1): 1–15.

[5] Farias D, Oliveira D, Quaresma L, Sousa M, Pinheiro M. Effect of Infill Parameters and Nano - Reinforcement on Compression Performance of 3D Printed Polylactic Acid 2024.

[6] Ma Q, Rejab MRM, Kumar AP. Effect of infill pattern of polylactide acid (PLA) 3D-printed integral sandwich panels under ballistic impact loading. Mater. Today Commun 2024; 38: 107626.

[7] Rahman MM, Sultana J, Rayhan S Bin, Ahmed A. Optimization of FDM manufacturing parameters for the compressive behavior of cubic lattice cores: an experimental approach by Taguchi method. Int J Adv Manuf Technol 2023.

[8] Hozdić E, Hozdić E. Comparative Analysis of the Influence of Mineral Engine Oil on the Mechanical Parameters of FDM 3D-Printed PLA, PLA+CF, PETG, and PETG+CF Materials. Materials (Basel) 2023; 16(18).

[9] Xu Z, La Mendola I, Razavi SMJ, Bagherifard S. Additive manufactured Triply Periodical Minimal Surface lattice structures with modulated hybrid topology. Eng Struct 2023; 289.

[10] Zhang H, Wu J, Robert C, Ó Brádaigh CM, Yang D. 3D printing and epoxy-infusion treatment of curved continuous carbon fibre reinforced dual-polymer composites. Compos Part B Eng 2022; 234.

[11] Pernet B, Nagel JK, Zhang H. Compressive Strength Assessment of 3D Printing Infill Patterns. Procedia CIRP 2022; 105: 682–687.

[12] Darsin M, Mauludy RR, Hardiatama I, Fachri BA, Ramadhan ME, Parningotan D. Analysis of the effect 3D printing parameters on tensile strength using Copper-PLA filament. Sinergi 2022; 26(1): 99.

[13] Abou-Ali AM, Lee DW, Abu Al-Rub RK. On the Effect of Lattice Topology on Mechanical Properties of SLS Additively Manufactured Sheet-, Ligament-, and Strut-Based Polymeric Metamaterials. Polymers 2022; 14(21).

[14] Pandzic A, Hodzic D, Milovanovic A. Influence of material colour on mechanical properties of pla material in fdm technology. Ann DAAAM Proc Int DAAAM Symp 2019; 30(1): 555–561.

[15] Ali Z, Yan Y, Mei H, Cheng L, Zhang L. Effect of infill density, build direction and heat treatment on the tensile mechanical properties of 3D-printed carbon-fiber nylon composites. Compos Struct 2023; 304: 116370.

[16] Garg S, Sardar A, Srivastava R, Verma S, Madan AK. Variation in Tensile Strength of 3D Printed PLA Parts by Varying Infill Density and Infill Pattern. Saudi J Eng Technol 2023; 8(05): 103–107.

[17] Naik M, Thakur DG, Chandel S. An insight into the effect of printing orientation on tensile strength of multi-infill pattern 3D printed specimen: Experimental study. Mater Today Proc 2022; 62: 7391–7395.

[18] Rismalia M, Hidajat SC, Permana IGR, Hadisujoto B, Muslimin M, Triawan F. Infill pattern and density effects on the tensile properties of 3D printed PLA material. J Phys Conf Ser 2019; 1402(4): 2–8.

[19] Dave HK, Rajpurohit SR, Sheth K V. Compressive Strength of PLA based Scaffolds: Effect of layer height, Infill Density and Print Speed. Int J Mod Manuf Technol 2019; 11(1): 21–27.

[20] ISO 179-1. International standard - determination of charpy impact properties. Int Organ Stand 2015; 10406–1:20 3–6.

[21] ISO-527-2. Plastics-Determination of tensile properties-COPYRIGHT PROTECTED 2012.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 233-249, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1546406

Ti6Al4V Alaşımının Delme ve Frezeleme Proseslerinde İşleme Parametrelerinin Talaş Formları, Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesici Takımların Aşınması Üzerine Etkileri

Şakir ALTINSOY[1*], Nuray BEKÖZ ÜLLEN[2]
[1] Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakülte, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
[2] Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye
[*1] sakir.altinsoy@yeniyuzyil.edu.tr, [2] nbekoz@iuc.edu.tr

(Geliş/Received: 09/09/2024; Kabul/Accepted: 15/11/2024)

Öz: Savunma, uzay ve medikal alanlarda kullanımı gittikçe artan Ti6Al4V alaşımı, işlenmesi oldukça zor ileri mühendislik malzemelerindendir. Ürünlerin genelde karmaşık şekilli olması, yüksek boyutsal hassasiyet gerektirmesi talaşlı işlem gerektirmektedir. Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımının farklı matkap çapı ve soğutma ortamında delme davranışı; farklı kesme hızı ve soğutma ortamına göre frezeleme davranışı incelenmiştir. Kuru ve kesme sıvısı ortamlarında; 7,5 mm ve 8,4 mm çaplı matkaplar ile delme işlemi ve 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızları ile frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Seçilen kesici takımlar ve parametreler çalışmanın yeniliğini oluşturmaktadır. İşlenebilirlik analizleri; talaş formları, işlenen yüzeylerin yapısı ve pürüzlülük değerleri, kesici takımların aşınma mekanizması ve takım ömürlerinin tespit edilmesi ile çok yönlü olarak yapılmıştır. Delme işlemi sonuçlarına göre; düşük çapta ve kesme sıvısı kullanımında yüzey pürüzlülük değerleri azalmış ve helisel talaş formu elde edilmiştir. Artan çap ve kuru ortam burgu talaş oluşumuna ve matkap aşınmasında artışa neden olmuştur. Elde edilen frezeleme sonuçlarına göre; artan kesme hızıyla kuru ortamda uzun spiral talaş oluşumu gözlenirken, kesme sıvısı ile homojen dağılımlı kısa spiral talaş oluşumu gerçekleşmiştir. Matkap çapının düşmesi ile uç ömrü kuru ortamda %42, kesme sıvısı kullanımında %22 bir artış göstermiştir. Kuru ortamda kesme hızının artmasıyla freze uç ömründe %23,53 artış olmuş, kesme sıvısı kullanımında ise %16,67 oranında atış olmuştur. Kesme sıvısının kullanımında freze uç ömrü, düşük kesme hızında %13,34, yüksek kesme hızında %5,56 oranında artmıştır.

Anahtar kelimeler: Ti6Al4V, işlenebilirlik, delme, frezeleme, takım ömrü ve aşınma mekanizması.

Effects of Processing Parameters on Chip Forms, Surface Roughness and Wear of Cutting Tools in Drilling and Milling Processes of Ti6Al4V Alloy

Abstract: Ti6Al4V alloy is an engineering material that is increasingly used in defense, aerospace and medical fields and is difficult to process. The products generally have complex shapes and require high dimensional precision, necessitating machining operations. In this study, drilling behavior of Ti6Al4V alloy with different drill diameter and cooling environment; and milling behavior was examined according to different cutting speed and cooling environment. Drilling (with 7.5 mm and 8.4 mm diameter drill bits) and milling (with 50 m/min and 100 m/min cutting speeds) operations were carried out in dry and cutting cooling environment. The cutting tools and parameters selected in the study constitute the innovation of the work. Machinability analyses; the chip forms, structure and roughness values of the machined surfaces, wear mechanisms of the cutting inserts and tool life were determined in a versatile way. According to the results of the drilling process; with low diameter and cutting fluid usage, surface roughness values decreased and helical chip form was obtained. The increased diameter and dry environment have caused the formation of auger chip and an increase in drill bit wear. According to the milling results obtained; while long spiral chips were formed in a dry environment with increasing cutting speed, homogeneously distributed short spiral chips were formed with cutting fluid. As the drill diameter decreased, bit life increased by 42% in dry conditions and 22% in cutting fluid usage. With the increase in cutting speed in a dry environment, there was a 23.53% increase in milling tip life and a 16.67% increase in cutting fluid usage. With the use of cutting fluid, milling cutter life increased by 13.34% at low cutting speed and 5.56% at high cutting speed.

Key words: Ti6Al4V, machinability, drilling, milling, tool life and wear mechanism.

1. Giriş

Ti6Al4V alaşımları içerdikleri üstün özelliklerinden dolayı; havacılık, savunma sanayi, otomotiv endüstrisi, medikal implantlar, kimya sanayi, enerji santralleri ve üst düzey spor ekipmanlarında kullanım alanlarına sahiptir [1–3]. Bu özellikler; yüksek mukavemet, mükemmel korozyon direnci, yüksek sıcakta sertlik özelliği, mükemmel biyouyumluluk, yorulma direnci, düşük termal iletkenlik ve düşük termal genleşmedir [4–7]. Kullanım alanları itibariyle Ti6Al4V alaşımından üretilen parçaların ölçüsel doğruluk ve yüzeysel kalite gerektirmesi nihai işlem

* Sorumlu yazar: sakir.altinsoy@yeniyuzyil.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-1893-2266, [2] 0000-0003-2705-2559

olan talaşlı işleme proseslerini ön plana çıkarmıştır. Talaşlı işlemenin tercih edilme nedenleri istenilen boyut, ölçüsel ve yüzeysel kalitenin elde edilmesi, seri ve ekonomik olması, sektörde ileri tekniklerin kullanımı ve yetişmiş eleman sorunun olmamasıdır. Düşük termal iletkenliği, düşük elastisite modülü ve yüksek kimyasal reaktiviteye sahip olması gibi özelliklerinden dolayı talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmesi zor bir malzemedir [8]. Talaşlı imalat ile işlemede; düşük takım ömrü, düşük talaş kaldırma oranı ve kötü yüzey kalitesi gibi sorunlar üretim maliyetinin ve işleme zamanının artmasına neden olmaktadır [9]. Ti6Al4V alaşımının talaşlı imalatında kesici takım performansının ve yüzey kalitesinin iyileştirilmesi yaşanan sorunları çözüme kavuşturmak için araştırmacıların ilgisini çekmektedir.

Geleneksel talaşlı işleme yöntemleri, ölçümsel doğruluk ve yüzey bütünlüğü açısından Ti alaşımlarının işlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde; tornalama, frezeleme ve delme gibi talaşlı imalat işlemleri içinde; delik delme işleminin bu işlemler arasında yaklaşık % 33 gibi bir paya sahip olduğu bilinmektedir [9]. Uçak kanatlarında ve gövde kısımlarında, silindir kapaklarında, motor gövdesinde ve birçok parçada delik oranı oldukça fazla olduğundan havacılık, uzay ve otomotiv sektörlerinde yaklaşık %40-60 aralığında delme işlemi olduğu rapor edilmiştir Ayrıca uçak ve uzay endüstrisinde kullanılan pervane üretiminin %60'ında frezeleme işlemi, gaz türbinlerinin disk ve kompresör kapak üretiminde %40 frezeleme ve %20 delme işlemi yapılmaktadır [10]. Ti6Al4V alaşımının ısıl iletkenliğinin düşük olması, talaşlı imalat ile işlenmesinde ortaya çıkan ısının kesme alanında yoğunlaşmasına ve bölgesel olarak kalmasına neden olmaktadır. Isının belli bir bölgede hapsolup yayılmaması da kesici takımda aşınmayı arttırmaktadır. Özellikle delme işlemi esnasında, plastik deformasyonun %90'ı ısıya dönüşmekte, deformasyon bölgesinde takımın, iş parçası ve talaşla temas ettiği bölgelerde yüksek ısı oluşturmaktadır. Isının çoğu kesme bölgesinde kalarak kesici ucun aşınmasına sebep olur. Yüzey kalitesini düşürerek, işlem maliyetini ve işlem süresini artırır [9]. Delik delme işlemi birçok teknikle yapılmasına rağmen matkapla delik delme hala en yaygın kullanılan yöntemdir [11,12]. Literatürde Ti6Al4V alaşımının riskli alanlarda kullanımından dolayı delinme işleminde matkap cinsi, geometrisi, işlem parametreleri ve kesme ortamı gibi değişkenlerin optimizasyonu üzerine birçok çalışma devam etmektedir [6,9,13]. Ti6Al4V alaşımının frezeleme işlemi ile yüksek doğruluk ve aşınma dayanımına sahip olması için gereken yüksek yüzey kalitesi sağlanır [14,15]. Frezeleme işleminde delme prosesine göre açık ortamda kesme yapıldığından; kesici takıma gelen kesme kuvveti ve takım aşınması daha azdır. Ancak titanyum alaşımlarının yüksek mekanik özellikler içermesi, ani olan titreşim ve darbelerde kesici ucun kırılmasına sebep olur. Bu yüzden sert kesici karbür takımlarla işlenmesi önerilmez. Titanyum alaşımlarının freze ile işlenmesinde uygun kesme hızının seçilmesi oldukça önemlidir. Çok düşük seçilen kesme hızlarında parçayı işlemek, kesici takım ucunda talaş sıvanması ve yapışması meydana getirebilir. Bu durum kesici takım geometrisini değiştirerek bütünlüğünü bozar. Çok yüksek seçilen kesme hızlarında parçayı işlemek, kesici takımın çok hızlı aşınmasına sebep olarak sürekli uç değişimi gerektirebilir. Bu durum çok yüksek maliyet artışına sebep olabilir [16]. İşlenebilirliğin anlaşılması için çıkan talaş formlarının iyi değerlendirilmesi gerekir. Talaş morfolojisi, işlenen yüzeyin kalitesi ve kesici takım ömrü açısından önemli kıstaslardandır [17]. Yüzey kalitesini belirleyen en önemli özelliklerden biri de yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesidir. Bu değer soğutma ortamı, kesme parametreleri, kesici takım özellikleri ve tezgâh rijitliği gibi kriterlere bağlıdır [17–19]. İşlenen malzemenin ve kesici ucun özellikleri, kesme parametreleri, kesme ortamı, tezgâh kalitesi, operatör becerisi gibi birçok etken yüzey pürüzlülük değerinde belirleyicidir. Parçanın kullanım yerine göre istenen yüzey kalitesini elde etmek için çok farklı talaşlı imalat yöntemleri ve işleme parametreleri kullanılır. Talaşlı imalat ürünlerinin fiyatını belirlenen en önemli kalemlerden olan kesici takımların uzun ömürlü olması, hem istenen kalitede ürün elde etmek için hem de uç değişim sürecini azaltarak üretim sürecini iyileştirmek için önemlidir. Kesici takım ömründe etkili olan tüm unsurların belirlenmesi ve değerlendirilmesi işlenebilirlik açısından çok önemlidir ve belirlenmesi gereklidir [20]. Talaşlı imalat sonrasında işlenen parçanın yüzey kalitesi, ölçüm hassasiyeti ve işlemin verimliliği kesici takımların aşınmasıyla doğrudan etkilenmektedir [21,22]. Bu yüzden kesici takımlarda oluşan aşınma mekanizmalarının tanımlanması çok önemlidir. Bu faktörlerin iyileştirilmesi ile Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde; parça yüzey kalitesinin ve kesici takımların performansının arttırılması mümkündür.

Genel olarak işlenebilirliğin değerlendirmesi; talaş oluşum mekanizmasının anlaşılması, işlenen yüzey kalitesinin ve kesici takım aşınması ile beraber kullanım ömrünün belirlenmesi ile yapılmaktadır [5,23–26]. İşleme performansının optimizasyonu işleme kalitesi ve maliyeti açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürde Ti6Al4V alaşımı işleme operasyonlarının ve parametrelerinin çeşitli yöntemler kullanılarak optimizasyonu üzerine birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen; hala yetersizliğinden bahsedilmekte ve işlenebilirliğindeki problemlere çözüm aranmaktadır. Düşük işlenebilirlik derecesine sahip bu alaşımların işlenmesinde yüzey bütünlüğü ve kesici takım aşınması gibi problemlerle sıklıkla karşılaşılmaktadır. Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının farklı çapta matkap ve soğutma ortamları kullanılarak delinmesi ve farklı kesme hızları ve soğutma ortamları kullanılarak frezelenmesi sonucu işlenebilirlik davranışları incelenmiştir. Delinen ve frezelenen parçalardan çıkan talaş

formları, işlenen yüzeylerin yapısı ve pürüzlülük değerleri, matkap ve freze uçlarının aşınma mekanizmaları ve aşınmaya bağlı kesici takım ömürleri belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen işlenebilirlik konusu literatürden farklı kesici takım ve parametrelerinin kullanımı ile ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar çalışmayla ilgili literatür ışığı altında tartışılmıştır. Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde karşılaşılan zorluklar da bilimsel bir dille değerlendirilmiştir.

2. Deneysel Metot

2.1. İş Parçası Malzemesi

Bu çalışmada, 30 mm çapa sahip Ti6Al4V alaşımı içi dolu profil çubuklar kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan Ti6Al4V alaşımının firma tarafından verilen kalite belgesinde kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi (ağ.%) [6].

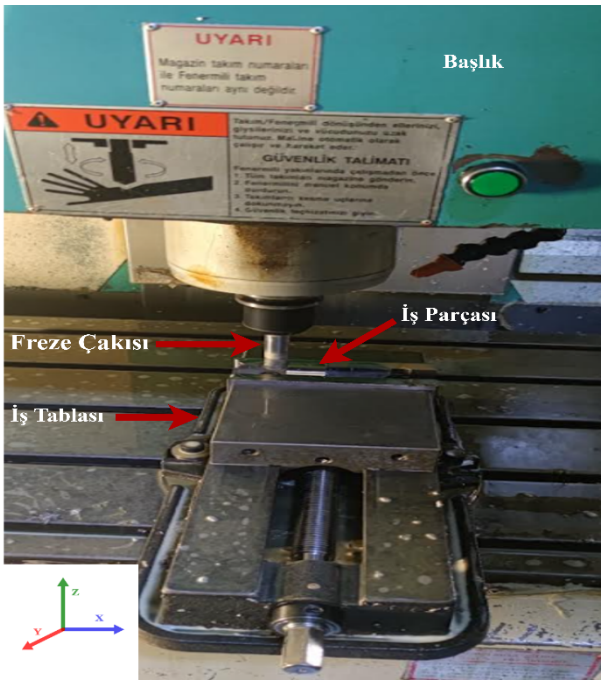
Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
6,09	3,91	0,13	0,02	0,01	0,001	0,09	Kalan

Tablo 2. Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri [6].

Çekme dayanımı, MPa	Akma dayanımı, MPa	Sertlik, HV	Elastik Modülü, GPa
992	935	310	110

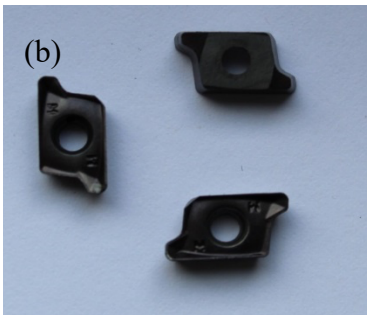
2.2. Parçaları Talaşlı İşleme Koşulları

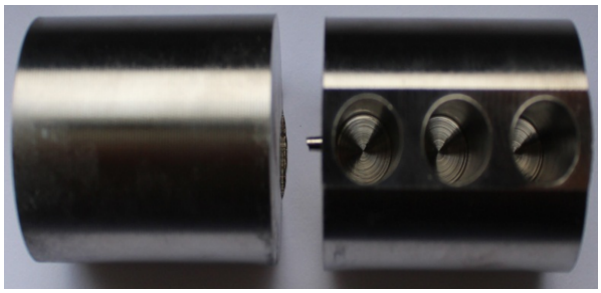
Gerek parçaların temini gerekse parçalar üzerinde yapılan tüm işlemlerin sanayide bulunan ve aktif olarak çalışan firmalarda gerçekleştirilmesi bakımından; Ti6Al4V alaşımını işleyen firmalar için çalışmanın sonuçlarının doğruluğu ve kabul edilebilirliği yüksektir. İş parçasının delik delme ve frezeleme işlemleri, AGMA VMC Serisi, VMC-115, X, Y ve Z eksenli, FANUC Serisi 18i-MB kontrolü 1-10,000 mm/dak kesme ilerlemesine sahip dik işleme tezgâhında yapılmıştır. Delme işleminde; 7,5 mm ve 8,4 mm çapında standart boylu iki ağız sayılı karbür matkaplar kullanılmıştır. Delme işleminde kör delikler; kesme hızı 50 m/dak, ilerleme hızı 0,08 mm/dev ve delme derinliği 20 mm olarak işlenmiştir. Her bir delme işlemi, üç parçaya üçer kör delik olmak üzere toplam dokuz delik delinerek yapılmıştır. Frezeleme işleminde; takımın alın kısmındaki dişlerin desteği ile kaldırılması olan alın frezeleme yöntemi kullanılmıştır. Frezeleme APXT-1003-PDR freze ucu ile yapılmıştır. Frezeleme işlemlerinde; kesme hızları 50 m/dak, ve 100 m/dak, ilerleme hızı 0,25 mm/dev ve kesme derinliği 0,4 mm olarak belirlenmiştir. Her bir frezeleme işlemi iki parçanın üç tarafı işlenerek gerçekleştirilmiştir. Delme ve frezeleme işlemlerinde, iş parçalarının tezgâha bağlanmasında yüksek hassasiyetli sıkma sağlayan eş merkezli mengene kullanılmıştır. Delme ve frezeleme işlemleri kuru ve kesme sıvısı kullanılarak yapılmıştır. Her iki işlem de soğutucu sıvı olarak; %5 Estra 320 mikroemülsiyon metal işleme sıvısı ve %95 su karışımı kullanılmıştır. Delme ve frezeleme işlemlerinin yapıldığı işleme tezgâhın görseli Şekil 1'de gösterilmiştir. Delme ve frezeleme testleri için kullanılan matkap ucunun ve frezeleme kesici ucunun görüntüleri ve teknik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir. Delik delme ve frezemle işlemlerinden sonra iş parçalarının fotoğrafları sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'de verilmektedir.



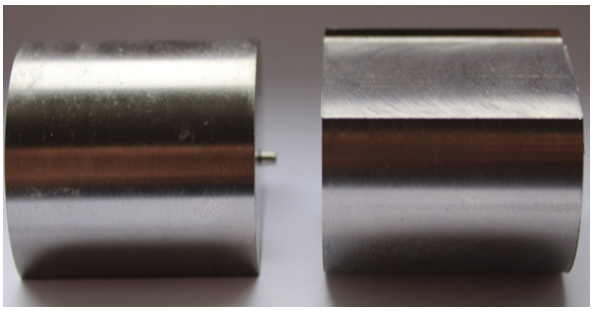
Şekil 1. Delme ve frezeleme işleminin yapıldığı işleme tezgâhı.

Tablo 3. (a) Matkap ve (b) freze uçlarının özellikleri ve görüntüleri.

	**Tip**	**Karbür Matkap**	
	Biçim	Elmas	
	Boy	Standart Boy	
	Üretici firma	MASTERCUT	
	Uç ve Helis Açısı (º)	135 ve 28	
	Ağız Sayısı	2	
	Çap (mm)	7,5	8,4
	Kesme Boyu (mm)	69	75
	Tam Boy (mm)	109	117
	**Tip**	**APXT Serisi**	
	Biçim	Elmas	
	ISO Kodu	ISO 8688	
	Üretici Kodu	APXT-1003-PDR	
	Üretici firma	KLP Cutting Tool	
	Kalite	KLB 1255	
	İç Daire (mm)	3	
	Kalınlık (mm)	3,5	
	Köşe Yarıçapı (mm)	0,80	
	En (mm)	6,30	
	Uzunluk (mm)	11,30	
	Boşluk ve Talaş açıları (º)	11 ve 90	



Şekil 2. Delme işleminden sonra iş parçasının yüzeyi.



Şekil 3. Frezeleme işleminden sonra iş parçasının yüzeyi.

2.3. İşlenen İş Parçalarının Karakterizasyonu

İşleme sonucu elde edilen talaş formlarının görüntüleri Canon marka EOS 1300D model 18-55MM DC-III fotoğraf makinesi kullanılarak çekilmiştir. İşlenen parçaların yüzey pürüzlülük ölçümleri Surftest SJ-210 model Mitutoyo marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Deliklerin yüzey pürüzlülük ölçümleri için, 60°'lik açıya ve 2 µm'lik tipik uç yarıçapına sahip küresel tipteki prob ucu kullanılmıştır. 0,8 mm kalınlığında olan özel bir aparat yardımıyla problar delik içlerine sokularak yüzeylerden ölçüm alınmıştır. İnce ayar el çarkı kullanarak prob pozisyonlandırılmıştır. Her bir delikten toplam beş ölçüm alınarak yüzey pürüzlülük değerlerinin aritmetik ortalaması (Ra) hesaplanmıştır. Kesici takımların aşınan yüzeylerinin ve işlem sonrası parça yüzeylerinin görüntü analizleri, JEOL™ JCM-6000 Benchtop model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. İşlenen parçalardan alınan örnekler ve kesici takımlar çift taraflı karbon bant kullanılarak numune tutuculara sabitlenmiştir. Kesici takımların aşınan yüzeyleri numune tutucularda yukarı gelecek şekilde yerleştirilmiştir. SEM görüntüleri farklı büyütme oranları ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada incelediğimiz aşınma SEM görüntüleri, kesici takımın asıl kesme kenarından alınmıştır. Takım ömrü belirlenirken aşınma kriteri olarak; kesici takımda oluşan ortalama serbest yüzey aşınmasının 200 µm'den fazla olması, kesici takımda herhangi bir kopma veya kırılma gerçekleşmesi durumu ele alınmıştır. Bu aşamalardan sonra kesme işlemine devam edilmemiş sonlandırılmıştır. Yapılan tüm karakterizasyon çalışmalarında sonuçlar verilirken; delme işleminde matkap çapı ve soğutma ortamına göre, frezeleme işleminde kesme hızına ve soğutma ortamına göre gruplandırma yapılmıştır.

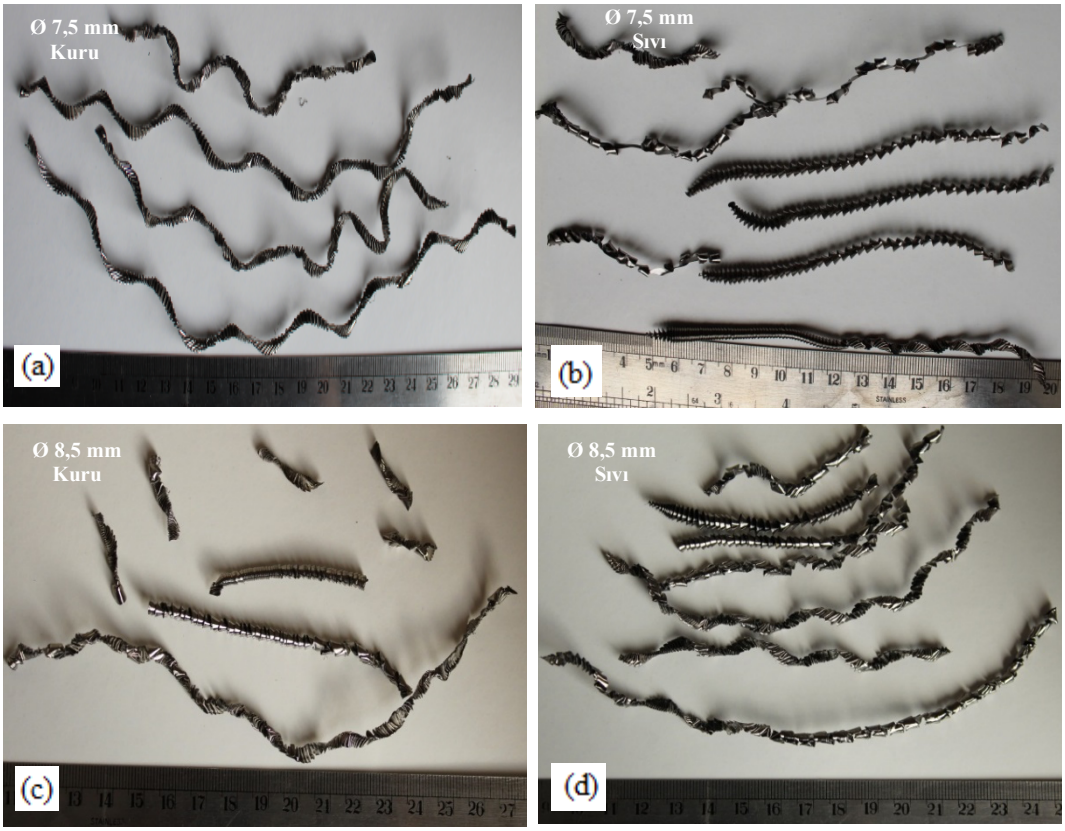
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Talaş Formları

Talaşlı işleme sırasında oluşan kesme şartlarını anlamak açısından, meydana gelen talaşların formu, boyutu ve rengi oldukça önemlidir [22]. Talaşların genel yapısını yorumlamak, takım aşınması ve işlenmiş yüzeyin kalitesi gibi işleme karakteristikleri hakkında bilgi vermek açısından önemlidir. Talaş formlarının kabul edilebilir sınırlar içinde olması ve boyutunun kısa oluşu, talaşın ortamdan uzaklaştırılması, tezgâhın güvenliği, işlenen yüzeyin kalitesinin biriken talaşlardan dolayı bozulmaması ve çalışanın güvenliği bakımından dikkate alınmalıdır [20,27,28].

3.1.1. Delme işlemi sonucu oluşan talaşlar

Şekil 4 (a) ve (b)'de sırasıyla kuru ve soğutma sıvısı kullanılarak 7,5 mm çapında karbür matkap ile elde edilen talaş formları; Şekil 4 (c) ve (d)'de sırasıyla kuru ve soğutma sıvısı kullanılarak 8,4 mm çapında karbür matkap ile elde edilen talaş formları verilmiştir.



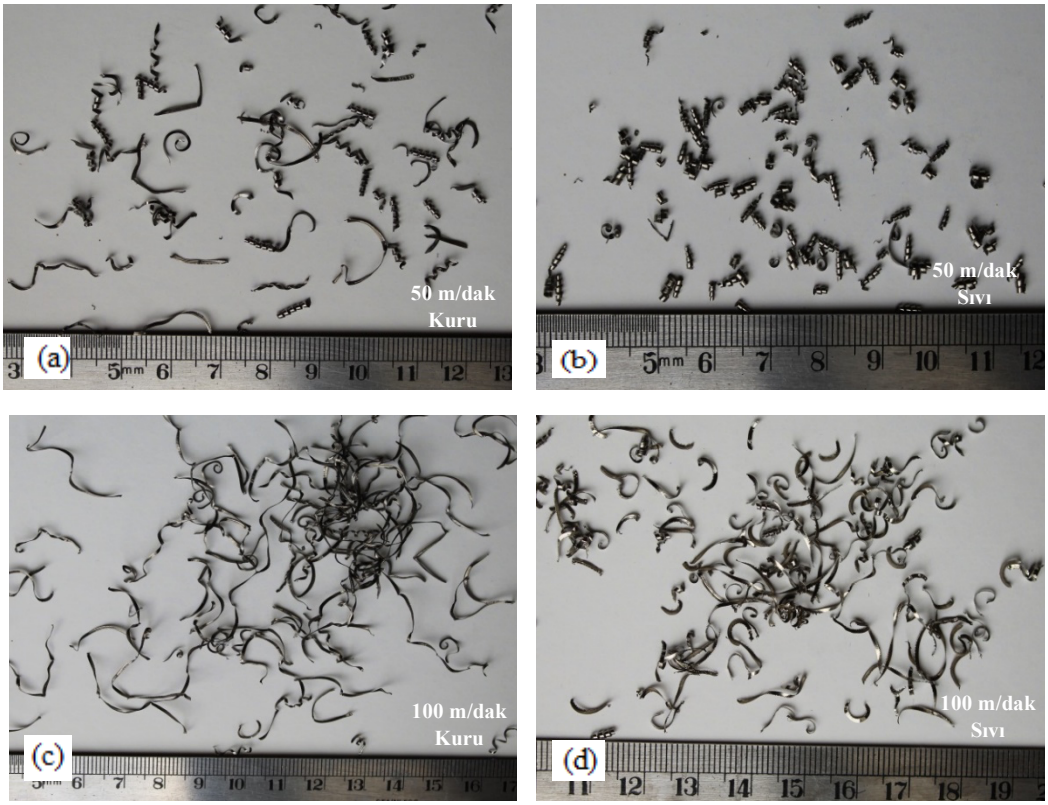
Şekil 4. (a) Ø 7,5 mm uç ile kuru ortamda, (b) Ø7,5 mm uç ile kesme sıvısıyla, (c) Ø 8,4 mm uç ile kuru ortamda, (d) Ø 8,4 mm uç ile kesme sıvısıyla delme sonrası talaş formları.

Talaşlı işlemler sonrası ortaya çıkan talaş formlarını değerlendirmek için; literatürde genel talaş formlarının sınıflandırılmasında kullanılan genel terimlere göre değerlendirme yapılmıştır [29]. Şekil 4'te 7,5 mm çapında karbür matkap ile elde edilen talaş formları incelendiğinde; (a) kuru işlemede istenmeyen talaş tipi olan burgu talaş oluşumu gözlemlenirken, (b) kesme sıvısı ile işlemede ise kabul edilebilir sınırın en altında olan helisel talaş oluşumu gözlenmiştir. Her iki koşulda da talaşlar uzun boyutlu ve düzenli şekilde kırılmıştır. Burgu talaş formu, talaş boşaltma kanalında kolayca talaşın sıkışmasına sebep olacağından dolayı arzu edilmez [30]. Delme işleminde, 7,5 mm ve 8,4 mm çapındaki karbür matkaplar ile sırasıyla 57,2 mm^3 ve 68,4 mm^3 hacminde talaş kaldırılmıştır. Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde yaşanan en büyük sorunlardan biri kesici takım ile talaş arasında meydana gelen yüksek sıcaklık oluşumudur. Oluşan talaşın ilk kısmı ve son kısmı arasındaki yüksek sıcaklık farkından dolayı yaşanan ısıl genleşme ve büzülmeler burgu veya helisel olarak bilinen kıvrımlı talaş yapısının oluşmasına neden olmaktadır [31]. Şekil 4'te 8,4 mm çapında karbür matkap ile elde edilen talaş formları incelendiğinde, (c) kuru işlemede istenmeyen talaş tipi olan burgu talaş oluşumu düzensiz olarak farklı boyutlarda, (d) kesme sıvısı ile işlemede ise burgu ve helisel talaş formları bir arada, boyutları birbirinden farklı talaş oluşumları gözlenmiştir. Sonuç olarak, kesme sıvısı ile yapılan delme işlemlerinde, kabul edilebilir sınırın en altında kalan helisel talaş oluşumu gözlenirken, kuru ortamda delmede istenmeyen ve işlem sırasında deliği tıkayarak talaş çıkışına sebep olan burgu talaş oluşumu gözlenmiştir. 8,4 mm çapında matkap ile kuru işlemede ise boyutsal düzensizlik oldukça belirgindir. Görüntülere talaş rengi açışından bakıldığında ise tüm şartlarda oluşan talaş renkleri birbirine benzerdir. Genel olarak; matkap çapının, kesme sıvısı kullanımı kadar talaş şekli üzerinde

belirleyici olmadığı söylenebilir. Elde edilen burgulu ve helisel talaş formlarının takım aşınmasına hızlandırıcı etkisinin olduğu birçok çalışmada ifade edilmiştir [30–32].

3.1.2. Frezeleme işlemi sonucu oluşan talaşlar

Şekil 5 (a) ve (b)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 50 m/dak kesme hızıyla freze ile işleme sonrası elde edilen talaş formları, Şekil 5 (c) ve (d)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 100 m/dak kesme hızıyla freze ile işleme sonrası elde edilen talaş formları verilmiştir. Görüntüsü alınan talaşların tamamı son parçanın frezeleme işleminden sonra elde edilmiştir.



Şekil 5. 50 m/dak kesme hızında (a) kuru ortamda, (b) kesme sıvısıyla; 100 m/dak kesme hızında (c) kuru ortamda ve (d) kesme sıvısıyla frezeleme sonrası talaş formları.

50 m/dak kesme hızıyla frezeleme sonrası elde edilen talaş formları incelendiğinde; (a) kuru işlemede kısa helisel, kısa boru ve kısa virgül şeklinde talaş oluşumları, (b)'de kesme sıvısı ile işlemede ise sadece kısa helisel talaş oluşumu gözlenmiştir. Kuru işlemede talaş kırılmaları düzgün olmasına rağmen düzensiz ve farklı formlarda talaşlar oluşmuştur. Kesme sıvısı ile işlemede daha stabil bir durum gözlenmiş ve tek tip talaş formu oluşmuştur. Şekil 5'te 100 m/dak kesme hızıyla freze ile işleme sonrası elde edilen talaş formları incelendiğinde (c) kuru işlemede karmaşık uzun spiral talaş oluşumu, (d)'de kesme sıvısı ile işlemede ise daha homojen ve kısa spiral talaş oluşumu gözlenmiştir. Aslantaş ve Karabulut, yaptıkları çalışmada, kesme hızının talaş formları üzerine oldukça belirleyici olduğunu ve birincil deformasyon bölgesindeki şekil değiştirme hızının kesme hızıyla arttığını belirtmişlerdir [33]. Literatürde şerit, dolaşık ve burgu şekilli talaş formları kabul edilebilir sınırların dışında işlenebilirliği zor olarak tanımlanırken, uzun veya kısa forma sahip helisel şekilli talaşlar kabul edilebilir sınırlar içinde, iyi işlenebilir olarak tanımlanırlar [29]. Bu çalışmada her iki durumda da kabul edilebilir talaş formları oluşumu ve talaş kırılmaları düzgün bir şekilde gerçekleşmiştir. Frezeleme işlemi kesintili talaş kaldırma işlemi olduğundan dolayı, işleme sırasında sistem sürekli olarak titreşime zorlanmakta ve kesme hızlarındaki artış titreşim seviyesini arttırmaktadır. Bu durumun sebebini artan kesme hızıyla kesici takım ile iş parçası arasında oluşan sürtünmeden kaynaklandığı yönünde literatür çalışmaları bulunmaktadır. Birçok çalışmada titanyum alaşımlarının işlenmesi sırasında oluşan termoplastik kararsızlık ve talaşın dış yüzeyinden çatlakların başlaması ve yayılması

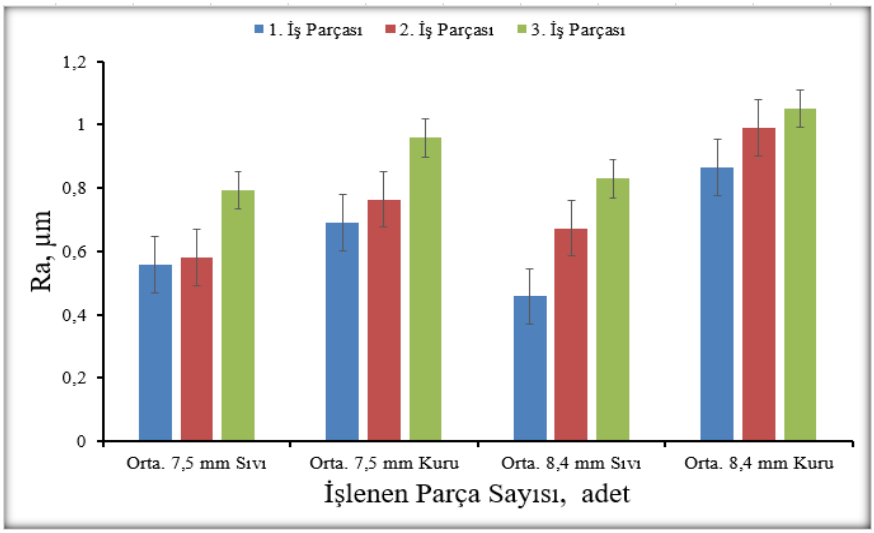
kesintili talaş oluşumunu ifade etmektedir [34]. Frezeleme işleminde, 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızları ile sırasıyla 67,9 mm^3 ve 78,4 mm^3 hacminde talaş kaldırılmıştır. Şekil 5'teki görüntülere talaş rengi açışından bakıldığında 50 m/dak kesme hızıyla frezelemede talaş rengi daha koyu, 100 m/dak kesme hızıyla frezelemeden elde edilen talaşlar daha açık renktedir. Genel olarak kesme hızının, kesme ortamından talaş formu üzerine daha belirleyici etkisinin olduğunu söyleyebiliriz.

3.2. Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

İşlenebilirliğin en önemli belirleyicisi olan yüzey pürüzlülük değerleri, yüzey kalitesinin de bir ölçütüdür. Yüzey pürüzlülüğü değerinin işleme parametrelerine bağlı olarak değişebileceği bilinen bir gerçektir [17,35]. İşlenen ürünlerin kalite değerlendirmesinde, boyutsal tamlık ve yüzey pürüzlülük ölçümleri mutlaka yer alır. Yüzey pürüzlük değeri, parçanın kullanım yerine göre değişen bir unsur olmakla beraber, bu değer aşağı düştükçe yüzey daha pürüzsüz hale gelmektedir. İşleme prosesinde tüm süreçlerin optimizasyonu ile iyi bir yüzey kalitesi mümkündür [36].

3.2.1. Delme işlemi sonrası yüzey pürüzlülük değerleri

Kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 7,5 mm ve 8,4 mm çapında karbür matkaplar ile işlenen Ti6Al4V alaşımının delik yüzeylerinden alınan ortalama yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir. Değişen kesme koşullarına ve matkap çapına göre delinen yüzeylerdeki pürüzlülük değerlerinin değişimini Şekil 6'da grafik olarak gösterilmiştir.

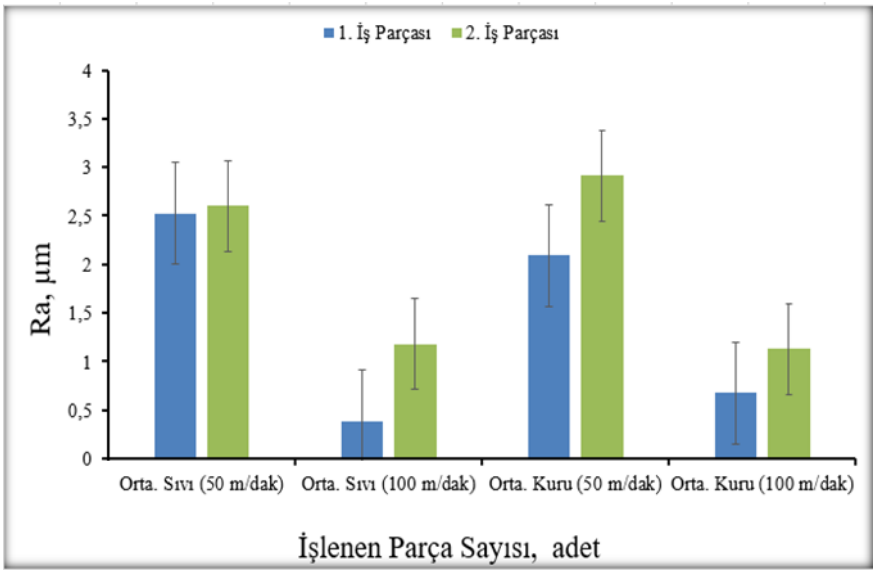


Şekil 6. 7,5 ve 8,4 mm matkap ile kuru ve sıvı ortamda işlenen parçaların yüzey pürüzlük değerlerinin değişimi.

Kuru ve kesme sıvısı ile işlemede delinen parça sayısının artması ile ortalama yüzey pürüzlülük değerinin arttığı görülmektedir. 7,5 mm ve 8,4 mm çapında karbür matkaplar kullanılarak kesme sıvısı ile işlenen Ti6Al4V alaşımı parçalarının yüzey pürüzlülük değerleri kuru işlemeye göre daha düşük, yüzey kalitesi daha iyidir. Matkap çapı Ø7,5 mm'den Ø8,4 mm'ye çıktığında hem kuru islemede hem de kesme sıvısı ile işlemede delinen parçaların yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla yaklaşık %13,75 ve % 9,8 artmıştır. En yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değeri 8,4 mm çapında karbür matkap kullanılarak kuru kesme ortamında, en düşük değer ise 7,5 mm çapında karbür matkap kullanılarak kesme sıvısı ortamında tespit edilmiştir. Ti6Al4V alaşımı talaşlı işlem sırasında ortaya çıkan yüksek sıcaklık ve basınç değerlerinde mukavemetini korurken, kesici takım koruyamamaktadır [37]. Bu çalışmada da artan matkap çapı ve kuru ortam, delinen yüzeye uygulanan sıcaklık ve basıncı arttırarak yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Kuru ortamda delinen delikten talaşların çıkmasını zorlaştırmakta, kesme alanını olumsuz etkilemektedir ve bu durum artan matkap çapı ile daha da artmaktadır. Sonuç olarak düşük matkap çapı ve kesme sıvısı kullanımında daha iyi yüzey kalitesi elde edilmektedir.

3.2.2. Frezeleme işlemi sonrası yüzey pürüzlülük değerleri

Kuru ve soğutma sıvısı kullanılarak 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızı ile frezeleme işlemi sonrası Ti6Al4V alaşımı yüzeylerinin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir. Değişen kesme koşullarına ve kesme hızına göre işlenen yüzeylerdeki pürüzlülük değerlerinin değişimi Şekil 7'de grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 7. 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızı ile kuru ve sıvı ortamda freze ile işlenen parçaların yüzey pürüzlük değerlerinin değişimi.

Kuru ve kesme sıvısı ile işlemede işlenen parça sayısının artması ile yüzey pürüzlülük değerinin arttığı, ancak 50 m/dak kesme hızında kesme sıvısı ile işlemede kayda değer bir değişim olmadığı görülmüştür. Kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 50 m/dak kesme hızı ile frezeleme işlemi sonrası Ti6Al4V alaşımı parçaların yüzey pürüzlülük değerleri 100 m/dak kesme hızı ile frezelemeden daha yüksektir. Kesme hızı 50 m/dak'dan 100 m/dak'ya çıktığında hem kuru islemede hem de kesme sıvısı ile islemede delinen parçaların yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla yaklaşık %37,5 ve %30,4 azalmıştır. Her iki kesme hızında da kesme sıvısı ile işlemede yüzey pürüzlülük değerleri daha düşüktür. Altınsoy ve diğ., (2024)'nın yaptıkları çalışmada, soğutma sıvısı ile Ti6Al4V alaşımının frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünün kesme hızı arttıkça azaldığını belirtmişlerdir [29]. Soğutma sıvısı ile kesme yüzeyinde oluşan ısının dağılması ile işlenen malzeme yüzeyinin sertlik değerinin değişmemesi sağlanarak talaş yapışmalarının önüne geçilmiş ve yüzey kalitesi arttırıldığını rapor etmişlerdir. Sonuç olarak frezeleme işleminde artan kesme hızı ile yüzey pürüzlülük değerleri azalmış, kesme sıvısı kullanımı ile kuru ortam bertaraf edilerek yüzey özelliği iyileşmiştir.

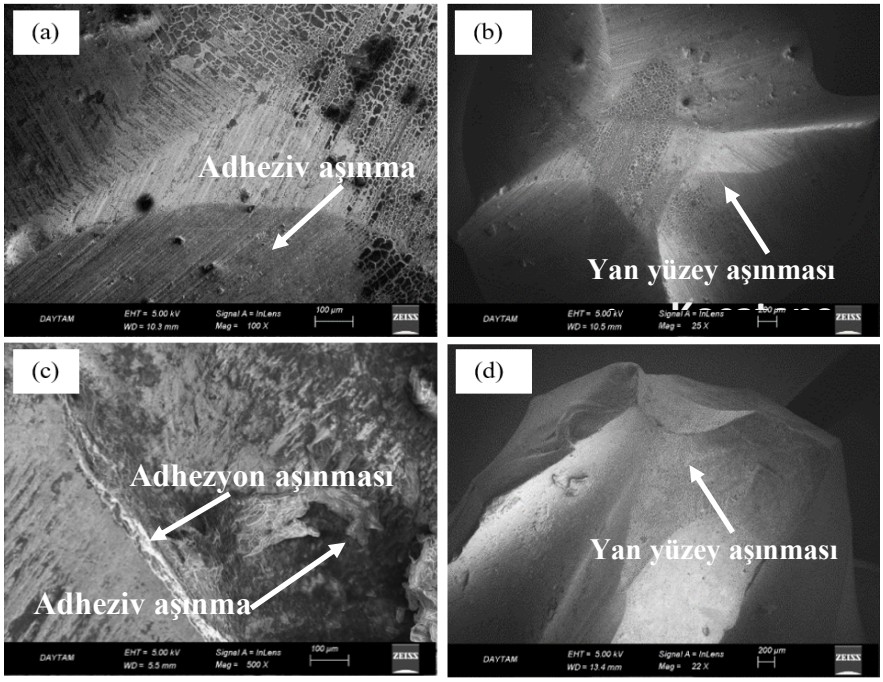
3.3. Kesici Takımların SEM Analizleri

Talaşlı imalat işlemlerinde genellikle, maliyet açısından takım ömrü ve üretilen malzemenin kalitesi açısından işlenen yüzey kalitesi ölçüt olarak kabul edilir. Aşınmış uçlar ile oluşturulan delikler ve yüzeyler parçanın kalitesini aşağı çeker ve ortaya çıkan ürünün kullanıcı tarafından reddedilmesine neden olabilir. Takım aşınmasının belirlenmesi; malzemeye uygun işleme prosesinin ve kesici takım sınıfının tespit edilmesinde optimum verimlilik için önemli işlenebilirlik çıktılarından biridir.

3.3.1. Delme sonrası matkap uçlarının aşınma analizi

Şekil 8 (a) ve (b)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak delme sonrası 7,5 mm çapında karbür matkapta meydana gelen aşınmaların SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 8 (c) ve (d)'de sırasıyla kuru ve kesme

sıvısı kullanılarak delme sonrası 8,4 mm çapında karbür matkapta meydana gelen aşınmaların SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8. 7,5 mm uç ile (a) kuru delme ve (b) kesme sıvısıyla delme; 8,4 mm uç ile (c) kuru delme ve (d) kesme sıvısıyla delme sonrası kesici takımların SEM görüntüleri.

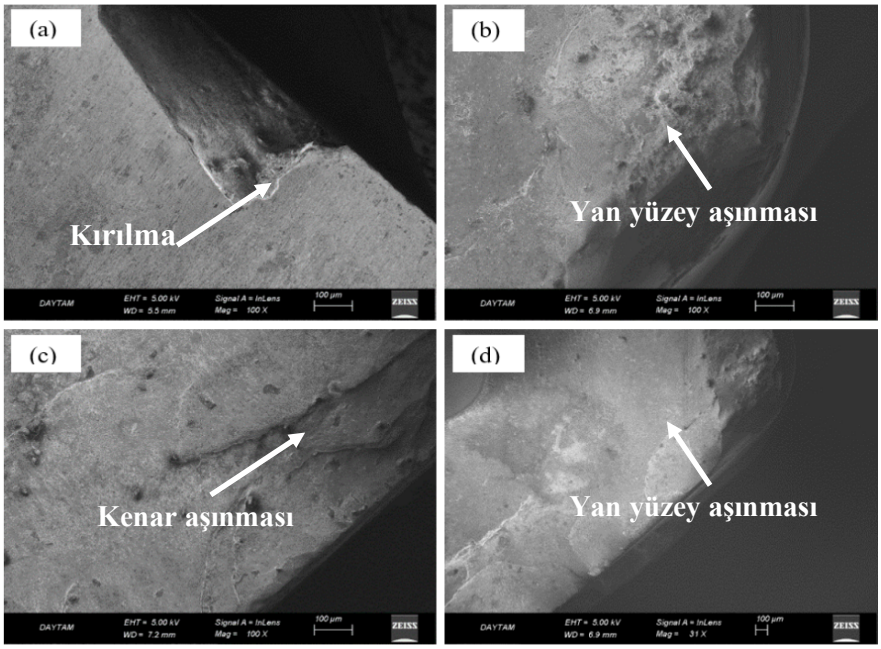
Şekil 8 (a) ve (c)'da sırasıyla 7,5 mm ve 8,4 çapında karbür matkap ile kuru delmeden sonra matkap incelendiğinde burgu talaş oluşumundan kaynaklı matkap yüzeyinde aşınmalar oluşmuştur. Ayrıca kesici takım ve delinen yüzey arasında kuru işlemeden kaynaklı yüksek ısıyla ortaya çıkan malzeme kaybı yani adhezyon aşınması gerçekleşmiştir. Kuru işlemeden kaynaklı basınç ve sıcaklığa bağlı olarak talaş ve matkap arasında oluşan difüzyon da aşınmaya neden olmuştur. Artan matkap çapıyla beraber kesici takımdaki aşınma da artmıştır. Kuru kesme ortamından kaynaklı matkaplarda oluşan adheziv aşınma yüzey kalitesinin düşmesine sebep olarak ortalama yüzey pürüzlülük değerlerini düşürmüştür. Şekil 8 (b) ve (d)'de sırasıyla 7,5 mm ve 8,4 çapında elmas karbür matkapla kesme sıvısı ile delmeden sonra matkap ucu incelendiğinde kabul edilebilir sınırlar içinde kalan helisel formda talaş oluşumundan kaynaklı aşınma kuru işlemeye göre daha azdır. Kesici ucun işlem yapan yüzeyinde serbest yüzey aşınması meydana gelmiştir. Meydana gelen bu aşınma sonucunda yüzey aşınması matkap çapının artması ile artmıştır. Sonuç olarak kesme sıvısıyla yapılan işlemlerde aşınma azalmıştır. Matkap çapının büyümesi ile her iki kesme ortamında da uç aşınması artmıştır. Bütün şartlarda meydana gelen aşınma matkap kesici kısmının merkeze yakın alanda yan yüzey aşınması şeklinde olduğu belirlenmiş fakat kuru ortamda kesme durumunda matkabın dış kısmına yakın bölgelerde kırılma ağzı şeklinde gerçekleştiği görülmüştür. Çiftçi ve Gökçe'nin, Ti6Al4V alaşımının delinebilirliği üzerine yaptıkları çalışmada gerçekleşen matkap aşınmaların kesici ağzın merkeze yakın olan bölümleri ve yan yüzeyinde olduğunu, matkap kırılmalarının da dışa doğu ağız kırılması şeklinde gerçekleştiğini açıklamışlardır [9].

Ti6Al4V alaşımı ile ilgili yapılan delme işlemi çalışmalarına bakıldığında; matkap geometrisi ve malzemesi, işleme parametreleri ve soğutucu ortam gibi kriterlerin optimize edilmesine yönelik çok sayıda bilimsel yayın olduğu görülmektedir [10,29,38,39]. Bu çalışmada da kesici takım aşınmasını, soğutma ortamının matkap çapından daha fazla etkilediği belirlenmiştir.

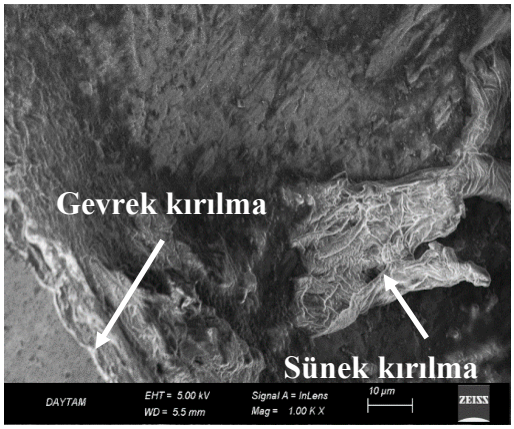
3.3.2. Frezeleme sonrası kesici uçların aşınma analizi

Şekil 9 (a) ve (b)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 50 m/dak kesme hızıyla; Şekil 9 (c) ve (d)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 100 m/dak kesme hızıyla frezeleme sonrası kesici takımda meydana

gelen aşınmaların SEM görüntüleri verilmiştir. Kuru ortamda 50 m/dak kesme hızı ile frezeleme sonrası kesici takımda meydana gelen aşınmada oluşan kırık bölgeden alınan SEM görüntüsü Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 9. 50 m/dak kesme hızında (a) kuru ortamda ve (b) kesme sıvısıyla; 100 m/dak kesme hızında (c) kuru ortamda ve (d) kesme sıvısıyla frezeleme sonrası kesici takımların SEM görüntüleri.



Şekil 10. 50 m/dak kesme hızında kuru ortamda yapılan frezeleme sonrası kesici takımda oluşan kırık bölgenin SEM görüntüsü.

Şekil 9 (a) ve (b)'de 50 m/dak kesme hızı ile sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak frezeleme sonrası kesici takımlar incelendiğinde kuru kesmede kesici takımda kırılma olduğu, kesme sıvısı kullanımında ise yan yüzeyde aşınma olduğu gözlemlenmiştir. Kırılmaya kuru şartlarda oluşan karmaşık formlarda talaş oluşumları da sebep olabilir. Özellikle kuru kesmede talaş bölgesindeki sıcaklık ve titreşimin artması, kesici takım ve iş parçası arasındaki aşınmayı hızlandırarak kırılmaya sebep olabilir. Şekil 10'da kuru ortamda 50 m/dak kesme hızı ile frezeleme sonrası kesici takımın uç bölgesinde meydana gelen kırılmanın daha net görüntüsü incelendiğinde kuru kesme şartı altında gerçekleşen plastik deformasyonun sebep olduğu görülmektedir. Kesici takımdan sıcaklık etkisi ile parça kopması çentik aşınması olarak da nitelendirilebilir. Kırılma detayının verildiği alanda sıcaklık farkından kaynaklanan termal çatlaklar da görülmektedir. Şekil 9 (c) ve (d)'de 100 m/dak kesme hızı ile sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak frezeleme sonrası kesici takımlar incelendiğinde aşınmaların kesici takım

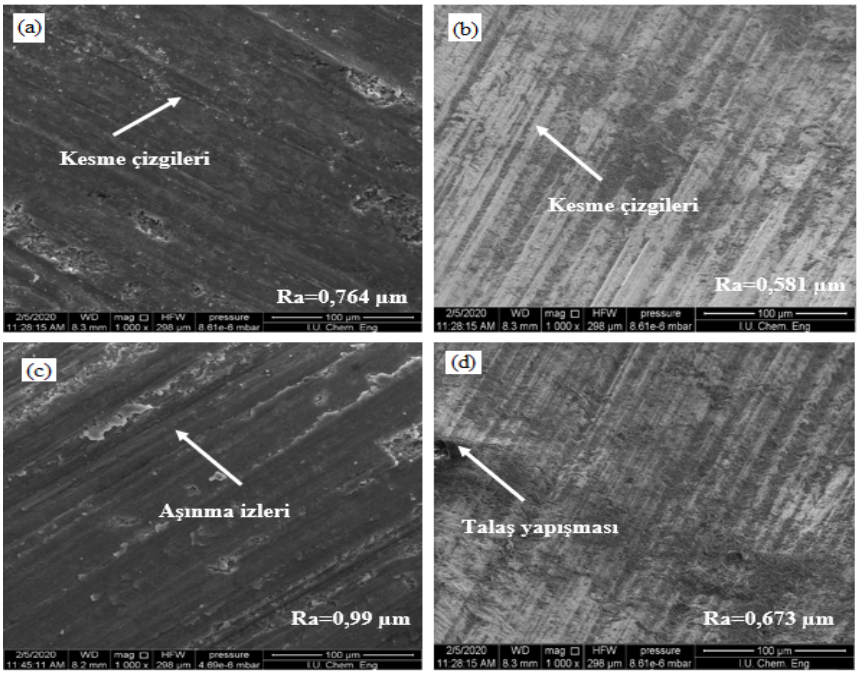
kenarının serbest yüzeyinde oluştuğu görülmektedir. Talaş çıkışında ve sonrasında asıl kesen yüzey ve yardımcı yan yüzey işlenen parça ile temas halindedir. Bu aşınma şekli yaygın olan, normal sayılan ve emniyetli görülen bir aşınma türü olarak literatürde geçer [22]. Bu sonuçlar değerlendirilecek olursa kesme sıvısı kullanıldığında kesici takım yüzeyine talaş yapışması önlenerek aşınmalar azaltılmıştır. Takım aşınmasının esas nedeninin kesici takım ve işlenen parça arasındaki sürtünmeden kaynaklanmaktadır ve sürtünme kaynaklı ısının aşınmayı hızlandırıcı etkisi vardır [1]. Bu çalışmada da kesme sıvısı kullanımı ile sürtünmeden kaynaklı olumsuz etkiler ortadan kaldırılmıştır. Artan ilerleme hızı ile aşınma azalmıştır. Buna istinaden frezelemede artan ilerleme hızı ile yüzey pürüzlülük değeri azalmıştır. Elde edilen sonuçlar birbirini desteklemektedir.

3.4. İşlenen Yüzeylerin SEM Analizleri

Titanyum alaşımları düşük elastik modülüne sahip olmasından dolayı talaşlı imalatı esnasında oluşan titreşimler yüzey kalitesi üzerine oldukça etkilidir [40]. Talaşlı imalat ile işlenen parçaların yüzeylerinin görüntülenmesi kesici takım performansının değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir. Kesme parametreleri ve kesme ortamının işlenen parçanın yüzey kalite üzerindeki etkileri delme ve frezeleme işlemleri sonrası belirlenmiştir.

3.4.1. Delme işlemi sonrası yüzeylerin SEM analizi

Şekil 11 (a) ve (b)'de sırasıyla, kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 7,5 mm çapında matkap ile delme sonrası aşınan yüzeylerin, Şekil 11 (c) ve (d)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 8,4 mm çapında matkap ile delme sonrası aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir.



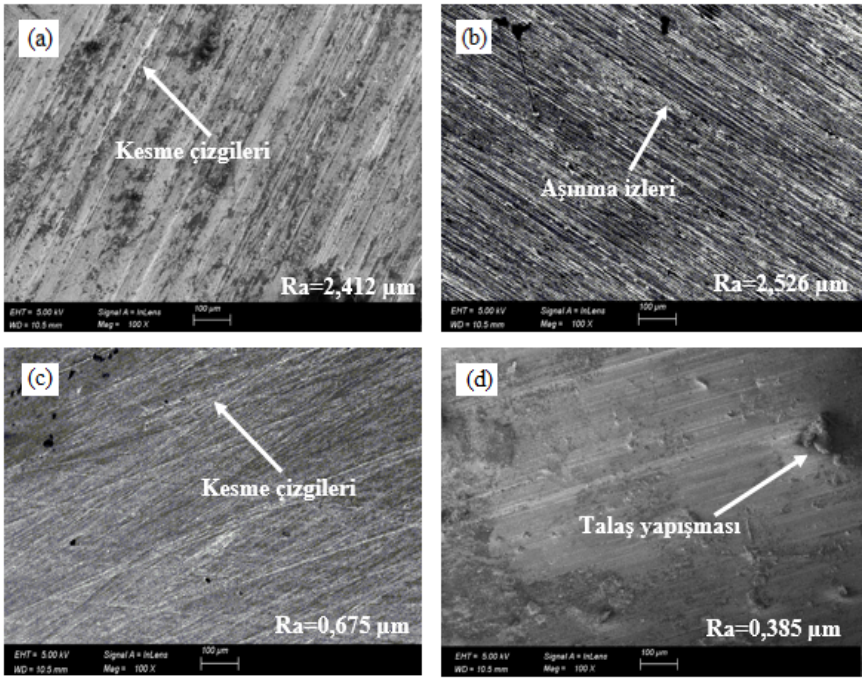
Şekil 11. 7,5 mm uç ile (a) kuru delme, (b) kesme sıvısıyla delme, 8,4 mm uç ile (c) kuru delme ve (d) kesme sıvısıyla delme sonrası aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri.

Ti6Al4V alaşımı düşük elastisite modülüne ve ısıl iletkenliğe sahip olduğundan özellikle delik delme gibi kaba işlemlerde daha güçlü takımlara ihtiyaç duyulur. Matkap ile delik delinmesinde yaşanan en büyük problem, talaşın delikten dışarı atılmasında zorluk ve artan sıcaklıktır. Bu durum kesici takımda sürtünme, yüzeyde bozukluk ve boyutsal sapmalara sebep olur. Ayrıca artan sıcaklık ve sürtünme ile çıkan talaşlar matkap ile delik yüzeyi arasında sıkışarak matkap yüzeyine yapışır ve yığıntı talaş (BUE) oluşumuna sebep olur. Yaşanan talaş yapışması sonucu işlenen yüzeyler daha kaba olmaktadır [41]. Aşınan yüzeylerde oluşan beyaz çizgiler iki ilerleme (besleme) arasındaki tepelerdir. Bazı kaynaklar oluşan bu çizgileri düzensiz bir plastik deformasyon akışı sonucu kesici

kenarda termomekanik koşulların değişmesine bağlamaktadır [42]. Şekil 11'de görüldüğü gibi Ø7,5 mm matkap ile yapılan delme işlemlerinde aynı şartlar altında Ø8,4 mm matkap çapı ile delme işleminden daha iyi kalitede yüzeyler elde edilmiştir. Matkap çapının artması ile paralel olarak oluşan aşınma çizgileri arasındaki mesafenin arttığı da görülmektedir. Kuru ortamda işleme sonucu elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde derin yarık dışında kopmuş parçacıkların taşınırken yapıştıkları ve dalgalı yüzeylerin oluşumuna sebep oldukları görülmektedir. Kesme sıvısı ile delinen yüzeylere paralel olarak oluşan aşınma çizgileri arasındaki mesafenin azaldığı görülmektedir. Her iki matkap ile delme işlemi sonunda kuru kesme ortamında işlenmiş yüzey görüntülerinde yüzeye yapışmış malzeme kalıntıları görülmektedir. Delinen parçaların aşınan yüzeylerinin görüntüleri, verilen yüzey pürüzlülük ve takım aşınması sonuçlarını desteklemektedir.

3.4.2. Frezeleme işlemi sonrası yüzeylerin SEM analizi

Şekil 12 (a) ve (b)'de sırasıyla, kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 50 m/dak kesme hızı ile frezeleme sonrası aşınan yüzeylerin, Şekil 12 (c) ve (d)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 100 m/dak kesme hızı ile frezeleme sonrası aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 12. 50 m/dak kesme hızında (a) kuru ortamda ve (b) kesme sıvısıyla; 100 m/dak kesme hızında (c) kuru ortamda ve (d) kesme sıvısıyla frezelemede aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri.

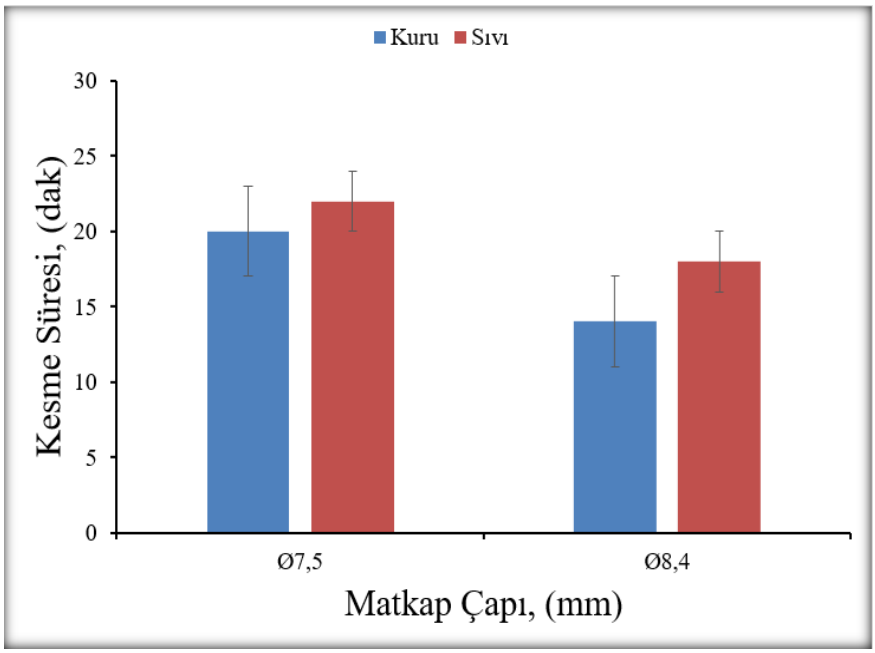
Kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızları ile frezeleme sonrası aşınan yüzeylerin görüntüleri incelendiğinde artan kesme hızı ile yüzeysel aşınmanın azaldığı görülmektedir. Kuru ortamda işleme sonucu elde edilen yüzeylerin sıvı ortamda işlenen yüzeylere göre her iki kesme hızında da bozulduğu belirlenmiştir. Azalan kesme hızı ve kuru kesme ortamına geçişle işlenen yüzeyin bütünlüğü bozulmuş, aşınma izleri daha da belirginleşmiştir. Sonuçlar yüzey pürüzlülük değerleri ile uyum içerisindedir. Kuru işlemelerde deformasyon sonucu oluşan ilerleme çizgilerinin arasındaki tepeler net bir şekilde ortaya çıkmakta ve artan kesme hızı ile azalmaktadır. Her iki kesme hızında da freze ile işlenmiş yüzeye yapışmış malzeme kalıntıları görülmektedir. Sonuç olarak; hem kesme hızının hem de kesme ortamının işlenen parçanın yüzey kalitesi üzerine etkisi vardır. Bu çalışmada kesme hızının etkisi, keme ortamına göre daha baskındır.

3.5. Takım Ömrü

İşlenebilirliğin belirlenmesinde kullanılan en önemli kriterlerden birisi kesici takım ömrüdür ve kullanım ömrünün arttırılması, kesme parametrelerinin ve kesme şartlarının optimizasyonu ile mümkündür. Kesici takım ömrü imalat maliyetini ve iş parçası yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir [1]. Çalışmada takım ömrü kriteri olarak yüzey aşınması ele alınmıştır. Bu aşamada belirlenen şartlar; işlenen parçanın yüzey kalitesinin bozulması durumu, kesici takımda oluşan ortalama serbest yüzey aşınması 200 µm'den fazla olması durumu ve kesici takımda kopma veya kırılma gerçekleşmesi durumunda kesici takım ömrünü tamamlamış olmaktadır. Aşınmadan kaynaklanan takım ömrünün tamamlanması kesme süresinin belirlenmesiyle ifade edilir. Çalışmanın takım ömürlerini belirleyen kesici ucun aşınma süresi olan kesme süreleri, delme işleminde matkap çapı ve soğutma ortamı, frezeleme işleminde kesme hızı ve soğutma ortamı kriterleri ele alınarak değerlendirilmiştir.

3.5.1. Delme işleminde takım ömrü

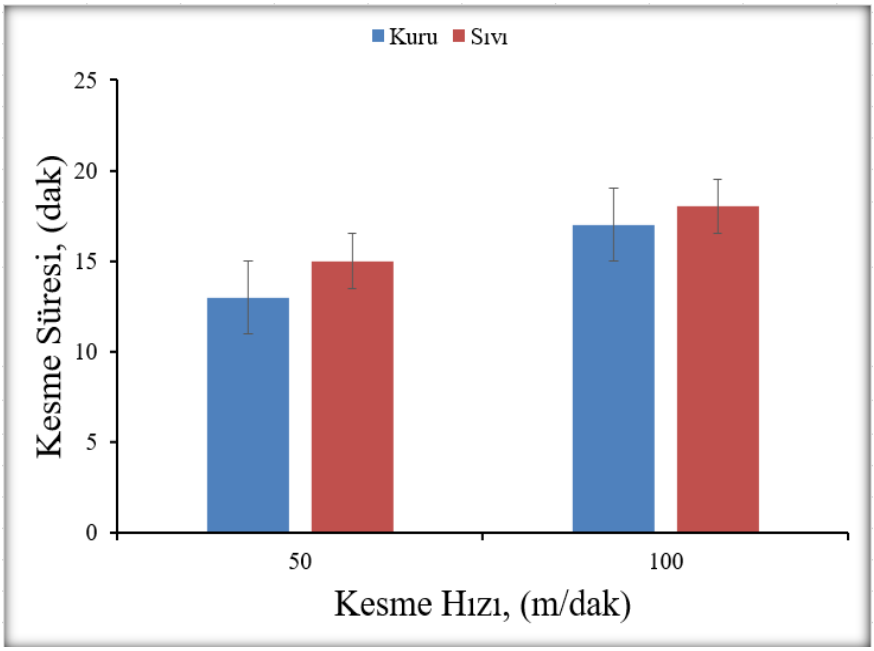
Ti6Al4V alaşımının delme sonrası matkap çapı ve soğutma ortamına göre, matkap aşınma süreleri yani kesme süreleri grafik görüntüsü Şekil 13'deverilmiştir. Matkap çapına göre aşınma süreleri incelendiğinde; 7,5 ve 8,4 mm çapındaki matkap ömürlerinin kesme sıvısı kullanımında kuru işlemeye göre daha uzun olduğu görülmektedir. 7,5 mm çapındaki matkaptaki artış %9,1 olarak tespit edilirken, bu oran 8,4 mm çapında %22,23 olarak belirlenmiştir. Kuru ortamda matkap çapının 8,4 mm'den 7,5 mm'ye inmesiyle matkap ömründe %42 artış belirlenmiştir. Sıvı ortamda delmede ise matkap çapının 8,4 mm'den 7,5 mm'ye inmesiyle matkap ömründe %22 artış belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar; delme sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük, takım aşınması ve işlenen yüzeyin aşınma sonuçları ile uyum içindedir. Kuru ortamda delme işlemi, her iki matkaptaki kesici ucun kullanım ömrünü kesme sıvısı kullanımına göre azaltmıştır. Titanyum alaşımlarının düşük ısıl iletkenliklerinden dolayı oluşan ısının kesme alanında dar bir bölgede kalmasına neden olmaktadır. Yaşanan bu sorun delme işleminde diğer yöntemlere istinaden daha belirgindir. Çünkü talaşın delinen bölgeden tahliyesi zor ve yavaştır. Bu yüzden oluşan ısının çoğu kesme bölgesinde kalır ve matkabın kullanım ömrünü azaltmaktadır [9]. Bu bağlamda delme işlemi üzerine kesici takım ömrü açısından sonuçlarımız önem taşımaktadır.



Şekil 13. Matkap çapına göre, kuru ve kesme sıvısı ortamlarında delme sonrası kesici takımların aşınma süreleri.

3.5.2. Frezeleme işleminde takım ömrü

Ti6Al4V alaşımının frezeleme sonrası kesme hızına ve soğutma ortamına göre, kesici ucun aşınma sürelerinin grafik görüntüsü Şekil 14'de verilmiştir. Frezeleme sonrası kesme hızına ve soğutma ortamına göre kesici freze ucunun aşınma süreleri incelendiğinde 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızlarında kesme sıvısı ile işlemede freze uçları ömürlerinin kuru işlemeye göre daha uzun olduğu görülmektedir. Kesme sıvısı kullanımını kuru ortam ile kıyasladığımızda 50 m/dak kesme hızında freze ucunda %13,34 artış tespit edilirken bu oran 100 m/dak kesme hızında %5,56 olarak tespit edilmiştir. Artan kesme hızı ile her iki kesme ortamında da kesici takım ömrünün arttığı tespit edilmiştir. Kuru ortamda frezelemede kesme hızının 50 m/dak'dan 100 m/dak'ya çıkarılmasıyla kesici takım ömründe %23,53 artış olmuştur. Sıvı ortamda frezelemede ise kesme hızının 50 m/dak'dan 100 m/dak'ya çıkarılmasıyla kesici takım ömründe %16,67 artış tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar frezeleme sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük, takım aşınması ve işlenen yüzeyin aşınma sonuçları ile uyum içindedir. Sonuç olarak frezeleme işleminde kesme sıvısı kullanımının ve kesme hızının artmasının kesici takım ömrü üzerine olumlu etkisi olmuştur. Ti6Al4V alaşımının talaşlı imalatında karşılaşılan kesici takımlarda oluşan bölgesel sıcaklık sorunu kesme sıvısı kullanımı ile giderilmiş ve takım ömrünü yukarı çekmiştir. Frezeleme işlemi tornalama ve delme işlemlerinden farklı olarak, kesici takımın ömrü kesici takımın iş parçasına defalarca temasından dolayı uçta oluşan deformasyon, çatlak ve kırıklara bağlıdır [43]. Bu çalışmada frezeleme işlemi sonrası 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızlarında kesme sıvısı ile işlemede kesici takımların ömürleri kuru işlemeye göre daha yüksektir. Zhao ve diğ., Ti6Al4V titanyum alaşımının işlenebilirliği üzerine yaptıkları çalışmada, takım ömrünün kesme sıvısı kullanımı ile arttığını tespit etmişlerdir [44]. Bu çalışmada da artan kesme hızı ile farklı kesme ortamların da kesici takım ömrünün arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 14. Kesme hızına göre, kuru ve kesme sıvısı ortamlarında frezeleme sonrası kesici takımların aşınma süreleri.

4. Sonuçlar

Ti6Al4V alaşımı parçaların delme ve frezeleme işlemleri sonrası işlenebilirlik performanslarının değerlendirilmesine ait elde edilen genel sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- **Kesme Ortamı ve Kesme Hızı:** Delme işleminde kesme ortamının etkisi, frezeleme işleminde ise kesme hızının etkisi daha belirgindir. Delme işlemi sırasında, helisel talaş oluşumu artan matkap çapı ve kuru kesme şartlarında gözlemlenmiştir. Frezeleme işlemi ile artan kesme hızı ve kesme sıvısı kullanımı sonucunda daha homojen kısa spiral talaş formu elde edilmiştir.

- **Yüzey Kalitesi:** İşlenilen yüzeylerin kalitesi, delme işleminde düşük çaplı matkap ve kesme sıvısı kullanımı ile iyileşirken, frezeleme işleminde artan kesme hızı ve kesme sıvısı kullanımıyla iyileşmiştir. Matkap çapının düşmesi, kuru ortamda uç ömründe %42, kesme sıvısı kullanımında ise %22 artış göstermiştir. Kuru ortamda kesme hızının artması, freze uç ömründe %23,53 artış sağlarken, kesme sıvısı kullanımında %16,67 oranında bir artış olmuştur.
- **Kesici Takım Aşınması:** Kesici takım aşınması, kesme sıvısı kullanımı ile azalmıştır. Delme işleminde artan matkap çapı ve frezeleme işleminde azalan kesme hızı, kesici takım aşınmasını artırmıştır. Kesme sıvısı kullanımı ile freze uç ömrü, düşük kesme hızında %13,34 ve yüksek kesme hızında %5,56 oranında artış göstermiştir.
- **Sıcaklık Sorunları:** Titanyumun talaşlı işlenmesindeki en ciddi sorun, işlem esnasında kesici takımda oluşan dar alana sıkışmış bölgesel sıcaklıktır. Bu çalışmada, kesme sıvısı kullanımı ile bu sorunun yarattığı olumsuzluklar azaltılmıştır. Isının dar bir alanda etkili olduğu göz önünde bulundurulduğunda, kesme sıvısının çok yayılmadan tam olarak kesme alanına verilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Çalışma kapsamında kullandığımız parçaların işlenmesi konusunda bizlere yardımcı olan ve teknik destek sağlayan Bor Kesici Takım ve Makine San. Tic. Ltd. Şti.'ne teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

[1] Aslantas K, Hasçelik A, Erçetin A, Danish M, Alatrushi LKH, Rubaiee S, Bin Mahfouz A. Effect of cutting conditions on tool wear and wear mechanism in micro-milling of additively manufactured titanium alloy. Tribol Int 2024; 193: 109340.

[2] Karakılınç U, Ergene B, Yalçın B, Aslantaş K, Erçetin A. comparative analysis of minimum chip thickness, surface quality and burr formation in micro-milling of wrought and selective laser melted Ti64. Micromachines 2023; 14 (6): 1160.

[3] Katta S, Chaitanya G. Key Improvements in Machining of Ti6Al4V Alloy: A Review. 2017 AIP Conference Proceedings: AIP Publishing LLC.

[4] Kürşad G. Havacılık ve uzay malzemelerinde soğutma sıvısının elektro erozyonla delinen deliklerin performans parametrelerine etkisinin deneysel incelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2017; 32 (1): 293-301.

[5] Rotella G, Imbrogno S, Candamano S, Umbrello D. Surface integrity of machined additively manufactured Ti alloys. J Mater Process Technol 2018; 259: 180-185.

[6] Sawant SN, Patil SK, Unune DR, Nazare P, Wojciechowski S. Effect of copper, tungsten copper and tungsten carbide tools on micro-electric discharge drilling of Ti6Al4V alloy. J Mater Res Technol 2023; 24: 4242-4257.

[7] Subaşı M, Karataş Ç. Ti6Al4V alaşım tozundan hazırlanan besleme stokunun kalıplama ve sinterleme parametrelerinin araştırılması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2016; 31 (2): 473-483.

[8] Garbiec D, Siwak P, Mróz A. Effect of compaction pressure and heating rate on microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered Ti6Al4V alloy. Arch Civ Mech Eng 2016; 16: 702-707.

[9] Çiftçi İ, Gökçe H. Ti6Al4V titanyum alaşımının delinmesinde delme yönteminin aşınmaya etkisinin incelenmesi. Politeknik Dergisi 2019; 22 (3): 627-631.

[10] Kıvak T, Şeker U. Effect of cryogenic treatment applied to M42 HSS drills on the machinability of Ti-6Al-4V alloy. Mater Technol 2015; 49 (6): 949-956.

[11] Alting L. Manufacturing Engineering Processes. ABD: CRC Press, 2020.

[12] Nee AYC. Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. Incorporated: Springer Publishing Company, 2014.

[13] Darsin M, Pasang T, Chen Z. Performance of TiAlN PVD Coated Carbide Drill When Drilling Titanium 6246 Alloy. 2017 MATEC Web of Conferences, EDP Sciences; Sibiu, Romania, 02001.

[14] Yıldız H. Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin delik üzerine ve kesici takıma etkisinin araştırılması. Yüksek Lisans tezi, Batman Üniversitesi, Batman, 2015.

[15] Gültekin U, Yaşar SA, Korkut İ. "Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine ve delik kalitesine etkisinin incelenmesi. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi 2017; 7 (2): 469-475.

[16] Safari H, Sharif S, Izman S, Jafari H. Surface integrity characterization in high-speed dry end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. Int J Adv Manuf Technol 2015; 78: 651-657.

[17] Ullen NB, Hasak SMA, Dirikolu MH. Factors influencing the machinability during turning sinter-hardened Cu-Ni-Mo based steel: Dependency on cutting speed, feed rate and cutting depth. J Eng Res 2020; 8 (4): 236-257.
[18] Stephenson DA, Agapiou JS. Metal Cutting Theory and Practice, CRC Pres, Boca Raton, 2016.
[19] Wei X, Liu X, Yue C, Liang SY, Wang L, Sun Y, Qin Y. Surface roughness prediction framework for flank milling Ti6Al4V alloy based on CLBAS-BP algorithm. Int J Comput Integr Manuf 2023; 36(6): 830-841.
[20] Altınsoy Ş, Yardımcı R, Köse FZ, Koç G. Farklı soğutma ortamları kullanılarak ısıl işlem görmüş Ti6Al4V alaşımının SBF ve Hank solüsyonlarında biyokorozyon davranışının incelenmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi 2024; 15 (2): 453-462.
[21] Lindvall R, Lenrick F, M'Saoubi R, Ståhl JE, Bushlya V. Performance and wear mechanisms of uncoated cemented carbide cutting tools in Ti6Al4V machining. Wear 2021; 477: 203824.
[22] Sert A. Improving machinability of Ti6Al4V alloy with cryogenic process applied WC-Co cemented carbide tool. Doctoral Dissertation, Eskişehir Osmangazi University. Eskişehir, 2017.
[23] Chen Z, Wu X, Tomus D, Davies CHJ. Surface roughness of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy components. Addit Manuf 2018; 21: 91-103.
[24] Gong Y, Sun Y, Wen X, Wang C, Gao Q. Experimental study on surface integrity of Ti-6Al-4V machined by LS-WEDM. Int J Adv Manuf Technol 2017; 88: 197-207.
[25] Groover MP. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, ABD: John Wiley & Sons, 2020.
[26] Pervaiz S, Rashid A, Deiab I, Nicolescu M. Influence of tool materials on machinability of titanium-and nickel-based alloys: A review. Mater Manuf Processes 2014; 29 (3): 219-252.
[27] Demir H, Ulaş HB, Binali R. Toolox 44 malzemesinde talaş kaldırma miktarının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerinin incelenmesi. Technological Applied Sciences 2018; 13 (1): 19-28.
[28] Yılmaz B, Güllü A. AISI 1050 çeliğin tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumu üzerine etkilerinin araştırılması. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2020; 26 (4): 628-633.
[29] Altınsoy Ş, Üllen NB, Ersoy M, Can D. Machining performance of uncoated and carbide coated cutting inserts in Ti6Al4V turning: An experimental and numerical approach. J Mater Eng Perform 2024; 33 (15): 6903.
[30] Yavuz M, Gökçe H, Şeker U. Matkap geometrisinin takım aşınması ve talaş oluşumu üzerine etkisinin araştırılması. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2017; 3 (1):11-19.
[31] An Q, Wang C, Xu J, Liu P, Chen M. Experimental investigation on hard milling of high strength steel using PVD-AlTiN coated cemented carbide tool. Int J Refract Met Hard Mater 2014; 43: 94-101.
[32] Strano M, Albertelli P, Chiappini E, Tirelli S. Wear behaviour of PVD coated and cryogenically treated tools for Ti-6Al-4V turning. Int J Mater Form 2015; 8: 601-611.
[33] Verma M, Pradhan SK. Experimental and numerical investigations in CNC turning for different combinations of tool inserts and workpiece material. Mater Today Proc 2020; 27: 2736-2743.
[34] Mahmat A, Tosun N, Ağar S. Ti6Al4V alaşımının ultrasonik yüksek hızlı mikro frezelenmesinde talaşların incelenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2023; (46): 27-36.
[35] Üllen NB, Hasak SMA, Dirikolu MH. The Effect of Cutting Speed on Tool Life in The Machining of Powder Metal Parts. 2019 IMCOFE, Young Scholars Union (YSU), Antalya, TurkeyProceedıng and Abstract Book, 40.
[36] Memiş F. AISI 2205 (EN 1.4462) paslanmaz çeliğin CNC torna tezgahında işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerinin deneysel araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2015.
[37] Küçükköse M. a-C:N/TiAlN kaplamaların karakterizasyonu ve aşınma davranışlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Bartın, 2017.
[38] Rodríguez A, Calleja A, de Lacalle LNL, Pereira O, Rubio-Mateos A, Rodríguez G. Drilling of CFRP-Ti6Al4V stacks using CO2-cryogenic cooling. J Manuf Processes 2021; 64: 58-66.
[39] Zhu Z, Sui S, Sun J, Li J, Li Y. Investigation on performance characteristics in drilling of Ti6Al4V alloy. Int J Adv Manuf 2017; 93 (1): 651-660.
[40] Çelik YH, Kiliçkap E. Titanyum alaşımlarından Ti-6Al-4V'nın işlenmesinde karşılaşılan zorluklar: Derleme. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology 2018; 6 (1):163-175.
[41] Xu J, Li C, Chen M, El Mansori M, Paulo Davim J. On the analysis of temperatures, surface morphologies and tool wear in drilling CFRP/Ti6Al4V stacks under different cutting sequence strategies. Compos Struct 2020; 234: 111708.
[42] Özçatalbaş Y. Machinability of elongated coarse grain Fe-based superalloys. Mach Sci Technol 2014; 18 (4): 626-637.
[43] Üllen NB. Tornalama İşlemlerinde Çeşitli Kesici Takım Uçlarının Hasar Mekanizmaları. 2020 In 2nd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology, EurasianSciEnTech.
[44] Muthukrishnan N, Davim P. Influence of coolant in machinability of titanium alloy (Ti-6Al-4V). Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology 2011; 1: 9-14.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 251-261, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1552422

Efektif Kendiliğinden Yerleşen Hafif Beton Dayanımı Tahmini için Farklı Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Karşılıklı Değerlendirilmesi

Hakan GÜLER[1], Mustafa ULAŞ[2*], Merve AÇIKGENÇ ULAŞ[3]
[1] Dijital Dönüşüm ve Yazılım Ofisi, , Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
[2] Yapay Zeka ve Veri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
[3] Mimarlık Bölümü, Mimarlık Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
[*1] hakanguler@firat.edu.tr, [2] mustafaulas@firat.edu.tr, [3]merveacikgenc@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 18/09/2024; Kabul/Accepted: 19/02/2025)

Öz: İnşaat mühendisliği literatüründe, özel beton türlerinin karışım tasarımını modellemek ve bu amaçla betonun bazı özelliklerini tahmin etmek için makine öğrenmesi yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Geleneksel karışım tasarımı hesapları, istenilen özellikte betonun üretilebilmesi için bir deneme yanılma süreci gerektirmektedir. Bu süreçte zaman, işgücü ve malzeme kayıpları yaşanır. Makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak deneme yanılma karışımlarının sayısı azaltılabileceğinden, gerek duyulan özelliklere sahip betonun üretilebilmesi kolaylaşabilir. Burada söz konusu malzeme Kendiliğinden Yerleşen Hafif Beton (KYHB) gibi özel bir tür beton ise karışım tasarımının pratik hale getirilmesi ile üretim sürecinin hızlandırılması daha büyük önem kazanır. Hem kendiliğinden yerleşen özellikte hem de hafif agrega içeren bu beton türünün istenilen özelliklerde üretilebilmesi süreci geleneksel betona göre daha zordur. Bu çalışmada, KYHB'nin basınç dayanımını tahmin etmek için dört farklı makine öğrenmesi algoritması karşılaştırılmalı değerlendirilmiştir. Çalışmanın amacı, KYHB bileşiminden basınç dayanımının tahmin edilmesidir. Ek olarak makine öğrenmesi algoritmalarının beton performansını tahmin etmedeki başarısını kanıtlamak ve böylece yöntemin öncelikle beton karışım hesabı için kullanımını artırmaktır. Bu amaçla, KYHB karışımının bazı deneysel özelliklerini ve bileşimini içeren bir veri seti ile Lineer Regresyon, Gauss Süreç Regresyonu, Quadratik ve Kernel Destek Vektör Makinası yöntemleri kullanılarak 4 farklı tahmin modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerin performansı, deneysel sonuçlar ile model çıktısı arasındaki doğrusal korelasyon oranı ve hata miktarları açısından değerlendirilmiştir. Gauss Süreç Regresyonu modeli ise bu çalışmada en başarılı makine öğrenmesi metodu olmuştur.

Anahtar kelimeler: Kendiliğinden Yerleşen Hafif Beton, Lineer Regresyon, Gauss Süreç Regresyonu, Destek Vektör Makineleri.

Mutual Evaluation of Different Machine Learning Algorithms for Effective Self-Compacting Lightweight Concrete Strength Prediction

Abstract: Machine Learning (ML) methods are frequently used to model the mix design and to predict some properties of concrete. Traditional mix design calculations require a trial-and-error process to produce concrete with the desired properties. In this process, time, labor, and material losses are experienced. By using ML methods, the number of trial-and-error mixtures can be reduced, making it easier to produce concrete with the required properties. As a special type of concrete, Self-Compacting Lightweight Concrete (SCLWC), it becomes more important to speed up the production process by making the mix design practical. SCLWC, which contains both self-compactibility and lightweight aggregates, is more difficult to produce with the desired properties than conventional concrete. In this study, four different ML algorithms were comparatively evaluated to predict the compressive strength of SCLWC. The aim of the study is to predict the compressive strength from the composition of SCLWCC. In addition, to prove the success of ML in predicting concrete performance and thus increase the use of the method primarily for concrete mix calculation. For this purpose, 4 different prediction models were developed using Linear Regression, Gaussian Process Regression, Quadratik and Kernel Support Vector Machine methods with a data set containing some experimental properties and composition of SCLWC mix. The performance of the developed models was evaluated in terms of the linear correlation ratio between the experimental results and the model output and the amount of error. The Gaussian Process Regression model was the most successful ML method in this study.

Key words: Self-compacting Lightweight Concrete, Linear Regression, Gaussian Process Regression, Support Vector Machines.

[*] Sorumlu yazar: mustafaulas@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-7599-5431, [2] 0000-0002-0096-9693, [3] 0000-0001-8986-7791

1. Giriş

Modern beton teknolojisindeki ilerlemelerin bir sonucu olarak ortaya çıkan özel beton türlerinden biri de Kendiliğinden Yerleşen Hafif Betondur (KYHB). Hem kendiliğinden yerleşebilirlik özelliğine sahip hem de birim hacim ağırlığı bakımından geleneksel betona göre daha hafif olan bu beton türü, Hafif Beton (HB) ve Kendiliğinden Yerleşen Betonun (KYB) olarak bilinen iki tür betonun özelliklerini bir araya getirir. Literatürde hem HB hem de KYB'nin karışım tasarımlarına ilişkin ayrı ayrı standartlar olmasına rağmen, KYHB'ye özel bir karışım tasarımı, uygulamasına ilişkin herhangi bir teknik şartname veya referans standart bulunmamaktadır. KYHB tasarımı için HB ve KYB için yazılmış standart ve yönetmeliklerden faydalanılır [1–3]. Örneğin üretilmiş bir betonun KYHB olarak anılabilmesi için taze özelliklerinin KYB için yazılmış EFNARC şartnamelerine uygun olması gerekirken, aynı zamanda TS EN 206-1'e göre fırın kurusu yoğunluğunun 800 ila 2000 kg/m^3 olması gerekmektedir [1, 4].

Hedeflenen özelliklere ulaşılabilmek için çok sayıda deneme yanılma karışımı oluşturarak uygun özellikleri testler sonucunda doğrulanmış betonu üretme sürecine karışım tasarımı denir [5]. Karışım tasarımı yaklaşımının geleneksel beton için geçerli olan deneme-yanılma prosedürü yukarıda bahsedilen özel betonlar için daha uzun sürebilir. Bu sürecin uzaması ise işgücü ve malzeme tüketiminde de artışa neden olur. KYHB ise iki beton türünün birleşimi olduğu için bahsedilen karışım tasarımı süreci daha da uzun sürer ve işgücü ile malzeme sarfı doğal olarak artar. Çünkü KYHB, bileşim özellikleri ve oranlarındaki değişikliklere karşı oldukça hassastır, bu nedenle daha fazla kalite kontrolü gerektirir [3, 6]. KYHB gibi özel betonların karışım tasarım sürecini hızlandırabilecek bir tahmin modeli oluşturmak için makine öğrenme algoritmalarının kullanımı literatürde oldukça yaygındır. Hu vd., çalışmalarında yapay zeka teknolojisinin beton performansının tahminindeki kullanımını incelemişlerdir. Çeşitli algoritmaların kullanımı ve örnek veri miktarının yanı sıra model oluşturmanın etkileri de değerlendirilerek, yapay zeka tabanlı beton basınç tahmini sistemlerinin performansını analiz etmişlerdir [7]. Ziolkowski vd., yaptıkları çalışmada makina öğrenimi modellerini kullanarak beton karışım sürecini kolaylaştırmayı hedeflemişlerdir. Derin sinir ağı mimarisi ile eğitilen bir makine öğrenimi modeli, geniş bir beton tarifi veritabanı üzerinde geliştirilmiş ve betonun basınç dayanımını tahmin etmek için matematiksel bir formüle dönüştürmüşlerdir. Yaptıkları testlerde, adaptif özelliklere sahip yeni algoritmanın, geleneksel yöntemlere kıyasla önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiğini söylemişlerdir [8]. Golafshani vd., çalışmalarında ekstra çimento içeren katkı maddeleri ile üretilmiş geri dönüştürülmüş agregalı beton sıkıştırma dayanımının kapsamlı bir analizini yapmışlardır. Elastic Net regresyonu, K-En Yakın Komşu, Yapay Sinir Ağı, Destek Vektör Makinesi, Karar Ağacı, Rastgele Orman, eXtreme Gradient Boosting, Light Gradient Boosting, Kategori Boosting ve yığılmış yöntemler de dahil olmak üzere çeşitli makine öğrenimi teknikleri kullanmışlardır. En iyi performans gösteren yığma modeli, test sırasında diğerlerine kıyasla %4,2 oranında kök ortalama kare hatasında bir azalma göstermiştir [9]. Başka bir çalışmada ise, ultra-yüksek performanslı beton basınç dayanımını tahmin etmek için güncel makine öğrenimi teknikleri kullanılmıştır. Elde ettikleri sonuçlar ile geliştirilen modellerin beklenilen başarılı tahmin performansı sergilemiştir [10]. Farooq vd., yaptıkları çalışmada atık malzemelerle hazırlanan yüksek performanslı betonun dayanımını tahmin etmek için makine öğrenimi yöntemlerini kullanan bir yaklaşımı sunmuşlardır. Bagging, boosting ve ensemble modellerini kullanılarak güçlü modeller oluşturulmuş ve bu modellerin performansı R^2=0,92'ye kadar çıkarmışlardır. Bu çalışmanın sonuçları, atık malzemelerle hazırlanan yüksek performanslı betonun dayanımını tahmin etmek için etkili bir yaklaşım sunmaktadır [11]. Dao ve ekip arkadaşları, yüksek performanslı betonun basınç dayanımını tahmin etmek için iki yapay zeka tekniğinin, Gaussian Süreç Regresyonu (GPR) ve Yapay Sinir Ağı (ANN), hassasiyetini ve sağlamlığını analiz etmeyi amaçlamışlardır. Matern32 çekirdek fonksiyonunu kullanan GPR, diğerlerini geride bırakarak en iyi performansı sergilediğini göstermişlerdir [12]. Ultra-Yüksek Performanslı Betonun hassas tasarımı ve özelliklerinin tahmini için ise Modifiye Andreasen ve Andersen (MAA) modeli ile Genetik Algoritma tabanlı Yapay Sinir Ağı (GA-ANN) tekniğinin ele alındığı bir çalışmada model, diğer klasik tahmin modellerine kıyasla önemli üstünlükler göstermiştir [13]. Moein vd., çalışmalarında beton mekanik özelliklerini tahmin etmek için başarılı makina öğrenimi ve derin öğrenme model uygulamalarının bir derlemesini sunmuşlardır. Birkaç modelleme algoritması incelemiş, uygulamaları, performansları, mevcut bilgi boşlukları ve gelecekteki araştırmalar için önerileri vurgulamışlardır. İnşaat mühendislerine ve araştırmacılara, uygulamalarına uygun ve doğru teknikleri seçmelerinde yardımcı olacağını söylemişlerdir [14]. Ahmad vd., betonun mekanik özelliklerini tahmin etmek için geniş bir kullanım alanına sahip olan makine öğrenimi tekniklerini değerlendirmişlerdir. Bagging gibi ensemble yöntemlerinin, bireysel algoritmalarla karşılaştırıldığında daha iyi bir tahmin performansı gösterdiğini bulmuşlardır. Özellikle, ensemble modelin karar ağacı ve gen ifade programlama yöntemlerine kıyasla daha yüksek bir R^2 değeri olan 0,911 elde ettiği görülmüştür [15]. Başka bir özel beton türü olan Ultra-Yüksek Performanslı Betonun basınç dayanımını tahmin etmek için akıllı algoritmaların kullanılmasının önemini işleyen

bir araştırmada ise Sıralı Özellik Seçimi (SFS) ve Sinir Açıklama Diyagramı (NID) gibi derin makine öğrenme tekniklerinin yapay sinir ağlarına katkısı incelenmiş ve kritik malzeme bileşenlerini tanımlamaya yönelik bir yöntem sunulmuştur. 110 adet basınç dayanımı testi verisi kullanılarak yapılan bu çalışma, dört ana malzeme bileşeninin (çimento, uçucu kül, silis dumanı ve su) tahmin doğruluğunu önemli ölçüde artırdığını göstermişlerdir [16]. Kaloop vd., betonun basınç dayanımını tahmin etmek için çok değişkenli Adaptif Regresyon Eğri Modelli (MARS) bir özellik çıkarma yöntemi olarak kullanmanın ve ardından Gradyan Ağaç Artırma Makinesi (GBM) öğrenme tekniği ile tahmin etmenin etkinliğini incelemişlerdir. Çimento, yüksek fırın cürufu, su, kimyasal katkı, ince agrega, kür süresi gibi sekiz giriş değişkeninin toplam 1030 veri seti kullanılarak yapılan analiz sonuçları, betonun basınç dayanımını farklı yaşlar için tahmin etmenin mümkün olduğunu göstermiştir [17]. Son olarak, Zheng vd., beton karışım oranlarını optimize etmek için Çok Amaçlı Optimizasyon (MOO) çerçevesi önermişlerdir ve bu amaçla gelişmiş makine öğrenimi yöntemleri kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar, 5-katlamalı çapraz doğrulama, hiperparametre optimizasyonu ve regresyon özellik eleme gibi tekniklerin basınç dayanımı ve bağlayıcı yoğunluğu gibi önemli beton performans göstergelerinin tahmin doğruluğunu önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuşlardır [18].

Bu çalışmada KYHB'nin basınç dayanımını tahmin etmek için uluslararası deneysel araştırmalardan bir veri seti toplanmıştır. Veri seti, çeşitli KYHB bileşimlerinin oranlarına (çimento, su, mineral tozu, kimyasal katkı, hafif agrega ve normal agrega miktarları) ek olarak KYHB'nin taze hal birim hacim ağırlığı, çökme-yayılma test sonuçları ve basınç dayanımı değerlerini içermektedir. Çalışmanın amacı, KYHB'nin basınç dayanımını en doğru şekilde tahmin etmek için hedef birim hacim ağırlık ve hedef işlenebilirlik ile beton bileşimini kullanan bir makine öğrenmesi modeli oluşturmaktır. Bu amaçla çalışmada dört farklı makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır. Ek olarak bu modellerin birbirleri ile karşılaştırılması ile KYHB dayanımının tahmininde en başarılı modelin ortaya çıkarılması da amaçlanmaktadır. KYHB'nin ön karışım tasarımı için basınç dayanımını tahmin etme ihtiyacını ortadan kaldırabilecek modeller geliştirmek için Lineer Regresyon (LR), Gauss Süreç Regresyonu (GSR), Quadratik Destek Vektör Makinası (Q-DVM) ve Kernel Destek Vektör Makinası (K-DVM) olarak bilinen makine öğrenmesi algoritmaları seçilmiştir. Sonuç olarak, bu modeller içerisinde en başarılı olan Gauss Süreç Regresyonu (GSR) modeli, en doğru tahmin sonuçlarını üretme kabiliyetini göstermiş ve bu yaklaşımın KYHB'nin ön karışım tasarımında kullanım için en uygun makine öğrenmesi metodu olduğu belirlenmiştir. Basınç dayanımının belirlenen girdilere göre tahmin edilebilmesi ile KYHB için karışım tasarımı sürecinin önemli bir bölümü model üstünde yapılabileceğinden hedeflenen karışımı üretme süreci oldukça kısalabilecektir. Böylece karışım tasarımı sürecindeki zaman, malzeme ve işgücünden önemli bir tasarruf sağlanabilecektir. Son olarak, çalışmada sunulan metot ile KYHB kullanımının arttırılmasına katkı sağlanması beklenmektedir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada kullanılan veri seti ile makine öğrenmesi metotları bu bölümde açıklanmıştır.

2.1 Veri setinin toplanması ve düzenlenmesi

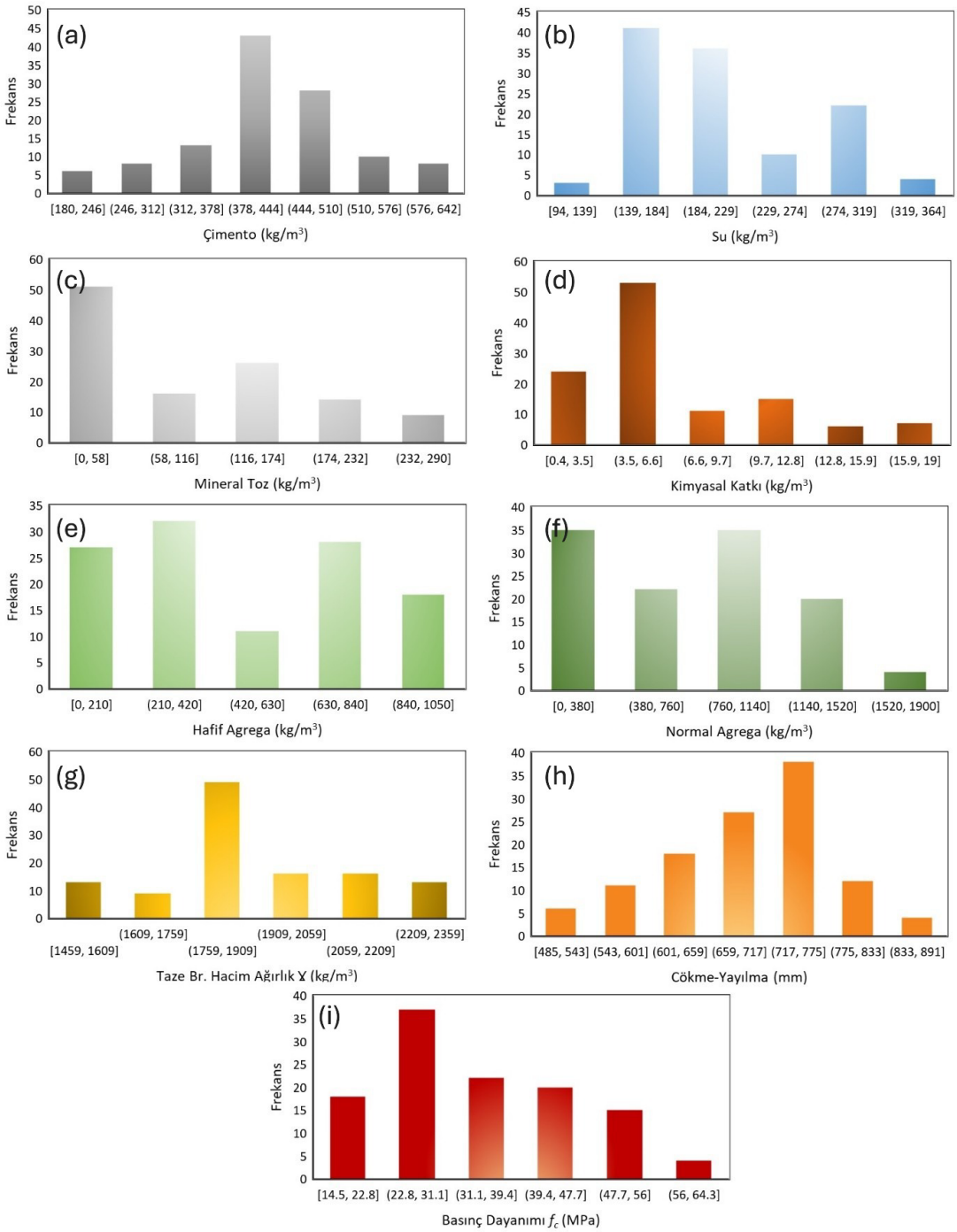
Bu çalışmada, literatürdeki deneysel çalışmalardan [19–32] elde edilen deneysel bir veri seti, LWSCC'nin basınç dayanımını tahmin eden modeller geliştirmek için kullanılmıştır. Toplam 116 farklı LWSCC karışımını içeren veri setinin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. KYHB bileşimini oluşturan kg/m^3 cinsinden çimento (Ç), su (S), mineral toz (MT), kimyasal katkı (KK), hafif agrega (HA) ve normal agrega (NA) miktarları ile KYHB'nin taze birim hacim ağırlığı (γ)'nın yanında işlenebilirliği ifade eden çökme-yayılma (ÇY) (mm) değeri makine öğrenmesi modellerinin girişlerini oluşturmaktadır. Bu girişlere karşılık olarak modellerin üreteceği çıkış ise MPa cinsinden KYHB'nin 28 günlük basınç dayanımıdır (f_c) (Tablo 1).

Tablo 1. Veri setinin istatistiksel özellikleri.

	GİRİŞLER								ÇIKIŞ
	Ç	**S**	**MT**	**KK**	**HA**	**NA**	**γ**	**ÇY**	**f_c**
Minimum	180,00	93,80	0,00	0,40	0,00	0,00	1459,00	485,00	14,50
Maksimum	591,00	332,50	270,00	17,90	932,00	1753,00	2343,00	860,00	64,30
Ortalama	419,08	212,03	95,97	6,57	465,29	699,10	1890,26	693,66	34,18
Std. Sapma	92,33	62,68	80,49	4,27	290,55	522,87	211,00	81,44	11,63

Bu çalışmada, beton karışım tasarımı için kullanılan giriş özellikleri ve çıkış özellikleri için histogram garfikleri çizdirilmiştir (Şekil 1a-1i). Modellerin girişleri, çimento miktarı (kg/m^3), su miktarı (kg/m^3), mineral toz miktarı (kg/m^3), kimyasal katkı miktarı (kg/m^3), hafif agrega miktarı (kg/m^3) ve normal agrega miktarı (kg/m^3)

gibi KYHB bileşenlerini içermektedir. Öte yandan girişlere, taze KYHB'nin birim hacim ağırlığı (kg/m^3) ve çökme-yayılma test sonuçları (mm) da dahil edilmiştir. Modellerin çıkışı ise 28 günlük basınç dayanımı (MPa)'dır. Şekil 1'de tüm bu parametreler için frekans histogramları verilmiştir. Bu histogramlar, çalışmada kullanılan veri setinin giriş ve çıkış parametreleri için bir parametrenin farklı aralıklarda hangi sıklıkla dağıldığını göstermektedir. Bu histogramlar, KYHB veri setinin özelliklerinin daha iyi anlaşılmasına ve optimize edilmesine katkı sağlar.



Şekil 1. Tüm giriş ve çıkış verileri için frekans histogramları: a) çimento, b) su, c) mineral toz, d) kimyasal katkı, e) hafif agrega, f) normal agrega, g) taze birim hacim ağırlık, h) çökme-yayılma, i) basınç dayanımı.

Histogramlar incelendiğinde veri setinin hangi aralıklarda yoğunlaşmış olduğu görülmektedir. Şekil 1a, 1b, 1c ve 1d'de sırasıyla çimento su, mineral toz ve kimyasal katkı malzemelerinin literatürden toplanan veri setinde belirli aralıklarda yoğun olarak kullanıldığı görülmektedir. Şekil 1e ve 1f'de verilen hafif ve normal agreganın ise geniş bir aralığa yayılmış olduğu anlaşılmaktadır. Betonların taze birim hacim ağırlıkları (Şekil 1g) ve çökme-yayılma test sonuçlarının (Şekil 1h) ise belirli değerler aralığında yoğunlaşmasının sebebi ise çalışmaya konu olan KYHB'un özel bir beton türü olmasından kaynaklıdır. Son olarak, Şekil 1i'de histogram grafiği görülen basınç dayanımı ise genellikle 30 MPa civarında yoğunlaşmıştır. Bu durum veri setinde mümkün olduğunca normal dayanımlı betonlara yer verilmesinden kaynaklanmaktadır.

2.2 Makine öğrenmesi ve performans ölçümleri

Bu çalışmada, Kendiliğinden Yerleşen Hafif Betonun (KYHB) basınç dayanımını tahmin etmek için dört farklı makine öğrenimi algoritması kullanılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde kullanılan makine öğrenmesi algoritmaları tanıtılmıştır.

2.2.1 Lineer regresyon (LR)

LR, iki değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılan istatistiksel bir model veya yaklaşımdır. Bu modelde, bir değişken Bağımlı Değişken olarak hareket ederken, diğeri Bağımsız Değişken olarak hareket eder. Regresyon çizgisi, bu iki değişken arasındaki ilişkiyi temsil eder [33].

Temelde, basit doğrusal regresyon kullanılarak tek bir değişkenin tahminlerinin yapıldığı görülmektedir. Bu durumda, regresyon denklemi Deklem 1'deki gibidir.

$$Y = a + bX + \varepsilon \tag{1}$$

Burada *Y*, yanıt veya çıktı veya bağımlı değişken; *a*, ara kesit; *b*, doğrusal regresyon çizgisinin eğimi; *X*, Bağımsız Değişken; ve *ε*, modelin hatası veya artığıdır. Daha sonra, Çoklu Doğrusal Regresyon kullanılarak birden fazla değişkenin tahminlerinin yapıldığı görülmektedir. Bu durumda, regresyon Denklem 2'deki hale gelir.

$$Y = a + bX1 + cX2 + dX3 + \ldots\ldots + \varepsilon \tag{2}$$

Burada, *Y*, yanıt; *X1*, *X2*, *X3*, bağımsız değişkenler; *a*, ara kesit; *b*, *c*, *d*, bağımsız değişkenlerin eğimleri; ve *ε*, tüm regresyon çizgileri için hesaplanan artık hataların toplamıdır.

İki tür regresyon analizinde de amaç, ortak bir faktör olan hatayı (ε) en aza indirmektir. Bu hata, çeşitli matematiksel yöntemler kullanılarak azaltılır. Bazı yaygın yöntemler arasında Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE), Ortalama Kare Hatası (MSE), Ortalama Mutlak Hata (MAE), R^2, En Küçük Kareler Yöntemi, Mutlak hataların toplamı ve Gradyan İniş Yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında, en yaygın ve rahat olanı RMSE yöntemidir. Bu yöntem, tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki farkın karelerinin köküdür [33].

Uyum performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir metrik olan RMSE (Kare Kök Ortalama Kare Hata), tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasının karekökünü ifade eder. Formül olarak, RMSE, tahmin edilen değerler (Y_{pred}) ile gerçek veya gözlemlenen değerler (*Y*) arasındaki farkların karelerinin toplamının gözlem sayısına (*N*) bölünmesi ve sonrasında karekökünün alınmasıyla hesaplanır. RMSE, bir modelin doğruluğunu değerlendirirken, farkların büyüklüğünün katkısını vurgular ve bu sayede daha büyük farklar daha fazla ağırlığa sahip olur. RMSE'nin Denklem 3'te verilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\Sigma(Y_{pred} - Y)^2}{N}} \tag{3}$$

Burada, Y_{pred} tahmin edilen değerler, *Y* gerçek veya gözlemlenen değerler ve *N* gözlem sayısını temsil eder. RMSE, genellikle bir modelin performansını değerlendirirken kullanılır ve daha küçük bir RMSE değeri, daha iyi bir model uyumu olarak kabul edilir [34].

Ortalama Kare Hatası (MSE), modelin tahmin hatalarının ortalama büyüklüğünün karesidir. MSE, her bir gözlem için tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki farkın karesinin ortalaması olarak hesaplanır. Büyük hataların daha büyük bir etkisi olması durumunda MSE'nin değeri büyür, çünkü hataların kareleri alınır (Denklem 4).

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{m}(X_i - Y_i)^2 \quad (4)$$

Burada, N gözlem sayısını, X_i tahmin edilen değerleri ve Y_i gerçek değerleri temsil eder. MSE'nin en iyi değeri 0'dır, bu durumda model tahminleri gerçek değerlere mükemmel şekilde uyar. En kötü değer ise +∞'dir, bu durumda modelin tahminleri gerçek değerlerden çok uzak olur [35].

Başka bir hata metriği olan Ortalama Mutlak Hata (MAE), modelin tahmin hatalarının ortalama büyüklüğünü ifade eder. Model tahminleri ile gerçek gözlemler arasındaki farkların mutlak değerlerinin ortalaması olarak hesaplanır. Büyük hataların ortalama hata üzerinde daha büyük bir etkisi olduğundan, MAE'nin hesaplanmasında farkların mutlak değerleri kullanılır. Bu, her gözlem için hata büyüklüğünün aynı öneme sahip olduğu anlamına gelir. MAE ve RMSE, her ikisi de ilgi değişkeninin birimleri cinsinden ortalama model tahmin hatasını ifade eder. Ancak, RMSE'de hatalar kare alındığından büyük hatalar daha yüksek bir ağırlık kazanır. MAE, mutlak değer kullanarak hata büyüklüklerini hesapladığı için, matematiksel hesaplamalarda istenmeyen mutlak değeri içermez (Denklem 5).

$$MAE = \frac{\sum |Y_{pred} - Y|}{N} \quad (5)$$

Burada, Y_{pred} tahmin edilen değerler, Y gerçek veya gözlemlenen değerler ve N gözlem sayısını temsil eder [36].

R^2, her endojen değişkenin açıklanan varyansını ölçer ve bu nedenle modelin açıklama gücünün bir ölçüsüdür. R^2 ayrıca, örnekleme içindeki tahmin gücü olarak da adlandırılır. R^2 değeri 0 ile 1 arasında değişir ve daha yüksek değerler, modelin daha fazla açıklama gücüne sahip olduğunu gösterir. Genel bir kılavuz olarak, 0.75, 0.50 ve 0.25 R^2 değerleri sırasıyla sağlam, orta ve zayıf olarak kabul edilebilir. Ancak, kabul edilebilir R^2 değerleri bağlama bağlı olarak değişebilir. Örneğin, hisse senedi getirilerini tahmin etmek gibi bazı alanlarda düşük R^2 değerleri kabul edilebilir olarak görülebilir [37].

2.2.2 Gauss süreç regresyonu (GSR)

Gauss Süreci Regresyonu (GSR) yöntemi, bir probabilistik non-parametrik öğrenme yöntemidir ve genellikle regresyon ve sınıflandırma problemleri için kullanılır. Bu yöntem, çekirdek fonksiyonları nedeniyle non-lineer verilerin modellemesi için oldukça etkilidir. GSR'nin ana avantajlarından biri, girdi verileri için güvenilir bir yanıt sağlamasıdır [38]. Öncelikle, GSR'nin temel varsayımı, çıktının Denklem 6'daki gibi hesaplanabileceğidir:

$$\int(x) = y + e \quad (6)$$

Burada $\int(x)$ bağımsız değişkenleri temsil ederken, y hedef değişkenleri (beklenen çıktı) ve e gözlem gürültüsünü simgeler. Bu denklemde, e örnekleme için eşit bir gürültü varyansına sahiptir. GSR regresyonu aşağıdaki genel Denklem 7 ile başlar:

$$\int(x) = K_*(K + a_n^2 I)^{-1} y \quad (7)$$

Burada K_* test veri noktalarının eğitim veri noktalarına olan çekirdek fonksiyonlarından oluşan matris, K eğitim veri noktalarının çekirdek fonksiyonlarından oluşan matris, a_n^2 gözlem gürültüsünün varyansı ve I birim matrisdir. Eğitim adımında, modelin hiper-parametreleri ayarlanır. Bu aşamada genellikle gürültü varsayılmaz. Ardından, test veri setinin çıktıları, eğitim veri setinin çıktıları ve verilen bağımsız değişken kullanılarak tahmin edilir. Yukarıdaki denklemler, modelin tahminlerini açıklar ve gauss sürecinin belirli bir dağılıma sahip olduğunu gösterir. Son olarak, GSR modelli bir tahminin doğruluğunu artırmak için, belirli bir hiper-parametre ayarı yapmak önemlidir. Bu ayarlamalar, genellikle veriye özgüdür ve veri setinin özelliklerine bağlıdır [39].

2.2.3 Quadratik destek vektör makinası (Q-DVM)

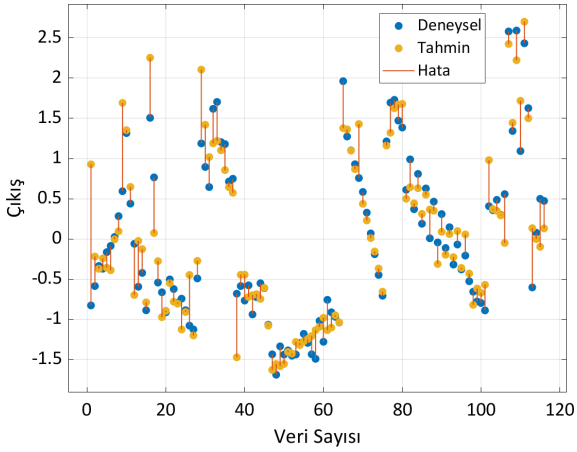
Quadratik Destek Vektör Makinası (Q-DVM), Dagher tarafından, ilk kez bir kernel-bağımsız non-lineer sınıflandırıcı olarak önerilmiştir. Bu yöntem, maksimum geometrik marj fikrine dayanır ve eğitim örneklerini 2 boyutlu bir hiper-yüzey ile böler. Q-DVM'nin temel avantajı, uygun çekirdek fonksiyonlarını bulma ve hiper-parametrelerini ayarlama zorluğundan kaçınmasıdır [40, 41].

2.2.4 Kernel destek vektör makinesi (K-DVM)

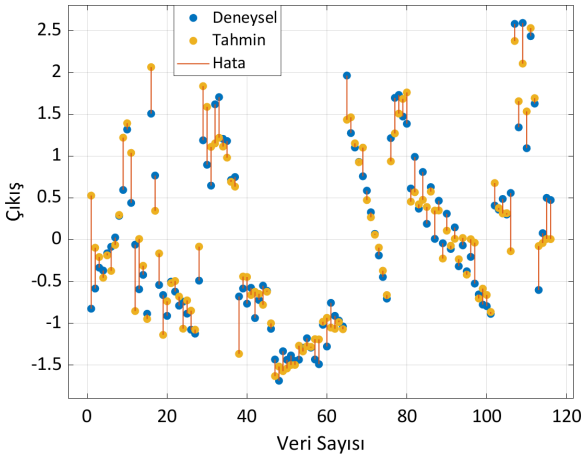
Kernel Destek Vektör Makinesi (K-DVM) doğrusal olmayan veri kümelerini sınıflandırmak için kullanılan güçlü bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. Bu yöntem, veri noktalarını daha yüksek boyutlu bir uzaya eşlemek suretiyle bu uzayda doğrusal olarak ayrılabilir hale getirir. Özellikle, doğrusal bir hiperdüzlemle ayrılamayan veri kümelerini sınıflandırmak için K-DVM oldukça etkilidir. Çeşitli çekirdek fonksiyonları aracılığıyla veri noktalarını yüksek boyutlu uzaylara eşleme esasına dayanır ve bu sayede doğrusal olmayan veri kümelerini başarıyla sınıflandırabilir. Bu yöntem, karmaşık yapıya sahip veri kümeleri üzerinde de etkilidir ve problem bağlamına göre en uygun çekirdek fonksiyonunun seçilmesi önemlidir [42].

3. Bulgular ve Tartışma

Bir özel beton türü olan Kendiliğinden Yerleşen Hafif Beton (KYHB)'nin bileşim parametreleri, çökme-yayılma hedefi ve taze birim hacim ağırlık özelliklerinden, 28 günlük basınç dayanımını tahmin etmeyi amaçlayan bu çalışmada ulaşılan sonuçlar bu bölümde açıklanmıştır. Çalışmada kullanılan 4 farklı makine öğrenmesi algoritmasından ilki, LR modelidir. LR modeli, doğrulama veri setine göre 0,358 RMSE değeri ile en düşük ortalama kare hatayı elde etmiştir. Bu, modelin doğruluk açısından kabul edilebilir bir performans sergilediğini göstermektedir. Ayrıca, R^2=0,871 değeri, modelin verilere iyi uyum sağladığını gösterir. Ancak, MAE değeri 0,246'dır, bu da bazı tahminlerin hala iyileştirilebileceğini göstermektedir. LR, basitliği ve yorumlana bilirliği nedeniyle tercih edilir, ancak daha karmaşık ilişkileri yakalamak için yetersiz olabilir (Şekil 2).



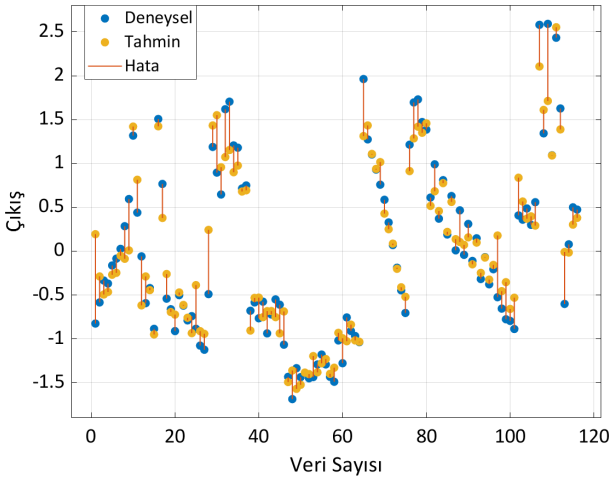
Şekil 2. LR modelinin çıkışları ile deneysel basınç dayanımı verilerin karşılaştırılması.



Şekil 3. Q-DVM modelinin çıkışları ile deneysel basınç dayanımı verilerin karşılaştırılması.

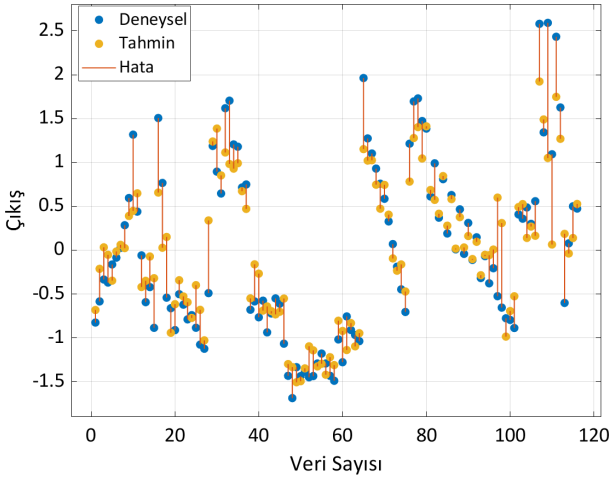
Q-DVM modeli, RMSE=0,322 değeri ve R^2=0,896 değeri ile oldukça iyi bir performans sergilemektedir. Q-DVM, sınıflandırma problemlerindeki başarısıyla bilinse de, bu sonuçlar, metodun regresyon problemleri için de etkili olduğunu göstermektedir. Ancak, MSE ve MAE değerleri biraz yüksektir, bu da modelin bazı tahminlerde geliştirilebileceğini göstermektedir (Şekil 3).

GSR modeli, RMSE=0,289 değeri ve R^2=0,916 değeri ile en iyi performansı sergilemektedir. Bu, GSR'nin verilere oldukça iyi uyan ve karmaşık olmayan non-lineer ilişkileri yakalayabilen güçlü bir regresyon modeli olduğunu göstermektedir. Ayrıca, MAE değeri diğer modellere kıyasla daha düşüktür (MAE=0,211), bu da GSR'nin tahminlerinin daha kesin olduğunu göstermektedir (Şekil 4).



Şekil 4. GSR modelinin çıkışları ile deneysel basınç dayanımı verilerin karşılaştırılması.

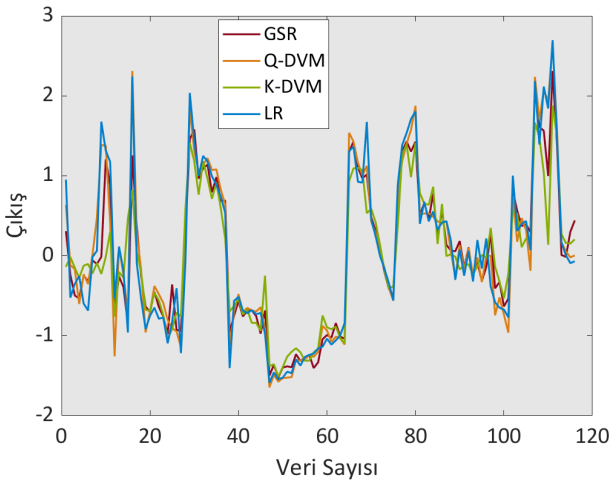
K-DVM modeli, RMSE=0,394 değeri ile en düşük performansı sergilemektedir. Ayrıca, R^2 değeri diğer modellere kıyasla daha düşüktür (R^2=0,844). Bu, modelin verilere daha az uyum sağladığını ve tahminlerin daha az doğru olduğunu gösterebilir. Ancak, MAE=0,288 ile diğer modellere benzerdir, bu da bazı tahminlerin doğruluğunun diğer modellerinkinden düşük olduğunu göstermektedir (Şekil 5).



Şekil 5. K-DVM modelinin çıkışları ile deneysel basınç dayanımı verilerin karşılaştırılması.

Çalışmada, dört farklı regresyon modelinin performansı incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. LR, Q-DVM, GSR ve K-DVM, gerçek ve tahmin edilen yanıtlar arasındaki ilişkiyi değerlendiren modeller olmuşlardır. Şekil 6'da tüm modellerin tahminleri grafik olarak görülmektedir. Ayrıca Tablo 2'de modellerin performans ölçüm parametreleri verilmiştir. LR modeli genellikle doğrusal bir ilişki sergilerken, Q-DVM modelinin bazı durumlarda düşük doğrulukla tahmin yaptığı gözlenmiştir. Öte yandan, GSR modeli en düşük RMSE değeri ve en yüksek R^2

değeri ile en iyi performansı gösterirken gerçek ve tahmin edilen yanıtlar arasında neredeyse mükemmel bir uyum göstermiştir. Bu da modelin verilere en iyi uyum sağladığını ve doğru tahminlerde bulunduğunu işaret etmektedir. K-DVM modeli, diğer modellere kıyasla daha yüksek hata oranlarına sahip olmasına rağmen, genel olarak doğrusal bir ilişki sergilemiştir. Çalışmada tercih edilen tüm modellerin tahmin doğrulukları (R^2) %80'in üzerindedir. Bu sonuçlar, farklı regresyon modellerinin performansını değerlendirerek, gelecekteki tahminler için en uygun modelin seçilmesine yardımcı olabilir. Ancak, her bir modelin belirli bir veri setine ve probleme bağlı olarak avantajları ve dezavantajları olduğu unutulmamalıdır.



Şekil 6. Kullanılan regresyon modelleri için doğrulama tahminlerinin görselleştirilmesi.

Tablo 2. KYHB dayanım tahmini için makine öğrenmesi algoritmalarının performans ölçümleri.

Model	RMSE	MSE	R^2	MAE
LR	0,3582	0,1283	0,87100	0,2457
GSR	0,2888	0,08345	0,91614	0,2107
Q-DVM	0,3216	0,1034	0,89605	0,2365
K-DVM	0,3940	0,1553	0,84394	0,2883

Sonuç olarak, KYHB tasarımında GSR gibi bir makine öğrenmesi algoritmasından yararlanılması, beton karışım tasarımı sürecini kısaltacaktır. Bu sayede süreçte meydana gelen malzeme ve işgücü sarfiyatı da azaltılabilecektir. Bu çalışma, farklı regresyon modellerinin karşılaştırılmasıyla, verilerin doğru şekilde analiz edilmesi, gelecekteki tahminlerin geliştirilmesi için de değerli bir rehber sağlayacaktır.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, özel bir beton türü olan KYHB'nin bileşim parametreleri, çökme-yayılma hedefi ve taze birim hacim ağırlık özelliklerinden, 28 günlük basınç dayanımını tahmin etmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla, dört farklı makine öğrenmesi algoritması kullanan regresyon modelinin performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışma sonuçları şu şekilde özetlenebilir:

- Öncelikle, LR modelinin performansı gözden geçirilmiştir. Bulgular, LR modelinin doğruluk açısından kabul edilebilir bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ancak, diğer modellerle karşılaştırıldığında, LR daha düşük bir doğruluk seviyesine sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- Hata ve korelasyon değerleri karşılaştırıldığında Q-DVM modelinin performansının ise LR modeline göre daha iyi olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, Q-DVM modelinin LR modeline göre daha iyi bir performans sergilediğini göstermektedir.
- Hata değerleri ve korelasyon katsayıları açısından en iyi performansı GSR modeli sergilerken, K-DVM modeli ise bu çalışmadaki en düşük performanslı model olmuştur. Yine de bütün modellerin tahminleri ve deneysel gerçek veriler arasındaki korelasyonlarının %80'in üstünde olması çalışmada geliştirilen tüm

modellerin kullanılabilir olduğunu göstermektedir. GSR modelinin performansı bu açıdan bakıldığında %90'ın üstüne çıkmıştır. Dolayısıyla GSR çalışmada en doğru tahminleri üreten model olmuştur.

- Son olarak, bu çalışma, GSR metodunun KYHB'nin karışım tasarımında kullanılabileceğini göstermiş ve amacına ulaşmıştır. Ek olarak çalışma, farklı regresyon modellerinin karşılaştırmalı bir analizini sunarak, araştırmacılara doğru modeli seçmelerine yardımcı olabilir. Ancak, her bir modelin kendi avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır ve hangi modelin tercih edileceği, belirli bir veri setinin özelliklerine ve analiz gereksinimlerine bağlı olacaktır. Bu sonuçlar, gelecekteki farklı beton türlerinin karışım tasarımlarını konu edinen çalışmalar için de değerli bir temel oluşturabilir.

Teşekkür

Yazar katkıları şu şekilde açıklanmıştır: H.G., analizleri gerçekleştirmiştir ve kavramsallaştırma, metodoloji/çalışma, doğrulama, analiz ve yorumlama, araştırma, veri iyileştirme, yazma/orijinal taslak, görselleştirme, metodoloji işlerini gerçekleştirmiştir. M.U. sonuçları yorumlamıştır ve kavramsallaştırma, metodoloji/çalışma, analiz ve yorumlama, yazma/orijinal taslak, görselleştirme, metodoloji işlerini gerçekleştirmiştir. M.A.U., fikir sahibidir ve kavramsallaştırma, doğrulama, analiz ve yorumlama, araştırma, Yazma/inceleme ve düzenleme işlerini gerçekleştirmiştir.

Kaynaklar

[1] Bibm C, Ermco, EFNARC E. European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use. SCC European Project Group; 2005.
[2] Sağlam RN, Açıkgenç Ulaş M, Alyamaç KE. Hafif Beton Üretimi İçin Gerekli Olan Hafif Agrega Miktarının Yapay Sinir Ağı ile Tahmin Edilmesi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim Derg. 2022;34(2):889-898.
[3] Vakhshouri B, Nejadi S. Mix design of light-weight self-compacting concrete. Case Stud Constr Mater. 2016;4:1-14.
[4] TS EN 206 Beton- Özellik, Performans, Imalat ve Uygunluk. Published online 2013.
[5] TS 802 Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları. Published online 2016.
[6] Agrawal Y, Gupta T, Sharma R, Panwar NL, Siddique S. A Comprehensive Review on the Performance of Structural Lightweight Aggregate Concrete for Sustainable Construction. Constr Mater. 2021;1(1):39-62.
[7] Hu X, Li B, Mo Y, Alselwi O. Progress in Artificial Intelligence-based Prediction of Concrete Performance. J Adv Concr Technol. 2021;19(8):924-936.
[8] Ziolkowski P, Niedostatkiewicz M, Kang SB. Model-Based Adaptive Machine Learning Approach in Concrete Mix Design. Materials (Basel). 2021;14(7).
[9] Golafshani EM, Kim T, Behnood A, Ngo T, Kashani A. Sustainable mix design of recycled aggregate concrete using artificial intelligence. J Clean Prod. 2024;442:140994.
[10] Marani A, Jamali A, Nehdi ML. Predicting Ultra-High-Performance Concrete Compressive Strength Using Tabular Generative Adversarial Networks. Mater (Basel, Switzerland). 2020;13(21).
[11] Farooq F, Ahmed W, Akbar A, Aslam F, Alyousef R. Predictive modeling for sustainable high-performance concrete from industrial wastes: A comparison and optimization of models using ensemble learners. J Clean Prod. 2021;292:126032.
[12] Dao D Van, Adeli H, Ly HB, et al. A Sensitivity and Robustness Analysis of GPR and ANN for High-Performance Concrete Compressive Strength Prediction Using a Monte Carlo Simulation. Sustainability. 2020;12(3).
[13] Fan D, Yu R, Fu S, et al. Precise design and characteristics prediction of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) based on artificial intelligence techniques. Cem Concr Compos. 2021;122:104171.
[14] Moein MM, Saradar A, Rahmati K, et al. Predictive models for concrete properties using machine learning and deep learning approaches: A review. J Build Eng. 2023;63:105444.
[15] Ahmad A, Farooq F, Niewiadomski P, et al. Prediction of Compressive Strength of Fly Ash Based Concrete Using Individual and Ensemble Algorithm. Materials (Basel). 2021;14(4).
[16] Abuodeh OR, Abdalla JA, Hawileh RA. Assessment of compressive strength of Ultra-high Performance Concrete using deep machine learning techniques. Appl Soft Comput. 2020;95:106552.
[17] Kaloop MR, Kumar D, Samui P, Hu JW, Kim D. Compressive strength prediction of high-performance concrete using gradient tree boosting machine. Constr Build Mater. 2020;264:120198.
[18] Zheng W, Shui Z, Xu Z, Gao X, Zhang S. Multi-objective optimization of concrete mix design based on machine learning. J Build Eng. 2023;76:107396.
[19] Andiç-Çakır Ö, Hızal S. Influence of elevated temperatures on the mechanical properties and microstructure of self consolidating lightweight aggregate concrete. Constr Build Mater. 2012;34:575-583.
[20] Kaffetzakis M, Papanicolaou C. Mix Proportioning Method for Lightweight Aggregate SCC (LWASCC) Based on the Optimum Packing Point Concept BT - Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction. In: Fardis MN, ed. Springer Netherlands; 2012:131-151.
[21] Ofuyatan OM, Olutoge F, Omole D, Babafemi A. Influence of palm ash on properties of light weight self-compacting

concrete. Clean Eng Technol. 2021;4:100233.
[22] Aslani F, Ma G, Yim Wan DL, Muselin G. Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. J Clean Prod. 2018;182:553-566.
[23] Mazloom M, Mahboubi F. Evaluating the settlement of lightweight coarse aggregate in self-compacting lightweight concrete. Comput Concr. 2017;19(2):203–210.
[24] Ghanbari M, Kohnehpooshi O, Tohidi M. Experimental Study of the Combined Use of Fiber and Nano Silica Particles on the Properties of Lightweight Self Compacting Concrete. Int J Eng. 2020;33(8):1499-1511.
[25] Andiç-Çakır Ö, Yoğurtçu E, Yazici S, Ramyar K. Self-compacting lightweight aggregate concrete: design and experimental study. Mag Concr Res. 2009;61(7):519-527.
[26] Mazaheripour H, Ghanbarpour S, Mirmoradi SH, Hosseinpour I. The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. Constr Build Mater. 2011;25(1):351-358.
[27] Maghsoudi AA, Mohamadpour S, Maghsoudi M. Mix design and mechanical properties of self compacting light weight concrete. Int J Civ Eng. 2011;9(3):230-236. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-80052764281&partnerID=40&md5=fbdde60f5121d637865440a4b9e9a0fa
[28] Güneyisi E, Gesoğlu M, Booya E. Fresh properties of self-compacting cold bonded fly ash lightweight aggregate concrete with different mineral admixtures. Mater Struct. 2012;45(12):1849-1859.
[29] Papanicolaou CG, Kaffetzakis MI. Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art & Pumice Application. J Adv Concr Technol. 2011;9(1):15-29.
[30] Zarnaghi VN, Fouroghi-Asl A, Nourani V, Ma H. On the pore structures of lightweight self-compacting concrete containing silica fume. Constr Build Mater. 2018;193:557-564.
[31] Hilal NN, Sahab MF, Mohammed Ali TK. Fresh and hardened properties of lightweight self-compacting concrete containing walnut shells as coarse aggregate. J King Saud Univ - Eng Sci. 2021;33(5):364-372.
[32] Li J, Chen Y, Wan C. A mix-design method for lightweight aggregate self-compacting concrete based on packing and mortar film thickness theories. Constr Build Mater. 2017;157:621-634.
[33] Priya KS. Linear regression algorithm in machine learning through MATLAB. Int J Res Appl Sci Eng Technol. 2021;9(12):989-995.
[34] Liemohn MW, Shane AD, Azari AR, Petersen AK, Swiger BM, Mukhopadhyay A. RMSE is not enough: Guidelines to robust data-model comparisons for magnetospheric physics. J Atmos Solar-Terrestrial Phys. 2021;218:105624.
[35] 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 Comput Sci. 2021;7:e623.
[36] Kumar A, Verma A, Shinde G, Sukhdeve Y, Lal N. Crime Prediction Using K-Nearest Neighboring Algorithm. In: 2020 International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (Ic-ETITE). ; 2020:1-4.
[37] Purwanto A. Partial Least Squares Structural Squation Modeling (PLS-SEM) Analysis for Social and Management Research: A Literature Review. ournal Ind Eng Manag Res. 2021;2(4):114-123.
[38] Açıkgenç Ulaş M. Gauss Süreç Regresyonu ve Destek Vektör Makineleri Kullanılarak Değerlendirilen Kendiliğinden Yerleşen Beton Davranışının Deneysel Veri İle Doğrulanması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim Derg. 2023;35(1):379-388.
[39] Mahdaviara M, Rostami A, Keivanimehr F, Shahbazi K. Accurate determination of permeability in carbonate reservoirs using Gaussian Process Regression. J Pet Sci Eng. 2021;196:107807.
[40] Dagher I. Quadratic kernel-free non-linear support vector machine. J Glob Optim. 2008;41(1):15-30.
[41] Ye J, Yang Z, Ma M, Wang Y, Yang X. ∈-Kernel-free soft quadratic surface support vector regression. Inf Sci (Ny). 2022;594:177-199.
[42] Jun Z. The Development and Application of Support Vector Machine. J Phys Conf Ser. 2021;1748(5):52006.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 263-273, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1552793

Nohut Özütünden Platin Nano Parçacık Sentezinin Araştırılması

Umur ÜSTÜNOĞLU[1], Selin YETİM[2], Yusuf Mert SARI[3], Burcu Nilgün ÇETİNER[4*]
[1,2,3,4] Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
[1] ustunoglu59@hotmail.com, [2] yagmurselinyetim@gmail.com, [3] ysfsari2@gmail.com, [4*] burcunilguncetiner@gmail.com

(Geliş/Received: 20/09/2024; Kabul/Accepted: 24/02/2025)

Öz: Platin Grubu Metaller (PGM), nadir bulunmaları ve kataliz, elektronik, yakıt hücreleri gibi alanlardaki kritik kullanımları nedeniyle önemli hammaddelerdir. Bu çalışmada, yeşil kimya yaklaşımıyla nohut özütü kullanılarak atık platin kaplama çözeltilerinden nano ölçekli platin geri kazanılmıştır. Platin çözeltisinin konsantrasyonun 125 ppm olduğu ICP-OES ile doğrulanmış ve farklı oranlarda nohut filiz özütü ve saf su ilave edilerek 24 saat reaksiyona bırakılmıştır. Ardından, filtrasyon sonrası UV-VIS spektrofotometri, zeta potansiyeli ve nano parçacık boyutu analizleri gerçekleştirilmiştir. UV-VIS sonuçları, $PtCl_6^{2-}$'nin indirgenmesiyle 220 nm'de Pt^0 absorpsiyon pikini doğrulamıştır. Zeta potansiyeli analizleri, parçacık konsantrasyonunun artışıyla birlikte potansiyelin düştüğünü ve nanopartiküllerin topaklanma eğiliminde olduğunu göstermiştir. SEM-EDS analizleri, parçacıkların küresel formda ve yaklaşık 30 nm boyutunda olduğunu ortaya koymuştur. FTIR spektroskopisi, fenolik ve karbonil gruplarının platine bağlandığını doğrulamıştır. Sonuçlar, biyobazlı indirgeme yöntemlerinin sürdürülebilir nano platin sentezi için etkili bir alternatif sunduğunu göstermektedir. Bu çalışma, yeşil kimya ve geri dönüşüm yöntemleri, PGM geri kazanımı için umut vadeden bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Yeşil Kimya, Nano-Platin, Nohut, Geri Kazanım.

Investigation of Platinum Nanoparticle Synthesis from Chickpea Extract

Abstract: Their wide application range in catalysis, electronics, and fuel cells make Platinum Group Metals (PGMs) invaluable and scant raw resources. In this research, nano-scale platinum was extracted from waste platinum coating solutions via a 'green chemistry' technique that incorporates chickpea extract. The concentration of the platinum solution ICP-OES confirmed was 125 ppm. Various ratios of the sprouted chickpea extract and pure water were mixed prior to 24 hours of reaction. Zeta potential, UV-VIS spectrophotometry, and nanoparticle size analyses were performed after filtration. The $PtCl_6^{2-}$ reduction with confirmed by the UV-VIS absorption peak at 220 nm. The zeta potential analysis showed that the concentration of the nanoparticle increased the potential agglomeration of the nanoparticles increased leading to a lower zeta potential. The SEM-EDS analyses showed the particles to be roughly spherical in shape and around 30 nm in diameter. The FTIR spectroscopy showed that the phenolic and carbonyl groups were attached to platinum. These results prove that the nano-platinum synthesis can successfully be scaled up. Green chemistry and recycling techniques offer a new way of approaching PGM recovery which should be considered further in the future.

Key words: Green Chemistry, Nano-Platinum, Chickpeas, Recovery.

1. Giriş

Platin grubu metaller (PGM'ler), yüksek ekonomik değerleri ve stratejik uygulama alanlarıyla önemli kritik hammaddeler arasında yer almaktadır. Katalizör, yakıt hücreleri ve elektronik gibi alanlarda kullanımları, bu metallerin endüstriyel ve bilimsel önemini arttırmaktadır. Ancak, bu metallerin yer kabuğundaki sınırlı bulunurluğu ve mevcut rezervlerin tükenmesi, sürdürülebilir ve çevre dostu geri kazanım yöntemlerini gerekli kılmaktadır [1, 2]. Özellikle düşük tenörlü kaynakların çevresel kaygılar ve ekonomik sınırlamalar nedeniyle kullanımı zor olduğundan, pirometalurjik yöntemlerin yerini hidrometalurjik ve biyometalurjik süreçler almaktadır [3].

Son yıllarda, PGM'lerin geri kazanımı için ikincil kaynaklardan yararlanan birçok yenilikçi yöntem geliştirilmiştir. Otomotiv katalizörleri, elektronik hurdalar ve endüstriyel katalizörler gibi ikincil kaynaklar, bu metallerin ekonomik ve sürdürülebilir bir şekilde geri kazanımını mümkün kılmaktadır [4-7]. Bununla birlikte, geleneksel kimyasal yöntemlerin çevresel etkileri, yeşil kimya tabanlı yenilikçi yaklaşımlara olan ihtiyacı arttırmıştır. Literatürde, yoğun güçlü asitler ve bazlar ve siyanür gibi bileşenlerin PGM grubu metallerinin geri kazanılması için geleneksel yöntemlerde kullanıldığı çalışmalar vardır [8-14]. Yeşil kimya, toksik olmayan, çevre dostu ve sürdürülebilir prosesler sunarak bu alanda önemli bir rol oynamaktadır [15]. Geleneksel kimyasal ve

* Sorumlu yazar: burcunilguncetiner@gmail.com Yazarların ORCID Numarası: [1] 0009-0009-0849-0546, [2] 0000-0002-0037-6572, [3] 0009-0000-7819-7489, [4] 0000-0002-3742-4929.

fiziksel yöntemlerde çevre açısından zararlı ve tehlikeli maddelerin kullanılması, bugün çevre sorunlarıyla karşı karşıya olan dünyamızda yeni çevre dostu yöntemlerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda, yeşil kimya yaklaşımı, sürdürülebilir, güvenli, basit, toksik olmayan, biyouyumlu ve çevre dostu bitkiler ve bakterilerin kullanımını temel hedeflemesi ile öne çıkmaktadır [16]. Yeşil kimyanın 12 temel ilkesinin benimsenmesi, atıkların en aza indirilmesine veya ortadan kaldırılmasına ve sürdürülebilir süreçlerinin uygulanmasına olan ilginin artmasıyla, gelişmiş malzemelerin hazırlanması için biyolojik ve biyomimetik yaklaşımlar geliştirmek arzu edilir [16]. Yapılan sürdürülebilirlik çalışmalarında, konvansiyonel olarak, ekonomik açıdan belirli tarımsal atıkların biyoenerji kaynağı ve hayvan yemi olarak kullanılmasına yönelik karşılaştırılmalı çalışmalar yapılmıştır. Konvansiyonel olarak, bu bakış açısı ile biyolojik atık malzemelerin doğru kullanımı, gıda veya hayvan yemi kaynaklarıyla herhangi bir çatışmaya yol açmadan, bir bölgedeki enerji üretimi, çevrenin korunması ve ekonomik kalkınma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [17]. Biyolojik atıklardan enerji ve ekonomik fayda sağlanması yanında yürütülen çalışmadaki gibi değerli metallerin kazanılması veya sucul ortamdan metal iyonlarının çekilmesi de yeşil kimya kapsamında majör faydalardan biridir. Aynı zamanda, nanobiyoteknoloji, metalik nanoparçacıkların üretilmesi için uygun maliyetli, çevre dostu bir süreç gerektirir.

Bitkisel ve biyolojik yöntemler, nanoteknolojinin çevresel sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda uygulanmasına olanak tanımaktadır. Yeşil kimya kapsamında, bitki özütleri metal nanoparçacıklarının biyolojik sentezinde indirgeyici ve stabilizatör ajanlar olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemler, yüksek maliyetli ve toksik kimyasal süreçlerin yerine, doğal bileşenlerden yararlanarak daha çevreci bir yaklaşım sunar [18, 19].

Flavonoidler, terpenoidler, polifenoller ve alkaloitler gibi bitkisel fitokimyasallar, nanoparçacıkların boyut ve şeklinin kontrol edilmesinde kilit rol oynar. Örneğin, Azadirachta indica (yalancı tesbih ağacı) yaprak özleri, platin nanoparçacıklarının biyolojik sentezinde başarıyla kullanılmış ve bu nanoparçacıkların 5-50 nm arasında homojen bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir [19]. Benzer şekilde, Terminalia chebula (kara halile), Ocimum sanctum (tulsi) ve Aloe vera gibi bitkiler, farklı metallerin nanoparçacıklarının sentezinde etkili bir şekilde kullanılmıştır [15,19,20].

Bitki özleri kullanılarak yapılan nanoparçacık sentezi, metal ve metal oksit nanoparçacıkları içeren geniş bir yelpazeye sahiptir. Altın (Au), gümüş (Ag), platin (Pt), paladyum (Pd), bakır (Cu), demir (Fe), kobalt (Co), çinko (Zn) ve titanyum oksit (TiO_2) gibi metaller, bitkisel özütler kullanılarak başarıyla sentezlenmiştir [19, 21]. Aloe vera, neem (yalancı tesbih ağacı), Terminalia chebula, Punica granatum (nar), Mentha piperita (bahçe nanesi) ve Taraxacum officinale (karahindiba) gibi bitkiler, bu tür sentezlerde yaygın olarak kullanılmıştır [22-24].

Özellikle, yalancı tesbih ağacı ve Terminalia chebula'nın platin nanoparçacık sentezindeki kullanımı dikkat çekmektedir. Yapılan çalışmalar, bu bitkilerin hem çevresel hem de biyomedikal uygulamalarda önemli katkılar sunduğunu ortaya koymuştur. Nar yaprağı özütü, platin nanoparçacıkları sentezlemek için kullanılmış ve bu nanoparçacıkların güçlü antioksidan özellikler sergilediği tespit edilmiştir [23].

Ülkemizde yapılan çalışmalardan, üzüm sapından hazırlanan yeni bir aktif karbon ile Ni(II) adsorpsiyonu [25], çam kozalakları kullanarak Basic Blue 3 boyar maddesinin adsorpsiyonu [26], sitrik asitle modifiye edilerek aktifleştirilmiş şeker pancarı küspesi (MŞPK) ile sulu çözeltilerden Pb(II) ve Cd(II) iyonlarının adsorpsyion ile giderilmesi [27] örnek gösterilebilir.

Platin nanoparçacıkları, yüksek yüzey alanları, biyouyumlulukları ve üstün katalitik özellikleri sayesinde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Endüstriyel alanda, karbon monoksit ve diğer zararlı gazların karbondioksite dönüştürülmesi gibi katalitik reaksiyonlarda yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, yakıt hücreleri ve güneş pilleri gibi enerji dönüşüm cihazlarında önemli bir rol oynar [20, 22].

Biyomedikal alanda ise platin nanoparçacıkları, ilaç taşınması, kanser tedavisi ve teşhis amaçlı uygulamalarda kullanılmaktadır. Anti-inflamatuvar özellikleri sayesinde yara iyileşmesi ve doku yenilenmesinde etkili olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, çevresel iyileştirme süreçlerinde de etkili bir rol oynayan platin nanoparçacıkları, ağır metallerin ve organik kirleticilerin giderilmesinde kullanılmaktadır [21, 23].

Bu çalışmada kullanılan nohut (Cicer arietinum L.) özütü, platin nanoparçacık sentezinde çevre dostu ve yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Nohut, proteinler, karbonhidratlar ve fitokimyasallar açısından zengin olup, bu özellikleriyle metal iyonlarını indirgeyebilecek potansiyele sahiptir. Literatürde nohut özütünün metal nanoparçacık sentezinde kullanıldığı çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, nohut özütü ile gümüş nanoparçacıklarının sentezinde başarılı sonuçlar elde edilmiş ve bu nanoparçacıkların antimikrobiyal özellikleri incelenmiştir [28]. Ayrıca, nohut kabukları kullanılarak karbon nanotüp sentezi gerçekleştirilmiş ve biyoteknolojik uygulamalar için yeni bir yol açılmıştır [29]. Bu makalenin konusu olan araştırmada, Türkiye'de mücevher sektöründen temin edilen atık platin çözeltisi, nohut filizlerinden elde edilen özüt kullanılarak platin nanoparçacıklara dönüştürülmüştür. Bu yöntem, hem çevre dostu bir yaklaşım sunmakta hem de literatürde sınırlı bir şekilde incelenen nohut bazlı biyosentez yöntemlerine katkı sağlamaktadır. Bu araştırmada, nohut özütü kullanılarak platin nanoparçacık sentezi gerçekleştirilmiş ve bu yöntemin çevre dostu bir alternatif olduğu

vurgulanmıştır. FT-IR, UV-Vis spektroskopisi, tane boyut analizi ve zeta potansiyel ölçümü gibi analitik yöntemler, sentezlenen nanoparçacıkların karakterizasyonunda kullanılmıştır. Sonuçlar, bu yöntemin platin nanoparçacıkların boyut, şekil ve yüzey özellikleri üzerinde yüksek kontrol sağladığını göstermiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Nohut ekstratının ve numunelerin hazırlanması

Nohut temini için, yerel bir zincir marketten Anadolu kökenli nohutlar satın alınmıştır. Bu nohutlar, başlangıçta kişisel tüketim amacıyla edinilmiş olup, son tüketim tarihi geçmiş olduğundan, değerlendirilerek araştırma kapsamında platin nanoparçacık sentezinde kullanılmıştır. Bu yöntem, gıda israfını önleyici ve çevre dostu bir yaklaşıma dayanmaktadır. Son kullanma tarihi geçmiş tarım ürünü küf, kirlilik veya bozulmalara karşı incelenip ve ayıklanıp, ardından saf su ile iyice temizlenmiştir. Daha sonrasında nohutlar 7 gün filizlendirilmiştir. Filizler ayıklanmış ve 30 g nohut filizi literatüre uygun olarak [30] 100 mL distile su ile kaynatılmış ve Sartorius beyaz filtre kâğıdı ile süzülmüştür. Çalışmada kullanılan platin çözeltisi, Türkiye'deki ihracatçı bir firmadan temin edilen ve mücevherat sektöründeki kaplamalarda kullanılan atık platin çözeltisidir. Perkin Elmer Avio 200 marka ICP-OES cihazının analizi sonucunda atık platin çözeltisinin konsantrasyonu 125 ppm olarak tespit edilmiştir. Bu özüt, çeşitli denemelerden elde edilmiş kör deneyler sonucunda atık Pt çözeltisine Tablo 1'de verilen belirli oranlarda eklenmiş ve 24 saat beklenmiştir. Ardından numuneler analizlerin gerçekleştirilmesi için önce 0,45 µm ardından 0,22 µm enjektör tipi PTFE filtrelerden geçirilmiştir.

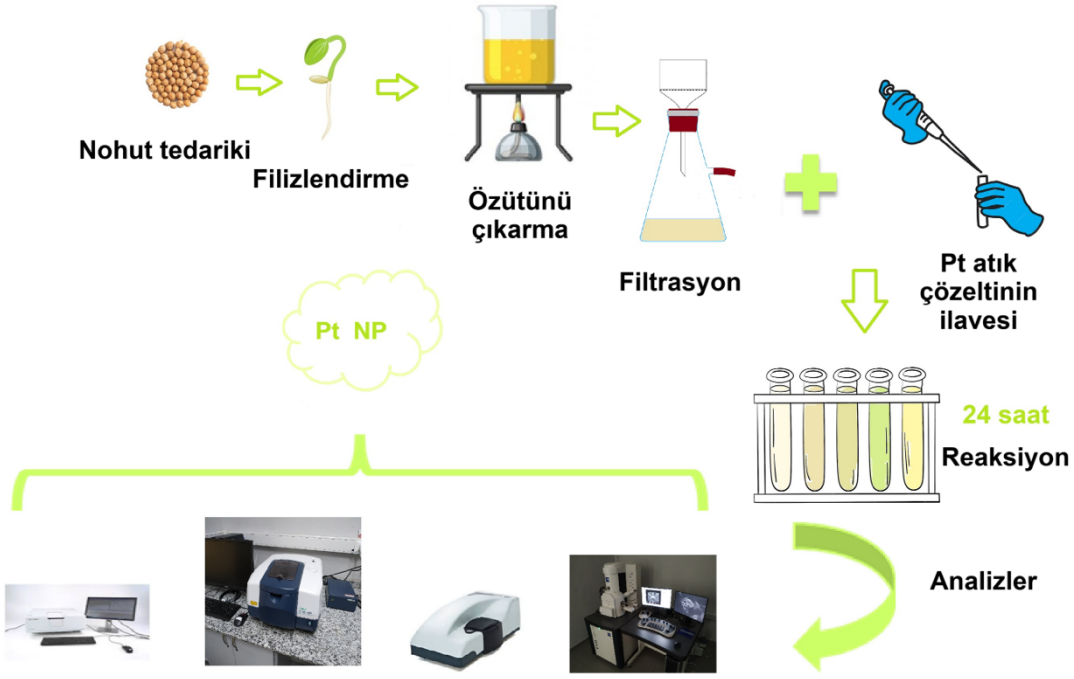
Tablo 1. Kör deneyler sonucunda nohut ekstraktı, Pt çözeltisi ve saf su miktarlarını içeren son test listesi.

Numune	Nohut özütü (mL)	Pt çözeltisi (mL)	Saf su (mL)
NP (Nano Platin) 1	0,5	0,5	9,0
NP 2	0,5	1,0	8,5
NP 3	0,5	2,0	7,5
NP 4	1,0	1,0	8,0
NP 5	1,0	2,0	7,0
NP 6	1,0	4,0	5,0
NP 7	2,0	1,0	7,0
NP 8	2,0	2,0	6,0
NP 9	2,0	4,0	4,0
NP 10	4,0	1,0	5,0
NP 11	4,0	2,0	4,0
NP 12	4,0	4,0	2,0

2.3. Kullanılan kimyasallar ve cihazlar

Çalışmada platin nanoparçacıkların sentezi ve analizi için çeşitli kimyasal ve cihazlar kullanılmıştır. Platin çözeltisi, Türkiye'de mücevher sektöründe kullanılan atık platin çözeltilerinden temin edilmiştir. Nohut ekstraktının hammaddesi olarak, Anadolu kökenli nohut (Cicer arietinum L.) kullanılmıştır. Çözeltilerin hazırlanmasında saf su dışında (0,4µS/cm), yeşil kimyanın da ilkelerine ile uygun olarak başka herhangi bir kimyasal kullanılmamıştır.

Platin nanoparçacıkların oluşumu renk değişimi gözlemleriyle doğrulanmış, ardından Shimadzu UV-2450 cihazı kullanılarak 1 nm çözünürlükte UV-VIS spektroskopisi gerçekleştirilmiştir. Nohut özütünün ve sentezlenen platin nanoparçacıkların FTIR ölçümleri sıvı ortamda Jasco-FT/IR-4700 cihazında yapılmıştır. Malvern Zeta Sizer Nano ZS90 ile sıvı ortamda tane boyutu ve zeta potansiyeli analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM-EDS analizleri, JEOL JCM-6000 Plus ve Zeiss - Evo | MA10 cihazları kullanılarak yapılmış ve nanoparçacıkların yüzey morfolojisi ile elementel kompozisyonu incelenmiştir. pH ölçümleri için HANNA Instruments HI2002-01edge® özel pH/ORP ölçer ve kablosuz pH elektrodu kullanılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçlarına göre çalışma pH 1 değerinde yürütülmüştür. Saf suyun iletkenliğini ölçmek için, HANNA HI98309 ultra saf su için cep tipi iletkenlik ölçer kullanılmıştır. Çalışmanın deneysel özeti Şekil 1'de verilmektedir.

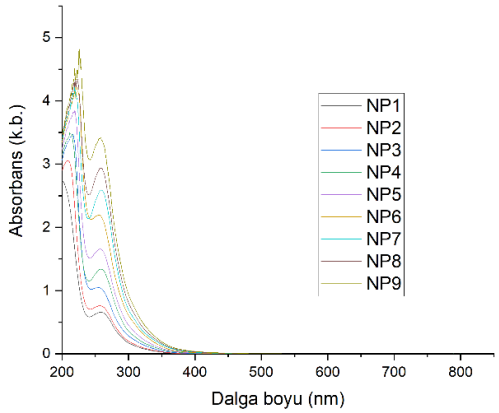


Şekil 1. Çalışmanın deneysel özeti.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. UV-Vis Analizi

UV-vis spektroskopisi, sentezlenen nanoparçacıkların ön analizi için faydalıdır. UV-vis spektroskopisi hızlıdır, basittir ve ölçüm süresi kısadır. Çeşitli çalışmalarda boyutları 2-100 nm arasında değişen nanoparçacıkları karakterize etmek için 200-800 nm dalga boyu kullanılmıştır. Çalışmadaki NP1-9 arasındaki numunelerin UV-vis spektroskopisi sonuçları Şekil 2'de verilmektedir. Şekil 2'de de görülebileceği üzere literatür ile uyumlu bir şekilde çözeltideki $PtCl_4^{2-}$ ve $PtCl_6^{2-}$, pH=1 spektrumunda 240 ve 267 nm'de absorpsiyon bantlarına sahiptir [31]. Sonuçlarda reaksiyon hızının düşük olduğu ve Pt^0 oluşumunu yavaş olduğu gözlenmektedir. Bu durum, düşük platin çökelme verimini beraberinde getirmiştir. Diğer taraftan artan nohut özütü, $PtCl_6^{2-}$'nin $PtCl_4^{2-}$'ye indirgenmesi hızını artırmakta ve 220 nm'te Pt^0 absorpsiyon pikinin eğimini de arttırmaktadır. Ayrıca UV-Vis spektrumları 220 nm'de maksimum emilim göstererek platin nano parçacığının küresel formunu doğrulamaktadır.



Şekil 2. NP1-9 arasındaki numunelerin UV-vis spektroskopisi sonuçları.

3.2. Tane boyut analizi ve Zeta potansiyeli ölçümü

Yeşil yöntemle üretilen Pt-NP'lerin kararlılığı ve yüzey yükü, bir zeta analizörü kullanılarak analiz edilmiştir. Bu yöntem sıklıkla nanoparçacık dispersiyonunun (dağılımının) kararlılığını değerlendirmek için kullanılır. Pt-NPler, yüzeylerinde negatif yüklü fito-bileşenlerin varlığı nedeniyle negatif bir zeta potansiyeline sahiptir, bu da itmeye ve kararlılığın artmasına neden olur. Zeta potansiyeli, parçacık ve parçacığın içinde bulunduğu sıvı arasında meydana gelir. Zeta potansiyeli, bir parçacığın dağıldığı sıvı yığını ile NP yüzeyiyle ilişkili zıt yüklü iyonları içeren sıvı katmanı arasındaki potansiyel farkın bir ölçüsüdür [32].

Pt nano parçacıklarının zeta potansiyeli analizi ve parçacık boyutu analizi sonuçları, nano Pt parçacığının üretimini/sentezini göstermiştir ancak aynı zamanda zeta potansiyeli sonuçları bu parçacıkların parçacık büyüklüğüne bağlı olarak topaklanma veya çözünme eğilimleri olduğu Tablo 2 ve 3'teki sonuçlar ile gösterilmiştir. Zeta Potansiyelinin büyüklüğü, parçacık kararlılığı hakkında bilgi sağlar, daha yüksek büyüklükteki potansiyeller elektrostatik itmeyi arttırır ve dolayısıyla kararlılığı arttırır. Zeta potansiyelinin büyüklüğü aglomerasyonunu kolloidal süspansiyonları kararlı kılar.

Nanopartikül konsantrasyonunun artışıyla birlikte zeta potansiyelinde düşüş gözlemlenmesi, parçacıklar arasındaki mesafenin azalması ve Van der Waals çekim kuvvetlerinin artmasıyla ilişkilidir. Bu durum, nanopartiküllerin topaklanma ve çökelme eğiliminde olduğunu gösterir. Zeta potansiyeli, kolloidal sistemlerin stabilitesini belirleyen kritik bir parametre olup, yüksek değerlerde elektrostatik itme kuvvetlerini artırarak agregasyonu önler. Ancak, partikül konsantrasyonu arttığında bu itme kuvvetleri azalır ve parçacıklar bir araya gelerek çökelmeye başlar. Bu nedenle, süspansiyonun stabilitesini korumak için pH ayarlamaları veya iyonik dengenin düzenlenmesi gibi stratejiler uygulanabilir [33]. Ayrıca, nanopartiküllerin santrifüj edilerek etüvde kurutulması ve gerektiğinde yeniden disperse edilmesi, tane boyutunun korunmasına ve uzun süre stabil kalmasına yardımcı olabilir. Bu çalışmada SEM-EDS analizi aşamasında benzer bir yaklaşım sergilenmiştir. Tablo 2 ve 3 incelendiğinde, sonuçlar numunenin kararsız bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Analiz sonuçlarında redüktant olarak kullanılan nohut ekstraktının etkisi daha belirgin olduğundan dolayı, yakın sonuçlar elde edildiğinde durumu özetleyip basitleştirmek için değişimin önemli olarak gözlemlendiği sonuçlar tablolarda gösterilmiştir. Tane boyutu analizleri bize hangi alana yakınlaşmamız gerektiğini göstermesi açısından önemlidir, 100 nm altında tane boyutu hedeflendiği için SEM-EDS analizi için NP 1 tane boyutu analizleri ve UV-Vis analizleri neticesinde karar verilerek gözlemlenmiştir.

Tablo 2. Her seriden numunelerin zeta potansiyeli ölçümleri.

Analiz	Numune Adı	T (°C)	Zeta Potansiyeli (mV)	Hareketlilik (µmcm/Vs)	İletkenlik (mS/cm)
Zeta	1	25	-2,79	-0,2185	0,563
Zeta	4	25	-0,927	-0,07264	0,978
Zeta	9	25	-0,159	-0,01246	3,52

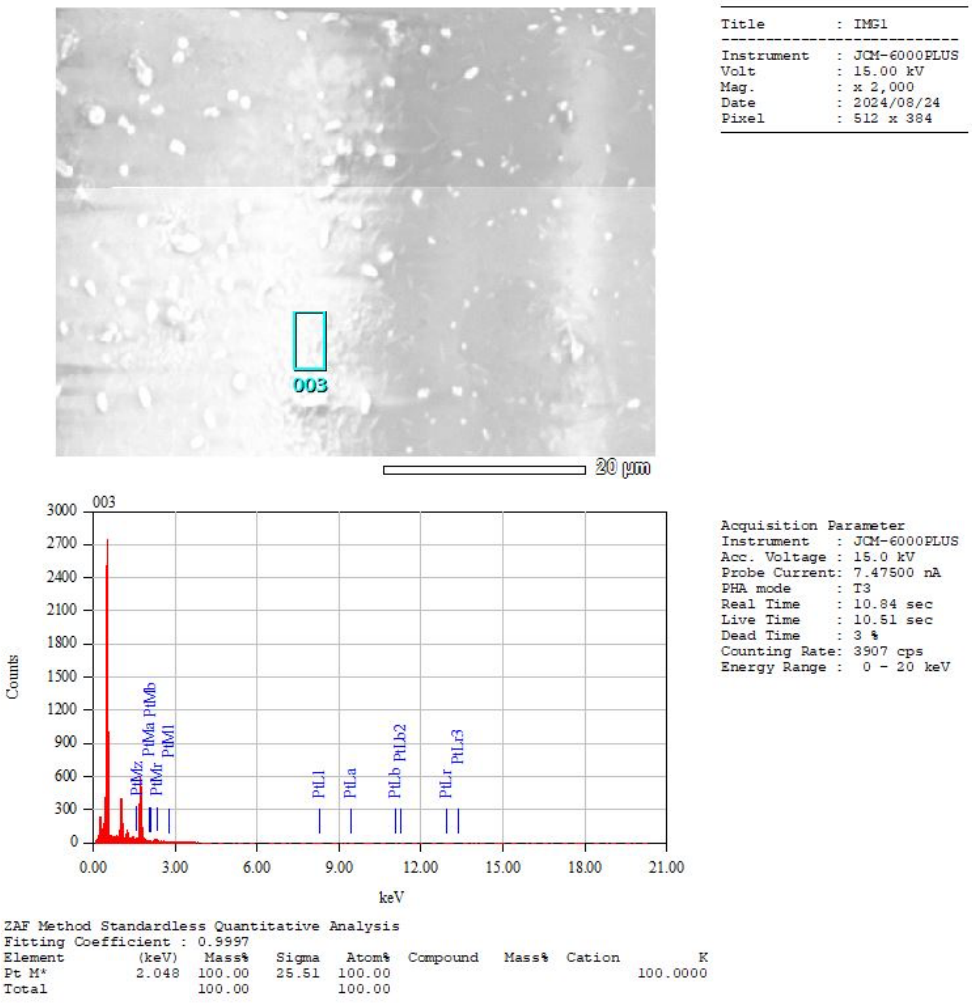
Tablo 3. Bazı numunelerin tane boyut ölçümleri

Analiz	Numune Adı	T °C	Ortalama Tane Boyutu (nm)
Boyut	**1**	25	1,422
Boyut	**2**	25	2,913
Boyut	**4**	25	72,95
Boyut	**7**	25	226,2
Boyut	**8**	25	133,4
Boyut	**9**	25	165,2
Boyut	**10**	25	127,9
Boyut	**11**	25	101,9

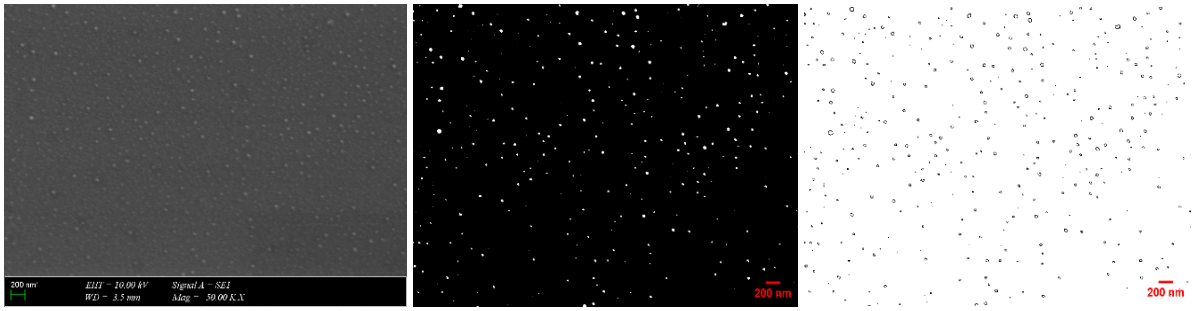
3.3. SEM-EDS analizi

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDS (Enerji Dağılım Spektroskopisi) çeşitli platin nanoparçacık türleri arasında ayrım yapmaya odaklanarak şekil, agregasyon ve boyut gibi nanoparçacık özelliklerini analiz etmek için kullanılmıştır.

Bu çalışma için NP-1 çözeltisi hazırlandıktan ve 24 saat bekledikten sonra, 0,22 mikron şırınga filtreden geçirilerek nispeten daha yoğun ve kaba parçacık organik bileşenlerin uzaklaştırılması sağlanmıştır. Bu haldeki çözelti cam lamelin üzerine bir damla damlatılmış ve etüvde 4 saat beklenmiştir. Akabinde bu hali ile lamel altın ile kaplanmış ve JEOL JCM-6000 Plus marka SEM-EDS analizi yapılmıştır. EDS analizi esnasında karbon banttan ve altından gelebilecek pikler atılarak geri kalan piklerin ölçümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te EDS analizi verilmektedir. Kullanılan SEM-EDS cihazı masa tipi olduğundan ve bu şekilde cam üzerinden numune analizi yapıldığından çökelirken her aglomere olmasının önüne geçilememiş ve cihazın resolüsyonu ancak bir yere kadar görüntü almaya izin vermiştir. Aynı koşullar altında yeniden numune üretilerek bu sefer parçacık boyutu analizi için Zeiss - Evo | MA10 cihazı ile daha yüksek büyütmelere çıkılarak SEM görüntüsü alınabilmiştir. Parçacıkların homojen bir şekilde dağıldığı, küresel formda ve yaklaşık 30 nm parçacık boyutu ile yakın büyüklüklerde olduğu görülmüştür. Elde edilen görüntülerden en net olanı ve Image J programı ile elde edilen kontrast ve boyut analizi için kullanılan resim Şekil 4'te sunulmaktadır. Şekil 4 c) üzerinde Image J yardımı ile yapılan boyut analizine göre ortalama 27 ± 14 nm parçacık boyutu tespit edilmiştir (Elde edilen maksimum boyut 75 nm, minimum boyut ise 7 nm olarak belirlenmiştir). Bu hali ile stabilize edilen Pt metalik parça SEM-EDS analiz sonuçları parçacık boyutu ve UV-VIS spektroskopisi sonuçları ile uyumludur.



Şekil 3. NP-1 numunesinden sentezlenen Pt parçacıklarının SEM-EDS analizi.

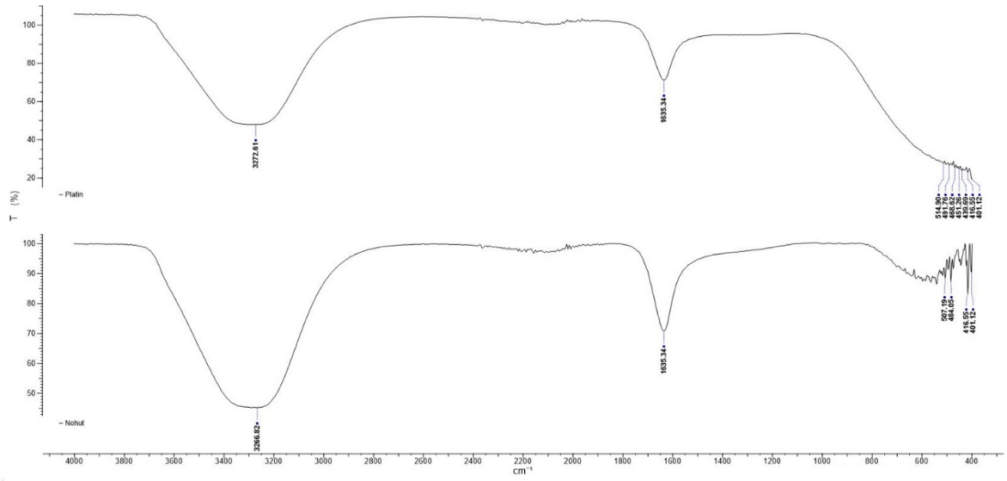


(a) (b) (c)

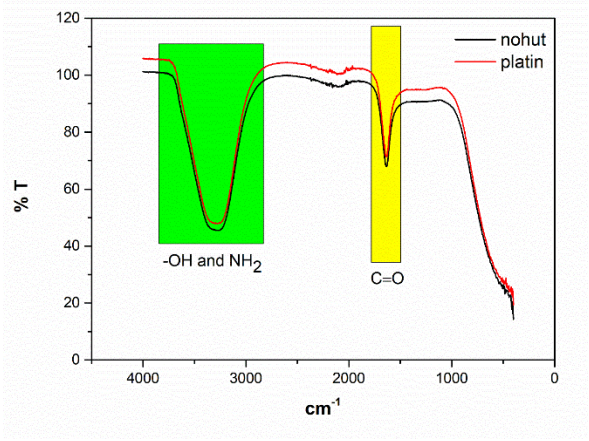
Şekil 4. a) Sentezlenen Pt parçacıklarının x50.000 SEM, b) Image J kontrast ve c) Image J boyut analiz resmi.

3.4. FT-IR analizi

Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), aynı anda geniş bir dalga boyu aralığında ayrıntılı spektrum verileri elde eder. Bu, aynı anda yalnızca sınırlı bir dalga boyu aralığındaki yoğunluğu tespit eden dispersif spektrometreyle karşılaştırıldığında dikkate değer bir fayda sağlar. Bu çalışmada çözeltideki, kimyasal bağ yapıları sahip oldukları dalga boyları ile ayrılır ve kimyasal özellikleri anlaşılır hale gelir. Şekil 5'te gösterilen FTIR analizleri literatürle uyumlu olarak [33] 3260-3270, 1635 cm^{-1} dalga boyları civarında piklere rastlanmıştır. Bu pikler, sırasıyla alkol ve fenollerin hidroksil grupları ile biyoaktif bileşenler ile ilintili olarak nohut bitkisinin yapısındaki polifenol C=C ve C=O bağlarının varlığını göstermektedir. 3500 ile 3000 cm^{-1} arasındaki geniş bant gözlemlenmiştir. Bu geniş bant amino asitler, peptitler, proteinler, alkaloidler, su, alkoller, karboksilik asitler gibi yapılarda bulunan amino (NH_2) grupları ve O-H gruplarını temsil etmektedir [34,35]. Ayrıca, 1700 ile 1200 cm^{-1} arasındaki bölgedeki bant esas olarak C=C ve C=O grupların gerilmesinden kaynaklanan polifenol varlığını göstermektedir. Bu bant fenolik moleküllerin tipik karakteristik absorpsiyonu ifade etmektedir [36,37]. Nohut özütünde görünen, 507 cm^{-1} ve 484 cm^{-1} FTIR pikleri, flavonoid bileşenler nohut özütlerinde yaygın olarak bulunduğundan ve bu grupların C-O-C bükülme titreşimlerinden kaynaklanıyor olabilir, ayrıca nohutta bulunan, protein yapılarında C-S gibi bağların bükülme titreşimleri bu bölgede olabilir ya da lignin veya polisakkarit içeren bileşiklerde de bu aralıkta titreşimler görülebilir. Yine nohut özütünde görünen; 416 cm^{-1} ve 401 cm^{-1} pikler, fenolik bileşikler 400-450 cm^{-1} bölgesinde pik verebilir veya yine C-S bağlarının deformasyon modları da bu bölgede olabilir. Platin-nohut özütünü içeren çözeltide ise; 514 cm^{-1}, 491 cm^{-1}, 468 cm^{-1}, 451 cm^{-1}, 439 cm^{-1}, 416 cm^{-1} ve 401 cm^{-1} bölgelerinde pikler gözlemlenmiştir. 400-500 cm^{-1} aralığında gözlenen pikler, Pt-O veya Pt-OH bağlarını gösterebilir. Platin oksitleri (PtO, PtO_2) oluşmuş olabilir veya yüzeyde oksijenle etkileşen bağlar bulunabilir. Nohut özütü gibi biyolojik bileşenler içerdiği fenolik, karbonil ve amino gruplarıyla platine bağlanabilir. 401-439 cm^{-1} aralığında görülen pikler, Pt-N (amin grubu etkileşimi) veya Pt-S (sülfür içeren bileşikler) ile ilişkili olabilir. Bu analiz neticesinde; nohuttaki fenolik bileşiklerin ve organik moleküllerin (protein, polisakkarit) metal ile etkileşime girdiği ve kompleksler oluşturduğu şeklinde yorumlanabilir [38,39].



(a)



(b)

Şekil 5. a) Nohut ekstraktı ve Pt içeren nohut ekstratının FTIR analizi ve b) bağların bulunduğu bölgelerin gösterimi.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, nohut (Cicer arietinum L.) özütü kullanılarak atık platin kaplama çözeltilerinden nano ölçekli platin (Pt-NP) sentezlenmiş ve bu yöntemin etkinliği çeşitli analitik tekniklerle değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yeşil kimya prensiplerine uygun olarak geliştirilen bu yöntemin hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik açıdan avantajlı bir alternatif sunduğunu göstermektedir.

- UV-VIS spektroskopisi ile yapılan analizler, $PtCl_6^{2-}$ iyonlarının indirgenmesi sonucunda 220 nm'de belirgin bir Pt^0 absorpsiyon piki oluştuğunu göstermiştir. Bu bulgu, literatürde belirtilen değerlerle uyumludur ve nano ölçekli platin oluşumunu doğrulamaktadır. Ayrıca, artan nohut özütü konsantrasyonu ile absorpsiyon pikinin eğimi artmış, bu da indirgenme hızının özüt konsantrasyonu ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir.
- Zeta potansiyeli analizleri, platin nanoparçacıklarının yüzey yükü ve stabilitesini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, negatif zeta potansiyeli değerleri ile nanoparçacıkların yüzeyinde bulunan biyolojik bileşenlerin elektrostatik itme sağlayarak dispersiyon kararlılığını artırdığını

göstermiştir. Ancak, nanopartikül konsantrasyonu arttıkça zeta potansiyelinde bir düşüş gözlemlenmiş ve parçacıklar arasında Van der Waals çekim kuvvetlerinin etkisiyle topaklanma eğilimi artmıştır. Bu durum, sistemin uzun süreli stabilitesinin korunması için pH ayarlamaları veya iyonik dengenin optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

- Parçacık boyut dağılımı analizleri, üretilen Pt-NP'lerin ortalama olarak yaklaşık 30 nm boyutunda olduğunu göstermiştir. SEM-EDS analizleri ile doğrulanan bu değerler, partiküllerin küresel formda olduğunu ortaya koymuş ve sentezlenen platin nanoparçacıklarının tekdüze dağılım gösterdiğini kanıtlamıştır.
- FTIR spektroskopisi ile yapılan analizler, nohut özütünde bulunan fenolik, karbonil ve amino gruplarının platin yüzeyi ile etkileşime girerek indirgenme sürecinde aktif rol oynadığını doğrulamıştır. 400-500 cm^{-1} aralığında gözlenen pikler, platin ile oksijen ve sülfür içeren bileşiklerin etkileşimini göstermiştir. Bu sonuçlar, nohut özütü içindeki biyomoleküllerin stabilizatör ve indirgen ajan olarak görev yaptığını desteklemektedir.

Bu çalışmanın bulguları, yeşil kimya prensiplerine dayalı metal geri kazanım süreçleri için önemli katkılar sunmaktadır. Geleneksel kimyasal yöntemlerde kullanılan toksik reaktifler yerine bitkisel ekstraktlar kullanılarak çevre dostu bir süreç geliştirilmiştir. Bu yöntemin avantajları şu şekilde özetlenebilir:

- Çevre Dostu Yaklaşım: Kimyasal indirgeme ajanları yerine, biyolojik olarak parçalanabilen ve toksik olmayan nohut özütü kullanılarak çevresel etki azaltılmıştır.
- Ekonomik ve Sürdürülebilir: Atık platin çözeltilerinin geri dönüştürülmesi hem ekonomik hem de endüstriyel açıdan değerli metallerin yeniden kullanımını sağlar.
- Biyouyumlu Nanoparçacık Üretimi: Yeşil sentez yöntemleriyle elde edilen nanoparçacıklar biyomedikal uygulamalarda kullanılabilir hale gelmektedir.
- Kontrollü Nanoparçacık Üretimi: UV-VIS, SEM-EDS ve FTIR analizleri, parçacık büyüklüğü ve yüzey özellikleri üzerinde yüksek bir kontrol sağlandığını göstermektedir.

Ancak, çalışmanın bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Özellikle, nanoparçacıkların uzun vadeli stabilitesi ve endüstriyel ölçeklenebilirliği üzerine daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Ayrıca, farklı bitki ekstraktları ile karşılaştırmalı çalışmalar yapılarak en verimli biyoreduktan ve stabilizatör ajanların belirlenmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, nohut özütü kullanarak platin nanoparçacık sentezinin hem çevresel hem de ekonomik açıdan uygulanabilir bir yöntem olduğunu göstermiştir. Bu yöntem, özellikle sürdürülebilir malzeme üretimi ve atık geri kazanımı alanlarında gelecekte yapılacak araştırmalara önemli bir temel oluşturacaktır.

Etik Beyan

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Bilgilendirme

Bu çalışmada, Burcu Nilgün Çetiner makale ile ilgili deneysel çalışmaların organizasyonu ve analizler hususunda ve yazımına katkı sağladı, Umur Üstünoğlu makale fikrinin oluşumuna katkı sağladı ve finansal destek sağlayan projeyi yürüttü, Selin Yetim, deneysel sürece ve raporlama sürecinde Umur Üstünoğlu'na katkı sağladı, Yusuf Mert Sarı deneysel çalışmalara ve malzeme tedarik sürecine katkı sağladı. Yazarlar, bu makalede bildirilen çalışmayı etkilemiş gibi görünebilecek, bilinen rakip mali çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan ederler.

Teşekkür

Bu çalışma, BİDEB 2209-A - Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında finansal olarak desteklenmiştir. F.A.N.C.Y. Kuyumculuk Limited Şirketi'nden Aris Demir'e bağışladığı atık platin çözeltisi için çok teşekkür ederiz. Prof. Dr. Serdar Aktaş projenin TÜBİTAK projesi danışmanlığını yapmıştır, verdiği destek için kendisine derin sevgi ve hürmetlerimizi sunmaktayız. SEM-EDS analizlerimizde desteklerini esirgemeyen Tri Mühendislik A.Ş ve AR-GE Müh. Hilal Çolak'a, çalışmanın FT-IR ve SEM analizleri Marmara

Üniversitesi Nanoteknoloji ve Biyomalzeme Uygulama ve Araştırma Merkezi (NBUAM) tarafından gerçekleştirilmiş olup, Prof. Dr. Oğuzhan Gündüz & Arş. Gör. Eray Altan'a destek ve yardımları için teşekkür ederiz. Marmara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği öğretim üyesi Doç. Dr. Esra Erken, Yük. Müh. Ceren Hür ve Uzm. Serap Yıldırım Akyel'e UV-VIS ve Malvern Nano Sizer analizlerindeki yardımları için çok teşekkür ederiz.

Kaynaklar

[1] Erdmann L, Graedel TE. Criticality of non-fuel minerals: a review of major approaches and analyses. Environ Sci Technol 2011; 45: 7620-7630.
[2] Saurat M, Bringezu S. Platinum group metal flows of Europe, Part 1 – global supply, use in industry, and shifting of environmental impacts. J Ind Ecol 2008; 12: 754-768.
[3] Kielhorn J, Melber C, Keller D, Mangelsdorf I. Palladium – a review of exposure and effects to human health. Int J Hyg Environ Health 2002; 205: 417-432.
[4] Melber C, Keller D, Mangelsdorf I. Palladium: Environmental Health Criteria. World Health Organization, Geneva; 2002.
[5] Ravindra K, Bencs L, Van Grieken R. Platinum group elements in the environment and their health risk. Sci Total Environ 2004; 318: 1-43.
[6] Barakat MA. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater – review article. Arab J Chem 2011; 4: 361-377.
[7] Dean JA. Lange's Handbook of Chemistry. 12th ed. McGraw-Hill Inc., New York; 1979.
[8] Umeda H, Sasaki A, Takahashi K, Haga K, Takasaki Y, Shibayama A. Recovery and concentration of precious metals from strong acidic wastewater. Mater Trans 2011; 52: 1462-1470.
[9] Ilyas S, Srivastava RR, Kim H, Cheema HA. Hydrometallurgical recycling of palladium and platinum from exhausted diesel oxidation catalysts. Sep Purif Technol 2020; 248: 117029.
[10] Kim M, Kim E, Jeong J, Lee J, Kim W. Recovery of platinum and palladium from the spent petroleum catalysts by substrate dissolution in sulfuric acid. Mater Trans 2010; 51: 1927-1933.
[11] Mpinga CN, Bradshaw SM, Akdogan G, Snyders CA, Eksteen JJ. Evaluation of the Merrill–Crowe process for the simultaneous removal of platinum, palladium and gold from cyanide leach solutions. Hydrometallurgy 2014; 142: 36-46.
[12] Quinet P, Proost J, Van Lierde A. Recovery of precious metals from electronic scrap by hydrometallurgical processing routes. Miner Metall Process 2005; 22: 17-22.
[13] Aktas S. Rhodium recovery from rhodium-containing waste rinsing water via cementation using zinc powder. Hydrometallurgy 2011; 106: 71-75.
[14] Aktas S, Morcali MH, Aksu K, Aksoy B. Recovery of ruthenium via zinc in the presence of accelerator. Trans Indian Inst Met 2018; 71: 697-703.
[15] Gupta D, Boora A, Thakur A, Gupta TK. Green and sustainable synthesis of nanomaterials: recent advancements and limitations. Environ Res 2023; 231: 116316.
[16] Sigma-Aldrich. Green chemistry. [Internet]. Available from: https://www.sigmaaldrich.com/chemistry/greener-alternatives/green-chemistry.html [Accessed: 13 Sept 2024].
[17] Pesen D, Gençay G, Kurşun B. Environmental and economic analysis of bioenergy production and utilization in Adana, Turkey. Celal Bayar Univ J Sci 2023; 19: 1-10.
[18] Thirumurugan A, Aswitha P, Kiruthika C, Nagarajan S, Christy AN. Green synthesis of platinum nanoparticles using Azadirachta indica – An eco-friendly approach. Mater Lett 2016; 170: 175-178.
[19] Khandel P, Yadaw RK, Soni DK, Kanwar L, Shahi SK. Biogenesis of metal nanoparticles and their pharmacological applications: present status and application prospects. J Nanostruct Chem 2018; 8: 217-254.
[20] Shiraz M, Imtiaz H, Azam A, et al. Phytogenic nanoparticles: synthesis, characterization, and their roles in physiology and biochemistry of plants. Biometals 2024; 37: 23-70.
[21] Şahin B, Aygün A, Gündüz H, Şahin K, Demir E, Akocak S, Şen F. Cytotoxic effects of platinum nanoparticles obtained from pomegranate extract by the green synthesis method on the MCF-7 cell line. Colloids Surf B Biointerfaces 2018; 163: 119-124.
[22] Nishanthi R, Malathi S, Paul SJ, Palani P. Green synthesis and characterization of bioinspired silver, gold and platinum nanoparticles and evaluation of their synergistic antibacterial activity after combining with different classes of antibiotics. Mater Sci Eng C 2019; 96: 693-707.
[23] Al-Radadi NS. Green synthesis of platinum nanoparticles using Saudi's Dates extract and their usage on the cancer cell treatment. Arab J Chem 2019; 12: 330-349.
[24] Eltaweil AS, Fawzy M, Hosny M, Abd El-Monaem EM, Tamer TM, Omer AM. Green synthesis of platinum nanoparticles using Atriplex halimus leaves for potential antimicrobial, antioxidant, and catalytic applications. Arab J Chem 2022; 15: 10351.
[25] Orhan R, Erdem M. Üzüm sapından hazırlanan aktif karbon ile sulu çözeltilerden Ni(II)'nin giderimi. Firat Univ Muh Bil Derg 2017; 29: 319-324.

[26] Tanyıldızı MŞ, Uygut MA. Çam kozalığıyla Bazik Mavi 3 adsorpsiyonu. Firat Univ Muh Bil Derg 2016; 28: 169-174.
[27] Arslanoğlu H, Tümen F. Sitrik asitle modifiye edilmiş şeker pancarı küspesi ile sulu çözeltilerden Pb(II) ve Cd(II) giderilmesi. Firat Univ Muh Bil Derg 2015; 27: 85-99.
[28] Baran A, Baran MF, Keskin C, Hatipoğlu A, Yavuz Ö, İrtegün Kandemir S, Adican MT, Khalilov R, Mammadova A, Ahmadian E, Rosić G, Selakovic D, Eftekhari A. Investigation of antimicrobial and cytotoxic properties and specification of silver nanoparticles (AgNPs) derived from Cicer arietinum L. green leaf extract. Front Bioeng Biotechnol 2022; 10: 855136.
[29] Singh V, Chatterjee S, Palecha M, Sen P, Ateeq B, Verma V. Chickpea peel waste as sustainable precursor for synthesis of fluorescent carbon nanotubes for bioimaging application. Carbon Lett 2021; 31: 117-123.
[30] Chandran SP, Chaudhary M, Pasricha R, Ahmad A, Sastry M. Synthesis of gold nanotriangles and silver nanoparticles using Aloe vera plant extract. Biotechnol Prog 2006; 22: 577-583.
[31] Thongnopkun P, Kitprapot W. Synthesis of the platinum particle with the pH variation for the particle size control. J Phys Conf Ser 2021; 2145: 012038.
[32] Ates M. Nanoparçacıkların ölçme ve inceleme teknikleri. Turk J Sci Rev 2018; 11: 63-69.
[33] Dobrucka R, Dlugaszewska J, Kaczmarek M. Antimicrobial and cytostatic activity of biosynthesized nanogold prepared using fruit extract of Ribes nigrum. Arab J Chem 2016; 12(8).
[34] Kadiroğlu P, Aydemir LY, Akcakaya FG. Prediction of functional properties of registered chickpea samples using FT-IR spectroscopy and chemometrics. LWT 2018; 93: 463-469.
[35] Tas O, Ertugrul U, Grunin L, Oztop MH. An investigation of functional quality characteristics and water interactions of navy bean, chickpea, pea, and lentil flours. Legume Sci 2022; 4: e136.
[36] Silva SD, Feliciano RP, Boas LV, Bronze MR. Application of FTIR-ATR to Moscatel dessert wines for prediction of total phenolic and flavonoid contents and antioxidant capacity. Food Chem 2014; 150: 489-493.
[37] Xu Y, Obielodan M, Sismour E, Arnett A, Alzahrani S, Zhang B. Physicochemical, functional, thermal and structural properties of isolated Kabuli chickpea proteins as affected by processing approaches. Int J Food Sci Technol 2017; 52: 1147-1154.
[38] Socrates G. Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts. 3rd ed. Wiley; 2001.
[39] Nakamoto K. Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds. 6th ed. Wiley; 2009.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 275-291, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1514538

Akademik Verilerin Neo4j Çizge Veritabanı ile Modellenmesi

Berna Çengiz*[1], Faysal Elbeg[1], Mehmet Özdem[2], Resul Daş[1]
[1]Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği, 23119 Elazığ, Türkiye
[2]Türk Telekom, Ankara, Türkiye
[1*]brnpolatt@gmail.com, [2]faysalelbeg@gmail.com, [3]mehmet.ozdem@turktelekom.com.tr, [4]rdas@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 11/07/2024; Kabul/Accepted: 20/11/2024)

Öz: Her geçen gün gelişen teknoloji ile, üretilen veri miktarı devasa boyutlara ulaşmaktadır. Veri, diğer verilerle olan ilişkisiyle birlikte en güçlü ve anlamlı bilgiyi oluşturmaktadır. Veriler arasındaki ilişkinin verinin kendisinden daha önemli olması dikkat çeken noktalardan biridir. Bu ilişkiler, İlişkisel veri tabanları tarafından verimli bir şekilde ele alınmaktadır. Ancak büyük miktarda veriyi ilişkileriyle birlikte ele almak sıkıcı bir süreçtir. Çizge Veri tabanları, İlişkisel veri tabanlarındaki varlıklar ve ilişkileri, çizge veri tabanlarındaki düğümler ve ilişkiler ile daha basite indirgemektedir. Bu çalışma, Türkiye'deki mevcut üniversiteler ve akademisyenler hakkında kapsamlı bir veri görselleştirme yapabilmek amacıyla Neo4j graf veri tabanının kullanımını ele almaktadır. Yükseköğretim Kurulu (YÖK) tarafından elde edilen veriler ile 2191 düğüm ve 2124 tane düğümler arası ilişki oluşturularak, üniversiteler, akademik birimler ve akademisyenler arasındaki ilişkiler görselleştirilmektedir. Yapılan çalışma, akademik ağların daha iyi anlaşılmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Çalışmada uygulamanın geliştirilme süreci, veri toplama yöntemleri, kullanılan teknik araçlar ve analiz yöntemleri detaylı olarak sunulmaktadır. Elde edilen bulgular, Türkiye'deki akademik yapının daha etkili bir şekilde analiz edilmesine ve görsel olarak modellenmesine olanak tanımaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma Neo4j'nin eğitim ve araştırma verilerinin görselleştirilmesi için güçlü bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Neo4j, Çizge ağlar, Çizge modelleme, Çizge veri tabanı, Akademik ağlar.

Modeling Academic Data with Neo4j Graph Database

Abstract: The amount of data generated by the technology that is evolving every day is reaching gigantic proportions. Data, together with its relationship to other data, forms the most powerful and meaningful information. One of the remarkable points is that the relationship between data is more important than the data itself. These relationships are handled efficiently by relational databases. However, handling large amounts of data with their relationships is a tedious process. Graph databases simplify the entities and relationships of relational databases with the nodes and relationships of graph databases. This study deals with the use of Neo4j graph database in order to make a comprehensive data visualisation about existing universities and academics in Turkey. With the data obtained from the Council of Higher Education (YÖK), 2191 nodes and 2124 relationships between nodes are created and the relationships between universities, academic units and academics are visualised. The study aims to provide a better understanding of academic networks. In the study, the development process of the application, data collection methods, technical tools used and analysis methods are presented in detail. The findings allow for a more effective analysis and visual modelling of the academic structure in Turkey. In conclusion, this study demonstrates that Neo4j is a powerful tool for visualising educational and research data.

Keywords: Neo4j, Graph networks, Graph modeling, Graph database, Academic networks.

1. Giriş

İnternetin gelişmesi ve teknolojideki ilerlemeler, büyük ve karmaşık veri kümelerinin analizi, görselleştirilmesi, araştırma ve yönetim süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Verilerin boyutunun ve birbirine bağlılığının artmasıyla, veri sorgularının depolanması, bağlantısı, kullanılabilirliği, güvenliği ve yanıt süresi gibi parametreler dikkate alınması gereken zorluklardır. Teknolojideki ilerleme, insanlar arasındaki iletişimin yoğunlaşmasını mümkün kılmaktadır ve en önemli teknolojik devrim şüphesiz sosyal ağlarda

* Sorumlu Yazar: brnpolatt@gmail.com. Yazarların ORCID numarası: [1]0000-0002-1564-0604, [2]0009-0002-3912-1873, [3]0000-0002-2901-2342, [4]0000-0002-6113-4649,

ve çevrimiçi platformlarda gerçekleşmektedir. Yüksek hacimli sosyal ağ etkinliği büyük veriye sebep olmasıyla birlikte [1], bir veri tabanında saklanmasında harcanan zamanda da önemli bir artış anlamına gelmektedir [2].

Veri tabanları verilere daha kolay bir şekilde ulaşılabilmesi için verileri sınıflandırarak yönetmeyi sağlamaktadır. Yaygın olarak kullanılan veri tabanları ilişkisel veri modelini temel alan ilişkisel veri tabanlarıdır. En sık kullanılan veri tabanları olsa da büyük miktarda veri depolamak istenildiği durumlarda ilişkisel veri tabanlarının kullanımları üstesinden gelinmesi gereken zorluklardandır. İlişkisel veri tabanlarını kullanırken veri bütünlüğünü sağlamak amacıyla, veri kayıplarının ve tutarsızlığının önlenmesi gerekmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte çizge veri tabanları, bu tür karmaşık verilerin ilişkilerini ve bağlantılarını etkili bir şekilde temsil edebilme yetenekleri sayesinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır [3]. Neo4j, Infinite, Graph, DEX, InfoGrid, HyperGraphDB, Trinity vb. gibi bir dizi yüksek performanslı çizge veri tabanı bulunmaktadır [4]. Neo4j, bu alanda öne çıkan bir çizge veri tabanı olup, verilerin düğümler ve kenarlar olarak modellenmesine olanak tanımakta ve bu sayede veriler arasındaki ilişkilerin kolayca analiz edilmesini sağlamaktadır [5]. Veriden ziyade veriler arası ilişkilere odaklanmaktadır. Neo4j gibi grafik veritabanı sistemleri, akademik personelin faaliyetlerini ve ilişkilerini modellemek ve analiz etmek için önemli bir araçtır. Akademik dünyada, üniversiteler ve akademisyenler arasındaki ilişkiler, araştırmaların ve bilimsel iş birliklerinin başarısı için kritik öneme sahiptir [6]. Son yıllarda akademik yayınlar ve araştırmalar hızla artmakta, ancak bunların yalnızca bir kısmı büyük etki yaratmaktadır. Bu nedenle, akademik başarı faktörlerinin analizi, üniversiteler, araştırmacılar ve için büyük önem taşımaktadır. Büyük verilerin ön planda olduğu günümüzde, akademik veriler de oldukça değerlidir ve bu verilerin doğru analizi, eğitim ve araştırma politikalarının şekillendirilmesinde hayati rol oynamaktadır [7].

Yükseköğretim Kurulu (YÖK) tarafından sağlanan akademik veriler, Türkiye'deki üniversiteler, fakülteler, bölümler ve akademisyenler hakkında kapsamlı bilgiler sunmaktadır. Bu verilerin Neo4j gibi grafiksel veri tabanları kullanılarak analiz edilmesi ve görselleştirilmesi, akademik yapının daha iyi anlaşılmasını sağlayabilmektedir. Neo4j'nin sunduğu esnek ve doğal veri modelleme yetenekleri sayesinde, bu tür karmaşık ve bağlantılı veriler, daha anlaşılır ve interaktif bir şekilde sunulabilmektedir [8]. Akademik verilerin analizi, üniversitelerin ve akademisyenlerin performansını değerlendirmek ve potansiyel işbirliklerini belirlemek için önemlidir [9]. Neo4j ile yapılan görselleştirmeler, akademik dünyadaki temel etkenleri detaylı bir şekilde değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır. Bilgiler arasındaki ilişkiler çok sayıda olduğunda, geleneksel veri tabanları istenilen performansı gösterememekle birlikte bu ilişkilerin yönetimi zorlaşmaktadır. Neo4j gibi çizgesel veri tabanları, bu zorlukların üstesinden gelerek akademik verilerin etkin bir şekilde analiz edilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmanın amacı, Yükseköğretim Kurulu (YÖK) tarafından sağlanan veriler kullanılarak Türkiye'deki üniversiteler ve akademisyenler arasındaki ilişkileri detaylı bir şekilde görselleştirmektir. Neo4j grafiksel veri tabanı kullanılarak üniversiteler, akademik birimler ve akademisyenler arasındaki ilişkiler modellenmektedir. Akademik yapılar ve araştırma işbirlikleri hakkında değerli içgörüler sunmayı hedeflemektedir. Bu bağlamda, çizge veri tabanlarının ve gelişen teknolojilerin eğitim ve araştırma alanlarındaki uygulamaları konusunda önemli bir örnek teşkil etmektedir. Akademik kurumlar, araştırmacılar için değerli bilgiler sunan bu çalışma, aynı zamanda gelecekteki araştırmalar için de bir temel oluşturmaktadır.

Çalışmada ilk olarak literatürde yapılan çalışmalara değinilmekte ve Neo4j ile yapılan çalışmalar Tablo 1'de gösterilmektedir. Üçüncü bölümde grafiksel veri tabanlarının ve Neo4j'nin temel özellikleri ve avantajları ele alınmaktadır. Dördüncü bölümde YÖK verilerinin toplanması ve entegrasyonu süreci açıklanmakta ve bu verilerin Neo4j'ye nasıl aktarıldığına değinilmektetir. Son olarak, bu çalışmanın eğitim ve araştırma verilerinin görselleştirilmesi ve katkıları sonuç bölümünde sunulmaktadır.

2. Literatür Çalışması

Büyük veri kapsamında karmaşık ve farklı formattaki verilerin analizi bir çok zorluğu beraberinde getirmektedir. Geniş veri kaynaklarına sahip sistemler, bu zorlukların üstesinden gelebilmek için yeni yöntemlere ihtiyaç duymaktadır. Grafik analizi ve görselleştirme, üstün ve esnek özellikleri sayesinde güçlü bir teknik olarak ortaya çıkmaktadır. Çizge görselleştirme, büyük veride karşılaşılan birçok problemi ele almasının yanısıra etkili bir görselleştirme ile daha kolay anlaşılabilme yeteneği kazandırmaktadır. Çizgeler ile veri analizi bilgisayar bilimi, matematik, fizik, kimya, genetik ve sosyal bilimler gibi birçok farklı alanda yer edinmektedir [10].

Tablo 1: Neo4j ile gerçekleştirilen çalışmaların incelenmesi

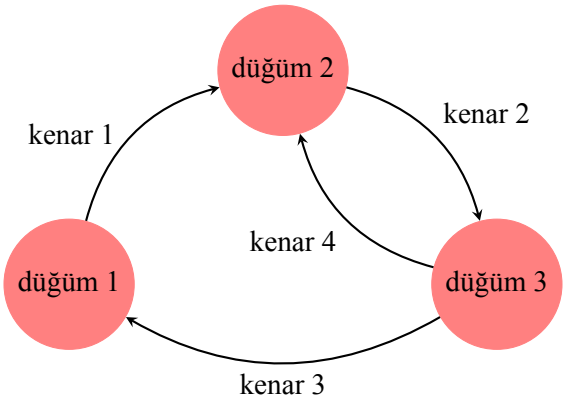
Referans	**Yıl**	**Uygulama Alanı**	**Amaç**
[11]	2020	Tedarik zinciri	Neo4j çizge veritabanı kullanarak UMKM satış verilerini modellemek
[12]	2020	Akademik ağlar	Neo4j ile Myanmar'daki Bilgisayar Üniversitesi'nin ortak yazar ağı yapısını incelemek
[13]	2020	Spor	Neo4j kullanarak Çin'de spor alanında bilgi grafiklerini geliştirmek ve verimliliğini artırmak
[14]	2020	Doğal Afet	Neo4j graf veritabanını kullanarak felaket bilgisi grafiğini görselleştirilmek
[15]	2021	Akademik ağlar	Neo4j graf veri tabanı ile Akademik bir sosyal ağ modelini görselletirilmek
[16]	2021	Ulaşım	Neo4j veritabanı ile GTFS verilerini kullanarak güzergah planlama yapmak
[17]	2021	Turizm	Akıllı turizm chatbot geliştirme amacıyla Neo4j graf veritabanı kullanılması amaçlanmaktadır.
[18]	2022	Sağlık	Akciğer kanseri hücre verilerini modellemek ve analiz etmek için Neo4j çizge veritabanı kullanılması üüzerinde çalışılmaktadır.
[19]	2022	Siber güvenlik	Siber tehdit istihbarat verilerinin analiz edilmesi için grafik görselleştirme kullanmak
[20]	2023	Performans metrikleri	Nebula Graph, Neo4j, ve TigerGraph veri tabanlarının performansını karşılaştırmak
[21]	2023	Siber güvenlik	Siber güvenlik ve zafiyet analizi yapma amacıyla Neo4j graf veritabanında açık kaynak istihbarat verilerinin kullanılması
[22]	2023	Ulaşım	Neo4j veri tabanı kullanılarak trafik güvenliği uygulaması üzerine bir model geliştirmek
[23]	2023	Ulaşım	Neo4j ve derin öğrenme kullanarak trafik sıkışıklığı simülasyonu ve optimizasyonu görselleştirilmesi
[24]	2023	Biyoloji	Neo4j ile bitki protein-protein etkileşim ağlarını depolamak ve analiz etmeye yönelik bir görselleştirme yapılması
[25]	2023	Bilim	Çizge veri biliminin bilimsel çalışmalardaki gücünü incelemesi
[26]	2024	Biyoinformatik	Sistem biyolojisi ve işaretleme dili verilerinin kullanılarak Neo4j ile analiz yapılması
[27]	2024	Tedarik zinciri	Neo4j ile müşteri satın alma kalıplarının görselletirilerek analiz edilmesi ve ürün önerileri geliştirilmesi
[28]	2024	Eğlence	Neo4j çizge veritabanının kullanarak sinema verilerinin analiz edilmesi ve modellenmesi
[29]	2024	Kriptoloji	Neo4j kullanarak SIMON şifreleme algoritmasını analiz etmek ve bilgi grafikleri oluşturmak

Değerli, yapmış olduğu tez çalışmasında akademik bilgi sistemlerinde karşılaşılan telif hakları intihal gibi bir takım problemlere ilişkin çizge veri tabanı modellemesi için Neo4j platformunu kullanmaktadır. Akademik bir yayın ve referans veri tabanı oluşturarak bu problemlere çözüm sunmayı amaçlamaktadır [30]. Sholeh ve ark. yaptıkları çalışmada UMKM (Mikro, Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeler) satış verileri Neo4j çizge veritabanı kullanılarak modellenmekte ve analiz edilmektedir. Çalışmanın amacı, satış verilerini daha etkili bir şekilde modelleyerek ve karşılaştırarak, UMKM'lerin iş süreçlerini ve karar verme mekanizmalarını iyileştirmektir. Neo4j'ün sağladığı ilişkisel veri modelleme kapasitesi, karmaşık veri yapılarının daha anlaşılır ve kullanılabilir hale getirilmesine yardımcı olmaktadır [11]. Aung ve Nyun, Myanmar'daki Bilgisayar Üniversitesi'nde gerçekleştirdikleri bu çalışmada, ortak yazar ağı yapısını incelemek ve görselleştirmek için Neo4j kullanılmaktadır. Araştırmanın amacı, akademik iş birliklerini ve ilişkileri daha iyi anlayarak, üniversitenin araştırma ağını optimize etmektir. Neo4j'ün grafik veritabanı özellikleri sayesinde, araştırmacılar arasındaki işbirlikleri ve ortaklıklar etkili bir şekilde haritalanmakta ve analiz edilmektedir [12]. Zhu ve ark. esnek iş atölyesi çizelgeleme sorununu çözmek için Neo4j tabanlı yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışmanın amacı, iş önceliği, stok ve zaman kısıtlamalarını içeren karmaşık üretim planlama problemlerini çözmektir. Neo4j, bu problemde kullanılan semantik graf modeli ve ontolojiyi entegre ederek, tüm yaşam döngüsü verilerini temsil edebilmekte ve dönüştürebilmektedir. Çalışma, otomatik dönüşüm mekanizması ve simülasyon tabanlı karınca kolonisi algoritması ile üstün çizelgeler elde etmeyi başarmaktadır [31]. Yi ve ark., geleneksel kullanıcı tabanlı işbirlikçi filtreleme algoritması kullanılarak bir film öneri sistemi geliştirmektedirler. Sistem, kullanıcı-proje puanlama matrisini önceden doldurmakta ve karmaşık ilişkileri yönetmekte başarılı olan çizge veritabanı teknolojisini kullanmaktadır. Veri görselleştirmede, bir filmin öneri derecesi düğüm boyutu ve kenar kalınlığı ile ifade edilerek kullanıcı deneyimi iyileştirilmektedir [32]. Soylu ve ark., akademik dergi makalelerindeki tutum belirteçlerinin kullanımını tanımada yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Araştırmanın amacı, akademik yazılardaki tutum belirteçlerini daha doğru ve kapsamlı bir şekilde tespit etmektir. Neo4j'ün çizge veri tabanı özellikleri, bu tür verilerin ve ilişkilerin etkin bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır [10]. Liu ve ark. tarfından yapılan bu çalışma, tayfun felaket bilgisi grafiği oluşturmak için Neo4j çizge veri tabanını kullanmaktadır. Araştırmanın amacı, tayfun felaketlerine ilişkin geniş veri setlerini anlamlandırarak afet yönetim süreçlerini iyileştirmektir. Neo4j, bu karmaşık veri ilişkilerini etkin bir şekilde modelleyerek afet hazırlık ve müdahale stratejilerinin optimize edilmesine yardımcı olmaktadır [14]. Değerli, akademik bir sosyal ağ modeli oluşturmak için Neo4j çizge veri tabanı kullanmaktadır. Araştırmanın amacı, akademisyenler arasındaki işbirlikleri ve ilişkileri görselleştirerek akademik ağların dinamiklerini daha iyi anlamaktır. Neo4j'ün sunduğu çizge veri yapıları, bu ilişkilerin ve işbirliklerinin daha net ve detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır [15]. Daş ve Soylu'nun yapmış olduğu çalışmada, çizge veri biliminin bilimsel çalışmalardaki gücününün incelenmesi amaçlanmaktadır. Araştırmanın amacı, çizge veri bilimini kullanarak bilimsel çalışmalarda yeni analiz ve modelleme yaklaşımları geliştirmektir [25]. Tablo 1 literatürde neo4j kullanılarak yapılan çalışmalara tarihsel bir bakış sunmaktadır. Karmaşık akademik yapılar ve üniversiteler üzerine yapılan mevcut çalışmalara rağmen, bu yapılar içinde yer alan dinamik ilişkilerin görsel analizinin sağladığı bilgi, hala tam olarak değerlendirilememiştir. Özellikle çizge veri tabanları kullanılarak üniversitelerin fakülte, bölüm ve akademisyen seviyesinde detaylı ilişkilerinin modellenmesi, yalnızca mevcut veriyi görmekle kalmayıp, bu veriler arasındaki örüntüleri ve hiyerarşileri daha etkili bir şekilde anlamamıza olanak tanımaktadır. Bu çalışmanın motivasyonu, klasik veri tabanı yaklaşımlarından farklı olarak, üniversitelerin iç yapısındaki ilişkilerin ve bu ilişkilerin sunduğu bilgilerin görselleştirilmesidir. Bu tür bir yaklaşım, özellikle çok katmanlı organizasyonlarda, verilerin kullanıcı dostu bir formatta sunulmasıyla veri analizi süreçlerine yeni bir bakış açısı kazandırmayı amaçlamaktadır. Çalışma, Türkiye'deki üniversiteler ve akademik birimler arasında yeni ilişkiler

keşfetmek ve bu alanlardaki daha derinlemesine analizler için bir zemin oluşturmaktadır.

3. Çizgesel Veri Tabanı

Çizge veri tabanları, verileri düğümler ve bu düğümler arasındaki ilişkiler (kenar) şeklinde modelleyip saklayan veri tabanı türleridir [5]. Bu veri tabanları, özellikle karmaşık ve yoğun bağlantılı veri kümeleriyle çalışmak için optimize olarak sunulmaktadır [33]. Çizge veri tabanlarının temel özelliklerinden biri, Şekil 1'de görüldüğü gibi düğümler ve kenarlar arasındaki ilişkileri doğrudan temsil etmeleridir. Düğümler, varlıkları temsil ederken, kenarlar bu varlıklar arasındaki ilişkileri ifade eder. Bu yapı, veriler arasındaki ilişkileri hızlı ve etkili bir şekilde sorgulamayı ve analiz etmeyi mümkün kılmaktadır.



Şekil 1: Çizge görünümü

Çizge veri tabanlarının bir diğer önemli özelliği esnekliklerdir. Yeni düğüm veya kenar türleri eklemek, veri tabanı yapısında değişiklikler yapmak son derece kolaydır. Bu esneklik, özellikle hızlı değişen ve büyüyen veri ortamlarında büyük avantaj sağlamaktadır. Çizge veri tabanları ayrıca yüksek performans sunmasının yanısıra; karmaşık sorguları ve analizleri hızlı bir şekilde gerçekleştirebilmektedir. Bu da, özellikle sosyal ağ analizi, öneri sistemleri, biyoinformatik ve dolandırıcılık tespiti gibi alanlarda kullanılmalarını ideal kılmaktadır. Bunun yanı sıra, çizge veri tabanları veri bütünlüğünü ve ilişkilerin tutarlılığını koruma konusunda da oldukça başarılıdır. Geleneksel ilişkisel veri tabanlarından farklı olarak, veriler arasındaki ilişkilerin daha doğal ve doğrudan bir şekilde ifade edilmesini sağlamaktadır. Bu da, verilerin daha anlamlı ve kullanışlı bir şekilde modellenmesine olanak tanır. Aşağıda bazı çizge veri tabanları özellikleri ve yapılarından bahsedilmektedir.

ArangoDB: triAGENS GmbH tarafından geliştirilen çok modelli bir veri tabanı sistemidir. Veriler grafik, belge, anahtar-değer ve sütun tabanlı olarak saklanabilir ve bunların hepsine AQL (ArangoDB Sorgu Dili) sorgulama dili ile erişilebilmektedir. AQL, SQL benzeri bir sorgulama dilidir ve karmaşık sorgulamaları kolaylaştırmaktadır. ArangoDB, tüm veri modelleri için aynı çekirdeği ve aynı sorgu dilini kullanmaktadır. Farklı veri modellerini tek bir sorguda birleştirmek, verilerin karmaşıklığını azaltmaktadır [34]. Bu çoklu model, basitleştirilmiş performans ölçeklendirmesi, artırılmış esneklik, hata toleransı, büyük miktarda depolama belleği ve diğer veritabanlarına göre daha düşük maliyete sahip olması nedeniyle başarım oranı yüksektir. ArangoDB, dağıtılmış çok modelli bir veri tabanı olarak büyük veri kümelerini işleyebilmektedir. Web ve mobil uygulamalarında karmaşık veri yapıları ve ilişkilerini yönetmek için idealdir. IoT sistemlerinde çeşitli veri kaynakları etkili bir şekilde entegre edilebilmektedir. Karmaşık ilişkisel verileri işleyebilir ve analiz edebilir dolayısıyla sosyal ağlar ve öneri sistemleri için de

idealdir.

OrientDB: 2011 yılında OrienTechnologies tarafından Java'da uygulanarak başlandı. Belgeler, grafikler, anahtar/değer ve nesnelerdeki veri modellerini destekleyen, çok modelli, açık kaynaklı bir NoSQL veri tabanı yönetim sistemidir. Dağıtık mimariyi desteklemektedir. Yatay ölçeklendirme için tasarlandığından büyük ölçekli uygulamalar için uygundur. Fiziksel veri saklama işlemi bellekte ve diskte yapılabilmektedir [35]. Kolay kullanım ve entegrasyon için SQL benzeri sorgular kullanmaktadır. OrientDB, kimlik doğrulama, parola ve atıl veri şifreleme kullanımıyla mevcut tüm gizli verilerde güvenlik sağlamaktadır. OrientDB'nin, dolandırıcılık tespiti, ağ/BT işlemleri, grafik arama, öneri motorları, ana veri yönetimi, kimlik yönetimi ve adli analiz gibi bir çok kullanım alanı bulunmaktadır [36].

Amazon Neptune: Amazon Web Services (AWS) tarafından sunulan tam yönetimli bir grafik veritabanı hizmetidir. Yüksek performanslı ve ölçeklenebilir olmasıyla öne çıkan Neptune, bağlı veri uygulamaları oluşturmak için optimize edilmiştir. RDF ve Property Graph modellerini desteklemektedir, bu sayede SPARQL ve Gremlin sorgu dillerini kullanarak veri tabanı işlemleri yapılabilmektedir. Veri bütünlüğü ve tutarlılığı sağlayan ACID uyumlu işlemler sunar ve otomatik yedekleme, güvenlik, ve yüksek kullanılabilirlik gibi yönetimsel özellikler barındırmaktadır [37]. Bu esneklik ve performans, sosyal ağlar, öneri motorları, bilgi grafikleri gibi uygulamalar için idealdir.

Tablo 2: Popüler çizge veritabanlarının özellik karşılaştırması

Özellik	**Neo4j**	**Amazon Neptune**	**JanusGraph**	**OrientDB**	**ArangoDB**	**TigerGraph**
Model	Doğrudan graf	RDF ve Property Graph	Property Graph	Multi-model (Graf, Document)	Multi-model (Graf, Document)	Property Graph
Sorgulama Dili	Cypher	SPARQL, Gremlin	Gremlin, SPARQL	SQL, Gremlin	AQL (ArangoDB Query Language)	GSQL
Ölçeklenebilirlik	Orta-Büyük	Büyük	Büyük	Orta	Orta	Büyük
Performans	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta-Yüksek	Yüksek
Dağıtık Mimari	Mevcut, ancak sınırlı	Tam destek	Tam destek	Kısmen destek	Tam destek	Tam destek
Kullanım Alanları	Sosyal Ağlar, Öneri Sistemleri	Biyoinformatik, Finans	Büyük veri analitiği	Çok modelli veri uygulamalar	Çok modelli veri uygulamalar	Büyük veri analitiği
Kullanıcı Arayüzü	Güçlü, kullanıcı dostu	Yönetim konsolu	Apache TinkerPop destekli	Web arayüzü	Web arayüzü	Güçlü, kullanıcı dostu

JanusGraph: Açık kaynaklı, dağıtık bir grafik veritabanıdır ve özellikle büyük ölçekli grafik veri modelleri için tasarlanmıştır. Apache TinkerPop çerçevesi ile uyumludur ve Gremlin sorgu dili kullanılarak sorgulama yapılabilir. Yüksek esneklik ve ölçeklenebilirlik sunmakta, bu da onu sosyal ağlar, biyoinformatik, bilgi grafikleri ve IoT gibi veri yoğun uygulamalar için ideal hale getirmektedir [38]. JanusGraph, HBase, Cassandra, ve BerkeleyDB gibi çeşitli depolama arka uçlarıyla çalışabilmekte ve Elasticsearch, Solr gibi arama motorları ile entegre olabilmektedir. Bu özellikleri, performans ve veri bütünlüğünü garanti etmektedir.

TigerGraph: Yüksek performanslı ve dağıtık bir grafik veritabanıdır. Büyük veri kümeleri ve karmaşık sorgular için optimize edilmiştir ve yatay olarak ölçeklenebilir bir mimariye sahiptir. Gerçek zamanlı analitik işlemleri desteklemektedir ve GraphQL gibi kullanıcı dostu sorgulama dillerini kullanmakta-

dır [38]. Gelişmiş veri akışı analitiği yetenekleri sunar ve derin grafik sorguları için güçlü bir altyapıya sahiptir. Finans, sağlık, telekomünikasyon, siber güvenlik ve IoT gibi çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrca, geliştiriciler için kapsamlı SDK ve API seçenekleri sunmaktadr.

Neo4J: Java'da uygulanan açık kaynaklı bir grafik veri tabanıdır. Neo4j işlemsel bir veri tabanı ve yapıları tablolar yerine grafikler biçiminde depolayabildiğimiz kalıcı bir Java motorudur. Kullanılan dil Cypher, karmaşık grafik sorgularını basit ve anlaşılır hale getiren SQL benzeri bir dildir [36]. Yeni düğüm ve kenar türleri kolayca eklenebilir, bu da veri modelleme esnekliği sağlamakadır [39]. Büyük veri içersinde pek çok bağlantı bulunmaktadır. Neo4j, görsel etkileşimli grafikleri sayesinde bunlar arasındaki iç içe geçmiş bağlantıların bulunmasına yardımcı olur. Neo4j, verileri son derece disiplinli bir şekilde yönetme ve saklama özgürlüğü sağlayan yerel grafik depolamayı kullanmaktadır. Neo4j gerçek zamanlı öneriler, kimlik ve erişim yönetimi, ağ ve BT operasyonları, dolandırıcılık tespiti, bilgi grafikleri, grafik destekli yapay zeka, akıllı evler ve IoT gibi bir çok uygulama senaryosu için uyarlanabilmektedir.

Tablo 2'de bu veri tabanlarının yapısal özelliklerinin karşılaştırılması verilmektedir. Yaptığımız çalışma da kullanıcı arayüzünün güçlü ve kolay anlaşılabilir yapısından dolayı Neo4j çizge veri tabanı tercih edilmektedir. Kullanılan veri setinin orta büyüklükte bir veri seti olması ve Neo4j'nin esnek yapısına uygun olması iyi bir tercih olduğunu göstermektedir.

4. Yöntem ve Uygulama

Neo4j kolay ve esnek yapısıyla bir çok avantaja sahiptir. Verilerin düğüm ve ilişki formunda hızlıca veri temsilleri oluşturulabilmektedir. Çalışmamızda YÖK websitesinden toplanan veriler; üniversiteler, akademisyenler ve akademisyenlere ait bilimsel çalışmalar düğümler olarak modellenmekte ve düğümler arasına bağlantılı ilişkiler atanmaktadır. Çalışmayı yaparken Şekil 2 'de gösterilen adımlar takip edilmektedir.

1. **Veri Toplama:** Başlangıç aşamasında verilerin hangi yöntem ile toplanacağı hangi formatta kaydedileceği araştırılması gereken zorluklardandır. Çalışmamızda YÖK websitesinden web scraping yapılarak üniversiteler, akademisyenler ve onların çalışmaları hakkında veriler toplanmaktadır.

    - Web scraping, web sitelerinden veri çekme işlemidir. Otomatik araçlar kullanarak, genellikle programlama dilleri ve kütüphaneler (Python, BeautifulSoup, Selenium gibi) yardımıyla web sayfalarındaki veriler toplanır, işlenir ve analiz edilir. Web scraping, büyük veri kümelerine hızlı erişim sağlamak ve bu verileri farklı formatlarda (CSV, JSON vb.) kaydetmek için kullanılır. Bu yöntem, veri analizi, makine öğrenimi modelleri oluşturma, fiyat karşılaştırma, pazar araştırması ve daha birçok alanda faydalıdır.

Tablo 3: Düğümler ve aralarındaki ilişkiler

Düğüm	**İlişki**	**Bağlantılı düğüm**
YÖK	üniversitesi	FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FIRAT ÜNİVERSİTESİ	FAKÜLTESİ	TEKNOLOJİ FAKÜLTESİ
TEKNOLOJİ FAKÜLTESİ	bölümü	YAZILIM MÜHENDİSLİĞİ
YAZILIM MÜHENDİSLİĞİ	AKADEMİSYENİ	R.D.

YÖK web sitesinden çekilen veri kümesinde, YÖK ve YÖK'e bağlı üniversite isimleri herbiri birer düğümü temsil etmektedir. Üniversiteler arasından Fırat Üniversitesi'ne ait fakülteler ve bu

fakültelere bağlı bölümler de düğüm temsillerini oluşturmaktadır. Ek olarak fakülte bölümlerinde mevcut bulunan akademisyenler de düğümlerin gerikalanıdır. Tablo 3'de düğümler ve aralarındaki ilişkiler gösterilmektedir, ancak çalışmadaki bütün düğüm isimlendirmelerini göstermek mümkün olmadığı için çalışmanın detayı anlaşılması bakımından bir kaç genel düğüm ve aralarındaki ilişki ismi belirtilmektedir. Tablo da düğüm ve ilişki isimleri belirtilirken, Neo4j'deki çizge isimlerine sadık kalınarak büyük ya da küçük harf kullanılmaktadır.

Veri kümesi kapsamında 2191 düğüm ve 2124 tane düğümler arası ilişki bulunmaktadır. Veri kümesinde bulunan düğüm sayısı Şekil 3'te görüldüğü gibi Cypher sorgu dili kullanılarak öğrenilebilmektedir.



Şekil 3: Sorgu sonucu düğüm sayısı

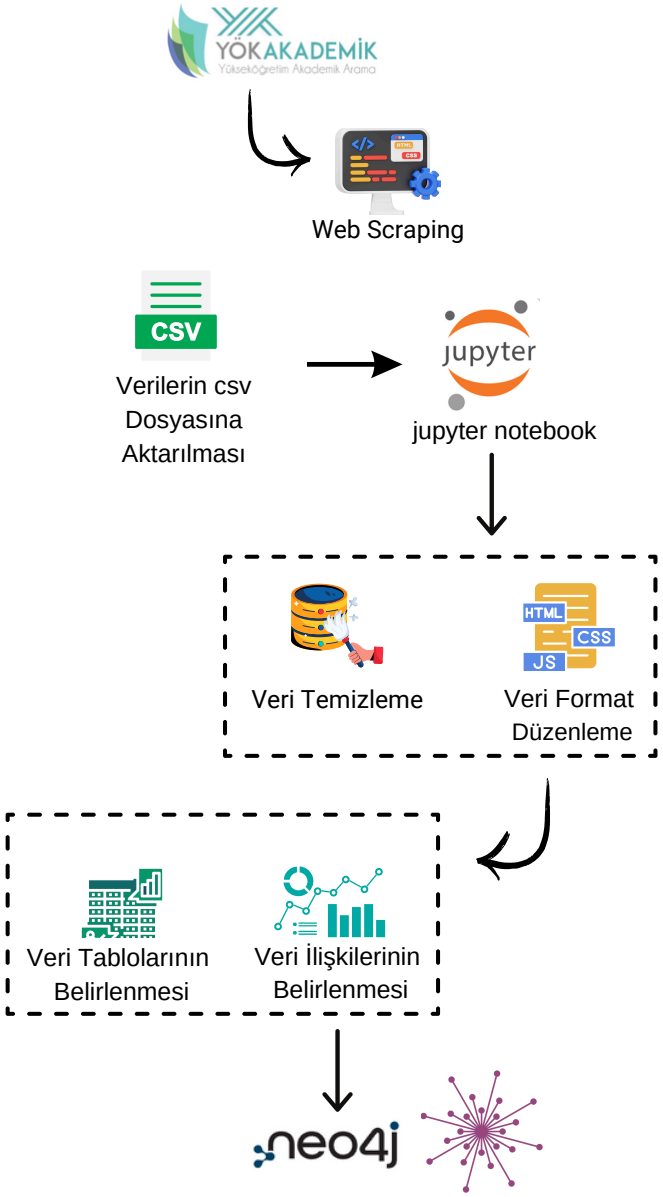
2. **Veri Aktarımı:** Toplanan veriler CSV formatında kaydedilip, Şekil 4'te görülen kod bloğu kullanılarak Jupyter Notebook ve Neo4j veri tabanı arasındaki veri aktarımı gerçekleştirilmektedir.

```
import pandas as pd
from neo4j import GraphDatabase
# Neo4j bağlantısı
host = 'bolt://localhost:7687'
user = 'neo4j'
password = '123456789'
driver = GraphDatabase.driver(host, auth=(user, password))
```

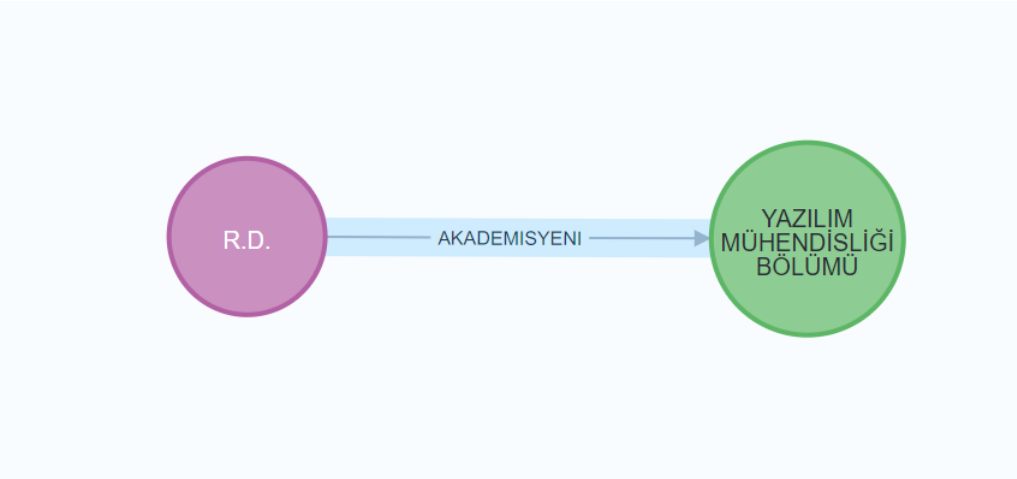
Şekil 4: Neo4j ve Jupyter notebook arasındaki bağlantı kodu

Verilerinin toplanmasından sonraki adım, veri kümesinin eksik, tutarsız verilerden temizlenmesidir. Tutarsız düğüm adları, bağlantısı olmayan veri düğümleri yada tekrarlanan veriler giderilmelidir. Farklı formatlarda bulunan verilerin normalleştirilmesi yapılmalıdır. Kısacası veri seti Neo4j veri tabanına aktarılmadan önce hazır hale getirilmelidir.

3. **Veri Modelleme:** Bu adımda düğümler ve aralarındaki ilişkiler tanımlanmaktadır. Veri tabloları oluşturulup, varlıklar arasındaki ilişkiler açık bir şekilde belirlenmelidir. Örneğin, bir üniversite düğümü ile bir fakülte düğümü arasında "fakültesi" ilişkisi oluşturulmaktadır. Şekil 5'da görüldüğü gibi iki farklı düğüm ve aralarında ilişkisel bağlantı bulunmaktadır. "R.D." düğümü "YAZILIM MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ" ile "Akademisyeni" ilişkisi kurulmaktadır.



Şekil 2: YÖK akademik verilerinin Neo4j çizge veritabanı ile modellenme adımları



Şekil 5: Düğümler ve aralarındaki ilişki

	un_adi	un_sehir	un_turu	un_aCilisYil	rektor_ismi
0	ABDULLAH GUL UNIVERSITESI	KAYSERI	DEVLET	2010	PROF.DR. C.Y.
1	ACIBADEM MEHMET ALI AYDINLAR UNIVERSITESI	ISTANBUL	VAKIF	2007	PROF.DR. A.S.
2	ADANA ALPARSLAN TURKES BILIM VE TEKNOLOJI UNIV...	ADANA	DEVLET	2011	PROF.DR. M.T.
3	ADIYAMAN UNIVERSITESI	ADIYAMAN	DEVLET	2006	PROF.DR. M.K.
4	AFYON KOCATEPE UNIVERSITESI	AFYONKARAHISAR	DEVLET	1992	PROF.DR. M.K.
...	...	...	...	...	...
203	YEDITEPE UNIVERSITESI	ISTANBUL	VAKIF	1996	None
204	YILDIZ TEKNIK UNIVERSITESI	ISTANBUL	DEVLET	1982	PROF.DR. T.Y.
205	YOZGAT BOZOK UNIVERSITESI	YOZGAT	DEVLET	2006	PROF.DR. E.Y.
206	YUKSEK IHTISAS UNIVERSITESI	ANKARA	VAKIF	2013	PROF.DR. K.S.
207	ZONGULDAK BULENT ECEVIT UNIVERSITESI	ZONGULDAK	DEVLET	1992	PROF.DR. I.H.O.

208 rows × 5 columns

Şekil 6: Üniversite Bilgileri

Üniversitelerin sahip olduğu fakülteler, bölümler ve akademisyen bilgilerini içeren veri üzerinde ”Üniversite Bilgilerini” içeren çıktı Şekil 6’te gösterilmektedir.

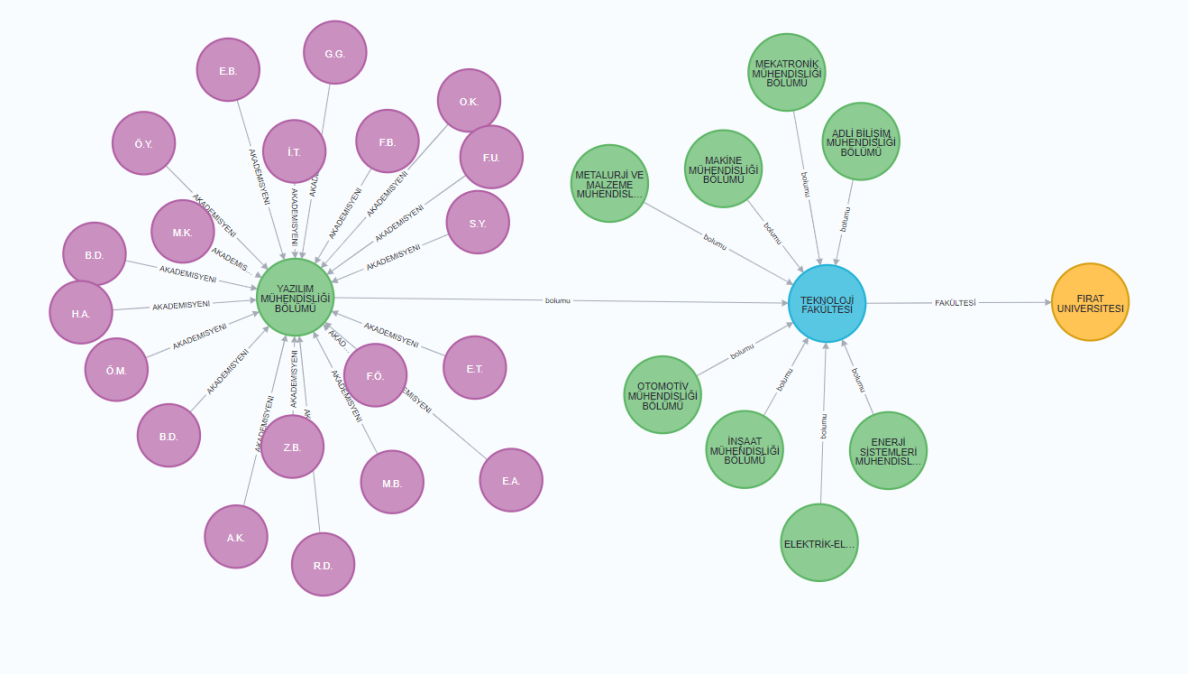
4. **Veri Analizi:** Cypher sorgu dili kullanılarak çeşitli analizler gerçekleştirilmektedir. Örneğin, belirli bir üniversitedeki tüm akademisyenler sorgulanabilir. Akademisyenin hangi üniversitede hangi bölümde olduğu öğrenilebilir. Şekil 7’de veri tabanına sorgu gönderme fonksiyonu gösterilmektedir.

   Cypher sorgulama dili ile SQL birbirinden farklı özellikler gösterebilmektedir. Cypher dilinde

```
# Veritabanına sorgu gönderme fonksiyonu
def run_query(query):
    with driver.session() as session:
        result = session.run(query)
        return pd.DataFrame([r.values() for r in result], columns=result.keys())
```

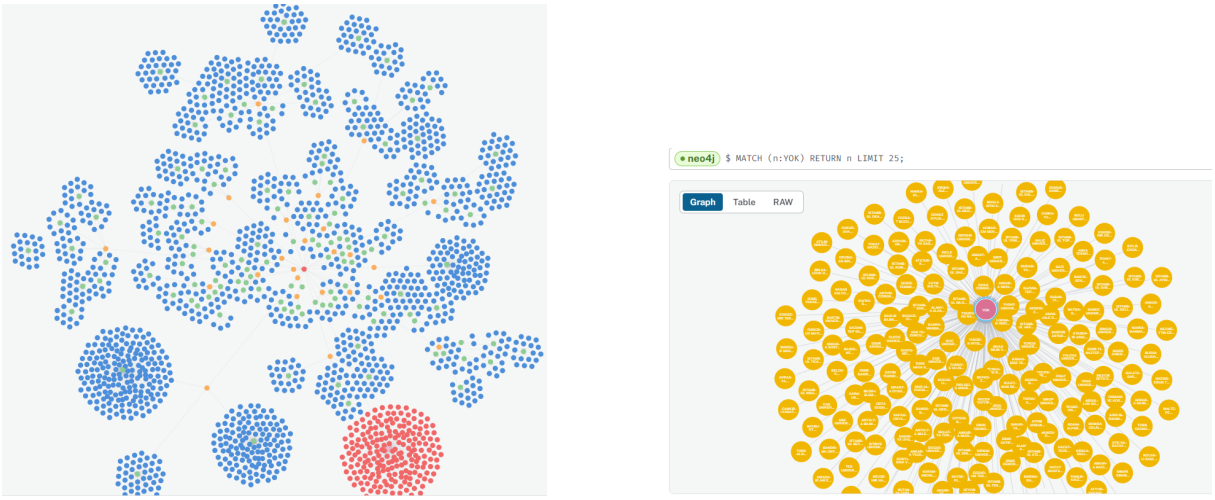
Şekil 7: Veritabanına sorgu gönderme fonksiyonu

MATCH ve WHERE gibi yaygın kelimeler kullanılmaktadır. MATCH, aranan örüntüdeki yapıyı ilişkilere dayandırarak açıklamaktadır. WHERE belirlenmiş kalıpların kısıtlamalarını ekleyebilmek için kullanılmaktadır. Veri yazmak, güncellemek ve silmek için özellikler bulunmaktadır. CREATE ve DELETE, düğümleri ve ilişkileri oluşturmak ve silmek için kullanılmaktadır. Örneğin; ” *$MATCH (n:FAKULTE) WHERE n.name =’TEKNOLOJİ FAKÜLTESİ’ RETURN n* ” sorgu cümlesi ile Şekil 8’de Teknoloji Fakültesinin bağlı bulunduğu üniversite ve kendisine bağlı olan düğüm kümeleri ve bu düğümlerle aralarındaki ”bölümü” ilişkisi görülmektedir. Şekil 9, a’da veritabanında yer alan bütün düğüm ve ilişkiler gösterilmektedir. b’de ise sorgu limitinin 25 olduğu bir görsel alan bulunmakta, YÖK ve bağlı bulunan üniversiteler gösterilmektedir.



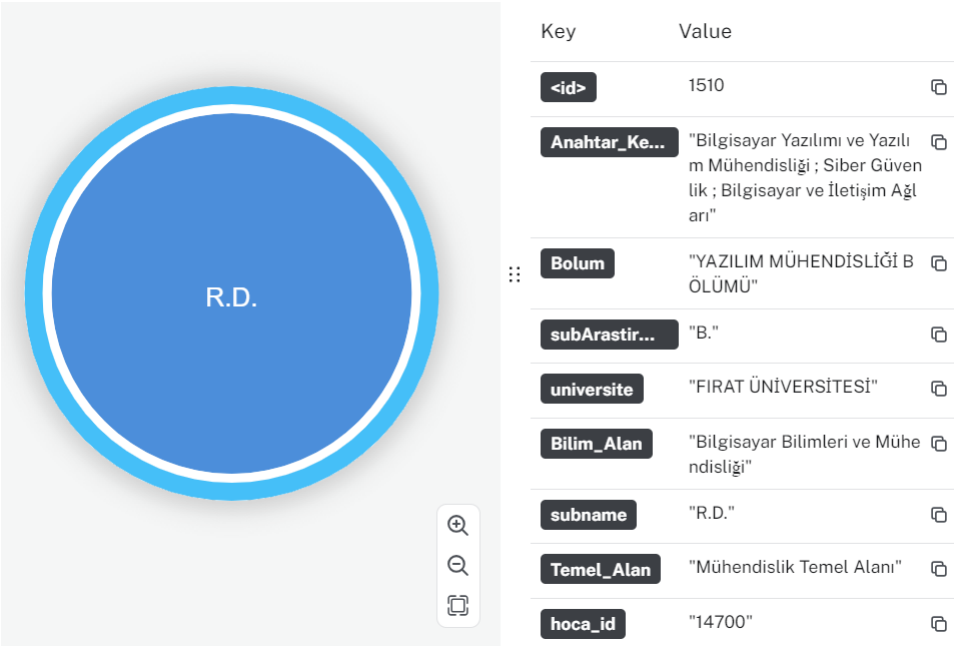
Şekil 8: Teknoloji Fakültesi isimli düğüm bağlantıları

Neo4j görselleştirme aracı, kullanıcıların veri üzerinde etkileşimli bir şekilde çalışmasına olanak tanımaktadır. Belirli düğümler ve bağlantılar tıklanarak daha derinlemesine analiz yapılabilmektedir. Şekil 10’da olduğu gibi düğüm üzerine tıklayınca sağ bölmede düğüme ait özelliklere ulaşılabilinmektedir.



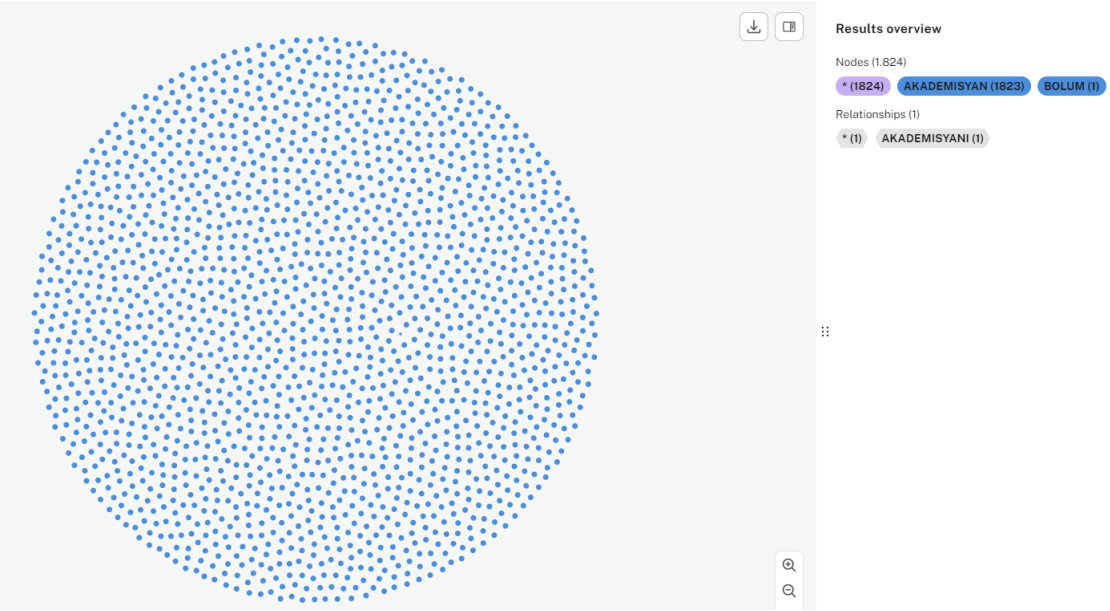
(a) Limitsiz Sorgu (b) Sorgu limiti 25 olan sorgu

Şekil 9: Cypher sorgulama dili çıktısı

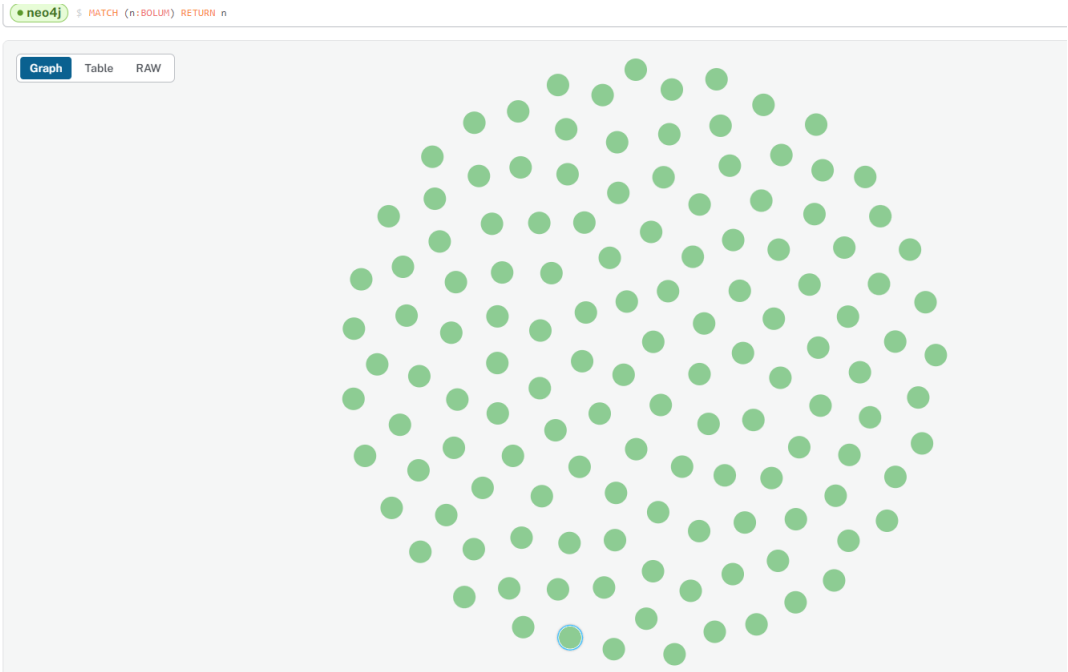


Şekil 10: Düğüm bilgileri

5. **Veri Görselleştirme:** 2191 Düğüm ve 2124 ilişkiden oluşan veri seti Neo4j kullanılarak, verilerin görselleştirilmesi sağlanmaktadır. Neo4j'de veri görselleştirme, verilerin daha iyi anlaşılmasını ve analiz edilmesini sağlar, karmaşık ilişkileri ortaya çıkarır ve veri ile ilgili içgörüleri güçlendirir. Şekil 11'de sorgu sonucu Fırat Üniveristesinde bulunan akademisyenler gösterilmektedir. 1823 düğüm bulunduğu yani veritabanında Fırat Üniveristesine ait 1823 veri kaydı olduğu görülmektedir. 12'de Fırat Üniversitesine ait bölümlerin sorgusu görüntülenmektedir.

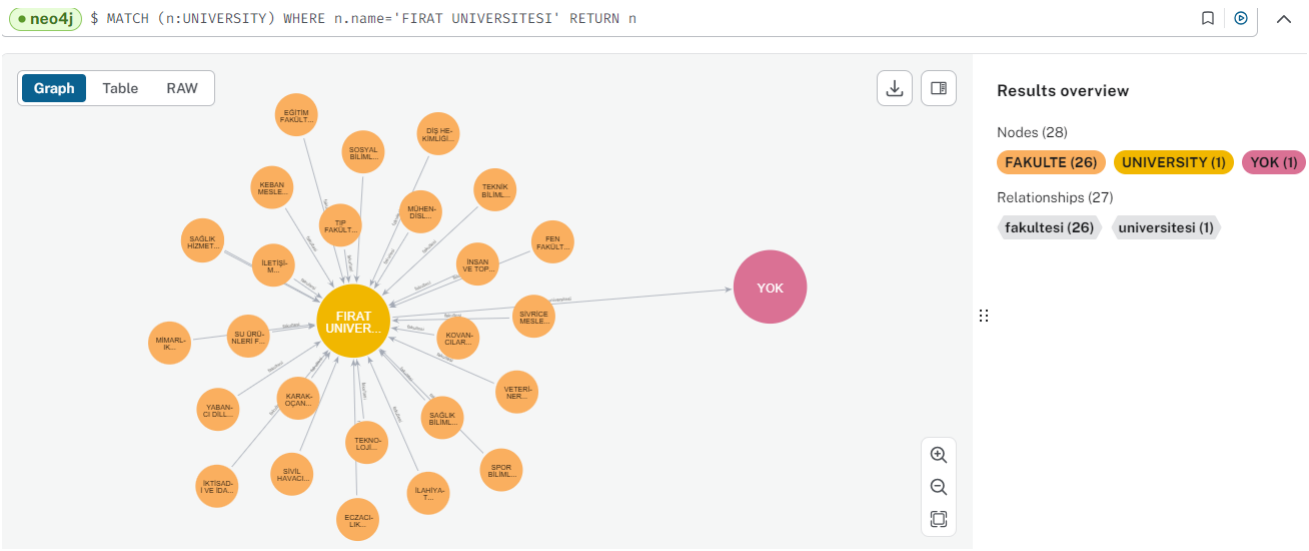


Şekil 11: Fırat Üniversitesinde bulunan akademisyenler



Şekil 12: Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Bölümleri

Veritabanındaki karmaşık ilişkiler ve bağlantılar, grafik olarak gösterildiğinde daha kolay anlaşılır hale gelmektedir. Neo4j Şekil 13'de olduğu gibi "FIRAT ÜNİVERSİTESİ" düğümünün ve diğer düğümler ile olan alaka düzeyi ilişkiler ile belirlendikten sonra görselleştirilip veriyi daha anlaşılır kılmaktadır.



Şekil 13: Veri düğüm temsilleri ve ilişkileri

5. Sonuç

Günümüzde akademik dünyada veriler hızla büyümekte ve bu veriler arasındaki ilişkiler daha karmaşık hale gelmektedir. Yalnızca verilerin kendisine odaklanmak yerine, bu veriler arasındaki ilişkileri anlamak ve analiz etmek büyük önem taşımaktadır. Geleneksel veri tabanları, bu karmaşık ilişkileri modellemekte ve yönetmekte yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada, YÖK web sitesinden çekilen üniversite, fakülte, bölüm ve akademisyen verileri Neo4j kullanılarak görselleştirilmektedir. Görselleştirme süreci, özellikle büyük ve karmaşık veri setlerinde, veriler arasındaki ilişkileri anlamayı kolaylaştırmaktadır. Üniversiteler, fakülteler ve bölümler arasındaki hiyerarşik yapı ve akademisyenlerin bu yapılar içindeki konumları Neo4j ile daha net bir şekilde ortaya konulmaktadır. Görselleştirme, veri yapısının anlaşılmasında büyük bir katkı sağlamakta ve ileride yapılacak analizler için değerli bir başlangıç noktası sunmaktadır. Özellikle Fırat Üniversitesi üzerine yoğunlaşılarak yapılan bu çalışmada, farklı fakülteler, bölümler ve akademisyenler arasındaki ilişkilerin görsel olarak ortaya konması, bu verilerin analiz edilmesi gerektiğinde daha etkin sorgulamalar yapılmasını kolaylaştıracak önemli bir adımdır. Neo4j'nin sağladığı görselleştirme avantajı, veri tabanındaki düğümler ve ilişkilerin daha net bir şekilde incelenmesine olanak tanımakta, görsel araçların analiz süreçlerine katkısını gözler önüne sermektedir. İleride yapılacak çalışmalar, bu verilerin analiz edilerek akademik yapıların dinamikleri hakkında daha kapsamlı çıkarımlar yapılmasına olanak sağlayabilmektedir. Sonuç olarak, bu çalışmada elde edilen görselleştirmeler, Türkiye'deki üniversiteler ve akademik yapılar hakkında genel bir bakış sunmakla birlikte, daha ileri analizlerle desteklenerek, bu yapılar arasındaki ilişkilerin daha derinlemesine incelenmesi için bir temel oluşturmaktadır. Görselleştirme, karar alıcıların ve araştırmacıların büyük veri setlerini daha kolay anlamalarına yardımcı olan güçlü bir araç olarak kendini göstermektedir.

6. Bilgilendirme

Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yazılım Mühendisliği Anabilim Dalı doktora öğrencisi Berna ÇENGİZ'ın Doktora Tezi, TÜBİTAK tarafından "2211-C Öncelikli Alanlar Yurt İçi Doktora Burs Programı" kapsamında desteklenmektedir.

Kaynaklar

[1] Sagiroglu S, Sinanc D, Big data: A review, 2013 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS), 2013; 42-47. doi: 10.1109/CTS.2013.6567202.

[2] Kumar P, Huang HH, Graphone: A data store for real-time analytics on evolving graphs, ACM Transactions on Storage (TOS), 2020; 15(4): 1-40.

[3] Besta M, Gerstenberger R, Peter E, Fischer M, Podstawski M, Barthels C, Alonso G, Hoefler T, Demystifying graph databases: Analysis and taxonomy of data organization, system designs, and graph queries, ACM Computing Surveys, 2023; 56(2): 1-40.

[4] Turgay S, Eren K, Graph database for agent based emergency response model, The 2014 International Conference on Advances in Big Data Analytics (ABDA) & ICOMP, 2014.

[5] Miller JJ, Graph database applications and concepts with Neo4j, Proceedings of the Southern Association for Information Systems Conference, 2013; 2324(36): 141-147.

[6] Afandi MI, Wahyuni ED, University research graph database for efficient multi-perspective data analysis using Neo4j, 2020 6th Information Technology International Seminar (ITIS), 2020; 286-290.

[7] Bürhan Y, Daş R, Akademik veritabanlarından yazar-makale bağlantı tahmini, Politeknik Dergisi, 2017; 20(4): 787-800.

[8] Hodler AE, Needham M, Graph data science using Neo4j, in: Massive Graph Analytics, Chapman and Hall/CRC, 2022; 433-457.

[9] İnce K, Karcı A, Akademik işbirliklerinin yeni bir çizge olarak modellenmesi ve istatistiki analizi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2019; 34(1): 439-460.

[10] Soylu M, Soylu A, Daş R, A new approach to recognizing the use of attitude markers by authors of academic journal articles, Expert Systems with Applications, 2023; 230: 120538. doi: 10.1016/j.eswa.2023.120538.

[11] Sholeh M, Rachmawati RR Y, Susanti E, Pemodelan basis data graph dengan Neo4j (Studi Kasus: Basis Data Sistem Informasi Penjualan pada UMKM), Jurnal Teknologi Informasi dan Terapan, 2020; 7(1): 25-32. doi: 10.25047/jtit.v7i1.129.

[12] Aung TT, Nyunt TTS, Community detection in scientific co-authorship networks using Neo4j, 2020 IEEE Conference on Computer Applications (ICCA), 2020; 1-6. doi: 10.1109/ICCA49400.2020.9022826.

[13] Xu Z, Xu T, Zhang F, Construction of chinese sports knowledge graph based on Neo4j, 2020 IEEE 2nd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT), 2020; 561-564. doi: 10.1109/ICCASIT50869.2020.9368851.

[14] Liu P, Huang Y, Wang P, Zhao Q, Nie J, Tang Y, Sun L, Wang H, Wu X, Li W, Construction of typhoon disaster knowledge graph based on graph database Neo4j, 2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2020; 3612-3616. doi: 10.1109/CCDC49329.2020.9164384.

[15] Değerli A, Ağ toplumu yaklaşımı ile akademik bir sosyal ağ modeli için graf veri tabanı önerisi, Beykoz Akademi Dergisi, 2021; 9(1): 68-88. doi: 10.14514/BYK.m.26515393.2021.9/1.68-88.

[16] Vágner A, Route planning on GTFS using Neo4j, Annales Mathematicae et Informaticae, 2021; 54: 163-179. doi: 10.33039/ami.2021.07.001.

[17] Kim DH, Im HS, Hyeon JH, Jwa JW, Development of the rule-based smart tourism chatbot using Neo4J graph database, International Journal of Internet, Broadcasting and Communication, 2021; 13(2): 179–186.

[18] Tuck D, A cancer graph: a lung cancer property graph database in Neo4j, BMC Research Notes, 2022; 15(1): 45. doi: 10.1186/s13104-022-05912-9.

[19] Sülü M, Daş R, Graph visualization of cyber threat intelligence data for analysis of cyber attacks, Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering, 2022; 10(3): 300-306. doi: 10.17694/bajece.1090145.

[20] Monteiro J, Sá F, Bernardino J, Experimental evaluation of graph databases: JanusGraph, Nebula Graph, Neo4j, and TigerGraph, Applied Sciences, 2023; 13(9): 5770. doi: 10.3390/app13095770.

[21] Pelofske E, Liebrock LM, Urias V, Cybersecurity threat hunting and vulnerability analysis using a Neo4j graph database of open source intelligence, 2023; doi: 10.48550/arXiv.2301.12013.

[22] Yuan D, Zhou K, Yang C, Architecture and application of traffic safety management knowledge graph based on Neo4j, Sustainability, 2023; 15(12): 9786. doi: 10.3390/su15129786.

[23] Singh SP, Khan AA, Souissi R, Yusuf SA, Leveraging Neo4j and deep learning for traffic congestion simulation & optimization, 2023; doi: 10.48550/arXiv.2304.00192.

[24] Kumar N, Mukhtar S, Building protein–protein interaction graph database using Neo4j, Protein-Protein Interactions: Methods and Protocols, Springer US, New York, NY, 2023; 469-479. doi: 10.1007/978-1-0716-3327-4-36.

[25] Das R, Soylu M, A key review on graph data science: The power of graphs in scientific studies, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2023; 240: 104896. doi: 10.1016/j.chemolab.2023.104896.

[26] Gricourt G, Duigou T, Dérozier S, Faulon JL, neo4jsbml: import systems biology markup language data into the graph database Neo4j, PeerJ, 2024; 12: e16726. doi: 10.7717/peerj.16726.

[27] Dermawan F, Kwang CH, Adijanto MD, Rakhmawati NA, Basara NR, Product recommendations through Neo4j by analyzing patterns in customer purchases, 2024 ASU International Conference in Emerging Technologies for Sustainability and Intelligent Systems (ICETSIS), 2024; 1-4. doi: 10.1109/ICETSIS61505.2024.10459357.

[28] Tangalay Dalgın G, Daş R, Sinema verilerinin Neo4j çizge veritabanı ile modellenmesi ve analizi, DÜMF Mühendislik Dergisi, 2023. doi: 10.24012/dumf.

[29] Cook J, Rehman S, Khan MA, Cryptanalysis of the SIMON cypher using Neo4j, 2024. doi: 10.48550/arXiv.2405.04735.

[30] Değerli A, Ağ Toplumu bağlamında Bilginin paylaşımına yönelik akademik yayın ve referans Sistemleri: Neo4j platformunda graf veritabanı uygulaması, PQDT - Global, 2014; 285. doi: 9798515213640.

[31] Zhu Z, Zhou X, Shao K, A novel approach based on Neo4j for multi-constrained flexible job shop scheduling problem, Computers & Industrial Engineering, 2019; 130: 671-686. doi: 10.1016/j.cie.2019.03.022.

[32] Yi N, Li C, Feng X, Shi M, Design and implementation of movie recommender system based on graph database, 2017 14th Web Information Systems and Applications Conference (WISA), 2017; 132-135. doi: 10.1109/WISA.2017.34.

[33] Huang H, Dong Z, Research on architecture and query performance based on distributed graph database Neo4j, 2013 3rd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, 2013; 533-536. doi: 10.1109/CECNet.2013.6703379.

[34] Zaniewicz N, Salamończyk A, Comparison of MongoDB, Neo4j and ArangoDB databases using the developed data generator for NoSQL databases, Studia Informatica. System and Information Technology, 2022; 26(1): 61-72.

[35] Meiling L, Benchmarking Multi-model Databases with ArangoDB and OrientDB, Helsingfors universitet, 2017.

[36] Fernandes D, Bernardino J, Graph databases comparison: AllegroGraph, ArangoDB, InfiniteGraph, Neo4J, and OrientDB, 7th International Conference on Data Science, Technology and Applications, Porto, Portugal, 2018, pp. 373-380. doi: 10.5220/0006910203730380.

[37] Bebee BR, Choi D, Gupta A, Gutmans A, Khandelwal A, Kiran Y, Mallidi S, McGaughy B, Personick M, Rajan K, et al., Amazon Neptune: Graph data management in the cloud, ISWC (P&D/Industry/BlueSky), 2018.

[38] Lopes A, Rodrigues D, Saraiva J, Abbasi M, Martins P, Wanzeller C, Scalability and performance evaluation of graph database systems: a comparative study of Neo4j, JanusGraph, Memgraph, NebulaGraph, and TigerGraph, 2023 Second International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon), 2023, ss. 537–542.

[39] Sandell J, Asplund E, Ayele WY, Duneld M, Performance comparison analysis of ArangoDB, MySQL, and Neo4j: an experimental study of querying connected data, 2024.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 293-301, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1555994

Evaluation of the Effects of Installation Faults in the Outdoor Unit of Air Conditioners Using Exergy Analysis

Ruveyda Ergen[1] and 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: 25/09/2024; Kabul/Accepted: 27/11/2024)

Abstract: The increasing prevalence of global warming has led to a significant rise in the use of air conditioning systems**,** a trend widely acknowledged by numerous key institutions**.** However, this widespread adoption has brought about several challenges, particularly those stemming from improper installation practices**.** This study specifically examines the impact of installation faults in the condenser units of air conditioners on exergy destruction**.** One of the most critical issues identified is the blockage of the air inlet in the condenser unit, which often occurs due to installation errors**.** This study investigates the effects of such blockages on exergy destruction within the system**.** The findings indicate that installation faults in the condenser unit can substantially reduce the exergy efficiency of air conditioning systems**,** with efficiency values ranging from 38% to as low as 19%**.** Moreover, the exergy analysis of the condenser unit reveals that under inefficient operating conditions, exergy destruction increases by 114%**.** For example, when the air inlet of the condenser is obstructed, the exergy destruction in this section escalates from 0.35 kW to 0.75 kW**,** underscoring the critical impact of improper installation on system performance**.**

Keywords: Air conditioning, Exergy, Installation Fault.

Klima Dış Ünitesindeki Montaj Hatalarının Etkilerinin Ekserji Analizi Kullanılarak Değerlendirilmesi

Öz: Küresel ısınmayla birlikte klima kullanımı artmaktadır. Bu durumu birçok önemli kurum da dile getirmektedir. Ancak klima montajından dolayı ciddi sorunlar ortaya çıkmıştır. Özellikle klimaların kondenser ünitesi montaj hatalarının ekserji yıkımına olan etkileri bu çalışma kapsamında ele alınmıştır. Montaj hatalarından sonra klimaların kondenser ünitesinin hava girişi çeşitli nedenlerle engellenmektedir. Bu durumun ekserji yıkımına olan etkisi incelenmiştir. Kondenser montaj hatalarında elde edilen sonuçlara göre AC sistemin ekserji verim değerleri %38 ile %19 arasında hesaplanmıştır. Kondenser-ekserji analizinde ekserji yıkımı değerlerinin %114'ü kondenserde verimsiz çalışma koşullarında oluşmaktadır. Kondenserdeki hava girişlerinin kapatılması kondenser bölümündeki ekserji yıkımının 0,35 kW'dan 0,75 kW'a çıkmasına neden olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Klima, Enerji, Kurulum hatası.

1. Introduction

Different climatic conditions present a significant challenge that air conditioning (AC) companies must address. Designing systems tailored to the specific climatic conditions of the regions where their products are sold not only reduces electricity consumption but also minimizes costs. This approach contributes to decreasing carbon emissions associated with the electricity consumption of AC systems. In AC system design, the concept of eco-friendliness is often emphasized in the literature, alongside efficiency parameters. In particular, energy and exergy analyses are widely utilized as critical tools for comparative evaluation in such studies [1]. A review of the literature reveals that research on installation faults in air conditioners remains limited. While some existing studies are academic and scientific, others are reports prepared by national public institutions. One such study examined the consequences of installation faults in air conditioners and heat pumps in the United States. It was found that installation faults in these systems result in an additional annual energy demand of 20.7 TWh, corresponding to an annual billing cost of $2.6 billion. However, this study focused solely on residential air conditioners and heat pumps [2]. In another study, a framework was developed to address errors commonly encountered in air conditioning systems. These included issues such as contamination, sensor errors, control errors, and performance degradation. To analyze the impact of these errors, the researchers conducted modeling for five different climatic conditions in the United States. The findings indicated that such faults increase energy consumption and failure rates due to excessive loads placed on system components [3]. Additional studies have investigated the effects of heat pumps in residential settings, focusing on issues such as duct leakage, insufficient refrigerant charge, oversized heat pumps, undersized duct systems, restricted airflow caused by small duct sizes, and overcharging of refrigerants. Modeling these errors across six U.S. regions revealed that specific energy consumption could

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

increase by 100% to 133% annually under certain conditions [4]. A separate study evaluated error protocols in AC systems, concluding that existing protocols were inadequate. It was determined that systemic errors generated approximately 40% false signals depending on operating conditions [5]. Similarly, another report highlighted installation problems in AC systems from the perspective of national energy efficiency and savings. The report demonstrated that energy-saving potential ranged from 3% to 15%, with cumulative savings reaching up to 40%. Common installation errors included improper sizing (selecting systems with capacities mismatched to the space requirements), incorrect load calculations (underestimating or overestimating heating and cooling needs), suboptimal airflow rates, and duct leakage. It was estimated that addressing these errors could achieve energy savings of up to 25% per kWh [6]. Air conditioners play a crucial role not only in heating and cooling environments but also in maintaining humidity balance. In this context, exergy losses and exergy performance observed in air conditioners designed for such purposes are among the preferred methods for obtaining significant data [7]. Notably, exergy analysis is widely utilized in evaluating the components of hybrid air conditioning systems under different climatic conditions, such as hot and humid environments [8]. Moreover, the environmental impacts of refrigerants used in air conditioning systems have emerged as a current research focus. When environmentally friendly refrigerants are employed, the necessity of evaluating these systems through exergy analysis also arises. The literature reveals the existence of valuable studies in this domain [9]. Exergy analysis is frequently employed by researchers as a method for identifying critical data, such as exergy losses and performance indicators in air conditioning systems [10,11].

While the studies reviewed provide valuable insights, no research has specifically examined the effects of inefficient operating conditions in air conditioners—particularly those caused by installation faults in the condenser section—on exergy destruction. The present study, by addressing this gap, establishes its originality and significance.

2. Research Methodology

Serious issues often arise during the installation of the condenser section of air conditioners (ACs). To address this, AC manufacturers typically provide detailed guidelines in user manuals on the correct installation procedures for condenser sections. In this study, the installation instructions for the condenser, as outlined in the user manual of the AC used in the experiments, are presented in Fig. 1. Additionally, Fig. 1 includes technical drawings illustrating how the air inlets of the condenser were obstructed during the experiments.

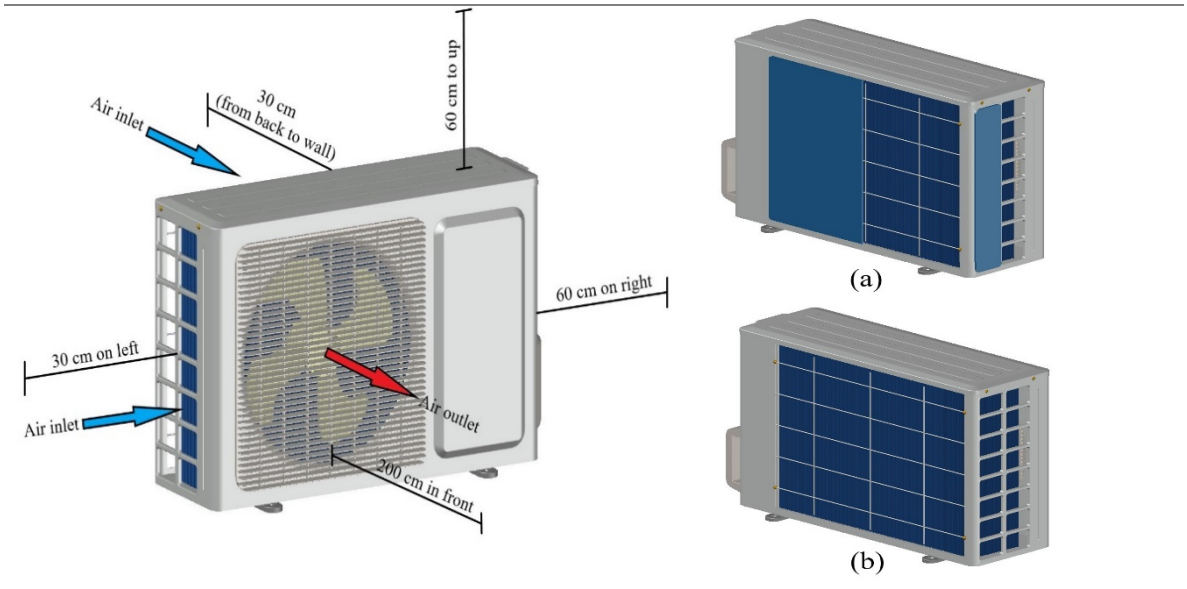
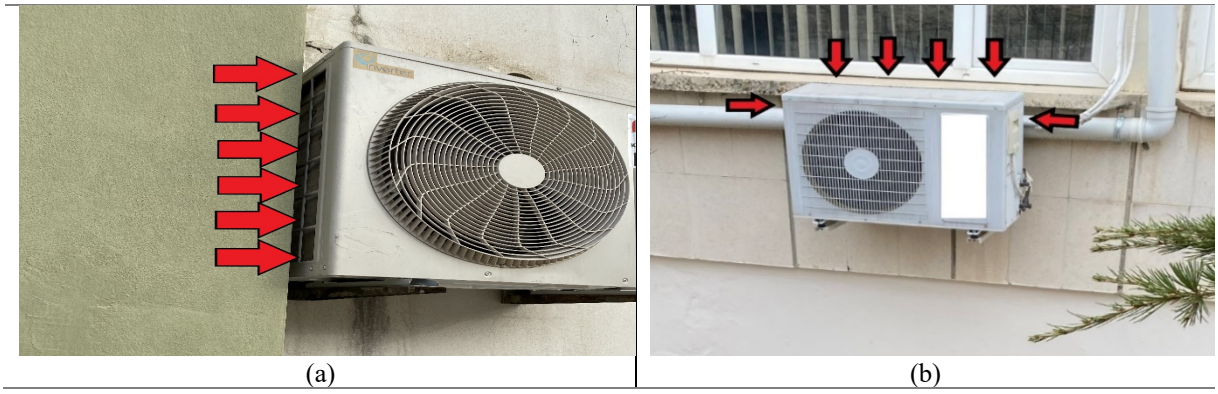


Figure 1. (Left) Illustration of the condenser section installation in the AC system. (Right) Technical depiction of how the air inlets were obstructed during the experiments ((a)- airflow blocked state, (b)- airflow open state).

In Fig. 1 (left), the air inlets and outlets of the condenser section are illustrated. The condenser section features air inlets located on the back and left sides. Heat absorbed by the evaporator section is transferred to the condenser via the refrigerant and compressor. The surrounding air is drawn through the condenser's heat exchanger with the

aid of a fan, enabling the heat extracted from the evaporator to be discharged into the environment. However, as obstructions increase and the airflow entering the condenser decreases, the compressor unit consumes more electricity to transfer this heat effectively. A split type AC system was used in the experiments. The working fluid used in the cycle of the system is R32. While the cooling capacity of the system is 12000 BTU/h, the seasonal efficiency value is 6.1 in the AC system cooling mode. The experimental process consists of two parts. In the first part, the AC was installed in accordance with the installation procedure of the authorized service and then the system was operated. The energy consumption values of the AC, which was installed in accordance with the installation procedure of the authorized service, were calculated. The values obtained from this analysis are for reference or comparison parameters. In the second part, installation faults was created. Barriers are placed in the air inlets of the condenser section. The air inlets utilized during the experiments are shown in Fig. 1 (right). In Fig. 1 (right-a and b), the air inlets on the back and left sides of the condenser are partially obstructed, with a blockage of 50%. During the experiments, the air inlets were closed to varying degrees: back inlets at 25%, 50%, 75%, and 100%, and left-side inlets at 25%, 50%, and 75%. Notably, when the back and left air inlets were completely (100%) blocked, the automation system automatically shut down to protect the AC system components. As a result, the maximum closure of the left-side air inlet was limited to 75%. The closed areas were calculated as percentages of the total air inlet area, which measures 0.346 m². A more detailed explanation of these calculations is provided in the Results and Discussion section. The experiments were also conducted at different fan speeds in the evaporator section. Specifically, fan speeds were set at 20%, 40%, 60%, 80%, and 100%. This approach allowed for a clearer assessment of how varying operating conditions of the AC system influence the effects of installation faults in the condenser section on the system's performance parameters. Finally, Fig. 2 provides visual evidence of incorrect outdoor unit installation in the air conditioning system.



(a) (b)

Figure 2. Photos showing the installation faults in the condenser section of ACs.

In Fig. (2-a), the condenser of the AC system is shown installed adjacent to the building's column. This placement obstructs the air inlet on the side of the condenser, restricting airflow. When the condenser installation is examined further, it is evident that the air inlet at the back of the condenser is also blocked, as illustrated in Fig. (2-b). Additionally, the building's rainwater pipe and a protrusion in front of the window hinder air entry from the top and partially from the back, as depicted in Fig. (2-b). Thermodynamic analyses serve as critical tools for evaluating the performance and efficiency of systems. Conducting these analyses during the study provides essential data for identifying the negative impacts of installation faults within the system. As a result, meaningful outcomes can be derived to propose appropriate solutions to mitigate these issues. The theoretical framework for exergy analysis is briefly outlined below. In the exergy calculations, a reference ambient temperature of 27 °C is used. The following equations are applied in the exergy analysis of the system:Eq. (1) is used to calculate the exergy destruction in the compressor [12];

$$\psi_{dest.comp} = (\psi_{output} - \psi_{input}) + \dot{W} = \dot{m} \cdot T_o \cdot (s_{output} - s_{input}) \quad (1)$$

The exergy destruction for the condenser section is calculated by using Eq. (2) [7];

$$\psi_{dest.cond} = (\psi_{input} - \psi_{output}) = T_o \cdot S_{gen.cond} \quad (2)$$

Eq. (3) is used to determine exergy destruction for the evaporator section [7];

$$\psi_{dest.\text{evap}} = (\psi_{output} - \psi_{input}) = T_o \cdot \mathrm{S}_{gen.\text{evap}} \tag{3}$$

The exergy efficiency of the AC system is calculated by using Eq. (4) [13,14].

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{evap}\left(1 - \frac{T_o}{T_{evap}}\right)}{\dot{W}} \tag{4}$$

In this study, the Kline and McClintock methods [15] were used to calculate the uncertainty. Eq. (5) is used for uncertainty analysis.

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \frac{1}{\varphi}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x_i}\Delta x_i\right)^2} \tag{5}$$

where φ is the parameter, x_i is the variable, and Δx_i is the error of the measured variables. The values obtained from the uncertainty analysis are shown using error bars in the graphs. 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)

3. Results and Discussions

The results obtained within the scope of the study were examined under several headings. The effects of installation faults are analyzed by evaluating various parameters. The error bars represent ±0.013 in the exergy graphs. Exergy analysis serves as a critical tool in evaluating engineering systems or designs. Such a thermodynamic analysis, operating within a diagnostic framework, assists researchers in identifying parameters that contribute to losses, inefficiencies, or comparisons. The surprising findings obtained as a result of the exergy analysis carried out within the scope of this study are explained as follows:

The analysis method that enables the acquisition of critical data in thermodynamic studies is exergy analysis. Energy analyses are insufficient for evaluating the direction and quality of energy. The values obtained from the exergy analysis should also be examined to reinforce the validity of the interpretations made. In particular, focusing on the exergy destruction parameter provides a more accurate approach. The purpose of this approach is to determine the effect of the issues caused by condenser installation faults on exergy destruction. The exergy destruction values that occur in the compressor when the condenser air inlet is blocked are presented in Fig. (3).

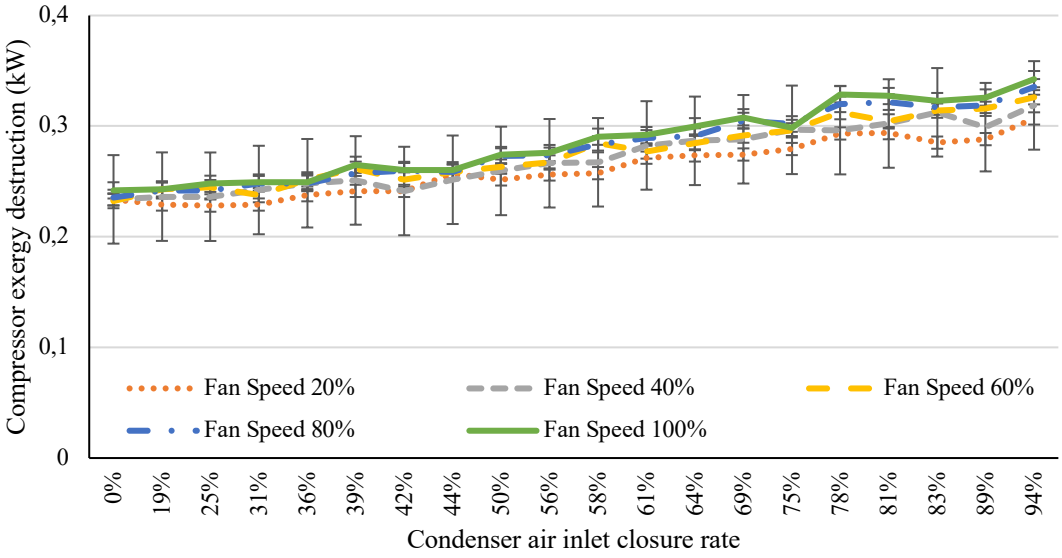


Figure 3. Exergy destruction in the compressor section.

The exergy destruction increased by 41.66% when the condenser air inlet was blocked. Error bars in the graph range between ±0.04. The exergy destruction reference value is 0.24 kW. The compressor power increased incrementally as the air inlet was gradually closed. As expected, the exergy destruction increases with higher power consumption. The values in Fig. (3) confirm this observation. The extra power consumption increases the exergy destruction value to as much as 0.34 kW due to the closure of the air inlet. It has been calculated that the exergy destruction reaches 0.247 kW, 0.27 kW, and 0.29 kW if the evaporator fan speed is 100% and the condenser air inlets are closed by 25%, 50%, and 75%, respectively. Notably, exergy refers to the quality of energy as well as its quantity. In this context, it can be predicted that closing the air inlets of the condenser section may result in a significant increase in exergy destruction, particularly within this system component. Fig. (4) visually represents this prediction.

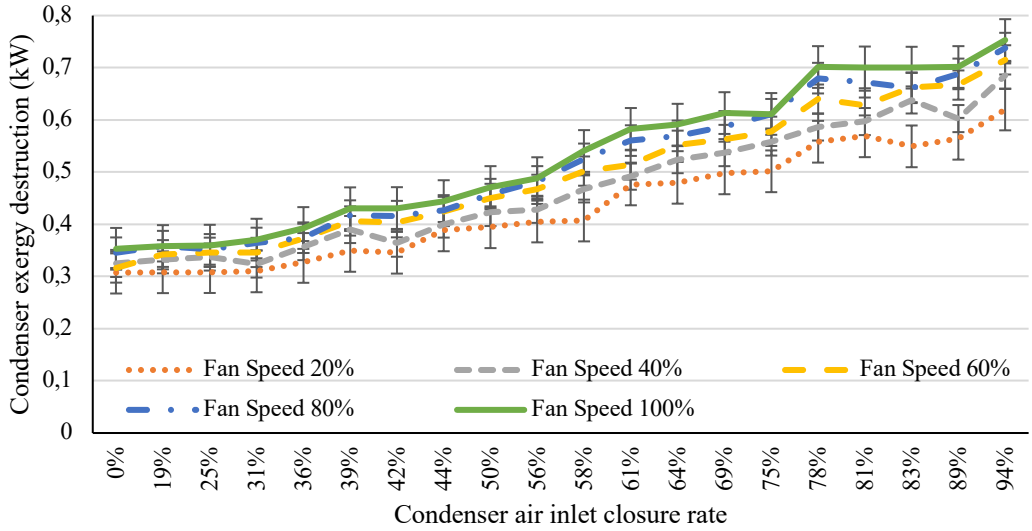


Figure 4. Exergy destruction in the condenser section.

In the condenser-exergy analysis, 114% of the exergy destruction values occur under inefficient operating conditions within the condenser. Closing the air inlets in the condenser increases the exergy destruction in the

condenser section from 0.35 kW to 0.75 kW. This significant rise demonstrates serious inefficiency in the condenser. However, the same interpretation cannot be directly applied to the data obtained from the exergy analysis of the evaporator. The exergy destruction values in the evaporator are presented in Fig. (5).

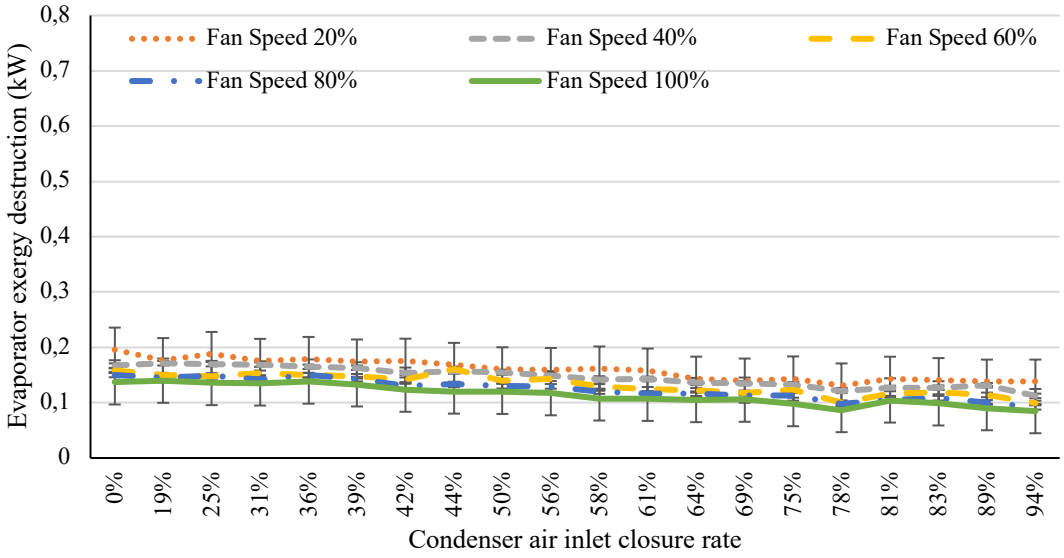


Figure 5. Exergy destruction in the evaporator section.

Error bars in the graph range between ±0.04. The gradual closure of the condenser air inlets does not significantly affect the exergy destruction in the evaporator. Variability in the evaporator remains limited as the system increases the capacity of electricity-consuming components such as the compressor and fan. Another important parameter in exergy analysis is exergy efficiency. The effects of air inlet closure and the variability in the ηex value under different operating conditions are illustrated in Fig. (6).

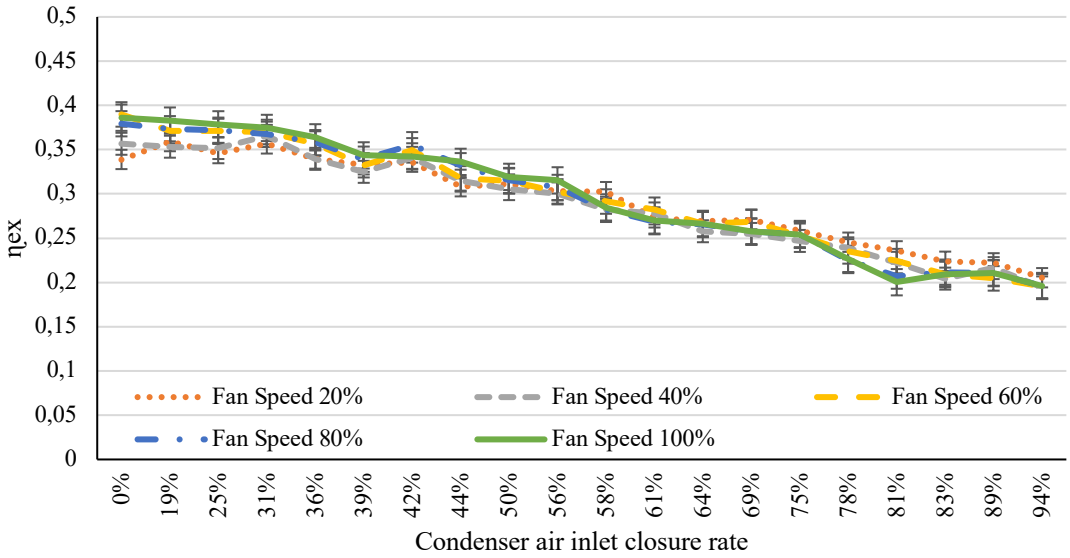


Figure 6. Change in the exergy efficiency of the AC system.

Fig. (6) illustrates the variation in the exergy efficiency of the AC system under different operating conditions. The reference exergy efficiency ranged from 33% to 38%, values consistent with those reported in the literature. While the exergy efficiency of the system varies between 33% and 38% at different cooling capacities, this value has been calculated as approximately 34% in studies from the literature [14]. When the values in the graph are examined overall, the maximum exergy efficiency was calculated to be 38%, while the minimum was 19%. In this study, a case study was carried out to install ACs in buildings. Developing this architectural design lies beyond the expertise of the authors. However, expert architects were asked to design a location on the building's outer wall that adheres to proper installation rules and avoids an unattractive appearance. In the design, it is possible to position the AC in locations distant from living areas, such as bedrooms, ensuring that the sound factor does not disturb either the user or those living on other floors. The design was carried out with many such factors in mind. Since this architectural design falls outside the scope of the study, a detailed explanation is not included. Many regulations must be considered during the construction process of buildings. These regulations typically address factors such as building insulation, fire extinguishing systems for structures with certain room and floor heights, and compliance with earthquake safety standards established by governments and international bodies. Only a few topics are referred to in the above sentence. In reality, construction regulations are far more extensive. In this study, a situation that should be added to these regulations is proposed based on exergy analysis. The necessity of designing suitable buildings for the installation of ACs has become apparent. For example, expert architects were asked to design condenser sections of ACs on the exterior of buildings. These designs aim to avoid any obstruction to air inlets entering the condenser. The design is presented in Fig. (7).



Figure 7. Precreated location in the building for the condenser of the AC ((a)-layout plan, (b)-exterior view).

As shown in Fig. (7), the precreated location of the condenser section of the ACs prevents installation faults in the condenser. Considering the appropriate design parameters in the positioning and design of buildings, it should be noted that AC systems can have a positive effect on operational lifespans. This indicates that original academic studies can be conducted in the field of architecture. In the future, both automation and the Internet of Things (IoT) will be important components of AC systems. It is anticipated that companies will monitor their products, allowing for intervention in case of installation faults or issues before the next scheduled maintenance date. Along with similar software designs such as artificial intelligence (AI), developments in measurement and sensors are enabling AC systems to operate more efficiently. The development of automated systems has the potential to significantly reduce energy consumption in AC systems. Many dynamic variables, different from those of traditional cooling system operations, affect the efficiency of these systems. These dynamic parameters—such as weather forecasts, climate conditions, temperature, and solar radiation—increase the importance of electronic control units and software integration in cooling systems. This equipment contributes to significant cost and energy savings in building AC systems [16]. Additionally, algorithms developed by applying similar strategies can also be used to independently regulate the temperature and humidity of cooling systems [17]. Artificial neural networks (ANNs) have emerged as a method successfully applied to engineering systems in recent years, with many researchers reporting positive results. However, studies on their application in cooling systems have yielded conflicting findings. In a detailed review, articles were categorized into eight distinct topics or categories [18]. Improving the coefficient of performance (COP) of AC systems allows for significant energy savings. However, this approach increases the need for additional parameters, such as user behavior data or climate-related variables, to enable advanced software control systems. Studies on these subjects have shown promising results [1]. There is an increasing research trend in this direction within the literature. The focus of software research and development changes based on advancements in the field. For example, while artificial neural networks (ANNs) are highly preferred, machine learning and control approaches are becoming increasingly popular. In the future, quantum learning methods could potentially enhance software control for AC systems, as suggested by emerging studies in the field. The number of studies in this area is steadily increasing. The studies carried out in this context can also contribute positively to the annual electricity consumption (AEC) values. In addition to improving the operation of cooling systems, AI has made substantial contributions to cooling system design. Artificial intelligence applications are used to estimate the climatic conditions in which the system will operate, as well as to determine the optimum design criteria for cooling systems in specific regions. In this respect, AI methods are often employed by researchers as prediction tools. Keywords summarizing AI applications in cooling systems include performance, modeling, optimization, forecasting, and control [18]. Operating AC and HVAC systems with artificial intelligence will prevent unnecessary energy consumption. Advanced automation and control strategies enabled by AI can ensure the efficient operation of these systems. When the above studies are examined, it becomes evident that different solutions can be developed to address installation faults in AC systems. The solution proposals expressed here do not fall within the expertise of the authors. Instead, these are scientific findings based on studies in the existing literature. However, the methods mentioned above are suggested for academic and scientific exploration. In the future, researchers can pursue innovative and original studies on this subject.

4. Conclusion

In this study, the practical problems caused by installation faults in the condenser section of ACs were investigated. Based on experimental analysis, the air inlet of the condenser section was gradually closed. The results show that the performance of ACs is lower than expected. Installation faults in ACs result in unnecessary energy consumption. When this situation is evaluated on a national scale, significant energy waste and emissions are observed. The results obtained from the study can be summarized as follows:

- The inability to transfer energy to the environment increases exergy destruction in all system components. In particular, the exergy destruction in the condenser section was found to be significantly affected. The storage of energy in the system components forces automation to operate the system at higher values. As a result of inefficient operating conditions, the exergy destruction in the compressor increased from 0.24 kW to 0.29 kW.
- Exergy destruction in the condenser increased from 0.35 kW to 0.75 kW.
- The reference exergy efficiency ranged between 33% and 38%. In parallel with the gradual reduction in the air inlets of the condenser section, exergy efficiency was calculated to decrease from 38% to 19%.

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] Saikia P, Gaurav, Rakshit D. Designing a clean and efficient air conditioner with AI intervention to optimize energy-exergy interplay. Energy AI 2020;2:100029.

[2] 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.

[3] Zhang R, Hong T. Modeling of HVAC operational faults in building performance simulation. Appl Energy 2017;202:178–88.

[4] Domanski PA, Henderson H, Payne WV. Effect of heat pump commissioning faults on energy use in a slab-on- grade residential house. Appl Therm Eng 2015;90:352–61.

[5] Yuill DP, Braun JE, Laboratories RWH, Engineering M, Drive SMJ. Evaluating the performance of fault detection and diagnostics protocols applied to air-cooled unitary air-conditioning equipment Evaluating the performance of fault detection and diagnostics protocols applied to air-cooled unitary air-conditioning equipme 2013;9669.

[6] Proctor J, Neme C, Nadel S. National Energy Savings Potential From Addressing Residential HVAC Installation Problems. 1999.

[7] Guan B, Liu Y, Zhang J, Chang X, Zhang T, Liu X. Enhancing exergy performance: Addressing air parameters nonuniformity at the outlet cross-section in desiccant wheel air-conditioning. Appl Therm Eng 2025;258:124672.

[8] Yang Y, Yang B, Zeng J, Yin L, Xie Z. Exergy analysis of hybrid air-conditioning systems with different evaporative-cooling condensers under hot-humid climates. J Build Eng 2024;97:110692.

[9] Andrade A, Zapata-Mina J, Restrepo A. Exergy and environmental assessment of R-290 as a substitute of R-410A of room air conditioner variable type based on LCCP and TEWI approaches. Results Eng 2024;21:101806.

[10] Guan B, Zhang J, Zhang Q, Chang X, Zhang T, Liu X. Energy and exergy analysis for advanced air-conditioning: Comparative evaluation of electrodialysis and aerodynamic thermal methods in liquid-desiccant reconcentration. Desalination 2024;583:117721.

[11] Colorado D, Rivera W, Conde-Gutiérrez RA, Jiménez-García JC. Energy and exergy analysis of an experimental NH3-LiNO3 air-conditioning absorption system. Int J Refrig 2024;165:393–405.

[12] Lateef Tarish A, Talib Hamzah M, Assad Jwad W. Thermal and exergy analysis of optimal performance and refrigerant for an air conditioner split unit under different Iraq climatic conditions. Therm Sci Eng Prog 2020;19:100595.

[13] Shawky Ismail M, El-Maghlany WM, Elhelw M. Utilizing the solar ice storage system in improving the energy, exergy, economic and environmental assessment of conventional air conditioning system. Alexandria Eng J 2022;61:8149–60.

[14] 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.

[15] Kline SJ, McClintock FA. Describing uncertainties in single sample experiments. Mech Eng 1953;75:3–8.

[16] Yao Y, Shekhar DK. State of the art review on model predictive control (MPC) in Heating Ventilation and Air-conditioning (HVAC) field. Build Environ 2021;200:107952.

[17] Xu X, Zhong Z, Deng S, Zhang X. A review on temperature and humidity control methods focusing on air-conditioning equipment and control algorithms applied in small-to-medium-sized buildings. Energy Build 2018;162:163–76.

[18] Mohanraj M, Jayaraj S, Muraleedharan C. Applications of artificial neural networks for refrigeration, air-conditioning and heat pump systems - A review. Renew Sustain Energy Rev 2012;16:1340–58.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 303-320, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1556260

The Impact of Balancing Techniques and Feature Selection on Machine Learning Models for Diabetes Detection

Vahid SİNAP[1*]
[1] Department of Management Information Systems, Faculty of Economics and Administrative Science, Ufuk University, Ankara, Türkiye
[*1] vahidsinap@gmail.com

(Geliş/Received: 25/09/2024; Kabul/Accepted: 24/01/2025)

Abstract: The detection of diabetes is crucial for effective management and prevention of the disease, which poses significant health risks globally. This study introduces a novel approach to diabetes detection by combining advanced data balancing techniques and feature selection methods, including Lasso (L1) regularization, to enhance the performance of predictive models in imbalanced datasets. Techniques such as Random Under Sampling (RUS), Adaptive Synthetic Sampling (ADASYN), and Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE) were employed alongside models including Random Forest (RF), CatBoost (CB), Extreme Gradient Boosting (XGB), K-Nearest Neighbors (KNN), Gaussian Naive Bayes (GNB), Logistic Regression (LR), and Gradient Boosting (GB) to assess their impact on model accuracy and generalization capabilities. The findings reveal that the RF model achieved the highest accuracy of 93.25% when utilizing the SMOTE technique, underscoring the importance of appropriate data handling strategies in improving predictive outcomes. Furthermore, when all features were utilized without selection, the RF model attained an accuracy of 95.31%, indicating the model's capacity to capture complex patterns when feature richness is maximized. The comprehensive methodology used in the study achieved a higher accuracy in diabetes detection than research in the literature and provided important outputs for developing reliable prediction models in healthcare.

Key words: Diabetes detection, data balancing techniques, imbalanced datasets, predictive modeling, health informatics.

Dengeleme Tekniklerinin ve Özellik Seçiminin Diyabet Tespitinde Makine Öğrenmesi Modelleri Üzerindeki Etkisi

Öz: Diyabet, küresel ölçekte önemli sağlık riskleri oluşturmaktadır. Diyabetin tespiti, hastalığın etkili yönetimi ve önlenmesi için büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, dengesiz veri setlerinde diyabet tespiti için çeşitli dengeleme tekniklerini ve Lasso (L1) düzenlemesi de dahil olmak üzere özellik seçim yöntemlerini birleştirerek diyabet tespitine yeni bir yaklaşım getirmektedir. Çalışmada, Random Under Sampling (RUS), Adaptive Synthetic Sampling (ADASYN) ve Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE) gibi teknikler, Random Forest (RF), CatBoost (CB), Extreme Gradient Boosting (XGB), K-En Yakın Komşu (KNN), Gaussian Naive Bayes (GNB), Lojistik Regresyon (LR) ve Gradient Boosting (GB) modelleri ile kullanılarak bu tekniklerin model doğruluğu ve genelleme yetenekleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular, SMOTE tekniği kullanıldığında RF modelinin %93,25 ile en yüksek doğruluğa ulaştığını göstermektedir, bu da uygun veri işleme stratejilerinin tahmin sonuçlarını iyileştirmede önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, özellik seçimi yapılmaksızın tüm özellikler kullanıldığında, RF modeli %95,31 doğruluk elde etmiş ve bu da özellik zenginliği maksimize edildiğinde modelin karmaşık desenleri yakalama kapasitesini ortaya koymaktadır. Araştırmada kullanılan kapsamlı metodoloji, diyabet tespitinde literatürdeki araştırmalardan yüksek bir doğruluğa ulaşmış ve sağlık hizmetlerinde güvenilir tahmin modelleri geliştirmek için önemli çıktılar sağlamıştır.

Anahtar kelimeler: Diyabet tespiti, veri dengeleme teknikleri, dengesiz veri setleri, tahmine dayalı modelleme, sağlık bilişimi.

1. Introduction

Diabetes mellitus (DM) is a chronic disease with an increasing prevalence, affecting millions of people worldwide. According to the World Health Organization, diabetes causes approximately 1.6 million deaths each year, reflecting the direct and indirect effects of the disease [1]. If diabetes is not controlled, serious complications such as heart disease, kidney failure, stroke and nerve damage can occur [2]. Diabetes is caused by insufficient insulin production (Type 1 diabetes) or the body's inability to use available insulin (Type 2 diabetes), leading to higher-than-normal blood glucose levels. Although Type 2 diabetes is a preventable disease, it continues to increase in prevalence, making early diagnosis and management even more important.

* Sorumlu yazar: vahidsinap@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-8734-9509

Despite advancements in diagnostic methods, gaps remain in accurately identifying diabetes at early stages, as traditional diagnostic methods often rely solely on static blood glucose measurements and clinical observations. This approach may not account for the dynamic nature of diabetes progression or provide insights for asymptomatic individuals, especially those in pre-diabetic stages. Addressing these gaps is crucial for enabling timely interventions and reducing diabetes-related complications.

Early diagnosis of diabetes enables individuals to be guided towards appropriate lifestyle changes necessary to slow the progression of the disease and prevent complications. Traditional methods of diagnosing diabetes today usually involve clinical examinations, laboratory tests and assessments based on the knowledge and experience of specialized physicians [3]. These methods include various laboratory tests that measure blood glucose levels, such as fasting blood glucose testing, oral glucose tolerance testing and hemoglobin A1c testing. However, such methods may not adequately reflect the dynamic and multidimensional nature of the disease, as they are based only on blood glucose levels measured at a specific moment in time. One of the biggest problems with traditional diagnostic methods is that they rely on limited data sources and the experience of physicians. The diagnostic process depends on the physician's assessment of the patient's symptoms, medical history and familial risk factors [4]. However, this method may ignore individual variations or nuances and is not accurate in the early stages of the disease or in asymptomatic individuals. For example, in patients who are pre-diabetic or in the early stages of diabetes, blood glucose levels are often borderline, which may be missed by conventional testing. In addition, traditional methods are largely time-consuming and costly. The collection of blood samples, laboratory analysis and interpretation of the results can prolong the diagnostic process for patients and increase the risk of diabetes progression [5]. Furthermore, in rural areas or where access to health services is limited, the lack of infrastructure and expertise to conduct laboratory tests is also a significant barrier.

Another important limitation of traditional methods is the increasing density and complexity of data. In healthcare today, it is possible to access large amounts of data from many different sources; however, processing and analyzing this data is very difficult and laborious with traditional methods. Analyzing the data can only scratch the surface, which can lead to overlooking complex underlying relationships or hidden patterns. Furthermore, results may not always be consistent as there may be subjective differences in assessment between experts [6]. These limitations highlight the need for more innovative and data-driven approaches to early diagnosis of diabetes. Advanced technologies such as machine learning and data mining can detect hidden patterns and meaningful relationships within large datasets, enabling higher accuracy and consistency in diagnostic processes. These approaches not only enable more effective use of existing health data, but also accelerate the diagnostic process, enabling individuals to access earlier intervention and treatment.

Machine learning algorithms are recognized as powerful tools for creating meaningful relationships and predictive models from large datasets. By learning relationships between variables from various data sources, these algorithms can analyze complex health data and identify previously undiscovered patterns [7]. Machine learning models developed for diabetes prediction make risk assessments using a wide variety of data types such as patients' genetic information, laboratory test results, lifestyle data and other health indicators. However, the lack of consistent results of these models in clinical applications is due to several important reasons. The success of machine learning models depends on the quality and representativeness of the datasets used [8]. Missing data, erroneous or misleading information can negatively affect the accuracy and generalization ability of the model. The heterogeneity and variability of health data can make it difficult for models to produce generalizable results [9]. In addition, existing models lack a standardized structure due to different health institutions and data collection methods [10]. This may cause the same model to perform differently on different datasets, leading to reliability issues in clinical applications. Furthermore, algorithms used for the comprehensive analysis and interpretation of health data often face performance issues due to challenges such as data imbalance. In datasets used to predict diseases like diabetes, there is frequently an imbalance between the classes; typically, there are more individuals who are healthy compared to those who are not. This imbalance can cause machine learning models to prioritize the majority class, making it difficult to accurately predict the minority class [11]. Thus, addressing data imbalance and ensuring model reliability across diverse datasets are critical for developing practical applications in healthcare. To address this, various methods and balancing strategies have been developed to enhance the accuracy of prediction models built from existing electronic health records, health screening results, and other large datasets. These approaches can lead to significant advances in the early detection and management of diabetes by enabling models to produce more generalizable and stability results. Additionally, using data from larger and more diverse patient populations allows for the development of more comprehensive and effective healthcare strategies and policies. As machine learning techniques evolve and data quality improves, these advancements hold the potential to revolutionize the early diagnosis and management of chronic diseases such as diabetes.

The main objective of this study is to address identified gaps in diabetes detection by combining data-balancing methods and advanced machine learning algorithms to create reliable predictive models, thereby improving the effectiveness of machine learning techniques in identifying the most appropriate methods for early diagnosis. Although existing research has demonstrated the effectiveness of machine learning techniques in diabetes prediction, data imbalance and feature selection have not been adequately addressed. This limits model accuracy and generalizability across different populations. In response, this study aims to reduce the effects of data imbalance -a key challenge in medical datasets that often leads to biased models- by applying advanced balancing techniques, namely SMOTE, RUS, and ADASYN. These methods enhance model reliability by either increasing the instances of the minority class or reducing the majority class instances, effectively countering the skewed distributions that commonly compromise the performance of traditional predictive models.

Furthermore, this study provides a detailed comparison using a comprehensive set of machine learning algorithms that utilize different statistical techniques such as RF, CB, XGB, KNN, GNB, LR and GB to evaluate and improve the prediction accuracy. This multi-algorithm approach not only considers the complexity and diversity of diabetes-related data but also tests various machine learning models systematically against balanced data, providing a nuanced understanding of each model's strengths and limitations. This study's diverse algorithmic framework enables a more holistic comparison, ultimately guiding practitioners towards the most suitable and reliable models for early diabetes diagnosis.

This research distinguishes itself by testing the integrated impact of data balancing and feature selection, specifically through Lasso regularization, to create high-performance models with the most relevant predictors. By addressing both data imbalance and feature relevance simultaneously, this study contributes a methodology that improves upon prior efforts and highlights the importance of balanced and optimized models in clinical applications. Comprehensive analysis of performance metrics, including accuracy and AUC, substantiates the study's effectiveness and provides essential insights for developing scalable, high-accuracy models that can be reliably applied across diverse clinical settings.

2. Related Works

In the field of diabetes detection, several significant studies have been conducted in the literature, highlighting various approaches and methodologies for improving predictive accuracy. Shin et al. [12] conducted a study aimed at creating DM prediction models using easily accessible health screening parameters. Two variable sets were employed to develop eight models, utilizing XGB and RF algorithms, with internal validation through stratified 10-fold cross-validation. The study found that the model based on 62 variables achieved the highest ROC-AUC of 0.928, while a simplified model with 27 variables still demonstrated acceptable performance, with ROC-AUCs ranging from 0.842 to 0.880. The inclusion of fasting glucose notably improved accuracy by up to 11.5%. Mir and Dhage [13] conducted a study aiming to enhance diabetes prediction using machine learning techniques. The researchers employed various classifiers, including Naive Bayes (NB), Support Vector Machine (SVM), RF, and Simple CART, utilizing the WEKA tool for analysis. The results indicated that SVM achieved the highest accuracy in predicting diabetes, suggesting it as the most effective algorithm among those tested. Sisodia and Sisodia [14] aimed to develop a model for predicting diabetes with high accuracy, addressing the challenges associated with traditional identification methods. The study utilized three machine learning classification algorithms: Decision Tree (DT), SVM, and NB, applying them to the Pima Indians Diabetes Database sourced from the UCI Machine Learning Repository. The results revealed that NB achieved the highest accuracy at 76.30%, demonstrating its effectiveness for early diabetes detection. Yahyaoui et al. [15] developed a Decision Support System (DSS) for diabetes prediction, addressing the growing prevalence of diabetes and its severe health implications. The study compared conventional machine learning techniques, SVM and RF, with a deep learning approach using a Convolutional Neural Network (CNN). Evaluating the proposed system on the Pima Indians Diabetes Database, which included 768 samples, the results demonstrated that RF achieved the highest accuracy at 83.67%, outperforming both CNN and SVM, which yielded accuracies of 76.81% and 65.38%, respectively. Khanam and Foo [16] used the Pima Indian Diabetes dataset from the UCI Machine Learning Repository to test seven machine learning algorithms for diabetes prediction. LR and SVM demonstrated strong performance, while a Neural Network model with two hidden layers achieved an accuracy of 88.6%. Sivaranjani et al. [17] employed SVM and RF algorithms to predict the likelihood of diabetes-related diseases. After data preprocessing and feature selection using step forward and backward methods, Principal Component Analysis (PCA) was applied. The RF model achieved an accuracy of 83%, outperforming the SVM, which had an accuracy of 81.4%. Hasan et al. [18] addressed outlier rejection, missing value handling, and feature selection using various machine learning classifiers, including RF and XGB. An ensemble model was created, weighting classifiers by their Area Under the

ROC Curve (AUC). The proposed model, tested on the Pima Indian Diabetes Dataset, achieved an AUC of 0.950, outperforming existing methods by 2%. Maniruzzaman et al. [19] focused on predicting diabetes using a machine learning-based system. Logistic regression was utilized to identify key risk factors, revealing seven significant variables. Four classifiers -NB, DT, Adaboost, and RF- were employed, with performance assessed using accuracy and AUC. The dataset, derived from the National Health and Nutrition Examination Survey, included 6,561 respondents. The study found that the combination of logistic regression for feature selection and RF classification achieved an accuracy of 94.25% and an AUC of 0.95, indicating strong predictive capability for diabetes.

Literature reveals a variety of approaches in diabetes detection, showcasing the effectiveness of machine learning techniques across multiple studies. Most existing studies, however, are limited in scope, often focusing on single algorithms or using imbalanced datasets without adequately addressing data skewness, which can compromise predictive reliability in clinical applications. These studies employed diverse algorithms such as RF, SVM, and NB to enhance predictive accuracy. Methods ranged from creating predictive models based on easily accessible health parameters to developing decision support systems that integrate both conventional and deep learning approaches. Many studies emphasized the importance of feature selection and data preprocessing, utilizing techniques like PCA and ensemble methods to improve performance metrics, including accuracy and AUC. However, issues such as data imbalance, lack of feature selection methods, and inconsistency in results across diverse datasets remain significant challenges in the field.

This study distinguishes itself from existing literature by integrating multiple advanced machine learning techniques and balancing methods to optimize diabetes prediction accuracy. Unlike previous works, this study adopts a holistic approach by systematically addressing data imbalance and irrelevant features, both of which are critical for creating more reliable and generalizable models. While previous works primarily focused on individual algorithms or specific datasets, this research employs a comprehensive approach that combines RF with sophisticated balancing techniques such as RUS, ADASYN, and SMOTE. By incorporating these balancing methods, the study effectively mitigates the risk of biased predictions toward the majority class, a limitation seen in prior research. Additionally, the utilization of Lasso regularization for feature selection ensures that only the most relevant variables are included, enhancing model strength. The empirical analysis demonstrates significant improvements in predictive performance, illustrating the importance of a multifaceted methodology in tackling the complexities of diabetes detection. This comprehensive strategy not only enhances predictive accuracy but also contributes to the development of more effective, scalable models that can be applied across diverse healthcare settings, marking a substantial advancement in the field.

3. Methodology

In this study, the objective is to improve the accuracy of diabetes detection through the evaluation of various data preprocessing techniques. These techniques will be assessed for their effectiveness in enhancing the quality and suitability of the input data for further analysis. Additionally, different oversampling methods will be examined to identify the most effective approach for mitigating class imbalance in the dataset. Class imbalance can significantly impact model performance, making it critical to select the appropriate oversampling method to enhance accuracy. Ultimately, the best combination of data preprocessing and oversampling techniques will be used to develop a model for precise diabetes detection. By integrating the most effective methods, this study aims to create a model that improves the reliability of diabetes diagnosis.

In the subsequent sections of the study, detailed information will be provided on several key aspects. The dataset utilized will be described, including its source and features. The classification algorithms employed, including GB, RF, CB, XGB, KNN, GNB, and LR, will be outlined, along with the data preprocessing techniques applied. Methods for addressing data imbalance, including oversampling techniques, will be discussed. Hyperparameter tuning processes will be explained, and Z-score normalization methods will be detailed. Cross-validation procedures and performance metrics used to evaluate the models will also be covered.

3.1. Dataset

The dataset used in this project is derived from the Behavioral Risk Factor Surveillance System (BRFSS) data spanning the years 1984 to 2015 [20]. Collected annually by the CDC, the BRFSS survey gathers data from over 400,000 Americans on health-related behaviors, chronic conditions, and preventive services. The rationale for selecting data only up to 2015 stems from several key considerations. Firstly, each year's dataset encompasses a substantial number of variables, ranging between 220 and 350, contingent upon the health topics prioritized during that specific survey year. The complexity of managing such a vast amount of data over several decades,

while striving to maintain a standardized format, presents considerable challenges. Notably, certain variables crucial for accurately predicting diabetes outcomes were not consistently available across all years. The inclusion of these variables, which number among the 22 key features employed in this study, is essential for ensuring the reliability of the predictive models. Additionally, the years following 2015, particularly those during the COVID-19 pandemic, introduced significant irregularities in health behaviors and access to care, which could skew analyses and predictions. The pandemic has been associated with alterations in chronic disease management that deviate from typical patterns, thereby necessitating careful consideration of any data integrated from this period. Thus, a focus was placed on a stable, pre-pandemic timeframe to ensure consistency and enhance the robustness of the findings.This study uses two distinct datasets to analyze and predict diabetes outcomes. The first dataset is a balanced collection of patient data, containing 70,692 samples with 22 features per sample. This dataset includes an equal number of individuals with and without diabetes, ensuring class balance and providing a fair basis for model evaluation. The second dataset is an imbalanced collection with 253,680 samples and the same 22 features per sample. In this dataset, a significant class imbalance is present, where one class is overrepresented compared to the other, which may impact model accuracy. The analysis will focus on exploring the relationships between features and the target variable in the imbalanced dataset to understand its structure and characteristics. Insights gained from this analysis will be used to enhance predictions in the balanced dataset, leveraging the extensive information from the larger, imbalanced dataset to improve the accuracy and reliability of diabetes predictions. Table 1 provides a detailed description of the features and their corresponding explanations.

Table 1. Description of features and their definitions.

Feature	**Description**
Diabetes_binary	Indicates whether the individual has diabetes (1: diabetic, 0: non-diabetic).
HighBP	Indicates the presence of high blood pressure (0: no high BP, 1: high BP).
HighChol	Indicates the presence of high cholesterol (0: no high cholesterol, 1: high cholesterol).
CholCheck	Indicates whether cholesterol levels have been checked in the past 5 years (0: not checked, 1: checked).
BMI	Body Mass Index, calculated as weight divided by the square of height.
Smoker	Indicates smoking status (0: never smoked, 1: smoked at least 100 cigarettes in entire life).
Stroke	Indicates whether the individual has had a stroke (1: had a stroke, 0: no stroke).
HeartDiseaseorAttack	Indicates a history of coronary heart disease or myocardial infarction (0: no, 1: yes).
PhysActivity	Indicates physical activity in the past 30 days, excluding job-related activity (0: no, 1: yes).
Fruits	Indicates whether the individual consumes fruit one or more times per day (0: no, 1: yes).
Veggies	Indicates whether the individual consumes vegetables one or more times per day (0: no, 1: yes).
HvyAlcoholConsump	Indicates heavy alcohol consumption (0: no, 1: yes), defined as more than 14 drinks per week for men and 7 for women.
AnyHealthcare	Indicates whether the individual has any form of health care coverage (0: no, 1: yes).
NoDocbcCost	Indicates if the individual could not see a doctor due to cost in the past 12 months (0: no, 1: yes).
GenHlth	Self-reported general health status on a scale from 1 (excellent) to 5 (poor).
MentHlth	Number of days in the past 30 days when the individual's mental health was not good (1-30 days).
PhysHlth	Number of days in the past 30 days when the individual's physical health was not good (1-30 days).
DiffWalk	Indicates difficulty walking (1: difficulty, 0: no difficulty).
Sex	Gender (1: male, 0: female).
Age	Age category, represented by 13 groups (e.g., 1: 18-24, 9: 60-64, 13: 80 or older).
Education	Education level on a scale from 1 to 6 (1: never attended or only kindergarten, 6: college graduate).
Income	Income level on a scale from 1 to 8 (1: less than $10,000, 5: less than $35,000, 8: $75,000 or more).

Figure 1 illustrates the correlations between various variables and diabetes, categorizing them into positive and negative correlations. Several variables exhibit a strong positive correlation with diabetes, including General Health (GenHlth), which shows the highest positive correlation, and High Blood Pressure (HighBP), which demonstrates a significant association with increased diabetes risk. Other variables, such as High Cholesterol (HighChol), Body Mass Index (BMI), and Heart Disease or Attack (HeartDiseaseorAttack), also show notable positive correlations. These strong correlations suggest that individuals with poorer general health, elevated blood pressure, high cholesterol, higher BMI, or a history of heart disease are at a higher risk of developing diabetes.

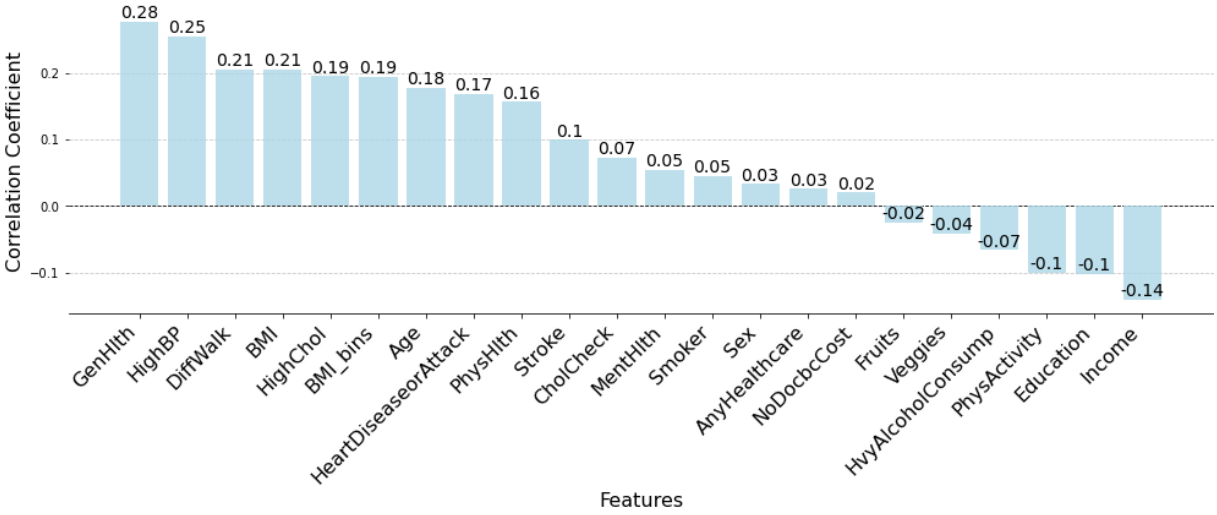


Figure 1. Correlation analysis of key variables with diabetes.

3.2. Data preprocessing

In the data preparation phase, the dataset underwent several preprocessing steps to ensure the data quality and suitability for subsequent analysis. Initially, the dataset was examined for missing values, and it was confirmed that there were no missing values. The next step involved checking duplicate entries, as duplicates can introduce biases and affect the model's performance. A total of 24,206 duplicate rows were detected and removed, resulting in a cleaned dataset with 229,474 entries. Following the cleanup, variables were grouped based on their characteristics. The target variable, Diabetes binary, indicates the presence or absence of diabetes. The remaining variables were classified into two groups: boolean variables and numerical variables. Boolean variables were identified as those with only two unique values, excluding the target variable, while numerical variables included all other features that did not fall into the boolean category. This categorization facilitated tailored preprocessing and analysis for each type of variable, optimizing the overall data preparation process.

3.3. Classification algorithms

In this study, various classification algorithms have been employed to predict diabetes outcomes effectively. Each algorithm was selected based on its suitability for handling the characteristics of the dataset and its performance in similar studies. The first algorithm utilized is GB, a powerful ensemble learning technique that builds models sequentially, where each new model attempts to correct the errors of the previous one. GB is particularly effective for datasets with imbalanced classes, as it focuses on learning from misclassified instances, thus enhancing predictive accuracy. The method combines weak learners, typically decision trees, into a strong learner, making it versatile for various classification tasks [21].

Another algorithm used in the research is RF. This algorithm operates by constructing multiple decision trees during training and outputting the mode of the classes for classification tasks. The inherent feature of RF to perform well with high-dimensional data and its robustness against overfitting makes it a valuable choice, especially in scenarios with substantial feature sets [22]. Furthermore, RF provides insights into feature importance, allowing for better understanding of the factors influencing diabetes prediction.

CB, which stands out for its ability to handle categorical features without extensive preprocessing, is another algorithm used in the research. CB implements an innovative approach to gradient boosting, reducing the risk of overfitting and improving generalization [23]. Its efficiency in managing large datasets while delivering competitive results in prediction accuracy is advantageous for this study's objectives.

XGB is recognized for its scalability and performance. XGB enhances the traditional gradient boosting framework by introducing parallel processing and regularization techniques, making it effective for handling complex datasets. Its capacity to optimize both training time and model performance through fine-tuning hyperparameters has proven beneficial in previous studies [24].

The KNN is a straightforward yet effective instance-based learning method. KNN classifies instances based on the majority class of their nearest neighbors in the feature space [25]. This algorithm is particularly useful for its simplicity and ease of interpretation, although it may require careful consideration of distance metrics and the number of neighbors to ensure optimal performance.

GNB has been included for its probabilistic approach to classification. Based on Bayes' theorem, GNB assumes independence among predictors, which simplifies the computation of posterior probabilities. Despite its simplifying assumptions, GNB has shown effective performance, especially in scenarios with high-dimensional data, making it a reliable choice for diabetes prediction tasks [26].

LR has been applied, serving as a fundamental statistical method for binary classification. LR models the probability of class membership using a logistic function, providing interpretability and efficiency [27]. Its application in healthcare-related predictive modeling is well-established, enabling insights into the relationships between features and the likelihood of diabetes occurrence.

3.4. Addressing data imbalance

Data imbalance is a common challenge in classification tasks, particularly when one class significantly outnumbers the other, as seen in the diabetes dataset used in this study, as shown in Figure 2. This imbalance can lead to biased models that perform well on the majority class but poorly on the minority class, ultimately compromising the model's predictive accuracy and generalizability. To address this issue, it is essential to apply techniques that balance the dataset, ensuring that both classes are adequately represented during training. Three methods, namely SMOTE, RUS and ADASYN, were used in this study.

SMOTE generates synthetic samples for the minority class by interpolating between existing minority instances, thus enhancing the representation of the minority class without duplicating data [28]. This approach helps to create a more balanced training set, improving the model's ability to learn the characteristics of both classes effectively [29]. RUS addresses imbalance by reducing the size of the majority class through random selection, creating a more balanced dataset by removing excess majority samples. While this method effectively balances the classes, it can potentially discard valuable information from the majority class, making it essential to carefully assess its impact on the model's performance [30]. ADASYN, an advanced variant of SMOTE, focuses on generating synthetic samples in areas where the minority class is underrepresented. This adaptive approach prioritizes instances that are harder to classify, thereby improving the model's capacity to differentiate between classes in complex decision boundaries [31]. By applying these techniques, the study aims to mitigate the negative effects of class imbalance, enhance the predictive power of the models, and ensure strong and reliable performance across both diabetic and non-diabetic classifications.

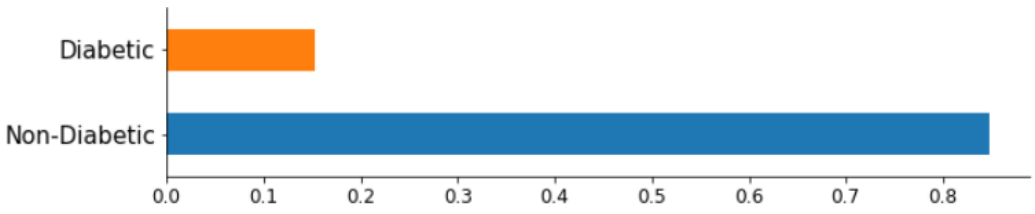


Figure 2. Distribution of diabetes status in the dataset (%).

3.5. Hyperparameter tuning

Hyperparameters are configuration settings used to control the training process of a model, unlike model parameters which are learned from the data. Optimal tuning of these hyperparameters can significantly enhance a model's ability to generalize well on unseen data, thereby improving its predictive accuracy. One of the most used methods for hyperparameter tuning is Grid Search. This technique involves exhaustively searching through a manually specified subset of the hyperparameter space to identify the best combination of parameters.

During Grid Search, the model is trained and evaluated for each combination of hyperparameters specified in the grid, usually using cross-validation, to ensure vigorous performance across different data splits. Although computationally intensive, Grid Search provides a thorough exploration of the hyperparameter space, making it a reliable method for finding optimal settings [32]. For this study, we employed Grid Search to determine the best hyperparameters for RF, CB, XGB, KNN, GNB, LR, and GB models. The optimal hyperparameter settings identified for each model, which were found to maximize performance metrics such as accuracy, and AUC, are shown in Table 2.

Table 2. Optimal hyperparameters for selected models determined via Grid Search.

Model	Hyperparameter	Optimal Value
RF	Number of Trees (n_estimators)	96
	Maximum Depth (max_depth)	11
	Minimum Samples Split (min_samples_split)	3
	Minimum Samples Leaf (min_samples_leaf)	2
	Max Features (max_features)	'sqrt'
CB	Depth (depth)	7
	Learning Rate (learning_rate)	0.09
	Number of Estimators (iterations)	483
XGB	Number of Estimators (n_estimators)	94
	Learning Rate (learning_rate)	0.08
	Maximum Depth (max_depth)	5
	Subsample (subsample)	0.76
	Colsample by Tree (colsample_bytree)	0.84
GB	Number of Estimators (n_estimators)	94
	Learning Rate (learning_rate)	0.08
	Maximum Depth (max_depth)	5
	Subsample (subsample)	0.76
	Colsample by Tree (colsample_bytree)	0.84
KNN	Number of Neighbors (n_neighbors)	5
	Weight Function (weights)	'uniform'
	Algorithm	'auto'
GNB	Smoothing Parameter (var_smoothing)	1e-09
LR	Regularization Strength (C)	1.0
	Solver	'lbfgs'
	Maximum Iterations (max_iter)	100

3.6. Feature selection

By identifying and retaining only the most relevant features, researchers can improve the accuracy of their predictive models while reducing computational complexity. Effective feature selection helps mitigate the risk of overfitting, enhances model generalization, and clarifies the relationships between the input features and the target variable [33]. In this study, Lasso was employed as a feature selection method to identify the most significant predictors of diabetes. Lasso regression applies a penalty to the absolute size of the coefficients, effectively shrinking some of them to zero, which aids in selecting a subset of features that contribute the most to the predictive capability of the model [34].

The strength of the relationship between each feature and the target variable, diabetes status, was assessed using correlation coefficients, categorized as follows:

- 0.5 and above: Very strong relationship – This feature has a significant impact on the target variable.
- 0.3 to 0.5: Strong relationship – This feature has a considerable effect on the target variable.
- to 0.3: Moderate relationship – This feature has a moderate effect on the target variable.
- 0.02 to 0.1: Weak relationship – This feature has a slight effect on the target variable.
- 0 to 0.02: Very weak or negligible relationship – This feature has very little or no effect on the target variable.

The relationship strengths of the features in relation to the target variable are categorized as follows: GenHlth (General Health) shows a very strong relationship with a score of 0.648. HighBP (High Blood Pressure) and BMI (Body Mass Index) demonstrate strong relationships, with scores of 0.532 and 0.406, respectively, along with Age at 0.395. HighChol (High Cholesterol) and DiffWalk exhibit moderate relationships, with scores of 0.298 and 0.267. HeartDiseaseorAttack (Heart Disease or Attack), PhysHlth (Physical Health), Income, and PhysActivity (Physical Activity) reflect weak relationships, with scores of 0.188, 0.172, 0.152, and 0.142, respectively. Finally, Education, HvyAlcoholConsump (Heavy Alcohol Consumption), Stroke, MentHlth (Mental Health), and Smoker (Smoker Status) are categorized as having very weak relationships, with scores of 0.109, 0.068, 0.078, 0.056, and 0.026, respectively.

3.7. Z-score normalization

Z-score normalization, also known as standardization, is a widely used technique in data preprocessing that transforms features to have a mean of zero and a standard deviation of one [35]. By normalizing the data, we enhance the performance of various machine learning algorithms that are sensitive to the scale of input features. The Z-score normalization formula is given in Equation 1.

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \tag{1}$$

Where, Z is the standardized value, x is the original value, μ is the mean of the feature, σ is the standard deviation of the feature. This transformation allows for comparison of scores across different features by placing them on a common scale. The resulting Z-scores indicate how many standard deviations a data point is from the mean, providing insights into the relative standing of each observation within its distribution.

3.8. Cross validation

In this study, 5-fold cross-validation was utilized as a method for evaluation of the predictive models. This technique systematically partitions the dataset into five equal-sized folds. For each iteration, one-fold is designated as the validation set while the remaining four folds are combined to form the training set [36]. This process is repeated five times, ensuring that each fold serves as the validation set exactly once. The use of 5-fold cross-validation helps to mitigate overfitting by providing a more generalized assessment of model performance across different subsets of the data. By averaging the evaluation metrics obtained from each fold, a comprehensive estimate of the model's predictive capability is achieved. The formula for calculating the performance metrics in 5-fold cross-validation is given in Equation 2.

$$\text{Performance Metric} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} \text{Metric}_i \tag{2}$$

where k represents the number of folds, and Metric_i is the performance metric calculated for the i-th fold.

3.9. Performance metrics

In this study, the effectiveness of the predictive models was assessed using two primary performance metrics, which include Accuracy and AUC. Accuracy is a fundamental metric that indicates the proportion of correctly predicted instances among the total instances in the dataset [37]. It is shown in Equation 3.

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \tag{3}$$

In this context, TP (True Positives) refers to the number of correctly predicted positive instances, while TN (True Negatives) indicates the number of correctly predicted negative instances. FP (False Positives) represents the number of incorrectly predicted positive instances, and FN (False Negatives) denotes the number of incorrectly predicted negative instances.

AUC, referring to the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve, measures the model's ability to distinguish between classes [38]. AUC is calculated as shown in Equation 4.

$$\text{AUC} = \int_0^1 \text{TPR}\, d(\text{FPR}) \tag{4}$$

TPR (True Positive Rate) represents sensitivity, which is calculated as shown in Equation 5.

$$\text{TPR} = \frac{TP}{TP + FN} \tag{5}$$

FPR (False Positive Rate) is calculated using the formula provided in Equation 6.

$$\text{FPR} = \frac{FP}{FP + TN} \tag{6}$$

4. Experimental Study and Findings

In this section of the study, the focus is on addressing the challenges posed by imbalanced datasets in predictive modeling by evaluating the effectiveness of various balancing techniques and their influence on model performance. Imbalanced data poses significant challenges in predictive modeling, often leading to biased results favoring the majority class. To address this, the study explores several balancing methods, comparing their effectiveness in enhancing model performance. By systematically examining these techniques, the research aims to provide insights into the best practices for handling imbalanced data in predictive modeling contexts. The research was conducted in a structured manner, progressing through the following steps: First, analyses were performed on the original imbalanced dataset to establish baseline results. Subsequently, the dataset was balanced using RUS to assess the effect of reducing the majority class. The study then employed the ADASYN sampling technique to generate synthetic samples of the minority class, followed by the SMOTE to further balance the data. Finally, the impact of feature selection was evaluated on the dataset balanced specifically using the SMOTE technique, providing a comprehensive comparison of the methods.

All model development and analysis were conducted using Python, taking advantage of its extensive libraries for machine learning and data processing. The primary libraries included scikit-learn for implementing machine learning algorithms, imbalanced-learn for handling imbalanced data through techniques like SMOTE, Pandas and NumPy for data manipulation and preprocessing, and Matplotlib and Seaborn for visualizations. Code was developed and executed in the Jupyter Notebook environment, allowing for iterative testing and refinement of the model. The models were trained on a PC with the following specifications: a Ryzen 7800x3D processor running at 4.2 GHz, an NVIDIA 4070 Ti GPU for accelerated computations, 32 GB of DDR5 RAM at 6000 MHz, and the Windows 11 operating system. Figure 3 presents the workflow of the study for diabetes prediction.

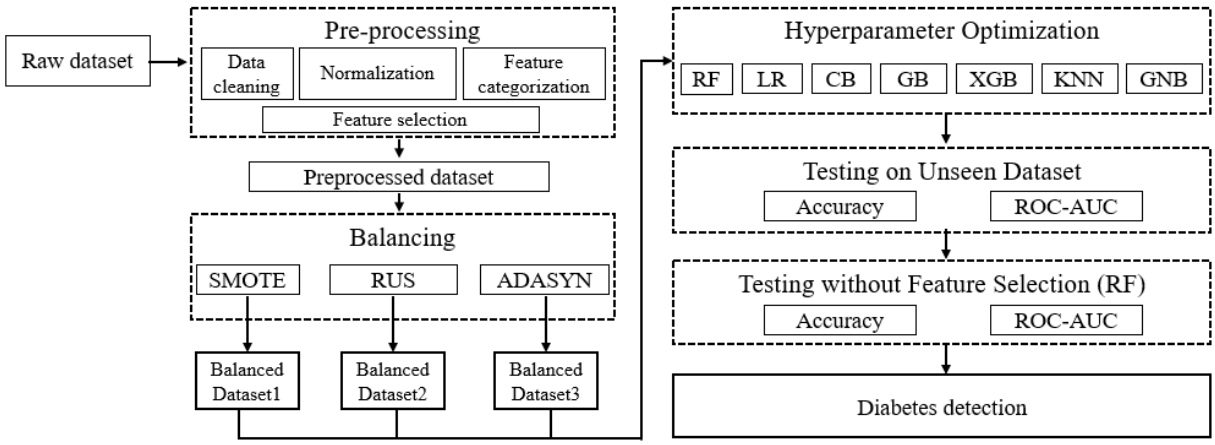


Figure 3. Workflow of the study for diabetes prediction model development.

Figure 3 presents the workflow of the study for diabetes prediction model development, illustrating the sequential steps including data preprocessing, application of classification algorithms, implementation of data balancing techniques such as SMOTE, RUS, and ADASYN, and evaluation of the RF model's performance without feature selection. The analyses conducted on the imbalanced dataset are presented in Table 3.

Table 3. Analysis results on the imbalanced dataset.

Model	Training Accuracy	Training AUC	Test Accuracy	Test AUC	Unseen Accuracy	Unseen AUC
RF	0.983416	0.998015	0.842514	0.764099	0.914520	0.984570
CB	0.864584	0.837797	0.859334	0.816036	0.587544	0.844531
XGB	0.861199	0.835693	0.858288	0.812885	0.581085	0.842366
KNN	0.874766	0.894319	0.835323	0.711257	0.653924	0.881901
GNB	0.774726	0.768106	0.777802	0.768734	0.667854	0.782006
LR	0.849264	0.803782	0.856502	0.807526	0.556091	0.816166
GB	0.853205	0.814605	0.859421	0.816742	0.563201	0.825097

Table 3 presents the analysis results for different models applied to the imbalanced dataset, focusing on key performance metrics, including testing and unseen data accuracy and AUC scores. The RF model stood out with the highest test accuracy of 0.8425 and a notable test AUC of 0.7641. Additionally, RF showed strong generalizability on unseen data, achieving an accuracy of 0.9145 and an AUC of 0.9846, which are the highest among all evaluated models.

Table 4. Analysis results on the RUS-balanced dataset.

Model	Training Accuracy	Training AUC	Test Accuracy	Test AUC	Unseen Accuracy	Unseen AUC
RF	0.950887	0.992859	0.366350	0.603088	0.631913	0.690164
CB	0.883607	0.939894	0.348658	0.547894	0.561971	0.575401
XGB	0.880251	0.936391	0.356850	0.559054	0.565707	0.586397
KNN	0.857530	0.944120	0.533075	0.633808	0.650868	0.689271
GNB	0.818123	0.905807	0.535515	0.623527	0.609337	0.646294
LR	0.845981	0.909715	0.490936	0.648997	0.626888	0.668883
GB	0.862950	0.924309	0.411801	0.624394	0.593857	0.645043

Table 4 displays the performance metrics of various models applied to the dataset balanced using the RUS technique. Among the models evaluated, the KNN model demonstrates relatively better performance, achieving a test accuracy of 0.5331 and a test AUC of 0.6338. KNN also shows competitive results on unseen data, with an

accuracy of 0.6509 and an AUC of 0.6893, which are among the highest in this configuration. Comparatively, the performance of models under RUS is generally lower than on the imbalanced dataset presented in Table 3. The RF, which previously excelled, shows a significant reduction in test accuracy (0.3664) and AUC (0.6031). This highlights the impact of balancing techniques like RUS, which, while mitigating the class imbalance, may also lead to information loss and reduced overall model performance.

Table 5. Analysis results on the ADASYN-balanced dataset.

Model	Training Accuracy	Training AUC	Test Accuracy	Test AUC	Unseen Accuracy	Unseen AUC
RF	0.984322	0.999205	0.687860	0.779964	0.851847	0.942934
CB	0.761683	0.846848	0.706728	0.813942	0.758895	0.836873
XGB	0.769956	0.854639	0.704593	0.810164	0.760039	0.838074
KNN	0.787682	0.875128	0.676225	0.749124	0.751321	0.820569
GNB	0.695081	0.769712	0.731001	0.767885	0.701464	0.781333
LR	0.732424	0.805529	0.720019	0.807786	0.741243	0.816781
GB	0.740081	0.817603	0.710868	0.816711	0.747513	0.824921

Table 5 presents the analysis results on the ADASYN-balanced dataset. Among the evaluated models, the RF model demonstrates superior performance, particularly evident in the test and unseen data. RF achieved a test accuracy of 0.6879 and an AUC of 0.7800. Furthermore, RF excelled on the unseen data with an accuracy of 0.8518 and an AUC of 0.9429, highlighting its strong generalization capability and effectiveness in predicting outcomes in previously unseen instances. In comparison to other models, the RF model consistently showed higher AUC values across different data splits, reinforcing its reliability in handling the ADASYN-balanced dataset. Other models, such as CB and XGB, also performed well with relatively high AUC scores (above 0.81 on the test set and around 0.84 on unseen data), but RF's superior unseen AUC of 0.9429 emphasizes its distinctive advantage in predictive performance.

Table 6. Analysis results on the SMOTE-balanced dataset.

Model	Training Accuracy	Training AUC	Test Accuracy	Test AUC	Unseen Accuracy	Unseen AUC
RF	0.985237	0.998741	0.827915	0.758419	0.932534	0.980670
CB	0.870121	0.947975	0.841119	0.800728	0.640775	0.829975
XGB	0.862297	0.940380	0.843211	0.803321	0.624817	0.813572
KNN	0.833034	0.869892	0.853364	0.661417	0.491912	0.675342
GNB	0.840268	0.920058	0.835062	0.793648	0.619213	0.800814
LR	0.856084	0.934584	0.836238	0.806860	0.637444	0.812978
GB	0.552343	0.610201	0.530542	0.609531	0.557897	0.615662

Table 6 shows the performance results on the SMOTE-balanced dataset. Among the evaluated models, RF stands out with consistently high performance across all metrics, particularly on unseen data. RF achieved a test accuracy of 0.8279 and a test AUC of 0.7584. Notably, RF excelled on unseen data with an accuracy of 0.9325 and an AUC of 0.9807. The overall findings underscore the RF model's strong adaptability and efficiency in handling imbalanced data, especially when balanced using SMOTE.

Table 7 presents the performance metrics of the RF model on the dataset without any feature selection, illustrating how the model's accuracy evolves as additional features are incrementally included. The RF model was selected for in-depth analysis across varying feature sets due to its consistently superior performance compared to other models in previous evaluations. The table reveals a clear trend: as the number of included features increases, there is a notable enhancement in model performance across all key metrics, particularly on unseen data. For example, with only a single feature, PhysHlth, the RF model achieved an unseen accuracy of 0.5926 and an unseen AUC of 0.6100. As more features were incorporated, such as PhysHlth, BMI, MentHlth, the unseen accuracy improved to 0.6639 and the unseen AUC to 0.7295. This progression continues, with the model reaching an unseen accuracy of 0.9532 and an unseen AUC of 0.9877 when 21 features were utilized. The data

strongly suggests that the inclusion of additional relevant features enables the RF model to capture more complex patterns in the dataset, thereby significantly enhancing its predictive accuracy and generalization capability. The most prominent gains are observed in the unseen metrics, emphasizing the RF model's improved ability to generalize to new data as feature richness increases.

Table 7. Performance of the RF model without feature selection.

Model	Test Accuracy	Test AUC	Unseen Accuracy	Unseen AUC	Features	No. of Features
RF	0.690953	0.605988	0.592568	0.609960	[PhysHlth]	1.0
RF	0.666768	0.695607	0.653518	0.712813	[PhysHlth, BMI]	2.0
RF	0.648379	0.661457	0.663930	0.729464	[PhysHlth, BMI, MentHlth]	3.0
RF	0.766385	0.724543	0.841030	0.928445	[PhysHlth, BMI, MentHlth, Age, HighBP, DiffWal...	9.0
RF	0.793054	0.733316	0.884501	0.958254	[PhysHlth, BMI, MentHlth, Age, HighBP, DiffWal...	10.0
RF	0.828700	0.757375	0.932114	0.980489	[PhysHlth, BMI, MentHlth, Age, HighBP, DiffWal...	15.0
RF	0.832534	0.766317	0.940788	0.983989	[PhysHlth, BMI, MentHlth, Age, HighBP, DiffWal...	16.0
RF	0.840988	0.777247	0.949998	0.987455	[PhysHlth, BMI, MentHlth, Age, HighBP, DiffWal...	20.0
RF	0.842383	0.777327	0.953170	0.987694	[PhysHlth, BMI, MentHlth, Age, HighBP, DiffWal...	21.0

The analysis reveals significant changes in model performance across various balancing methods and feature sets. The RF model demonstrated an accuracy of 91.45% and an AUC of 98.46% on the imbalanced dataset. However, when applying the RUS technique, the accuracy dropped to 36.63%, indicating a reduction of approximately 54.82%. In contrast, on the ADASYN-balanced dataset, RF's accuracy improved to 68.79%, reflecting a gain of about 32.16%. Further, the SMOTE balancing technique yielded an accuracy of 82.79%, resulting in a notable increase of around 14.00%. Finally, the analysis without feature selection showed that including more features consistently enhanced the model's accuracy, reaching 94.98% with 21 features, illustrating the importance of both balancing techniques and feature richness in predictive modeling.

Figure 4 illustrates the comparison of unseen accuracy values for various models across different datasets, including the imbalanced dataset, RUS-balanced dataset, ADASYN-balanced dataset, and SMOTE-balanced dataset. The bar chart presents the performance of various machine learning models, highlighting their unseen accuracy values across the different datasets. This comparison highlights the impact of different balancing techniques on model efficacy, with a clear indication of how unseen accuracy varies across models and datasets, thereby underscoring the importance of appropriate data handling strategies in enhancing predictive performance in diabetes detection.

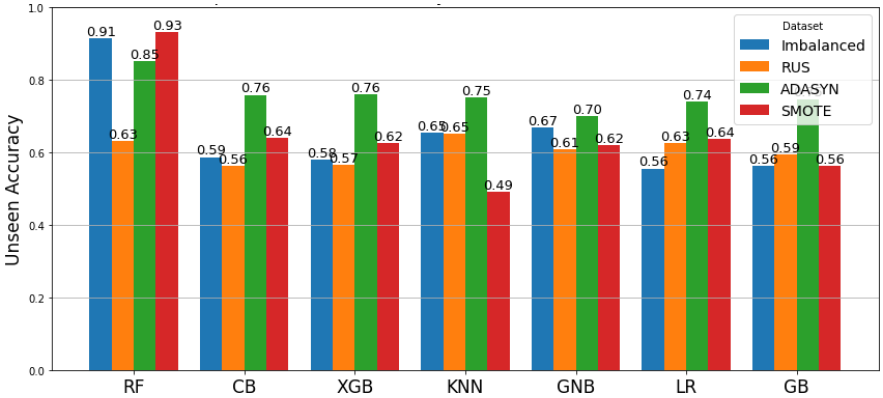


Figure 4. Comparison of unseen accuracy across different machine learning models and datasets.

5. Discussion

The present study investigates the impact of various balancing techniques and feature selection on predictive model performance in the context of imbalanced datasets, focusing on diabetes detection. The results highlight the challenges associated with class imbalance and the importance of employing appropriate methods to enhance model accuracy and generalization capabilities in predicting diabetes outcomes.

The RF model consistently emerged as the top performer across various datasets, demonstrating a test accuracy of 91.45% and an AUC of 98.46% on the original imbalanced dataset. This strong performance can be attributed to RF's ensemble learning approach, which effectively combines the predictions of multiple decision trees [39], thereby enhancing its ability to identify complex patterns in data relevant to diabetes detection. However, applying the RUS technique resulted in a drastic decrease in accuracy to 36.63%, underscoring the potential drawbacks of this method, particularly regarding information loss during data reduction [40]. RUS works by randomly removing instances from the majority class to balance the dataset, which can lead to the exclusion of valuable information that may be important for accurate predictions. This loss of data may reduce the model's ability to learn important features associated with diabetes, such as specific physiological indicators or lifestyle factors that are often present in the majority class. Moreover, the imbalance created by removing majority class instances can lead to a distorted representation of the underlying data distribution, making it challenging for the model to generalize effectively to unseen data. This aligns with findings from recent studies, which have highlighted that naive approaches to balancing can compromise model performance and accuracy, especially in high-stakes domains like healthcare where accurate predictions are critical [41].

The ADASYN and SMOTE techniques significantly enhanced the performance of the RF model, resulting in test accuracies of 68.79% and 82.79%, respectively. These improvements underscore the effectiveness of these advanced sampling methods in addressing class imbalance while maintaining critical data characteristics. The ADASYN technique, which focuses on generating synthetic minority instances based on the density of existing data points, allows for a more nuanced approach to balancing [42]. By adapting the number of generated instances to the local distribution of minority class samples, ADASYN effectively preserves the underlying structure of the data, thereby enhancing the model's ability to capture complex relationships relevant to diabetes detection. This adaptive nature is particularly beneficial in healthcare applications, where nuanced variations in data can carry significant predictive power. Similarly, the SMOTE technique employs a synthetic oversampling strategy, creating new minority class instances by interpolating between existing samples. This method not only increases the number of minority class instances but also enriches the dataset by introducing variability, which can lead to improved model strength [43]. By ensuring that the minority class is adequately represented, SMOTE enhances the RF model's capacity to generalize to unseen data, thus leading to improved accuracy and AUC metrics. These findings align with existing literature that emphasizes the efficacy of adaptive sampling methods in boosting predictive outcomes in imbalanced settings [44]. Such techniques facilitate a more balanced representation of data, enabling models to learn from a comprehensive view of the feature space associated with diabetes risk factors. This is fundamental, as accurate predictions are paramount in clinical settings, where misclassifications can have significant health implications.

The analysis conducted without feature selection demonstrated a noteworthy positive correlation between the number of features included in the model and its performance metrics. Specifically, the RF model achieved an accuracy of 95.31% when utilizing 21 features. As the number of relevant features increases, the RF model benefits from a richer representation of the underlying data landscape. Each additional feature contributes unique information that can help the model discern subtle variations in risk factors associated with diabetes. For instance, including features such as BMI, age, and blood pressure allows the model to leverage known risk factors that significantly impact diabetes prevalence [45]. This is critical in medical domains, where the complexity of patient data often requires multifactorial approaches to achieve reliable predictions. The findings align with existing literature that emphasizes the importance of feature richness in improving predictive accuracy and generalization capabilities [46]. Studies have shown that models with a higher number of relevant features are better equipped to identify complex interactions among variables, thus enhancing their overall interpretability and predictive power [47]. In the context of healthcare, this becomes vital, as accurately capturing the multifaceted nature of health-related data can lead to better risk assessments and more effective intervention strategies.

As demonstrated in Table 8, numerous studies have explored diverse machine learning models and datasets for diabetes detection, yielding varied levels of accuracy. For instance, the generalized regression neural network (GRNN) model by Zhang et al. [48] achieved a 75.49% accuracy on the CDC BRFSS2015 dataset, while Al-Absi et al. [49] attained a high 92% accuracy using the DiaNet v2 model on the Qatar Biobank dataset. Moreover, ensemble approaches, such as those used by Hasan et al. [18], and model combinations, like the LR and RF

ensemble applied by Maniruzzaman et al. [19], also showcased strong performance, reaching accuracies of 94.3% and 94.25%, respectively. However, the proposed method in this study, which utilized RF along with SMOTE on the CDC BRFSS2015 dataset, outperformed previous approaches with an accuracy of 95.31%. This result underscores the efficacy of RF in conjunction with SMOTE for managing imbalanced datasets and improving prediction accuracy in diabetes detection. The superior performance of our model may be attributed not only to the dataset choice and preprocessing steps but also to the optimized parameter tuning process applied. Specifically, Grid Search was employed to identify the best hyperparameters for the RF model, ensuring that it was finely tuned for optimal performance. Furthermore, cross-validation was implemented to validate the stability of the model, providing a reliable accuracy assessment across different data subsets.

The extensive data preprocessing steps in this study are among the other factors contributing to the higher accuracy compared to other studies in the field. The dataset's integrity was carefully examined, with missing values and duplicate entries eliminated to prevent the introduction of noise or bias. Additionally, variables were categorized based on their characteristics allowing for tailored preprocessing methods that optimized data handling and analysis for each type. Through this meticulous preparation, the model's ability to detect nuanced patterns was enhanced, contributing to the stability and reliability of the predictive framework and ultimately yielding superior accuracy in diabetes detection.

Table 8. Performance results of studies on diabetes detection.

Reference	Year	Method	Dataset Used	Accuracy
Zhang et al. [48]	2024	GRNN	CDC BRFSS2015 Dataset	GRNN: 75.49%
Al-Absi et al. [49]	2024	DiaNet v2	Qatar Biobank (QBB) Dataset	DiaNet v2: 92%
Maulana et al. [50]	2023	XGB	Pima Indians Diabetes Dataset	XGB: 82.68%
Khaleel and Al-Bakry [51]	2023	LR	Pima Indians Diabetes Dataset	LR: 94%
Shin et al. [12]	2022	XGB, RF	Health Promotion Center of Seoul St. Mary's Hospital	XGB: 85.8% (62 variables), 80.7% (27 variables)
Khanam and Foo [16]	2021	LR, SVM, CNN	Pima Indians Diabetes Dataset	CNN: 88.6%
Sivaranjani et al. [17]	2021	SVM, RF	Pima Indians Diabetes Dataset	RF: 83%
Hasan et al. [18]	2020	RF, XGB, Ensemble	Pima Indians Diabetes Dataset	XGB: 94.3%
Maniruzzaman et al. [19]	2020	LR, NB, DT, Adaboost, RF	National Health and Nutrition Examination Survey	LR + RF: 94.25%
Yahyaoui et al. [15]	2019	SVM, RF, CNN	Pima Indians Diabetes Dataset	RF: 83.67%
Mir and Dhage [13]	2018	NB, SVM, RF, Simple CART	Pima Indians Diabetes Dataset	SVM: 79.13%
Sisodia and Sisodia [14]	2018	DT, SVM, NB	Pima Indians Diabetes Dataset	NB: 76.30%
This study	-	RF + SMOTE	CDC BRFSS2015 Dataset	RF: 95.31%

6. Conclusion

This study underscores the critical role of advanced data-balancing techniques and feature selection in enhancing predictive model accuracy for diabetes detection, particularly in imbalanced datasets. Unlike prior research that often overlooks the impact of data imbalance on model accuracy, this work uniquely integrates multiple balancing methods with a comprehensive machine learning framework to address this issue systematically. The findings reveal that the RF model, combined with the SMOTE technique, achieved the highest predictive performance, highlighting SMOTE's effectiveness in mitigating class imbalance while maintaining essential data characteristics. In contrast, methods like RUS showed a significant drop in accuracy due to

information loss, emphasizing the potential drawbacks of certain balancing techniques and the need for careful method selection to avoid compromising data quality.

Another novel aspect of this study lies in its evaluation of feature selection through Lasso regularization, which demonstrated a clear positive correlation between the number of relevant features included and model performance. The findings reveal that as more relevant features are integrated, predictive accuracy improves, underscoring the importance of comprehensive feature inclusion in diabetes detection. Prioritizing relevant variables through this approach strengthens predictive capability and provides an efficient method for selecting features in medical diagnostics. This comprehensive integration of data balancing and feature selection represents a methodological advancement in developing high-performing and reliable models for healthcare applications. The insights from this study contribute valuable knowledge to the field by identifying optimal data handling strategies, particularly emphasizing the utility of SMOTE, to enhance predictive accuracy and support early diabetes diagnosis for improved health outcomes.

Looking ahead, future research could explore several avenues to build on the findings of this study. First, investigating the effectiveness of additional advanced balancing techniques, such as ensemble methods or generative adversarial networks, could provide further insights into improving model performance. Second, applying the developed methodologies to diverse populations and various healthcare settings would help validate the generalizability of the proposed models. Additionally, examining the interplay between feature selection methods and different algorithms could reveal more optimal combinations tailored for specific datasets. Finally, longitudinal studies could assess the real-world impact of these predictive models on early diabetes diagnosis and patient outcomes, thereby contributing to evidence-based practices in healthcare.

Acknowledgments

A preliminary version of this study was presented as a short abstract at the 1st International Data Analytics Congress, in 2024. The current manuscript is an extended version of that work, incorporating additional data, comprehensive analysis, and further discussions to provide a more in-depth exploration of the topic.

References

[1] World Health Organization. Diabetes. Available at: https://www.who.int/en/health-topics/noncommunicable-diseases/diabetes/#tab=tab_1 [Accessed 03 September 2024].
[2] Soumya D, Srilatha B. Late stage complications of diabetes and insulin resistance. J Diabetes Metab 2011; 2(9): 1000167.
[3] Sacks DB, Bruns DE, Goldstein DE, Maclaren NK, McDonald JM, Parrott M. Guidelines and recommendations for laboratory analysis in the diagnosis and management of diabetes mellitus. Clin Chem 2002; 48(3): 436-472.
[4] American Diabetes Association. Standards of medical care in diabetes—2019 abridged for primary care providers. Clin Diabetes 2019; 37(1): 11.
[5] Harris MI, Eastman RC. Early detection of undiagnosed diabetes mellitus: a US perspective. Diabetes Metab Res Rev 2000; 16(4): 230-236.
[6] Crow H, Gage H, Hampson S, Hart J, Kimber A, Storey L, Thomas H. Measurement of satisfaction with health care: implications for practice from a systematic review of the literature. Health Technol Assess 2002; 6(32): 1-10.
[7] Sinap V. A comparative study of loan approval prediction using machine learning methods. Gazi Univ J Sci Part C: Design Technol 2024; 12(2): 644-663.
[8] Gong Y, Liu G, Xue Y, Li R, Meng L. A survey on dataset quality in machine learning. Inform Software Technol 2023; 162: 107268.
[9] Emmanuel T, Maupong T, Mpoeleng D, Semong T, Mphago B, Tabona O. A survey on missing data in machine learning. J Big Data 2021; 8: 1-37.
[10] Neelima S, Govindaraj M, Subramani DK, ALkhayyat A, Mohan DC. Factors influencing data utilization and performance of health management information systems: a case study. Indian J Inform Sources Serv 2024; 14(2): 146-152.
[11] Thabtah F, Hammoud S, Kamalov F, Gonsalves A. Data imbalance in classification: Experimental evaluation. Inform Sci 2020; 513: 429-441.
[12] Shin J, Kim J, Lee C, Yoon JY, Kim S, Song S, Kim HS. Development of various diabetes prediction models using machine learning techniques. Diabetes Metab J 2022; 46(4): 650-657.
[13] Mir A, Dhage SN. Diabetes disease prediction using machine learning on big data of healthcare. In: 2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA); 16-18 August 2018; Pune, India. New York, NY, USA: IEEE; 2018. pp. 1-6.
[14] Sisodia D, Sisodia DS. Prediction of diabetes using classification algorithms. Procedia Comput Sci 2018; 132: 1578-1585.
[15] Yahyaoui A, Jamil A, Rasheed J, Yesiltepe M. A decision support system for diabetes prediction using machine learning and deep learning techniques. In: 2019 1st International Informatics and Software Engineering Conference (UBMYK); 6-7 November 2019; Ankara, Turkey. New York, NY, USA: IEEE; 2019. pp. 1-4.

[16] Khanam JJ, Foo SY. A comparison of machine learning algorithms for diabetes prediction. ICT Express 2021; 7(4): 432-439.
[17] Sivaranjani S, Ananya S, Aravinth J, Karthika R. Diabetes prediction using machine learning algorithms with feature selection and dimensionality reduction. In: 2021 7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS); 19-20 March 2021; Coimbatore, India. New York, NY, USA: IEEE; 2021. pp. 141-146.
[18] Hasan MK, Alam MA, Das D, Hossain E, Hasan M. Diabetes prediction using ensembling of different machine learning classifiers. IEEE Access 2020; 8: 76516-76531.
[19] Maniruzzaman M, Rahman MJ, Ahammed B, Abedin MM. Classification and prediction of diabetes disease using machine learning paradigm. Health Inform Sci Syst 2020; 8: 1-14.
[20] Centers for Disease Control and Prevention. Behavioral Risk Factor Surveillance System: Annual survey data. Available at: https://www.cdc.gov/brfss/annual_data/annual_data.htm [Accessed 07 September 2024].
[21] Tanha J, Abdi Y, Samadi N, Razzaghi N, Asadpour M. Boosting methods for multi-class imbalanced data classification: an experimental review. J Big Data 2020; 7: 1-47.
[22] Sinap V. Comparative analysis of machine learning techniques for detecting potability of water. J Sci Rep A 2024; 058: 135-161.
[23] Hancock JT, Khoshgoftaar TM. CatBoost for big data: an interdisciplinary review. J Big Data 2020; 7(1): 94.
[24] Chen T, Guestrin C. Xgboost: A scalable tree boosting system. In: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining; 2016 Aug. p. 785-794.
[25] Wilson DR, Martinez TR. Reduction techniques for instance-based learning algorithms. Mach Learn 2000; 38: 257-286.
[26] Ontivero-Ortega M, Lage-Castellanos A, Valente G, Goebel R, Valdes-Sosa M. Fast Gaussian Naïve Bayes for searchlight classification analysis. NeuroImage 2017; 163: 471-479.
[27] Dreiseitl S, Ohno-Machado L. Logistic regression and artificial neural network classification models: a methodology review. J Biomed Inform 2002; 35(5-6): 352-359.
[28] Elreedy D, Atiya AF, Kamalov F. A theoretical distribution analysis of synthetic minority oversampling technique (SMOTE) for imbalanced learning. Mach Learn 2024; 113(7): 4903-4923.
[29] Abacı İ, Yıldız K. SMOTE vs. KNNOR: An evaluation of oversampling techniques in machine learning. Gümüşhane University Journal of Science 2023; 13(3): 767-779.
[30] Susan S, Kumar A. The balancing trick: Optimized sampling of imbalanced datasets—A brief survey of the recent state of the art. Eng Rep 2021; 3(4): e12298.
[31] Mukherjee M, Khushi M. SMOTE-ENC: A novel SMOTE-based method to generate synthetic data for nominal and continuous features. Appl Syst Innov 2021; 4(1): 18.
[32] Belete DM, Huchaiah MD. Grid search in hyperparameter optimization of machine learning models for prediction of HIV/AIDS test results. Int J Comput Appl 2022; 44(9): 875-886.
[33] Bolón-Canedo V, Sánchez-Maroño N, Alonso-Betanzos A. A review of feature selection methods on synthetic data. Knowl Inf Syst 2013; 34: 483-519.
[34] Li Z, Sillanpää MJ. Overview of LASSO-related penalized regression methods for quantitative trait mapping and genomic selection. Theor Appl Genet 2012; 125: 419-435.
[35] Raju VG, Lakshmi KP, Jain VM, Kalidindi A, Padma V. Study the influence of normalization/transformation process on the accuracy of supervised classification. In: 2020 Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT); 20-22 August 2020; Tirunelveli, India. New York, NY, USA: IEEE; 2020. pp. 729-735.
[36] Rodríguez-Pérez R, Fernández L, Marco S. Overoptimism in cross-validation when using partial least squares-discriminant analysis for omics data: A systematic study. Anal Bioanal Chem 2018; 410(23): 5981-5992.
[37] Dinga R, Penninx BW, Veltman DJ, Schmaal L, Marquand AF. Beyond accuracy: Measures for assessing machine learning models, pitfalls and guidelines. BioRxiv. 2019; 743138.
[38] Obuchowski NA, Bullen JA. Receiver operating characteristic (ROC) curves: review of methods with applications in diagnostic medicine. Physics in Medicine & Biology. 2018; 63(7): 07TR01.
[39] Belgiu M, Drăguţ L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. ISPRS J Photogramm Remote Sens 2016; 114: 24-31.
[40] Elhassan T, Aljurf M. Classification of imbalance data using Tomek link (T-link) combined with random under-sampling (RUS) as a data reduction method. Glob J Technol Optim 2016; S1:111.
[41] Zheng K, Cai S, Chua HR, Wang W, Ngiam KY, Ooi BC. Tracer: A framework for facilitating accurate and interpretable analytics for high stakes applications. In: Proceedings of the 2020 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data; 14-19 June 2020; Portland, OR, USA. New York, NY, USA: ACM; 2020. pp. 1747-1763.
[42] Öter E, Doğan Y. A comparative study on data balancing methods for Alzheimer's disease classification. Cukurova Univ J Fac Eng 2024; 39(2): 489-501.
[43] Talukder MA, Islam MM, Uddin MA, Hasan KF, Sharmin S, Alyami SA, Moni MA. Machine learning-based network intrusion detection for big and imbalanced data using oversampling, stacking feature embedding and feature extraction. J Big Data 2024; 11(1): 33.
[44] Khushi M, Shaukat K, Alam TM, Hameed IA, Uddin S, Luo S, Reyes MC. A comparative performance analysis of data resampling methods on imbalance medical data. IEEE Access 2021; 9: 109960-109975.

[45] Boutilier JJ, Chan TC, Ranjan M, Deo S. Risk stratification for early detection of diabetes and hypertension in resource-limited settings: Machine learning analysis. J Med Internet Res 2021; 23(1): e20123.
[46] Friedrich T, Schlauderer S, Overhage S. Some things are just better rich: How social commerce feature richness affects consumers' buying intention via social factors. Electron Mark 2021; 31: 159-180.
[47] Tredennick AT, Hooker G, Ellner SP, Adler PB. A practical guide to selecting models for exploration, inference, and prediction in ecology. Ecology 2021; 102(6): e03336.
[48] Zhang Z, Ahmed KA, Hasan MR, Gedeon T, Hossain MZ. A deep learning approach to diabetes diagnosis. In: Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems; 10-12 April 2024; Singapore. Singapore: Springer Nature Singapore; pp. 87-99.
[49] Al-Absi HR, Pai A, Naeem U, Mohamed FK, Arya S, Sbeit RA, et al. DiaNet v2 deep learning-based method for diabetes diagnosis using retinal images. Sci Rep. 2024; 14(1): 1595.
[50] Maulana A, Faisal FR, Noviandy TR, Rizkia T, Idroes GM, Tallei TE, Idroes R. Machine learning approach for diabetes detection using fine-tuned XGBoost algorithm. Infol J Data Sci. 2023; 1(1): 1-7.
[51] Khaleel FA, Al-Bakry AM. Diagnosis of diabetes using machine learning algorithms. Mater Today Proc. 2023; 80: 3200-3203.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 321-339, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1556671

Alzheimer Hastalığının Manyetik Rezonans Görüntülerden Hibrit Derin Öğrenme Yaklaşımı ile Otomatik Tespiti

Öznur ÖZALTIN[1*], Sezgi ÇOBANBAŞ[2], Yasemin SIRAKAYA[3], Yuşa GÜNEŞ[4,5]

[1] Aktüerya Bilimleri Bölümü, Fen Fakültesi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye
[2] Matematik Bölümü, Veri Bilimi Ana Bilim Dalı, Università Degli Studi di Padova, Padova, İtalya
[3] Adli Veri Analitiği, Ernst & Young Global Limited Şirketi, İstanbul, Türkiye
[4] İstatistik Bölümü, Lisans Programı, Fen Fakültesi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye
[5] Veri Bilimi, ITECH Bilgi Teknolojileri Tıbbi Cihazlar Elektronik Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi, Ankara, Türkiye
[*1] oznurozaltin@hacettepe.edu.tr, [2] sezgicobanbas@gmail.com, [3] yaseminsr656@gmail.com, [4,5] yusagunes36@gmail.com

(Geliş/Received: 26/09/2024; Kabul/Accepted: 16/12/2024)

Öz: Alzheimer hastalığı, çağın en ciddi hastalıkları arasında yer almaktadır. Tedavisinin neredeyse bulunmadığı bu hastalıkta erken teşhis çok önemlidir. Erken teşhis edilmesi durumunda bu hastalığın ilerlemesi yavaşlayacaktır. Bu çalışmada, Alzheimer hastalığının derin öğrenme aracılığı ile Manyetik Rezonans (MR) görüntüler üzerinden tespit edilmesi amaçlanmıştır. Derin öğrenme algoritmalarından olan Evrişimli Sinir Ağları (ESA), görüntülerden otomatik özellik çıkarabilme yeteneğine sahiptir. Bu çalışmada, Alzheimer hastalığını MR görüntülerinden tespit etmede sekiz farklı ESA mimarisi kullanılmıştır. Bu mimarilerden en başarılı test sonucu veren NasNetMobile, otomatik özellik çıkarıcı olarak kullanılmış ve son katmanından 1056 özellik elde edilmiştir. Bu özellikler makine öğrenme algoritmalarından Derin Sinir Ağı (DSA), Destek Vektör Makinesi (DVM), Karar Ağacı, K-En Yakın Komşu, Yapay Sinir Ağı (YSA) ile sınıflandırılmıştır. Çalışmanın bu aşamasında yüksek doğruluk oranı elde edilse de sağlam sonuçlar için özellik seçim yöntemlerinden minimum Artıklık Maksimum İlişki (mRMR) yaklaşımından yararlanılmıştır. Böylece 1056 özellik 250'ye indirgenmiştir. Sonuç olarak, makine öğrenme algoritmalarının sınıflandırma performansı artmıştır. Alzheimer hastalığının tespitinde %90,68'lik doğruluk oranı ile en başarılı sonuç veren NasNetMobile-mRMR-DSA hibrit algoritması olmuştur.

Anahtar kelimeler: Alzheimer Hastalığı, Derin Öğrenme, Makine Öğrenmesi, Özellik Seçimi, Sınıflandırma.

Automatic Detection of Alzheimer's Disease from Magnetic Resonance Images Using a Hybrid Deep Learning Approach

Abstract: Alzheimer's disease is one of the most serious diseases of our age. Early diagnosis is very important in this almost incurable disease. The progress of this disease will be slowed down by early diagnosis. This study goals to identify Alzheimer's disease based on deep learning from Magnetic Resonance (MR) images. Convolutional Neural Networks (CNN), one of the deep learning algorithms, can automatically extract features from images. In this study, eight different CNN architectures were used to detect Alzheimer's disease from MR images. NasNetMobile, the most successful of these architectures, was used as an automatic feature extractor, and 1056 features were extracted from its last layer. These features were classified through machine learning algorithms: Deep Neural Network (DNN), Support Vector Machine (SVM), Decision Tree, K-Nearest Neighbor, and Artificial Neural Network (ANN). Although high accuracy was achieved at this stage of the study, the minimum Redundancy Maximum Relevance (mRMR) approach was used for selecting features and robust results. Thus, 1056 features were reduced to 250. As a result, the classification performance of machine learning algorithms improved. The NasNetMobile-mRMR-DNN hybrid algorithm was the most successful in the detection of Alzheimer's disease with an accuracy rate of 90.68%.

Key words: Alzheimer's Disease, Deep Learning, Machine Learning, Feature Selection, Classification.

1. Giriş

Alzheimer, demans türleri arasında yer alan özellikle de yaşlı bireylerde görülen nörodejeneratif bir beyin hastalığıdır [1, 2]. Demans, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde yaşlanan nüfusun hızla artmasının sonucu olarak önemli bir halk sağlığı sorunu haline gelmiştir [3, 4]. Alzheimer hastalığının artma nedenleri arasında yaşlanma,

[*] Sorumlu yazar: oznurozaltin@hacettepe.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0001-9841-1702, [2] 0009-0007-2630-4001, [3] 0009-0000-6718-6151, [4] 0009-0008-1416-8556

kolinerjik yollar, çevresel faktörler, kafa travması ve genetik faktörler yer almaktadır [3, 5]. Demansın en yaygın görülen şekli Alzheimer'dır ve bu hastalıktan kaynaklı ölümler %145'ten fazla artmıştır [3, 6]. Yapılan en son tahminlere göre demans prevalansının 2050 yılına kadar Avrupa'da iki kat, dünyada ise üç kat artması beklenmektedir [3, 7].

Alzheimer hastalığı olan bir bireyin beyninde boşluk (ventricle) boyutlarının büyüdüğü gözlenir [7, 8]. Bu durum çeşitli görüntüleme teknikleriyle kolayca ayırt edilebilmektedir. Manyetik Rezonans (MR) görüntüleme aracılığı ile beynin sağlıklı olup olmadığı ayırt edilebilmektedir [8]. Fakat sağlık çalışanlarının yükü her geçen gün artarken bu görüntülerin manuel olarak incelenmesi oldukça zaman almaktadır [7]. Dolayısıyla, görüntülemelerin otomatik olarak sınıflandırılması, hem sağlık çalışanlarının iş yükünü azaltacak hem de erken teşhis ile tedavi sürecini hızlandıracaktır.

Bu çalışmada, Alzheimer hastalığını MRI görüntüler üzerinden ayırt edilmesini sağlayan en iyi yaklaşımın bulunması hedeflenmiştir. Burada son dönemlerde oldukça yaygın olarak kullanılan ESA ve makine öğrenme algoritmalarından yararlanılmıştır. Bu çalışma için öncelikle yapılandırılmamış ADNI (Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative) veri setinden yararlanılarak üç sınıflı veri seti oluşturulmuştur. Bu üç sınıf şu şekildedir: Alzheimer Hastalığı (Alzheimer Disease, AD), Hafif bilişsel bozukluk (mild cognitive impairment, MCI) ve bilişsel olarak normal (cognitively normal, CN). Hafif bilişsel bozukluğu olan hastaların sağlıklı bireylere göre daha küçük bir entorinal korteks ve hipokampüse sahiptir. Ancak Alzheimer hastalığı olan hastalarda entorinal korteks ve hipokampüste belirgin bir azalma olabilir [9]. MRI görüntüler üzerinden doğru teşhis konulması tedavi süreci açısından oldukça önemlidir. Hafif bilişsel bozukluğu olan hastaların erken teşhis edilebilmesi Alzheimer hastalığına yakalanma süresini uzatacaktır. Dolayısıyla, bu sınıfları en iyi ayırt eden, aşırı öğrenmeden kaçınan NasNetMobile-mRMR-DSA algoritması tasarlanmıştır. Bu çalışma ile sağlanan katkılar şu şekildedir:

- ADNI veri seti üç sınıflı olarak oluşturulmuştur. Veri seti toplamda 3220 görüntüden oluşmaktadır. Görüntüler rastgele biçimde %80'i eğitim, %20'si ise test olarak ayrılmıştır.
- Önceden eğitilmiş AlexNet, InceptionResNet, InceptionV3, NasNetMobile, ResNet18, ResNet50, SqueezeNet ve Xception mimarilerden yararlanılmıştır.
- Eğitim veri setine mimarilerin aşırı öğrenmemesi için 5 katlı çapraz doğrulama uygulanmıştır.
- Mimarilerin performans sonuçları, doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik, F1-skoru ve AUC (area under curve, eğri altında kalan alan) üzerinden değerlendirilmiştir.
- Eğitilen mimarilerin ilk olarak SoftMax katmanı ile sınıflandırma performansları test edilmiştir. Bu aşamada en iyi test performansı veren NasNetMobile mimarisi olmuştur.
- Daha iyi performans elde etmek için NasNetMobile derin özellik çıkarıcı olarak kullanılmış ve DSA, DVM, Karar Ağacı, KNN ve YSA ile birleştirilmiştir.
- NasNetMobile mimarisinin son katmandan elde edilen 1056 özellik minimum artıklık maksimum ilişki (mRMR) algoritması aracılığı ile 250'ye düşürülmüştür. İndirgenen bu özellikler tekrar aynı makine öğrenme algoritmaları ile sınıflandırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu aşamada elde edilen performanslarda artış görülmüş ve en yüksek performans DSA ile elde edilmiştir.

Sonuç olarak, önerilen yöntem, Alzheimer hastalığının teşhisinde hem sağlık çalışanlarının iş yükünü azaltacak hem de erken teşhis ile hastalık sürecinin yavaşlatılmasına olanak tanıyacaktır. Bu nedenle çalışma, Alzheimer teşhisine yönelik literatürde önemli bir boşluğu doldurarak daha güvenilir ve etkin bir yöntem sunmaktadır.

1.2. Literatür Araştırması

Alzheimer hastalığı, bireylerin yaşam kalitesini ciddi ölçüde etkileyen ve global sağlık sisteminde önemli bir yük oluşturan ilerleyici bir nörodejeneratif bozukluktur. Bu hastalığın erken teşhisi, tedaviye yönelik stratejilerin geliştirilmesi ve hastalık sürecinin yavaşlatılması açısından kritik bir öneme sahiptir. MRI gibi ileri görüntüleme teknikleri ve yapay zeka destekli sınıflandırma yöntemleri, Alzheimer hastalığının farklı aşamalarını ayırt etmede etkin araçlar olarak öne çıkmaktadır. Literatürde, geleneksel makine öğrenmesi algoritmalarından derin öğrenme tabanlı modeller ve hibrit yaklaşımlara kadar geniş bir yöntem çeşitliliği bulunmaktadır.

Bu çalışmada, Alzheimer hastalığını MRI görüntüleri üzerinden sınıflandırmayı amaçlayan mevcut literatür incelenmiş ve modern tekniklerin avantajları ve sınırlamaları değerlendirilmiştir. Örneğin, Öziç ve Özşen [10] çalışmalarında voksel tabanlı bilgisayar tanı sistemi ile çalışmıştır. Alzheimer hastaları ve normal kontrol MR görüntüleri, hacimsel kayıp bölgelerindeki voksel değerleri kullanılarak sınıflandırılmıştır. Destek Vektör Makinesi (DVM) kullanarak %92,857 ile en yüksek doğruluk oranını elde etmişlerdir. Türk [11] çalışmasında,

Alzheimer hastalığının demans seviyesini dört farklı sınıf içeren MR görüntüleri kullanılarak tespit etmiş ve sonuç olarak en iyi performansın Bağımsız Bileşen Analizi tabanlı K-En Yakın Komşu sınıflandırıcı ile elde edildiğini ifade etmiştir. Aslan [12] çalışmasında Alzheimer hastalığının *elektroansefalogram* (EEG) sinyallerinden direkt olarak gerçekleştirilmesini amaçlayan bilgisayar destekli tanı sistemi oluşturmuştur. Elde ettiği özellikleri k-En Yakın Komşu algoritması ile sınıflandırmış ve sonuç olarak %91,12 doğruluk oranı elde etmiştir. Karabay ve Çavaş [13] toplamda 6400 adet MR görüntüsü kullanılarak AlexNet ve MobileNetV2 mimarilerinden özellik çıkarma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Özellik seçim aşamasında ise Komşuluk Bileşen Analizi (NCA) algoritmasından yararlanarak önemli özellikleri elde etmişlerdir. Son olarak bu özellikleri DVM ile sınıflandırmışlar ve çalışmanın sonucunda %100 doğruluk oranı elde etmişlerdir. Özkaya ve Cebeci [14] çalışmalarında Alzheimer hastalığını ve hastalığın teşhisinde kullanılan teknikleri incelemiş, başarılı bir model geliştirmek için çalışmışlardır. DenseNet121 modeli değiştirilebilen bir yapıda sunulmuştur. 3 boyutlu MR görüntülerini bu model doğrudan kullanabilmektedir. Böylece çeşitli uzaysal bilginin kaybının önüne geçilmiştir. Sadık [15] çalışmasında Alzheimer hastalığına ait belirlenen 5 öznitelik ile 4 farklı derin öğrenme algoritmasını karşılaştırmış ve Gradient Boosting Sınıflandırıcısı algoritması ile %96,43 doğruluk oranı elde etmiştir. Karakaya ve diğerleri [16] çalışmalarında Alzheimer hastalığının analizi için sınıflandırma ve segmentasyon işlemlerini uygulamış, bilgisayarlı görme destekli bir karar destek sistemi oluşturmuşlardır. Çalışmalarında 7 farklı mimariyi kullanmışlar ve GoogleNet mimarisi ile %94,67 doğruluk, %94,74 duyarlılık, %98,11 özgüllük ve 0,9467 F1 skoru elde etmişlerdir. Eren ve diğerleri [17] fonksiyonellik doğrulama testlerinde 3 boyutlu Evrişimli Sinir Ağı (ESA) kullanarak %81 doğruluk oranı elde etmişlerdir. Okyay [18] çalışmasında sadece sınıflandırıcıya bağlı olmamak amacı ile filtreleme metodunu kullanmayı tercih etmiştir. Sınıflandırma parametrelerinin optimize edilmesinden sonra sınıflandırıcıları 10 katlı çapraz doğrulama ile değerlendirmiştir. Sertkaya ve Ergen [19] sundukları çalışmada MRI görüntüleri ve genetik veriler kullanılarak yapay sinir ağlarıyla Alzheimer hastalığının ilerlemesini tespit etmeye çalışmışlardır ve bu hastalığın tespitinde %72-%90 arasında başarı elde etmişlerdir. Bhardwaj ve diğerleri [20] transfer öğrenme yoluyla InceptionResNetv2 mimarisini Alzheimer hastalığını tespit etmek için kullanmışlardır. Çalışmalarında beş sınıflı görüntü veri seti kullanmışlar ve %97,3 doğruluk oranı elde etmişlerdir. Mathew ve diğerleri [21] MRI görüntülerinden Alzheimer hastalığını tespit etmek için yeni bir yöntem önermişlerdir. Üç sınıflı görüntülerin özelliklerini çıkararak (şekil, renk, homojenlik, korelasyon vb.) önerdikleri yöntem olan Olasılıksal Sinir Ağını, DVM ve K-En Yakın Komşu algoritmaları ile doğruluk, özgüllük ve duyarlılık açısından performanslarını karşılaştırmıştır. Bu alanda yapılan araştırmalar sunulan çalışmalarla sınırlı değildir. Son teknolojik yöntemlerle Alzheimer hastalığı ve diğer hastalıklar tespit edilmeye devam etmektedir [22-27]. Tablo 1'de sunulan literatür araştırmasının özeti yer almaktadır.

Tablo 1'de sunulan çalışmalar arasında ADNI veri seti yaygın olarak kullanılan bir kaynak olmuştur. Örneğin, Özkaya ve Cebeci [14], Bhardwaj ve diğerleri [20], Sadık [15], Karakaya ve diğerleri [16] ile Sertkaya ve Ergen [19] çalışmalarında ADNI veri setinden faydalanmışlardır. Bu veri setini kullanan çalışmalarda, transfer öğrenme ve derin öğrenme tabanlı mimariler genellikle yüksek performans sağlamıştır. Bu durum, modern mimarilerin sınıflandırma yeteneklerini artırmada önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Bu çalışma, Alzheimer hastalığının manyetik rezonans görüntülerden otomatik olarak sınıflandırılmasına yönelik literatürdeki yaklaşımlardan farklı olarak hibrit bir yöntem olan NasNetMobile-mRMR-DSA algoritmasını önermektedir. Literatürde genellikle tekil derin öğrenme mimarileri veya standart makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmakta iken, bu çalışmada önceden eğitilmiş NasNetMobile mimarisi ile mRMR algoritması kullanılarak en anlamlı özellikler seçilmiş ve DSA sınıflandırıcısı ile bu özelliklerin performansı optimize edilmiştir. Bu yapı hem aşırı öğrenmenin önlenmesine hem de sınıflandırma başarısının artırılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, ADNI veri setinden oluşturulan üç sınıflı veri seti üzerinde kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiş ve duyarlılık, özgüllük, F1-skoru gibi performans ölçütleri açısından yüksek başarı oranlarına ulaşılmıştır. Bu özellikleri ile önerilen yöntem, Alzheimer hastalığının erken teşhisi için literatürdeki diğer çalışmalara kıyasla daha etkin ve güvenilir bir yaklaşım sunmaktadır.

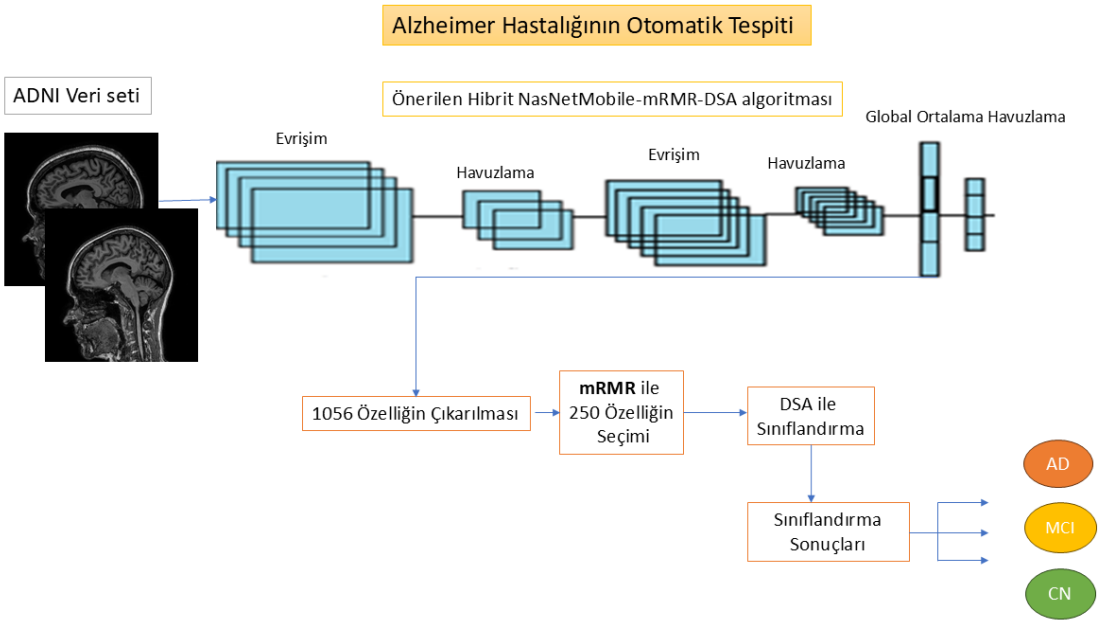
Bu çalışmanın devamında, 2. Materyal ve Yöntem bölümünde kullanılan veri seti, önceden eğitilmiş mimariler, sınıflandırıcılar, özellik seçim yöntemi, performans ölçütleri ve çapraz doğrulama sunulmuştur. 3. Bölümde, deneysel sonuçlardan bahsedilmiştir. Son olarak, çalışmada elde edilen bulgular, çalışmanın sınırları ve performans değerlendirmesi 4. Tartışma ve Sonuç bölümünde yapılmıştır.

Tablo 1. Alzheimer hastalığını MRI görüntüleri üzerinden sınıflandırmayı amaçlayan çalışmalar.

Çalışma	**Kullanılan Veri Seti**	**Model/Mimari**	**Öznitelik Çıkarımı/Seçimi**	**Doğruluk (%)**	**Yöntemin Öne Çıkan Özellikleri**
Öziç ve Özşen [10]	-	DVM	Voksel tabanlı özellikler	92,86	MRI'deki hacimsel kayıp bölgelerinin voksel analizi
Türk [11]	-	KNN	Bağımsız Bileşen Analizi (ICA)	-	Demans seviyesini sınıflandırmaya yönelik detaylı analiz
Aslan [12]	-	KNN	EEG sinyalleri	91,12	EEG tabanlı özelliklerle erken teşhis
Karabay ve Çavaş [13]	-	AlexNet, MobileNetV2 + DVM	NCA	100	Derin öğrenme tabanlı özellik çıkarımı ve önemli öznitelik seçimi
Özkaya ve Cebeci [14]	ADNI	DenseNet121	Uzaysal bilginin korunması	-	3 boyutlu MRI görüntülerini doğrudan kullanan bir model
Bhardwaj ve diğerleri [20]	ADNI	Inception-ResNetv2	Transfer öğrenme	97,3	Beş sınıflı sınıflandırma
Mathew ve diğerleri [21]	-	Olasılıksal Sinir Ağı, DVM, KNN	Renk, şekil, homojenlik gibi özellikler	-	Önerilen yöntemle performans karşılaştırması
Sadık [15]	ADNI	Gradient Boosting Sınıflandırıcısı	Belirlenen 5 özellik	96,43	Farklı algoritmaların performans karşılaştırması
Karakaya ve diğerleri [16]	ADNI	GoogleNet	Bilgisayarlı görme tabanlı öznitelikler	94,67	Yedi farklı mimarinin performans karşılaştırması
Eren ve diğerleri [17]	-	3 Boyutlu ESA	MRI veri seti	81,00	Fonksiyonellik doğrulama testi
Okyay [18]	-	DVM, KNN, ESA	Filtreleme metotları	-	10 katlı çapraz doğrulama ile performans değerlendirme
Sertkaya ve Ergen [19]	ADNI	YSA	MRI ve genetik veriler	72-90	Alzheimer ilerlemesini tespit etme

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmanın hazırlanmasında ilk olarak çalışma konusunun özgünlüğünü ortaya koyabilmek için ADNI veri tabanından yararlanılmıştır. MR görüntülerinden Alzheimer hastalığının tespiti için önceden eğitilmiş evrişimli sinir ağlarından yararlanılmış ve sekiz farklı mimari ile eğitim işlemi gerçekleştirilmiştir. Aşırı öğrenmenin olmaması için eğitim setine 5 katlı çapraz doğrulama uygulanarak eğitim sonuçları elde edilmiştir. Eğitilen mimarilerin daha önce hiç görmediği ilk başta ayrılmış olan test seti ile sınıflandırma performansları ölçülmüştür. Bu aşamada mimariler sınıflandırıcı olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçları iyileştirmek için mimarilerin otomatik özellik çıkarma gücünden yararlanılmıştır. En yüksek test performansı veren NasNetMobile'ın son katmanından elde edilen özellikler, literatürde sıkça kullanılan mRMR özellik seçim yöntemi ile indirgenmiştir. En önemli özelliklerin elde edilmesi ile sınıflandırma aşamasına geçilmiştir. Sınıflandırma aşamasında ise en yüksek doğruluğa DSA ulaşmıştır. Sonuçlar aynı zamanda özellik seçimi uygulanmadan da elde edilerek performans sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada önerilen NasNetMobile-mRMR-DSA algoritmasının grafik özeti ise Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Alzheimer hastalığının otomatik tespiti için akış grafiği.

2.1. Veri Seti

Bu çalışmada, Alzheimer Hastalığı Nörogörüntüleme Girişimi (ADNI) veri tabanından (https://adni.loni.usc.edu) yararlanılmıştır. Görüntüler yapılandırılmamış halde olduğundan ilk olarak nhii formatından png formatına dönüştürülmüştür. Elde edilen görüntüler Alzheimer Hastalığı (AD), Hafif Bilişsel Bozukluk (MCI) ve Bilişsel olarak Normal (CN) sınıflarına aittir. Toplamda 3220 görüntü olmak üzere, 1073'ü AD, 1025'i CN ve 1122'si MCI sınıfında yer almaktadır. Veri setinde yer alan 2576 MRI görüntü eğitim ve 644 MRI görüntü test için kullanılmıştır. Tablo 2'de veri setindeki her sınıf için görsellere ve görüntü sayılarına yer verilmiştir.

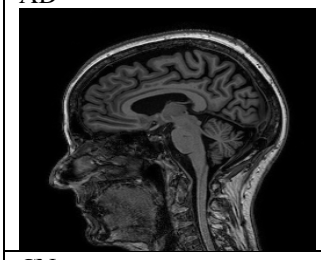
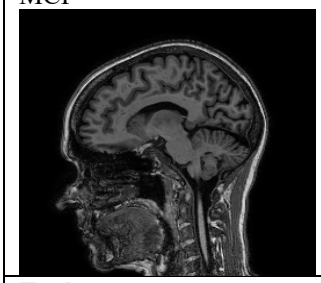
2.1.1. Veri Ön İşleme Adımları

ADNI veri setine uygulanan ön işlem adımları şu şekildedir:

- Veri setinde yer alan MRI görüntüleri, tamamlanmış ve eksiksiz şekilde alındığı için herhangi bir eksik veri ile karşılaşılmamıştır. Ancak, bazı görsellerin hasar görmüş veya bozulmuş olduğu durumlar, görüntü işleme adımında kontrol edilmiştir.

- MRI görüntü formatı dönüşümü sırasında görüntü boyutları sabitlenmiş ve tüm görüntüler 256x256x3 boyutlarına getirilmiştir.
- MRI görüntülerinin pixel değerleri 0 ile 255 arasında değişmektedir. Bu değerler, modelin daha verimli öğrenebilmesi için 0 ile 1 arasında normalize edilmiştir. Normalizasyon işlemi, her pikselin değerinin 255'e bölünmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu adım, modelin daha hızlı ve sağlıklı bir şekilde eğitim almasını sağlamaktadır.
- Veri setindeki sınıflar arasında belirgin bir dengesizlik bulunmamaktadır; ancak, herhangi bir dengesizliğin olabileceği durumlar için SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) gibi teknikler kullanılması düşünülmüştür. Ancak, bu çalışmada her sınıf için yeterli sayıda örnek bulunduğundan, bu aşama uygulamaya alınmamıştır.
- Görüntülerin çeşitliliğini artırmak ve modelin genelleme yeteneğini güçlendirmek amacıyla veri artırma teknikleri kullanılmıştır. Bu teknikler, döndürme, yansıma, kesme, ölçekleme gibi çeşitli görsel modifikasyonlarla artırılmıştır. Bu sayede modelin, daha fazla farklı veri ile karşılaşması sağlanmıştır

Tablo 2. ADNI veri seti detayları.

Sınıf	**Açıklama**	**Örnek Sayısı**	**Eğitim Verisi**	**Test Verisi**
AD 	Bu sınıftaki görüntüler, Alzheimer hastalığına özgü beyin küçülmesi belirtileri gösterir. Bu sınıfta yaş ortalaması 75,875 ±8,234 olan toplam 40 bireyden alınan MRI görüntüleri yer almaktadır.	1073	860	213
CN 	Bu sınıftaki görüntüler, normal bilişsel fonksiyonları olan beyni temsil eder. Bu sınıfta yaş ortalaması 76,66 ± 4,06 olan toplam 77 bireyden alınan MRI görüntüleri yer almaktadır.	1025	819	206
MCI 	Bu sınıftaki görüntülerde, genellikle hafif düzeyde yapısal değişiklikler gözlemlenebilir. Bu sınıfta yaş ortalaması 73,79 ± 8,28 olan toplam 100 bireyden alınan MRI görüntüleri yer almaktadır.	1122	897	225
Toplam	Yaş ortalaması 75,17 ± 7,15 olan 217 bireyden alınan MRI görüntüleri yer almaktadır.	3220	2576	644

Yukarıda bahsedilen adımlar, veri setinin daha sağlıklı ve modelin verimli çalışabileceği şekilde hazırlanmasına olanak tanımıştır.

2.2. Önceden Eğitilmiş Mimariler

AlexNet [28], ilk çıkan önceden eğitilmiş mimarilerdendir. AlexNet'in 5 evrişim katmanı, 3 tam bağlantılı katmanı, 1 bırakma katmanı (dropout) ve 1 SoftMax katmanı vardır. Girdi boyutu 227x227x3 olan AlexNet'in toplam parametre sayısı 62,3 milyondur. Bununla birlikte, düşük hesaplama kapasiteli cihazlarda kullanımının sınırlı olduğu gözlemlenmiştir.

InceptionResNet [29] Google tarafından önerilen bir mimaridir. Inception-ResNet modülü, Inception bloğu ve ResNet [30] yapısının bir kombinasyonudur. ResNet modülü, daha derin sinir ağlarını eğitmeyi mümkün kılan artık bağlantıları ilkel olarak tanıtmıştır. Inception bloğu, giriş görüntülerinin değişen ölçeklerinden daha fazla bilgi alabilir ve ResNet, önemli ölçüde artan derinlikten doğruluk kazanabilir durumdadır. Inception bloğu ve ResNet modülünün kombinasyonu, mimarinin performansını büyük ölçüde iyileştirmiştir [31]. InceptionResNet'in girdi boyutu 299x299x3 ve toplam parametre sayısı yaklaşık 55 bindir. Bu mimari, düşük parametre sayısına rağmen yüksek performans sunmaktadır. Ancak, bu mimarinin eğitimi daha uzun sürebilir ve GPU desteği gerektirebilir.

Inceptionv3 [32], GoogleNet [33]'in ileri versiyonlarından biridir. 48 katman derinliğine sahip bir evrişimli sinir ağı olan bu mimari, ImageNet (http://www.image-net.org) veri tabanından bir milyondan fazla görüntü üzerinde eğitilmiştir. 299x299x3 giriş boyutuna sahip olan mimari, optimize edilmiş bir hesaplama yükü ile yüksek doğruluk sağlamaktadır. Mimarinin toplam parametre sayısı, performansı ve eğitim süresi, modern projelerde sıkça tercih edilmesini sağlamaktadır.

NASNetMobile [34], Google Beyin ekibi tarafından geliştirilmiştir. Pekiştirmeli öğrenme tekniği aracılığıyla optimum evrişimli sinir ağı mimarisi bulmayı amaçlamıştır [35]. NASNetMobile'ın girdi boyutu 224x224x3 ve toplam parametre sayısı yaklaşık 4,5 milyondur. Taşınabilir cihazlar ile uyumlu çalışması için tasarlanan bu mimarinin eğitim süresi oldukça kısa olup enerji verimliliği ön plandadır.

ResNet-18 [30], ResNet ailesinin 18 derin katmana sahip bir mimarisidir. ResNet ailesinin hedefi, atlama yoluyla kısayol bağlantıları gerçekleştirmektir. Mimarinin daha hızlı öğrenmesi için bu atlama işleminde bağlantılar mimariye baskı yapar. Bu mimari, çok sayıda evrişim katmanından yararlanarak etkin bir şekilde öğrenmeyi gerçekleştirmektedir. 224x224x3 giriş boyutuna ve 11 milyondan fazla parametreye sahip olan mimari, orta düzey bir hesaplama yüküne sahiptir. Eğitim süresi modern GPU'larda oldukça hızlıdır.

ResNet-50 [30], 50 katmanlı ResNet mimarilerinden biridir. Katmanların ağırlıklarını %50 azaltabilme özelliği sayesinde tercih edilen mimarilerdendir. Toplamda 23 milyondan fazla parametreye sahiptir. Parametre optimizasyonu ve artık bloklarının varlığı, modeli klasik evrişimli sinir ağlarından ayırmaktadır. Eğitim süresi ResNet-18'e kıyasla daha uzundur, ancak doğruluk açısından önemli kazançlar sağlamaktadır.

SqueezeNet [36], ateşleme modülüne sahip farklı bir önceden eğitilmiş mimaridir. On evrişim katmanından, maksimum havuzlama katmanlarından ve bir SoftMax katmandan oluşan SqueezeNet'in girdi boyutu 227x227x3'tür. Toplam parametre sayısı oldukça düşüktür, bu da hafif yapısını desteklemektedir. Eğitim süresi kısa ve hesaplama yükü düşüktür, bu nedenle mobil cihazlar için uygun bir mimari olarak öne çıkmaktadır.

Xception [37], InceptionV3'ün gelişmiş versiyonu olarak tanıtılmıştır. Bu mimarinin temel özelliği, derinlemesine ayrılabilen evrişimleri (konvolüsyonları) kullanmasıdır. 299x299x3 giriş boyutuna sahip bu model, toplam parametre sayısını sabit tutarak daha yüksek performans sağlamaktadır. Eğitim süresi, kullanılan donanıma bağlı olarak değişmekle birlikte, yüksek doğruluk oranı nedeniyle tercih edilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan bu mimariler Alzheimer hastalığının tespitinde hem sınıflandırıcı hem de özellik çıkarıcı olarak kullanılmıştır. Her bir modelin parametre sayıları ve eğitim süreleri Tablo 3' te özetlenmiştir. Modellerin farklı özellikleri, Alzheimer hastalığının tespitinde hesaplama yükü ve doğruluk açısından detaylı bir karşılaştırmaya olanak sağlamaktadır.

2.3. Sınıflandırıcılar

Bu bölümde kısaca Destek Vektör Makinesi (DVM), Yapay Sinir Ağı (YSA), Derin sinir Ağı (DSA), Karar Ağacı ve K- En Yakın Komşu sınıflandırıcıları sunulmaktadır.

2.3.1. Destek Vektör Makinesi (DVM)

Destek Vektör Makinesi (DVM), Vapnik ve Cortes [38] tarafından iki sınıflı veriler için geliştirilmiştir. Daha sonra DVM, doğrusal olmayan ve çok sınıflı veri setleri için geliştirilmiş ve genelleştirilmiştir. DVM sadece sınıflandırma problemleri için kullanılmamıştır. Aynı zamanda regresyon (tahmin) problemlerin çözümünde de

sıklıkla kullanılmaktadır. Veri setini sınıflandırma/regresyon problemi için çekirdek tabanlı bir yöntemle ayırabilen etkili bir algoritmadır.

Tablo 3. Mimarilerin özellikleri.

Mimari	Parametre Sayısı	Giriş Boyutu	Eğitim Süresi (saniye)	Kullanım Amacı
AlexNet	62,3 milyon	227x227x3	120	Sınıflandırıcı/Özellik Çıkarıcı
InceptionResNet	55 bin	299x299x3	150	Sınıflandırıcı/Özellik Çıkarıcı
Inceptionv3	24 milyon	299x299x3	180	Sınıflandırıcı/Özellik Çıkarıcı
NASNetMobile	4,5 milyon	224x224x3	90	Sınıflandırıcı/Özellik Çıkarıcı /Mobil Uygulamalar
ResNet-18	11 milyon	224x224x3	100	Sınıflandırıcı/Özellik Çıkarıcı
ResNet-50	23 milyon	224x224x3	200	Sınıflandırıcı/Özellik Çıkarıcı
SqueezeNet	1,2 milyon	227x227x3	80	Sınıflandırıcı/Özellik Çıkarıcı/Mobil ve Hafif Uygulamalar
Xception	20 milyon	299x299x3	170	Sınıflandırıcı/Özellik Çıkarıcı

2.3.2. Karar Ağacı

Makine öğrenme algoritmalarından biri olan Karar Ağacı, genellikle regresyon veya sınıflandırma problemleri için tercih edilmektedir [39, 40]. 1970'lerin sonlarında başlanan algoritma, Ross Quinlan tarafından C4.5 programıyla tasarlanmış ve sonrasında 20 yıl boyunca geliştirilmiştir [41]. Sınıflandırma problemleri için karar ağacı hiyerarşik bir sisteme sahip olmaktadır. Bu yapısı sayesinde karmaşık miktardaki bilgiyi basit karar verme mekanizması ile alt gruplara bölebilmektedir. Karar ağacının yapısının anlaşılabilir olması, kolay yorumlanabilmesi ve diğer algoritmalarla uyumlu çalışabilmesinden dolayı sıklıkla tercih edilmektedir [42, 43].

2.3.3. K-En Yakın Komşu

K-En Yakın Komşu algoritması, seçilen bir girdinin kendine en yakın olanlarla arasındaki uzaklıkları ölçen, yaygın olarak kullanılan makine öğrenme algoritmalarındandır [44, 45]. Bu çalışmada uzaklık metriği olarak Öklid kullanılmıştır. Komşuların sayısı ise 5 olarak seçilmiştir.

2.3.4. Yapay Sinir Ağı (YSA)

Yapay Sinir Ağı (YSA), McCulloch ve Pitts [46] tarafından 1943 yılında tanıtılmıştır. YSA, hayvanların ve insanların nöron ağlarından esinlenerek ortaya çıkarılmış ve matematiksel teori ile desteklenmiştir [39]. Esnek yapısı ve kullanım kolaylığı sayesinde makine öğrenmesinde, özellikle de denetimli öğrenmede tercih edilen YSA, doğrusal olmayan bir modeldir. Bu çalışmada 5 nöronlu tek gizli katmanlı YSA modeli tercih edilmiştir.

2.3.5. Derin Sinir Ağı (DSA)

Derin Sinir Ağı (DSA), YSA' nın iki veya daha çok katmanlı versiyonu olarak ifade edilebilir. Tıpkı YSA gibi kullanım kolaylığının olması, büyük boyutlu verilerde oldukça yaygın kullanılması sebebiyle bu çalışmada DSA sınıflandırıcı olarak tercih edilmiştir. İki saklı katmandan oluşan DSA, ilk katmanda 5 nöron ikinci katmanda ise 10 nöron kullanılmıştır. Nöron sayıları deneme yanılma ile belirlenmiştir. Hem YSA hem de DSA da aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU tercih edilmiştir ve optimizasyon algoritması olarak "Sınırlı Bellek Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno (L-BFGS)", hesaplama karmaşıklığı olmaması sebebiyle tercih edilmiştir [47]. Çalışmada kullanılan diğer parametrelerin değerlerine ise Tablo 4'te yer verilmiştir.

Tablo 4. YSA/DSA parametreleri.

YSA/DSA parametreleri	Değerleri
Ağırlık Başlatıcı	glorot
Bias Başlatıcı	zeros
İterasyon limiti	1000
Gradyan toleransı	1.0000e-06
Kayıp toleransı	1.0000e-06
Adım toleransı	1.0000e-06
Lamda	0

2.4. Özellik Seçim Yöntemi: minimum Artıklık Maksimum İlişki (mRMR)

Minimum Artıklık Maksimum İlişki (mRMR) yöntemi ile mevcut özellikler arasından en iyisi seçilmeye çalışılır. Bu sayede hesaplama maliyetleri azaltılır. mRMR özellik seçme yönteminde değişkenler ve özellikler arasındaki korelasyonun maksimum olması hedeflenmektedir. Aynı zamanda özellikler arasındaki bağımlılığın da minimum olması hedeflenir [48]. Böylece, gereksiz ve birbirine benzer özellikler elenerek daha anlamlı ve özgün özellikler seçilir, bu da modelin genel performansını artırırken aşırı uyumu önlemektedir.

mRMR yönteminin işlem adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Verinin her bir özelliği ile hedef değişken arasındaki karşılıklı bilgi değeri hesaplanır.
2. Özellikler arasındaki bağımlılık hesaplanır.
3. İlk olarak, hedef değişkenle en yüksek ilişki değerine sahip özellik seçilir.
4. Seçilen özellik ile diğer özellikler arasındaki bağımlılık değerleri hesaplanır.
5. Her yeni özellik, ilişki- bağımlılık farkına göre seçilir.
6. Bu adım, istenilen sayıda özellik seçilene kadar devam eder.

mRMR yöntemi, biyoinformatik, görüntü işleme, doğal dil işleme ve diğer yüksek boyutlu veri setlerinde sıklıkla kullanılmaktadır [49-51]. Bu çalışmada, Alzheimer hastalığının tespitinde, ESA ile MRI görüntülerinden çıkarılan özelliklerin indirgenmesi mRMR yöntemi ile sağlanmıştır.

2.5. Performans Ölçütleri

Sınıflandırma performansı, doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik, F1 skoru ve AUC değeri gibi ölçütlere göre değerlendirilmiştir [52, 53]. Bu ölçütler, çok sınıflı (multi-class) sınıflandırma bağlamında one-vs-rest (bir sınıfın geri kalan sınıflardan ayrılması) stratejisi kullanılarak her bir sınıf için ayrı ayrı hesaplanmış ve genel değerlendirme için ortalama değerleri Eşitlik (1-5)' te sunulmuştur.

1. Doğruluk (Accuracy)

$$Doğruluk = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (1)$$

Doğruluk, modelin doğru tahmin ettiği sınıfların oranını gösterir. Burada, DP: Gerçek Pozitif (True Positive) ve DN: Gerçek Negatif (True Negative) doğru tahminlerin toplamını ifade eder. YP: Yanlış Pozitif (False Positive) ve YN: Yanlış Negatif (False Negative) yanlış tahminlerdir.

2. Duyarlılık (Sensitivity / Recall)

$$Duyarlılık = \frac{DP}{DP+YN} \quad (2)$$

Duyarlılık, modelin, ilgili sınıfa ait tüm örnekleri doğru bir şekilde tanıyıp tanımadığını gösterir. Yani, gerçek pozitiflerin doğru tespit edilme oranıdır.

3. Özgüllük (Specificity)

$$Özgüllük = \frac{DN}{DN+YP} \quad (3)$$

Özgüllük, modelin negatif sınıfları doğru bir şekilde sınıflandırma yeteneğini gösterir. Yani, negatif örneklerin doğru şekilde negatif olarak etiketlenme oranıdır.

4. Kesinlik (Precision)

$$Kesinlik = \frac{DP}{DP+YP} \tag{4}$$

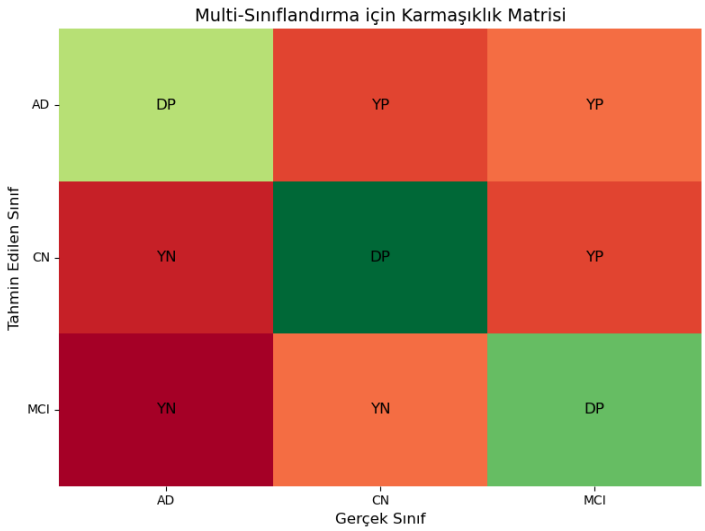
Kesinlik, modelin gerçek pozitif olarak sınıflandırdığı örneklerin, gerçekten doğru olup olmadığını gösterir. Başka bir ifade ile modelin pozitif olarak tahmin ettiği sınıf örneklerinin ne kadarının doğru olduğunu ölçer.

5. F1-Skoru (F1 Score)

$$F1 - Skoru = \frac{2 \times Kesinlik \times Duyarlılık}{Kesinlik + Duyarlılık} \tag{5}$$

F1-Skoru, kesinlik ve duyarlılığın harmonik ortalamasıdır ve her iki metriği dengeleyerek, her ikisini de dikkate alır. Modelin hem doğru pozitifleri bulmada hem de yanlış pozitifleri önlemede ne kadar başarılı olduğunu gösterir.

Çok sınıflı bir problemde, AUC (Area Under the Curve) ölçütü de one-vs-rest yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşımda, her bir sınıf için ayrı bir ROC (Receiver Operating Characteristic) eğrisi oluşturulur. ROC eğrisi, modelin doğru sınıflandırmalarını (gerçek pozitifler) ve yanlış sınıflandırmalarını (yanlış pozitifler) analiz eder. AUC, bu eğri altındaki alanı ifade eder ve modelin sınıflandırma doğruluğunun bir ölçüsüdür. AUC değeri 0 ile 1 arasında bir değeri alır; 1, mükemmel bir sınıflandırıcıyı, 0.5 ise rasgele tahmin yapan bir modelin performansını gösterir. Her bir sınıf için hesaplanan AUC değerlerinin ortalaması alındığında, genel sınıflandırma performansına dair bir değerlendirme yapılmış olur. Şekil 2'de her sınıf için DP, DN, YP ve YN değerlerinin karmaşıklık matrisi üzerinde görselleştirilmiş hali sunulmuştur. Bu matris yardımıyla sınıflandırma performansına dair ayrıntılı analiz yapılmıştır [54].

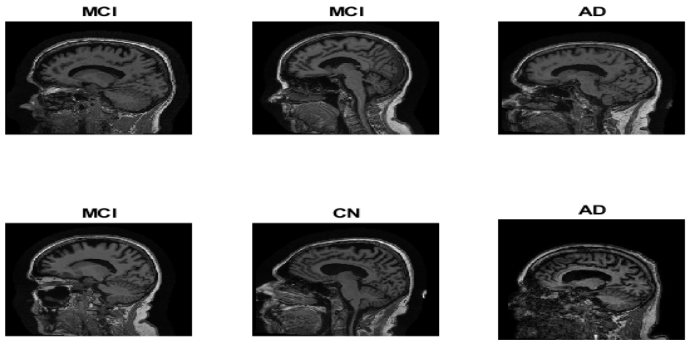


Şekil 2. ADNI veri setinin sınıflandırmasında kullanılan karmaşıklık matrisi.

3. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada, Alzheimer hastalığının otomatik tespiti için 8 farklı önceden eğitilmiş mimarilerden yararlanılmıştır. Çalışmada, AD, CN ve MCI sınıfları bulunan ADNI veri setinden yararlanılmıştır. Veri setinde toplam 3220 MRI görüntüsü bulunmaktadır. Bu görüntülerin %80'i eğitim %20'si ise test için ayrılmıştır. Rastgele olarak seçilen MRI görüntülerinden bir kesit Şekil 3'te gösterilmiştir. Analiz aşamasında MATLAB 2022b

programı kullanılmıştır. 5 katlı çapraz doğrulama ile eğitim aşaması tamamlanarak sonuçlar Tablo 5'te sunulmuştur.



Şekil 3. ADNI veri setinden örnekler.

Tablo 5. 5 katlı çapraz doğrulama uygulanan önceden eğitilmiş mimarilerin eğitim sonuçları.

Sınıflandırıcı	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1 Skoru	AUC
Alexnet	0,8750	0,8727	0,9366	0,8879	0,8753	0,9703
InceptionResNet	0,9950	0,9949	0,9975	0,9948	0,9949	0,9999
Inceptionv3	0,9950	0,9950	0,9975	0,9949	0,9949	**1,0000**
NasNetMobile	0,9926	0,9927	0,9963	0,9925	0,9926	0,9999
ResNet-18	0,9852	0,9853	0,9925	0,9857	0,9855	0,9995
ResNet-50	0,9938	0,9937	0,9969	0,9938	0,9938	0,9999
SqueezeNet	0,9786	0,9787	0,9892	0,9791	0,9789	0,9980
Xception	**0,9973**	**0,9973**	**0,9987**	**0,9972**	**0,9973**	0,9998

Tablo 5'e göre, en yüksek performans %99,73'lük doğruluk oranı ile Xception mimarisi ile elde edilmiştir. Bu mimarinin, duyarlılık, özgüllük, kesinlik, F1-Skoru ve AUC değeri sırasıyla %99,73, %99,87, %99,72, %99,73 ve 0.9998'dir. Burada AUC değeri haricinde koyu renkle gösterilenler Xception mimarisi ile elde edilmiştir. AUC değerinde koyu renkle ifade edilen en yüksek değer Inceptionv3 ile elde edilmiştir. Diğer mimarilerinde doğruluk oranları şu şekildedir: AlexNet, %87,50, InceptionResNet %99,50, Inceptionv3, %99,50, NasNetMobile, %99,26, ResNet-18, %98,52, ResNet-50, %99,38, SqueezeNet, %97,86. Eğitilen 8 mimarinin ortalama eğitim doğruluk oranları oldukça başarılı olmuştur. Bu mimarilerin test aşamasından sonra elde edilen sonuçları Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Önceden eğitilmiş mimarilerin test sonuçları.

Sınıflandırıcı	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1 Skoru	AUC
Alexnet	0,8463	0,8484	0,9232	0,8696	0,8473	0,9716
InceptionResNet	0,8711	0,8710	0,9350	0,8810	0,8736	0,9763
Inceptionv3	0,8758	0,8774	0,9380	0,8824	0,8776	0,9759
NasNetMobile	**0,8866**	**0,8874**	**0,9433**	**0,8918**	**0,8877**	0,9839
ResNet-18	0,8463	0,8469	0,9225	0,8644	0,8491	**0,9869**
ResNet-50	0,8602	0,8602	0,9295	0,8681	0,8627	0,9572
SqueezeNet	0,8370	0,8374	0,9179	0,8543	0,8403	0,9519
Xception	0,8773	0,8789	0,9385	0,8787	0,8783	0,9560

Tablo 6'ya göre, Alzheimer hastalığının tespitinden en yüksek test doğruluğu veren mimari %88,66'lık performans ile NasNetMobile olmuştur. Yine diğer metriklerde (AUC değeri hariç) bu mimari en yüksek değerleri elde etmiş ve Tablo 2'de koyu renk ile gösterilmiştir. NasNetMobile, %88,74 duyarlılık, %94,33 özgüllük, %89,18 kesinlik, %88,77 F1-skoru ve 0.9839 AUC değeri elde etmiştir. AUC değerinin 1'e yakın olması oldukça önemlidir. Bu değerin yüksek olması, modelin ne ölçüde sınıfları ayırabildiğini göstermektedir. Alzheimer hastalığının tespiti için MRI görüntülerin sınıflandırılmasında AlexNet %84,63, InceptionResNet %87,11,

Inceptionv3 %87,58, ResNet-18 %84,63, ResNet-50 %86,02, SqueezeNet %83,70 ve Xception %87,73 test doğruluğu elde etmiştir. Şekil 4, bu mimarilerin test sonrası elde edilen karmaşıklık matrislerini göstermektedir.

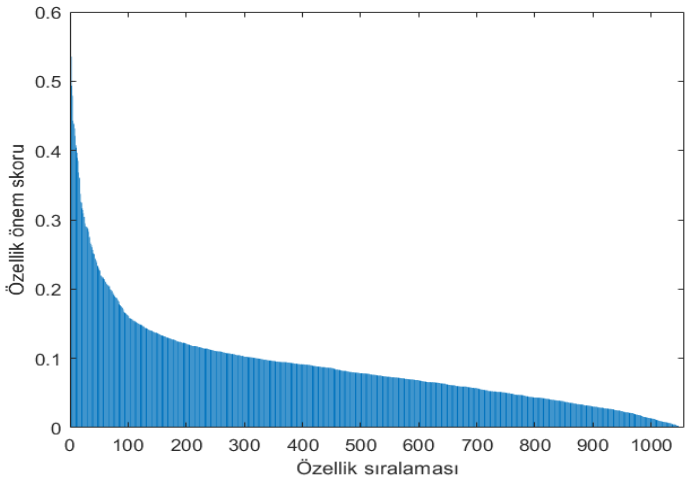
NasNetMobile mimarisi ile en yüksek test doğruluğu elde edilmiştir. Fakat son yıllarda yapılan çalışmalar gösteriyor ki önceden eğitilmiş mimarilerin derin özellik çıkarıcı olarak kullanılması ve makine öğrenme algoritmaları ile entegre edilmesi sonucunda performans artmaktadır [49]. Bu sebeple performansı daha iyi hale getirmek için NasNetMobile mimarisinin global average pooling katmanından 1056 özellik elde edilmiştir. Çıkarılan bu özellikler herhangi bir özellik seçim yöntemi uygulanmadan makine öğrenme algoritmaları ile sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma sonucu Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7. NasNetMobile mimarisinin özellik çıkarıcı olarak kullanılması ile oluşturulan hibrit algoritmaların sınıflandırma sonuçları.

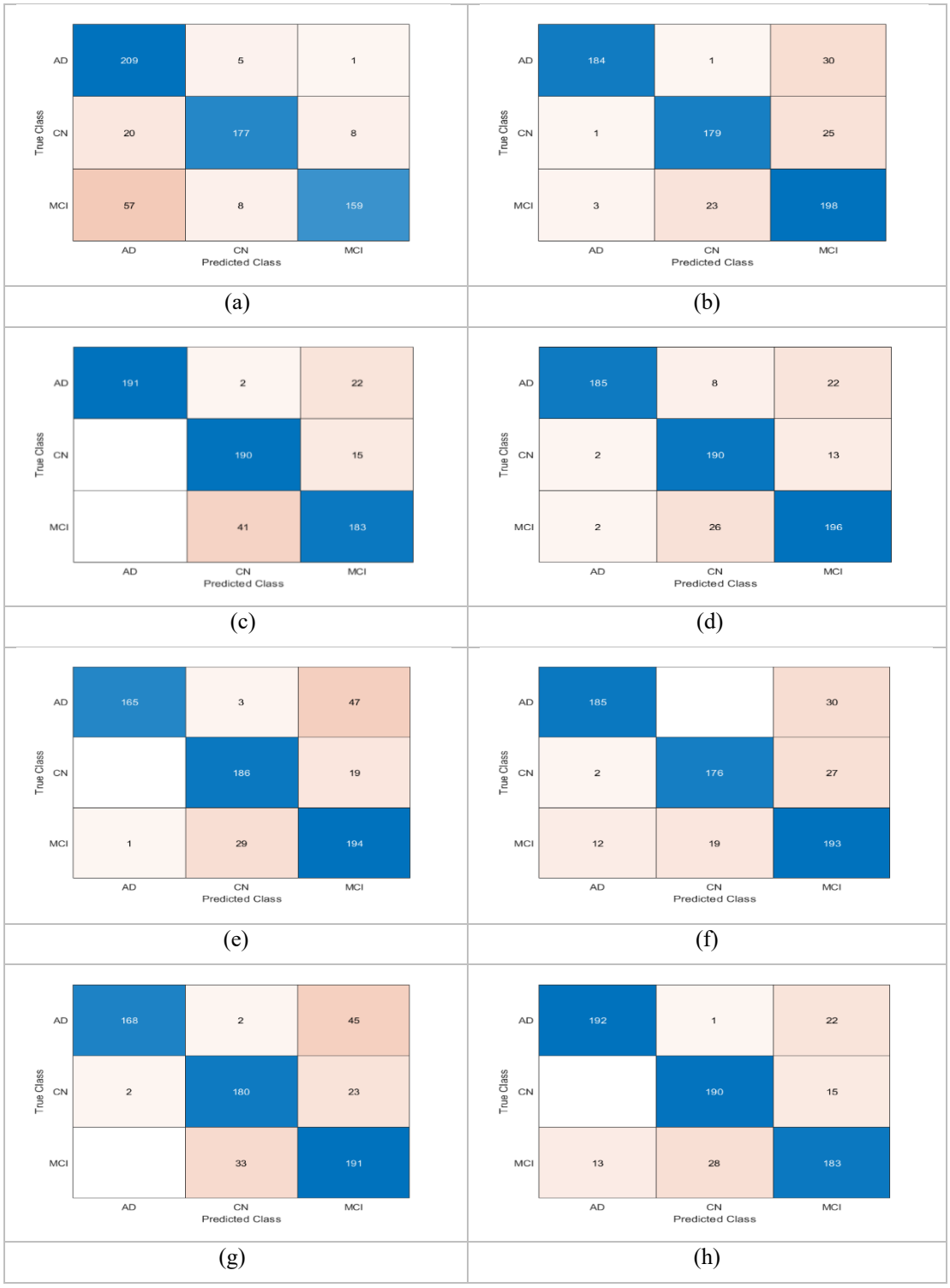
Sınıflandırıcı	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1 Skoru	AUC
DSA	**0,9037**	**0,9049**	**0,9522**	**0,9066**	**0,9043**	0,9913
DVM	0,8960	0,8971	0,9482	0,8981	0,8965	0,9908
Karar Ağacı	0,8960	0,8964	0,9481	0,8968	0,8956	0,9602
K-En yakın Komşu	0,8944	0,8954	0,9473	0,8962	0,8949	0,9383
YSA	0,8929	0,8940	0,9466	0,8955	0,8935	**0,9933**

Tablo 7'ye göre, NasNetMobile mimarisinin son katmanından elde edilen özelliklerin DSA ile sınıflandırılması sonucunda %90,37'lik test doğruluk oranı elde edilmiştir. NasNetMobile-DSA yapısı ile bu aşamada en yüksek performans elde edilmiştir. Tablo 6'da elde edilen sonuçla karşılaştırıldığında, başka bir ifade ile NasNetMobile sınıflandırıcı olarak kullanıldığında, %88,66'lık doğruluk oranı elde edilmişti. Tablo 7'de yer alan tüm sınıflandırıcıların performansının bu orandan fazla olduğu açıkça görülmektedir. Diğer sınıflandırıcılar ile elde edilen test doğruluk oranları sırasıyla şöyledir: NasNetMobile-DVM ile %89,6, NasNetMobile- Karar Ağacı ile %89,6, NasNetMobile- K-En Yakın Komşu ile %89,44, ve NasNetMobile-YSA ile %89,29'dur.

Bu sonuçlara bakıldığında algoritmanın yüksek performans gösterdiği görülmüştür. Fakat NasNetMobile mimarisinin son katmanından elde edilen özellik sayısı her bir görüntü için 1056'dır. Eğitim için kullanılan görüntü sayısının toplamda 2576 olduğu düşünüldüğünde 1056x2576 boyutlu bir matrisin hesaplamasını ilgili algoritma ve makine yapacaktır. Her bir görüntü için önemli olan özellik sayısı 1056'dan daha az olabilir. Bu düşünce ile özellik seçim algoritmalarından mRMR kullanılmıştır. Özelliklerin önem skorlaması Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. mRMR yöntemi ile özelliklerin önem skoru.



Şekil 4. (a) AlexNet, (b) InceptionResNet, (c) Inceptionv3, (d) NasNetMobile, (e) ResNet-18, (f) ResNet-50, (g) SqueezeNet ve (h) Xception karmaşıklık matrisi.

Şekil 5 incelendiğinde özelliklerin tamamının yüksek önem derecesinde olmadığı açıkça görülmektedir. Algoritmaların hesaplama yükünü hafifletmek için özellik seçimi yapmanın Alzheimer hastalığının teşhisi için önemli olacağı düşünülmüştür. Böylece mRMR özellik seçim yönteminin işaret ettiği önemli 250 özellik deneme yanılma ile seçilmiştir. 1056'dan indirgenen özellik sayısı sonrası sınıflandırma performansları Tablo 8' de sunulmuştur. Yapılan işlemin performansını ölçmek ve adil karşılaştırma için aynı özellikteki sınıflandırıcılar kullanılmıştır.

Tablo 8. mRMR yöntemi kullanılarak seçilen özellikler ile elde edilen sınıflandırma sonuçları.

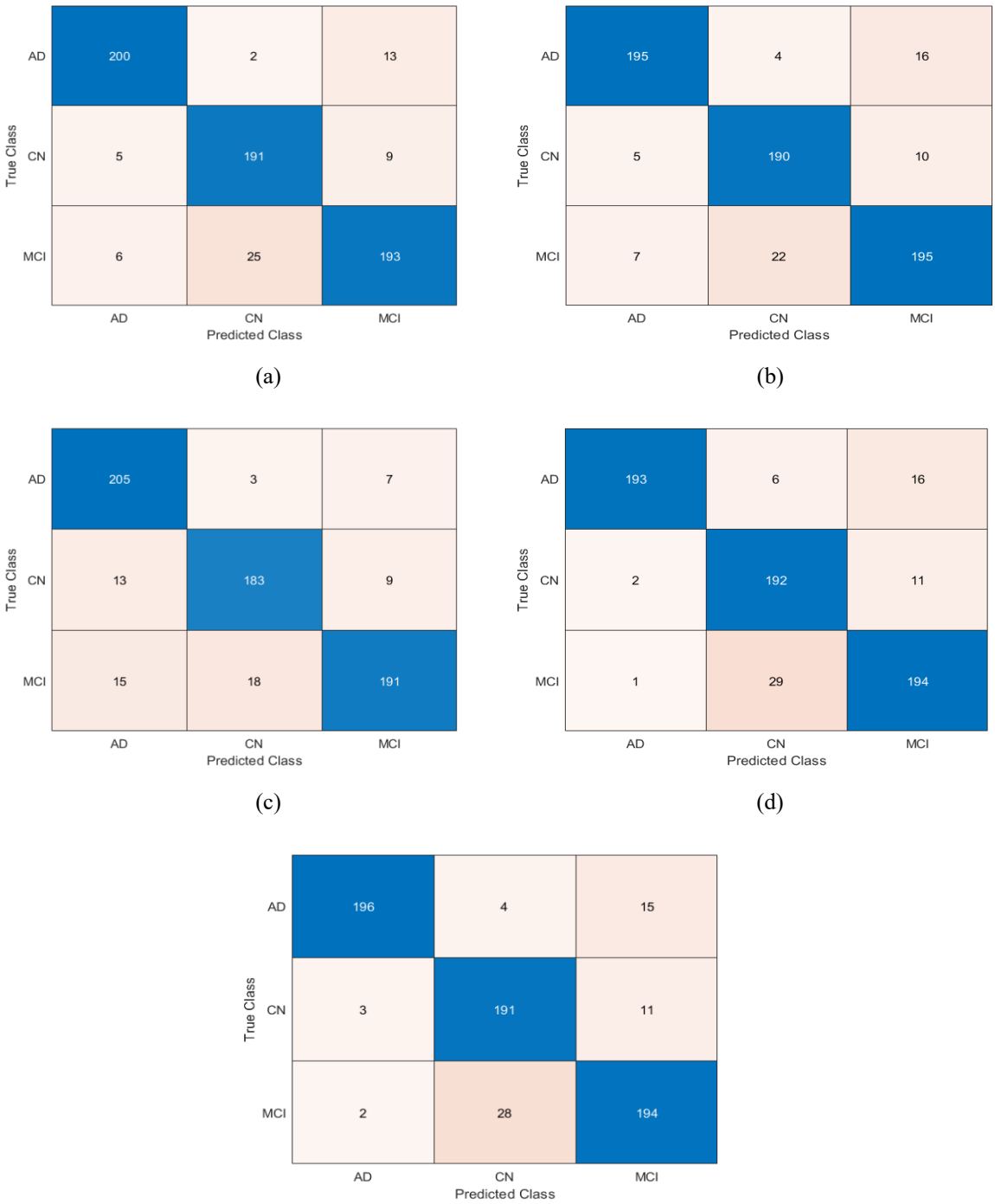
Sınıflandırıcı	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1 Skoru	AUC
DSA	**0,9068**	**0,9078**	**0,9535**	**0,9072**	**0,9071**	0,9908
DVM	0,9006	0,9014	0,9503	0,9013	0,9011	0,9894
Karar Ağacı	0,8991	0,8996	0,9496	0,8999	0,8988	0,9624
K-En yakın Komşu	0,8991	0,9001	0,9497	0,9028	0,9000	0,9453
YSA	0,9022	0,9031	0,9512	0,9045	0,9029	**0,9935**

Tablo 8 incelendiğinde, özellik seçiminin performanslara yansıdığı görülmektedir. Bir önceki aşamada artan performansın burada da yükseldiği söylenebilir. NasNetMobile-mRMR-DSA hibrit algoritmasının %90,68 ile en yüksek doğruluk oranı elde ettiği görülmüştür. Bu sonuç, tüm aşamalarda elde edilen test sonuçlarının en yükseğidir. Diğer metrikler bakımından da aynı artış söz konusudur. Tablo 8'de en yüksek değerler koyu renkle gösterilmiştir. Sonuç olarak bu hibrit algoritma ile %90,78 duyarlılık, %95,35 özgüllük, %90,72 kesinlik, %90,71 F1 skoru ve 0,9908 AUC değeri elde edilmiştir. AUC değerinin en yüksek olduğu sınıflandırıcı 0,9935 ile YSA olmuştur. DSA' nın elde ettiği AUC değeri ile en yüksek AUC değeri arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Bu sebeple bu çalışmada hemen hemen tüm metriklerde en yüksek performansı elde eden NasNetMobile-mRMR-DSA hibrit algoritması önerilmektedir. Şekil 6 hibrit algoritmaların ve önerilen hibrit algoritmanın karmaşıklık matrislerini göstermektedir. Şekil 7 de ise DSA sınıflandırıcısının kayıp (loss) grafiği sunulmuştur. Ayrıca önerilen hibrit algoritmanın sınıf bazındaki başarısı Tablo 9'da sunulmuştur.

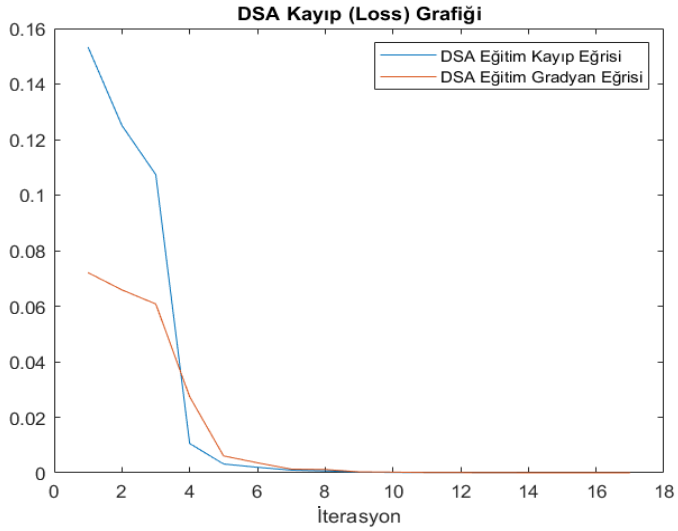
Tablo 9. NasNetMobile-mRMR-DSA algoritması ile elde edilen sınıf bazlı performans sonuçları.

Sınıf	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1 Skoru
AD	0,9302	0,9302	0,9744	0,9479	0,9390
CN	0,9317	0,9317	0,9385	0,8762	0,9031
MCI	0,8616	0,8616	0,9476	0,8977	0,8793

NasNetMobile-mRMR-DSA algoritması, Alzheimer hastalığı tespiti için yüksek doğruluk oranları elde etmiştir. AD sınıfı için %93,02 doğruluk, %93,02 duyarlılık, %97,44 özgüllük, %94,79 kesinlik ve %93,90 F1 skoru sağlanmıştır. CN sınıfı ise %93,17 doğruluk, %93,17 duyarlılık, %93,85 özgüllük, %87,62 kesinlik ve %90,31 F1 skoru ile başarılı performans sergilemiştir. MCI sınıfı ise %86,16 doğruluk, %86,16 duyarlılık, %94,76 özgüllük, %89,77 kesinlik ve %87,93 F1 skoru ile daha düşük bir performans göstermiştir. Genel olarak, algoritma üç sınıf için de yüksek performans sergileyerek güçlü bir sınıflandırma yeteneği ortaya koymuştur. Sonuç olarak, bu algoritmanın MRI görüntülerinden Alzheimer hastalığının teşhisi için kullanılabileceği söylenebilir.



Şekil 6. (a) NasNetMobile-mRMR-DSA, (b) NasNetMobile-mRMR-DVM, (c) NasNetMobile-mRMR-Karar Ağacı, (d) NasNetMobile-mRMR-K En Yakın Komşu ve (e) NasNetMobile-mRMR-YSA karmaşıklık matrisi.



Şekil 7. DSA sınıflandırıcısının kayıp grafiği.

4. Tartışma

NasNetMobile-mRMR-DSA algoritması, Alzheimer hastalığının tespitinde yüksek doğruluk oranlarıyla başarılı bir sınıflandırma performansı sergilemiştir. Bu başarının ardında, NasNetMobile modelinin derin öğrenme mimarisinin sunduğu çeşitli avantajlar bulunmaktadır. NasNetMobile, derin ağ yapısı ve mobil odaklı tasarımı sayesinde hem yüksek sınıflandırma yeteneği hem de düşük hesaplama maliyeti sağlar. Modelin global average pooling ve convolutional block yapıları, görüntüdeki önemli özellikleri etkili bir şekilde çıkarırken, başlangıçtaki katmanlarında öğrenilen temel özelliklerin, daha karmaşık yapıları tanımada nasıl kullanıldığına dikkat edilmiştir. Ayrıca, mRMR algoritması ile yapılan özellik seçimi, önemli bilgilere odaklanarak modelin karmaşıklığını azaltmış ve aşırı uyum riskini minimize etmiştir. Önerilen NasNetMobile-mRMR-DSA algoritmasının sınıflandırma performansı ile diğer son teknoloji çalışmalarının karşılaştırması Tablo 10'da sunulmuştur. Önerilen algoritma, bazı sınırlamalar olmasına rağmen üstün performans göstermiştir.

NasNetMobile'ın bu yapısal avantajları, yüksek doğruluk oranları elde edilmesine katkı sağlamıştır. Ancak, MCI sınıfındaki daha düşük performans, modelin hafif nörolojik değişiklikleri tespit etmede zorluk yaşadığını göstermektedir. Bu durum, MCI' nın Alzheimer'dan önceki aşama olması nedeniyle, benzer özelliklerin sağlıklı bireylerle (CN) karışmasının bir sonucu olabilir. Ayrıca, sınıf dengesizliği ve veri setindeki bazı görsellerin kapsayıcılığının yetersiz olması, modelin bu sınıfı doğru şekilde sınıflandırma yeteneğini sınırlamış olabilir. Bu tür yanlış sınıflandırmaların önlenmesi için daha fazla veri çeşitliliği ve sınıf dengesizliği iyileştirmeleri yapılması gerekebilir.

Tablo 10. NasNetMobile-mRMR-DSA algoritması ile son teknoloji çalışmalarının karşılaştırması.

Çalışma	**Veri Seti**	**Sınıflar**	**Kullanılan Yöntem**	**Doğruluk Oranı (%)**
Sertkaya ve Ergen [56]	ADNI	AD-CN AD-MCI MCI-CN	Görüntü Dönüştürücü (Vision Transformer, ViT)	79,8 80,3 89,3
Toshkhujaev ve diğerleri [57]	ADNI	AD-CN	DVM-RBF (radyal temelli fonksiyon, radial basis function)	90,45
Suganthe ve diğerleri [58]	ADNI+ Kaggle	AD CN MCI	Hibrit Inception-ResNet	79,12
Oh ve diğerleri [59]	ADNI	AD-MCI	ESA	90,09
Önerilen algoritma	**ADNI**	**AD CN MCI**	**NasNetMobile-mRMR-DSA**	**90,68**

5.Sonuç ve Öneriler

Alzheimer, son yılların en hızlı artan ve tedavisinin neredeyse bulunmadığı bir hastalıktır [3]. Bu hastalık için yapılabilecek en uygun yaklaşım, erken teşhis ederek hastalığın hızlanmasını önlemek olacaktır. Hastalığın erken teşhisi için genellikle beyin görüntüleme yöntemleri kullanılmaktadır. Uzmanlar görüntüler üzerinden Alzheimer hastalığının olup olmadığını, hastalık var ise hangi safhada olduğunu tespit etmektedir. Fakat bu oldukça zaman alan bir işlemdir. Bu çalışmada, yapay zekâ ile görüntüler üzerinden Alzheimer hastalığının otomatik tespit edilmesi hedeflenmiştir. Görüntülerin analiz edilmesinde son dönemlerde yaygın olarak ESA algoritmaları tercih edilmektedir. Bu çalışmada ESA olarak önceden eğitilmiş sekiz farklı mimari tercih edilmiştir. Transfer öğrenme ile daha hızlı öğrenebilen bu mimarilerde yararlanmak zaman kazandırmaktadır.

Çalışmada ESA'yı kullanan bir hibrit algoritma önerilmiştir. Fakat önerilen algoritma sadece mevcut ADNI veri setinde yer alan MR görüntüleri üzerinde eğitilmiş ve test edilmiştir. Daha fazla veri seti ve çeşitli görüntüleme tekniklerinden elde edilebilecek görüntülere çalışmada yer verilememiştir. Bunlar çalışmanın sınırları arasında yer almaktadır.

Bu çalışmanın orijinalliğini ortaya koymak için yapılandırılmamış ADNI veri setinden yararlanılmıştır. Bu veri setinde bulunan üç sınıf: AD, CN, MCI bulunmaktadır. Bu çalışmada herhangi bir ön işlem yönteminden yararlanılmamıştır. Veri seti eğitim ve test olarak bölünmüştür. Eğitim aşamasında 5-katlı çapraz doğrulama uygulanmış ve sonuçlar Tablo 5'te sunulmuştur. Bu aşamada %99'un üzerinde doğruluk performansı elde edilmiştir. Eğitilen mimarinin test sınıflandırma sonucunda %88,66'lık doğruluk oranı NasNetMobile mimarisi ile elde edilmiştir. Daha iyi performans elde etmek için hibrit bir algoritma geliştirilmiştir. Burada NasNetMobile mimarisi özellik çıkarıcı olarak kullanılmıştır. Bu mimarinin son katmanından elde edilen özellikler mRMR yöntemi ile indirgenmiştir. Sınıflandırıcılar olarak DSA, DVM, Karar Ağacı, K-En Yakın Komşu ve YSA tercih edilmiş ve indirgenen özellikler bu sınıflandırıcılar ile sınıflandırılmıştır. Performans sonuçları Tablo 8'de sunulmuş ve karmaşıklık matrislerine Şekil 6'da yer verilmiştir. Tüm sonuçlarda Alzheimer hastalığının MRI görüntülerden tespitinde en yüksek test performansı elde eden %90,68 doğruluk oranı ile NasNetMobile-mRMR-DSA hibrit algoritması olmuştur. Bu sayede uzman görüşüne ihtiyaç duyulmaksızın özellikler elde edilmiş ve daha sonra elde edilen bu özellikler güçlü mRMR yöntemi indirgenerek sınıflandırma başarısının artırılması gerçekleştirilmiştir.

Gelecek çalışmalarda, hiperparametre optimizasyonu ve ızgara araması (grid search) yöntemi kullanılması ile en az hatayla otomatik özellik seçimi yapabilen bir hibrit algoritma tasarlanması hedeflenmektedir. Böylece kullanıcı seçimine veya deneme yanılmaya gerek duyulmadan anlamlı özellikler görüntülerden tespit edilebilecektir.

Sonuç olarak bu çalışma ile yapay zekâ algoritmaları kullanılarak yüksek başarı performansı ile Alzheimer hastalığının görüntülerden tespit edilebildiği gösterilmiştir. Böylece birçok araştırmacıya bu çalışmanın ışık tutacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı 2022 yılı 2. dönem kapsamında 1919B012222024 numaralı proje ile desteklenmiştir. Yazarlar, bu destek için TÜBİTAK kurumuna teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

[1] Aydın S, Taşyürek M, Öztürk C. MR Görüntüleri Ön İşlenerek Derin Ağlar ile Alzheimer Hastalık Tespiti. In: International Conference On Emerging Sources In Science, 2022.

[2] Brun A, Liu X, Erikson C. Synapse loss and gliosis in the molecular layer of the cerebral cortex in Alzheimer's disease and in frontal lobe degeneration. Neurodegeneration 1995; 4(2): 171-177.

[3] Wang S, Kong X, Chen Z, Wang G, Zhang J, Wang J. Role of Natural Compounds and Target Enzymes in the Treatment of Alzheimer's Disease. Molecules 2022; 27(13): 4175.

[4] Noetzli M, Eap CB. Pharmacodynamic, pharmacokinetic and pharmacogenetic aspects of drugs used in the treatment of Alzheimer's disease. Clin Pharmacokinet 2013; 52(4): 225-241.

[5] Armstrong RA. What causes Alzheimer's disease?. Folia Neuropathol 2013; 51(3): 169-188.

[6] Gaugler J, James TB, Reimer J, Weuve J. Alzheimer's Association. 2021 Alzheimer's Disease Facts and Figures. Alzheimers Dement 2021; 17: Chicago, IL, USA.

[7] Subasi A, Subasi TN, Ozaltin O. Artificial intelligence in diagnosis of neural disorders using biosignals and imaging. In: Advances in Artificial Intelligence: Elsevier, 2024; 523-560.

[8] Bagcı U, Bai L. Manyetik Rezonans Beyin Imgelerinden Alzheimer Hastalığı Tanısında Gabor Dalgacıkları Kullanımı Detecting Alzheimer Disease in Magnetic Resonance Brain Images Using Gabor Wavelets.
[9] Yin C, Li S, Zhao W, Feng J. Brain imaging of mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. Neural Regen Res 2013; 8(5): 435-444.
[10] Öziç MÜ, Özşen S. 3B Alzheimer MR Görüntülerinin Hacimsel Kayıp Bölgelerindeki Voksel Değerleri Kullanılarak Sınıflandırılması. El-Cezerî J Sci Eng 2020; 7(3): 1152-1166.
[11] Türk Ö. MR Görüntülerinden Alzheimer Tespitinde Boyut Azaltma ve Derin Öğrenme Yaklaşımlarının Karşılaştırılması. Dicle Univ J Eng 2022; 13(3): 485-491.
[12] Aslan Z. EEG Sinyallerini Kullanarak Alzheimer Hastalığının Otomatik Tespiti İçin Bilgisayar Destekli Tanı Sistemi. Dicle Univ J Eng 2022; 13(2): 213-220.
[13] Karabay GS, Çavaş M. Derin Öğrenme Yöntemiyle Alzheimer Hastalığının Tespiti. Fırat Univ J Eng Sci 2022; 34(2): 879-887.
[14] Özkaya A, Cebeci U. A Model Suggestion For Alzheimer's Disease Diagnosis By Using Deep Learning. Eur J Sci Technol 2022; (37): 123-130.
[15] Sadık EŞ. Comparison Of Machine Learning Algorithms In The Detection Of Alzheimer's Disease. Eur J Sci Technol 2022; (42): 1-5.
[16] Karakaya F, Gurkan C, Budak A, Karataş H. Classification and Segmentation of Alzheimer Disease in MRI Modality using the Deep Convolutional Neural Networks. Eur J Sci Technol 2022; (40): 99-105.
[17] Eren HA, Okyay S, Adar N. Adoken: MR İçin Derin Öğrenme Tabanlı Karar Destek Yazılımı. J Eng Sci Design 2021; 9(2): 406-413.
[18] Okyay S. Beyin Görüntüleme Tekniklerinin Alzheimer Hastalığı Erken Tanı Tahmininde Kullanılması. Anadolu Univ, 2016.
[19] Sertkaya ME, Ergen B. Alzheimer Hastalığının Erken Teşhisinin Çoklu Değişken Kullanarak Tespiti. Eur J Sci Technol 2022; (35): 306-314.
[20] Bhardwaj S, Kaushik T, Bisht M, Gupta P, Mundra S. Detection of Alzheimer Disease Using Machine Learning. In: Smart Systems: Innovations in Computing: Springer, 2022; 443-450.
[21] Mathew NA, Vivek R, Anurenjan P. Early diagnosis of Alzheimer's disease from MRI images using PNN. In: 2018 Int CET Conf Control Commun Comput:IEEE, 2018; 161-164.
[22] Shanmugam JV, Duraisamy B, Simon BC, Bhaskaran P. Alzheimer's disease classification using pre-trained deep networks. Biomed Signal Process Control 2022; 71: 103217.
[23] Loddo A, Buttau S, Di Ruberto C. Deep learning based pipelines for Alzheimer's disease diagnosis: a comparative study and a novel deep-ensemble method. Comput Biol Med 2022; 141: 105032.
[24] Helaly HA, Badawy M, Haikal AY. Deep learning approach for early detection of Alzheimer's disease. Cogn Comput 2022; 14(5): 1711-1727.
[25] Arslan NN, Ozdemir D. Analysis of CNN models in classifying Alzheimer's stages: comparison and explainability examination of the proposed separable convolution-based neural network and transfer learning models. Signal Image Video Process 2024; 1-15.
[26] Tüzün BN, Özdemir D. Classification of Brain Tumors With Deep Learning Models. J Sci Rep-A 2023; (054): 296-306.
[27] Dörterler S, Dumlu H, Özdemir D, Temurtaş H. Hybridization of Meta-heuristic Algorithms with K-Means for Clustering Analysis: Case of Medical Datasets. Gazi J Eng Sci 2024; 10(1).
[28] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. Adv Neur Inf Proc Syst 2012; 25: 1097-1105.
[29] Szegedy C, Ioffe S, Vanhoucke V, Alemi A. Inception-v4, inception-resnet and the impact of residual connections on learning. In: Proc AAAI Conf Art Intell 2017; 31(1).
[30] He K, Zhang X, Ren S, Sun J. Deep residual learning for image recognition. In: Proc IEEE Conf Comp Vis Pat Rec 2016; 770-778.
[31] Peng S, Huang H, Chen W, Zhang L, Fang W. More trainable inception-ResNet for face recognition. Neurocomputing 2020; 411: 9-19.
[32] Szegedy C, Vanhoucke V, Ioffe S, Shlens J, Wojna Z. Rethinking the inception architecture for computer vision. In: Proc IEEE Conf Comp Vis Pat Rec 2016; 2818-2826.
[33] Szegedy C ve diğerleri. Going deeper with convolutions. In: Proc IEEE Conf Comp Vis Pat Rec 2015; 1-9.
[34] Zoph B, Vasudevan V, Shlens J, Le QV. Learning transferable architectures for scalable image recognition. In: Proc IEEE Conf Comp Vis Pat Rec 2018; 8697-8710.
[35] Addagarla SK, Chakravarthi GK, Anitha P. Real time multi-scale facial mask detection and classification using deep transfer learning techniques. Int J 2020; 9(4): 4402-4408.
[36] Iandola FN, Han S, Moskewicz MW, Ashraf K, Dally WJ, Keutzer K. SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and< 0.5 MB model size. arXiv preprint arXiv:1602.07360, 2016.
[37] Chollet F. Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions. In: Proc IEEE Conf Comp Vis Pat Rec 2017; 1251-1258.
[38] Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks. Mach Learn 1995; 20(3): 273-297.
[39] Jiang H. Machine Learning Fundamentals: A Concise Introduction. Cambridge Univ Press
[40] Quinlan JR. C4. 5: Programs for Machine Learning. Elsevier, 2014.

[41] Subasi A, Balfaqih M, Balfagih Z, Alfawwaz K. A Comparative Evaluation of Ensemble Classifiers for Malicious Webpage Detection. Procedia Computer Science 2021; 194: 272-279.
[42] Albayrak AS, Yilmaz SK. Veri Madenciliği: Karar Ağacı Algoritmaları ve İMKB Verileri Üzerine Bir Uygulama. Suleyman Demirel Univ J Fac Econ Adm Sci 2009; 14(1).
[43] Özaltın Ö. Biyomedikal Görüntülerin Sınıflandırılması İçin Yeni Bir Evrişimli Sinir Ağı Mimarisi. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2023.
[44] Keller JM, Gray MR, Givens JA. A fuzzy k-nearest neighbor algorithm. IEEE Trans Syst Man Cybern 1985; (4): 580-585.
[45] Cover T, Hart P. Nearest neighbor pattern classification. IEEE Trans Inf Theory 1967; 13(1): 21-27.
[46] McCulloch WS, Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bull Math Biophys 1943; 5: 115-133.
[47] Dolatabadi M, Zakariazadeh A, Borghetti A, Siano P. Distributed energy and reserve scheduling in local energy communities using L-BFGS optimization. CSEE J Power Energy Syst 2024.
[48] Eroglu Y, Yildirim M, Cinar A. mRMR-based hybrid convolutional neural network model for classification of Alzheimer's disease on brain magnetic resonance images. Int J Imaging Syst Technol 2022; 32(2): 517-527.
[49] Ozaltin O, Coskun O, Yeniay O, Subasi A. A deep learning approach for detecting stroke from brain CT images using OzNet. Bioengineering 2022; 9(12): 783.
[50] Li BQ, Zheng LL, Feng KY, Hu LL, Huang GH, Chen L. Prediction of linear B-cell epitopes with mRMR feature selection and analysis. Curr Bioinform 2016; 11(1): 22-31.
[51] Girgin ABA, Şahin S. Improving the Performance of Sentiment Analysis by Ensemble Hybrid Learning Algorithm With NLP And Cascaded Feature Extraction. Int J Adv Eng Pure Sci 2023; 35(1): 125-141.
[52] Narin A. Detection of Focal and Non-focal Epileptic Seizure Using Continuous Wavelet Transform-Based Scalogram Images and Pre-trained Deep Neural Networks. IRBM 2020.
[53] Xu X, Liu H. ECG heartbeat classification using convolutional neural networks. IEEE Access 2020; 8: 8614-8619.
[54] Fawcett T. An introduction to ROC analysis. Pattern Recognit Lett 2006; 27(8): 861-874.
[55] Başer BÖ, Yangın M, Sarıdaş ES. Makine öğrenmesi teknikleriyle diyabet hastalığının sınıflandırılması. Süleyman Demirel Univ J Sci Inst 2021; 25(1): 112-120.
[56] Sertkaya ME, Ergen B. Alzheimer Hastalığının Teşhisinde Görüntü Dönüştürücü (Vision Transformer) Yaklaşımı: Yenilikçi Bir İnceleme. Fırat Univ J Eng Sci 2024; 36(2): 609-619.
[57] Toshkhujaev S, Lee KH, Choi KY, Lee JJ, Kwon GR, Gupta Y, Lama RK. Classification of Alzheimer's disease and mild cognitive impairment based on cortical and subcortical features from MRI T1 brain images utilizing four different types of datasets. J Healthc Eng 2020; 2020(1): 3743171.
[58] Suganthe R, Geetha M, Sreekanth G, Gowtham K, Deepakkumar S, Elango R. Multiclass classification of Alzheimer's disease using hybrid deep convolutional neural network. NVEO Nat Volat Essent Oils J 2021; 145-153.
[59] Oh K, Chung YC, Kim KW, Kim WS, Oh IS. Classification and visualization of Alzheimer's disease using volumetric convolutional neural network and transfer learning. Sci Rep 2019; 9(1): 18150.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 341-350, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1557122

Deep Analysis of Patella caerulea Calcined Shells for Microwave Applications

Erkan UĞURLU[1], Muharrem KARAASLAN[2], Fatih Özkan ALKURT[2*], Kerim Emre ÖKSÜZ[3], Önder DUYSAK[4]

[1]Faculty of Science and Letters, Chemistry Department, Çukurova University, Adana, Türkiye
[2]Electrical and Electronics Eng. Iskenderun Technical University, Iskenderun, Hatay, Türkiye
[3]Sivas Cumhuriyet University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Sivas, Türkiye
[5]Faculty of Marine Science and Technology, Iskenderun Technical University, Iskenderun, Hatay, Türkiye
[1]erkn.ugurlu@yahoo.com, [2]muharrem.karaaslan@iste.edu.tr, [*3]fozkan.alkurt@iste.edu.tr,
[4]emre.oksuz@cumhuriyet.edu.tr, [5]onder.duysak@iste.edu.tr

(Geliş/Received: 27/09/2024; Kabul/Accepted: 12/03/2025)

Abstract: This study investigates the potential application of Patella caerulea shells collected from the Iskenderun Bay as biomaterial in microwave radomes and examines the dielectric properties of shells calcined at 600-1200 °C. At the central frequency of 10 GHz, the real permittivity values for P600, P800, P1000 and P1200 are 3.2, 2.3, 2.4 and 2.5, respectively. The corresponding imaginary parts at 10 GHz are 0.82, 0.44, 0.52 and 0.56, reflecting temperature-dependent variations. The loss factor of shells, particularly at 2.5 GHz, indicates their potential for low-loss applications in communication, such as microwave laminate and radome applications. Moreover, these materials have been integrated to a traditional patch antenna to show feasibility in a microwave system as a substrate layer. At temperatures exceeding 800 °C, slight increase in the CaO peaks was observed in X-ray diffraction spectrum. The thermal gravimetric analysis and differential thermal analysis of shell powder reveal weight loss occurring in two distinct stages and minor endothermic peaks at 125°C and 275°C. The study highlights that microwave antenna radome materials are promising due to their high impedance matching and low-loss properties. This research contributes to the exploration of marine-sourced materials for economic and ecological benefits in the field of microwave technology.

Key words: Dielectric, Marine materials, Characterization, Microwave, Limpets.

Patella caerulea Kalsine Kabuklarının Mikrodalga Uygulamaları İçin Derinlemesine Analizi

Öz: Bu çalışma, İskenderun Körfezi'nden toplanan Patella Caerulea kabuklarının mikrodalga radomelarında biyomalzeme olarak potansiyel uygulamasını araştırmakta ve 600-1200 °C'de kalsine edilmiş kabukların dielektrik özelliklerini incelemektedir. 10 GHz'lik merkezi frekansta, P600, P800, P1000 ve P1200 için reel dielektrik geçirgenlik değerleri sırasıyla 3,2, 2,3, 2,4 ve 2,5'tir. 10 GHz'de karşılık gelen sanal değerleri, sıcaklığa bağlı değişimleri yansıtan 0,82, 0,44, 0,52 ve 0,56'dır. Kabukların, özellikle 2,5 GHz'deki kayıp faktörü, mikrodalga laminat ve radome uygulamaları gibi iletişimde düşük kayıplı uygulamalar için potansiyellerini göstermektedir. Ayrıca, bu malzemeler bir mikrodalga sistemde alt tabaka olarak uygulanabilirliğini göstermek için geleneksel bir yama antene entegre edilmiştir. Bununla birlikte, 800 °C'yi aşan sıcaklıklarda X-ışını kırınım spektrumunda CaO tepelerinde hafif bir artış gözlemlenmiştir. Kabuk tozunun termal gravimetrik analizi ve diferansiyel termal analizi, iki ayrı aşamada oluşan ağırlık kaybını ve 125 °C ve 275 °C'de küçük endotermik tepeleri ortaya koymaktadır. Çalışma, mikrodalga anten radom malzemelerinin yüksek empedans uyumu ve düşük kayıp özellikleri nedeniyle umut verici olduğunu vurgulamaktadır. Bu araştırma, mikrodalga teknolojisi alanında ekonomik ve ekolojik faydalar için deniz kaynaklı malzemelerin keşfine katkıda bulunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Dielektrik, deniz malzemeleri, karakterizasyon, mikrodalga, deniz salyangozları.

1. Introduction

Limpets of the genus Patella are gastropods that graze in rocky areas in the middle and upper-lower coastal regions of the Atlantic and Mediterranean coasts in temperate regions [1]. It has an important role in the ecological and biological control of algae, that is the species distributed in coastal areas [2,3]. They are known as keystone species in the mid-littoral point of the coastal regions and are rarely consumed by humans and used as fish food [4]. Limpets are species that increase or decrease the amount of macroalgae species and the availability of other marine organisms. It also has an important position as the species that forms and regulates the ecological balance of tidal communities [2,5,6]. In the Mediterranean region, the Patella genus has four different species. These are

* Sorumlu yazar: fozkan.alkurt@iste.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1]0000-0001-8940-8421, [2]0000-0003-0923-1959, [2]0000-0002-9940-0658, [3]0000-0001-7424-5930, [4]0000-0002-7484-3102

P. caerulea, *P. ulyssiponensis, P. rustica* and *P. ferruginea*. *P. caerulea* which is known as a native Mediterranean limpet (Linnaeus, 1758) is found on cliffs or between rocky areas in the infralittoral and midlittoral regions of the Mediterranean coast [7]. It is considered as an endemic (native) species in the Mediterranean region [8–10].

There are many studies on the biology, distribution, ecology, population characteristics, chitin and chitosan production and availability of Patella species in the Eastern Mediterranean coast [11–18]. In the literature, a study was found in which the shells of invasive sea urchin were investigated using radome technology [19]. Radome technology studies need to be focused on marine-based animals, and these materials which are currently found in nature as waste, and especially those that do not have economic importance, need to be brought into the economy. In this way, both ecological and economic benefits will be provided. Especially in recent years, studies have been carried out on the integration of marine origin materials into different multidisciplinary fields. The most important features of marine-sourced materials are that they are non-toxic, biodegradable and compatible [20].

Furthermore, a "radome" is a structure that protects a radar system or other sensitive electronic equipment from the environment while allowing the electromagnetic signals to pass through with low reduction and scattering [21]. The term "radome" is the combination of the term "radar" and "dome" that is aimed to be transparent to the frequencies used by the radar system. There are many aspects of the radome theory. For example, it protects radar antennas and other sensitive equipment from environmental factors such as rain, wind, snow, and temperature extremes. They also shield against physical damage and corrosive elements, helping to extend the lifespan of the radar system. Moreover, they are designed to be transparent to the radio frequency signals used by radar systems. This allows the radar beams to pass through the radome without significant distortion, ensuring that the performance of the radar system is not compromised. Radome structures can be used in many applications such as military radars [22], weather radar [23], air traffic control radar [24] and satellite communications [25]. Finally, radomes are essential for upholding the effectiveness and dependability of radar systems, serving as safeguarding and transparent enclosures for sensitive electronic components.

This study is the first to explore the potential of Mediterranean limpet *Patella caerulea* shells, abundantly found along the Turkish coasts, as a biomaterial for microwave applications, particularly in radome structures. Unlike previous research, which has not investigated the applicability of *P. caerulea* seashells in microwave systems, this study provides a comprehensive analysis of their dielectric properties after calcination at different temperatures. The constitutive parameters of the calcined shells were extracted through microwave measurements, offering valuable insights into their feasibility for electromagnetic applications. To further demonstrate their practical implementation, a traditional patch antenna was designed and numerically analyzed with the proposed biomaterial integration. Additionally, an extensive characterization process was conducted, including morphological analysis via Scanning Electron Microscopy (SEM), crystallographic investigation using X-ray diffraction (XRD), and thermal stability assessment through Thermogravimetric Analysis (TGA) and Derivative Thermogravimetry (DTG). This multidisciplinary approach underscores the innovative use of *P. caerulea* shells as a sustainable and effective material in microwave engineering, filling a significant gap in the literature.

2. Preparation of Samples

Patella caerulea used in the invention of biomaterials has been collected from the Iskenderun Bay. All soft tissues were removed. Then, the shell thoroughly washed with tap water and then with bidistilled water and dried in an oven at 50 °C for 24 h (Fig. 1). The dried biomaterials were ground and sieved with the help of a grinder (Fig. 2).

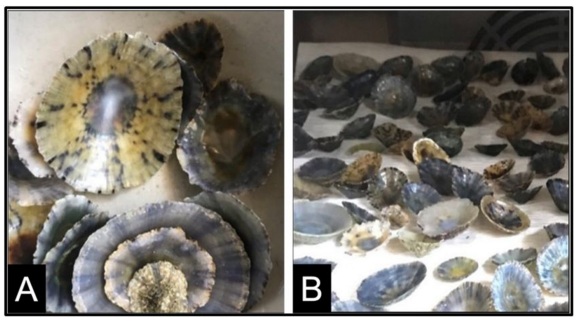


Figure 1. *P. caerulea* shells: A) washed distilled water and B) dried in oven.

A method by Park et al. [26] was modified to calcine dried shell powders at four different temperatures (600, 800, 1000 and 1200 °C) in a 1200 °C muffle furnace (Protherm-Furnaces) for 1 hour, with a heating rate of 5 °C/min. The calcined materials were left to dry in the desiccator. Immediately afterwards, the shell powder biomaterial was labeled as P600, P800, P1000 and P1200. It was kept in closed falcon tubes to be used in experiments to measure electromagnetic properties in microwave analysis. After these processes, microwave analysis has been started.

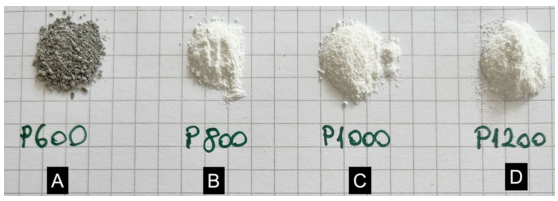


Figure 2. Images of calcined *P. caerulea* powder shells at different temperatures: A) 600 °C, B) 800 °C, C) 1000 °C and D) 1200 °C.

3. Sample Characterization

X-ray diffraction (XRD) analysis was performed to determine the mineral composition of the calcined *P. caerulea* shells. XRD analysis was carried out using an X-ray diffractometer [Malvern Panalytical EMPYREAN 3rd Generation Analytical (UK)] equipped with Ni-filtered Cu-Kα radiation operating at 40 kV and 30 mA. The data were collected over a 2θ range from 5° to 90°, with intervals of 0.02° and a counting time of 1 second per step. The measurements were conducted at the Central Laboratory of Iskenderun Technical University. The surface morphology and microstructures of the calcined shell powder samples were examined using Scanning Electron Microscopy (SEM, JEOL JSM-6380LA) operating at 10 kV. Prior to imaging, the samples were coated with a gold-palladium (Au-Pd) alloy using the POLARON SC7620 sputter coater to enhance their conductivity and improve image quality. Thermogravimetric analysis (TGA) and derivative thermogravimetry (DTG) are crucial for assessing the thermal properties, stability, and composition of shell samples. These analyses enable researchers and industry professionals to make informed decisions about material thermal properties and thermal performance. To examine the thermal and degradation profiles of the collected and prepared shell samples, TGA/DTG was conducted using a DTG 60 series TG/DTA thermal analyzer (Shimadzu, Japan). The samples were scanned at a rate of 10 °C per minute in an air atmosphere, covering a temperature range from 50 °C to 1000 °C. Measurements were taken in triplicate using a sample mass of 4 mg [27].

4. Microwave Analysis

Microwave laboratory analysis was conducted on meticulously prepared shell powder samples, wherein the complex permittivity parameters for each sample were determined by utilizing a dielectric probe kit and an Agilent PNLA Vector Network Analyzer (VNA), as illustrated in Fig. 3A by using open ended coaxial prob method. The investigation into the potential microwave applications of these samples spanned a broadband frequency range from 1 GHz to 20 GHz and all measurements have been carried out in room temperature. Despite the availability of various techniques for determining the relative permittivity, the open-ended coaxial probe method was specifically chosen due to the powdered form of the samples. The complex dielectric parameter of a material is expressed in terms of the relative permittivity in Eq. (1) [28];

$$\varepsilon = \frac{P}{\varepsilon_0 E} + 1 \tag{1}$$

where P is the polarization with respect to the electrical field strength and E of an external electric field. The relative complex dielectric constant of the sample was calculated according to Eq. (2) [29];

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{2}$$

The loss tangent is determined according to Eq. (3) [29];

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3)$$

Prior to conducting measurements, a calibration procedure was meticulously executed to mitigate losses, minimize noise, and alleviate potential interferences arising from laboratory conditions. The measurement frequency range was strategically set between 1 GHz and 20 GHz, encompassing the maximum dielectric parameter band of the utilized Vector Network Analyzer (VNA). The dielectric probe kit is conducted to a three-fold calibration process. Initially, the probe kit was tested under an open-ended line, measuring air at room temperature (Fig. 3B). Subsequently, a shorting block was affixed to the end of the probe line, inducing a short circuit effect on the primary microwave line (Fig. 3C). Finally, the probe line was connected to a clean water tube under room temperature conditions, serving as a reference sample for calibration (Fig. 3D). Notably, the dielectric characteristics of water and air, being well-established, facilitated the use of measured values from these samples to verify the calibration accuracy.

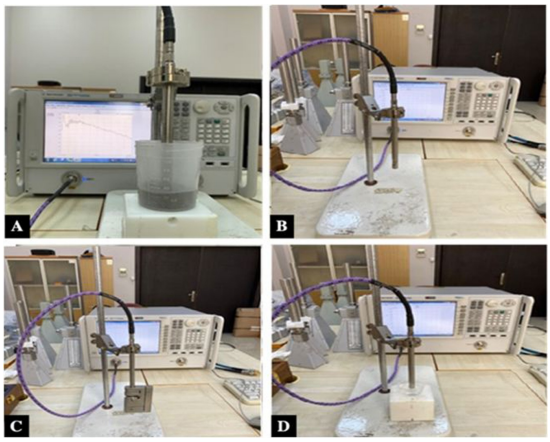


Figure 3. (A) Complex dielectric parameter measurement setup for 1 GHz-20 GHz band, (B) Calibration with respect to air, (C) known load and (D) pure water.

5. Scanning Electron Microscopy (SEM) Analysis

Shell samples of *P. caerulea* were collected from rocks along the shores of the İskenderun Bay. These samples were subsequently cleaned, ground, and calcined at temperatures ranging from 600°C to 1200°C. Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis was conducted on the calcined shell powders, as shown in Fig. 4. Morphological changes in the *P. caerulea* shell powder were observed at four different calcination temperatures using SEM. To provide a more comprehensive understanding of the morphological structures, SEM photos were captured at various magnifications.

The SEM photo of the sample obtained from *P. caerulea* shell powders calcined at 600°C reveals a broader view of the shell's surface, displaying a rough and porous texture indicative of insufficient thermal decomposition and phase changes due to the low calcination temperature (Figs. 4A and 5B). The image taken at higher magnification shows more distinct grain boundaries in the microstructure. The photograph taken at the lowest temperature shows a highly irregular spherical/layered porous surface. However, it should be noted that the calcination temperature of 600°C is insufficient to achieve complete thermal decomposition of the *P. caerulea* shells material. Higher temperatures are required to fully transform the material and achieve more uniform microstructural changes. The microstructure of the powders showed larger particles of irregular shape and non-uniform size distribution, which could be related to the unreacted $CaCO_3$. The microstructures of powders calcined at 800°C show irregularly shaped, clustered structures like those at 600°C, but with a higher degree of thermal decomposition compared to 600°C (Figs. 4C-D). The rough and porous texture is observed at all calcination temperatures, as identified from the SEM images. It was also observed that laminated CaO crystals formed within the structure as the calcination temperature increased.

In contrast, the surfaces of the calcined *P. caerulea* shells, as observed in Figs. 4E-6F, exhibited a fluffy-like structure. It was noted that at temperatures above 600°C, all traces of organic macromolecules such as proteins and polysaccharides in the shell powder disappeared completely, leaving the structure devoid of these components. As the calcination temperature increased, the release of CO_2 gas during the conversion from calcium carbonate to CaO led to significant pore formation within the structure. SEM photographs at temperatures of 1000°C and above indicated the absence of the $CaCO_3$ phase in the crystal structure post-calcination (Figs. 4E and F), confirming its complete transformation into a single phase (CaO), which was further corroborated by XRD analyses. Significant differences between CaO powders and $CaCO_3$ powders were observed. Specifically, in *P. caerulea* shell powders subjected to calcination at 1000 and 1200 °C, the structure underwent a complete transformation into crystalline CaO, distinguishing it from samples processed at other temperatures (Figs. 4E-H).

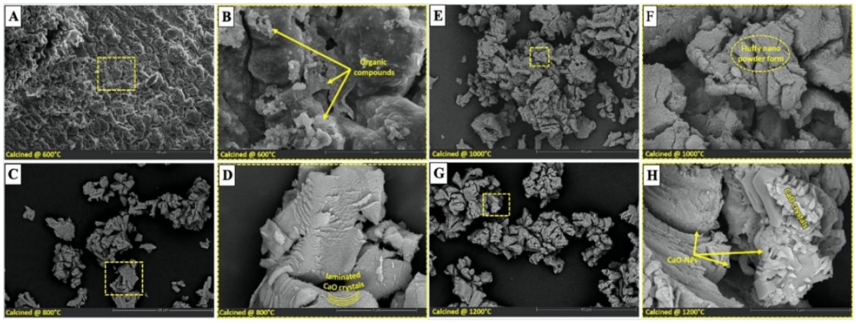


Figure 4. Surface morphology and microstructure of *P. caerulea* powder samples calcined at A-B) 600°C, C-D) 800°C, E-F) 1000°C and G-H) 1200°C.

6. Thermal Properties of *P. caerulea* Shell Powder

Equation [4] illustrates the thermal decomposition of calcium carbonate ($CaCO_3$) present in the *P. caerulea* shell, a process commonly referred to as calcination. This reaction involves the breakdown of $CaCO_3$ into calcium oxide (CaO) and carbon dioxide (CO_2) when subjected to high temperatures (Eq. 4).

$$CaCO_3(s) \rightarrow CaO(s) + CO_2(g) \quad (4)$$

Lime, an inorganic material, primarily consists of calcium oxide or calcium hydroxide compounds. Limestone, which is mainly composed of calcite, is the most prevalent carbonate rock from which calcite lime is derived [30,31]. Thermal gravimetric analysis (TGA) of *P. caerulea* shell powder (Fig. 5 - black line) reveals weight loss occurring in two distinct stages. Initially, thermal stability is maintained up to 655°C. Beyond this point, a significant mass loss (43.5 %) is observed between 655°C and 950°C, primarily attributable to the release of CO_2, consistent with the behavior expected of $CaCO_3$-based materials.

Differential thermal analysis (DTA) of the *P. caerulea* shell powder (Fig. 5 - blue line) shows minor endothermic peaks at 125°C and 275°C. The first peak likely corresponds to the evaporation of residual absorbed moisture, while the second peak is attributed to the release of organic matter residues absorbed within the *P. caerulea* sample.

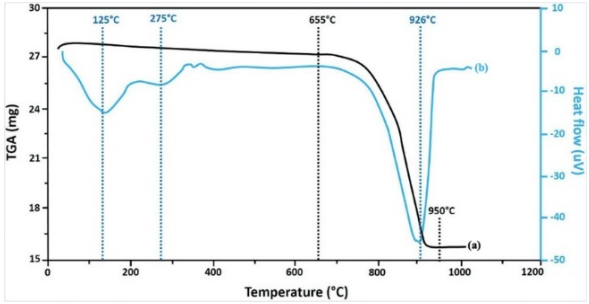


Figure 5. Thermal analysis curves of *P. caerulea* samples. (a) Gravimetric thermal analysis (TGA), (b) Differential thermal analysis (DTA).

7. X-ray diffraction (XRD) Analysis

X-ray diffraction (XRD) analysis was conducted to identify the mineral species of the calcined *P. caerulea* shells using an X-ray diffractometer [Malvern Panalytical EMPYREAN 3rd Generation Analytical (UK)] with Ni-filtered Cu-Kα radiation at 40 kV and 30 mA. The crystal structures and phases of calcined *P. caerulea* powders at various temperatures (600°C to 1200°C) were analyzed using XRD and are presented in Fig. 6. Powders calcined at 600°C exhibited four main characteristic peaks at diffraction angles (2θ°) of approximately 29.49°, 35.98°, 43.16°, and 47.11°, with corresponding Miller indices of (1 0 4), (1 1 0), (2 0 2), and (0 2 4), respectively. These peaks indicate the presence of $CaCO_3$ crystallized in the hexagonal calcite phase, as identified using PDF card number 47-1743. This finding is consistent with previous literature, such as the study by Soisuwan (2014), which identified the calcite ($CaCO_3$) crystalline structure in oyster shells through XRD analysis. Similarly, Park et al. [33] reported that oyster shells calcined at lower temperatures exhibited a hexagonal crystal structure.

At temperatures exceeding 600°C, the XRD patterns of the calcined *P. caerulea* powders displayed a similar trend. The highest intensity peaks were observed at diffraction angles (2θ°) of approximately 32.25°, 37.45°, 53.85°, and 64.15°, with corresponding Miller indices of (1 1 1), (2 0 0), (2 2 0) and (3 1 1). These peaks indicate the presence of a cubic calcium oxide (CaO) structure, as identified using PDF card number 48-1467. This analysis indicates that the primary component of *P. caerulea* shells calcined at 600°C was calcium carbonate ($CaCO_3$), whereas shells calcined at higher temperatures predominantly consisted of calcium oxide (CaO). In other words, the heat treatment at 600°C did not fully convert the $CaCO_3$ in *P. caerulea* shells into CaO. Conversely, heat treatments at 800°C, 1000°C, and 1200°C effectively transformed $CaCO_3$ into CaO. Additionally, it was observed that at calcination temperatures above 800°C, there was a small increase in the intensity of CaO peaks in the XRD spectra (Fig. 6).

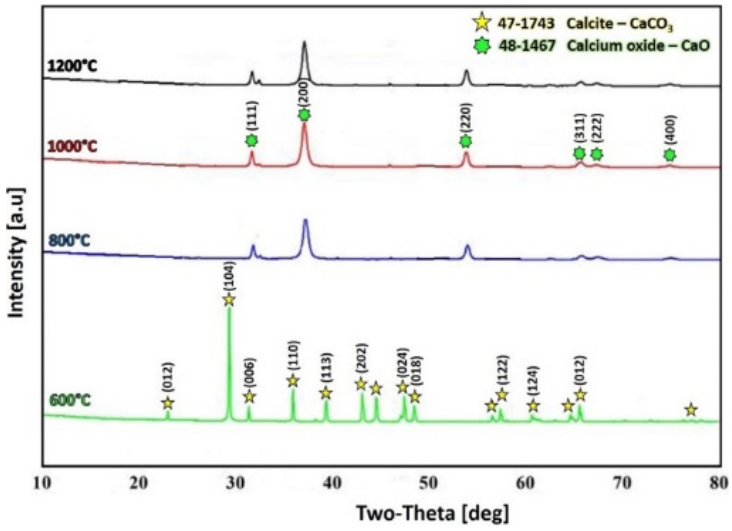


Figure 6. XRD spectra of calcined *P. caerulea* shell at different calcination temperatures.

8. Microwave radome applications

The objective is to promote the utilization of *P. caerulea* shells gathered from the Iskenderun shores across various domains. An exploration was undertaken to assess the viability of employing *P. caerulea* shells in microwave radome applications, involving their incineration at different temperatures. The study delved into the complex dielectric parameters of biomaterials derived from marine shells within the frequency range of 1 to 20 GHz, employing the open-ended coaxial probe method.

In Fig. 7, the measured values of real and imaginary components of diverse shell samples are depicted. Specifically, at the central frequency of 10 GHz, the real permittivity values for P600, P800, P1000 and P1200 are 3.2, 2.3, 2.4 and 2.5, respectively. Correspondingly, the imaginary parts for the same samples at 10 GHz are 0.82, 0.44, 0.52 and 0.56, reflecting variations attributable to the diverse heating temperatures applied. It is noteworthy that air exhibits an anticipated pattern with values of 1 for the real part and 0 for the imaginary part of the complex permittivity μ.

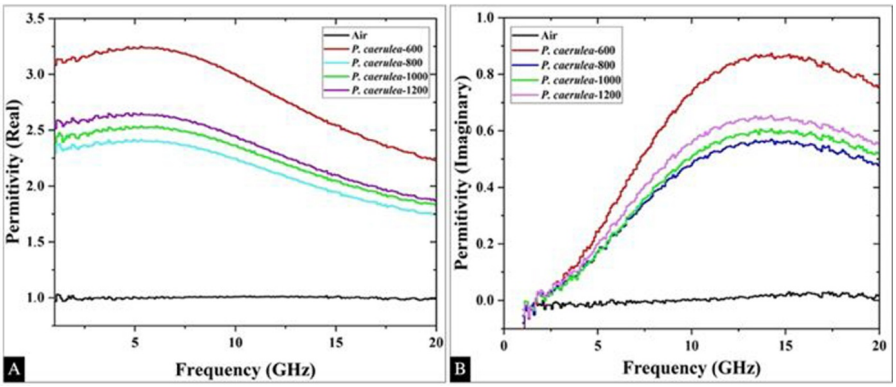


Figure 7. Real (A) and Imaginary (B) parts of measured *P. caerulea* samples in frequency range of 1-20 GHz

Although studies on the use of marine animals in radome applications are quite limited, when looking at the literature, there is only one previous study on marine crustacean species [19]. Shells and spines of the invasive sea urchin were used in this study. As a result of this study, it is clearly shown that the invasive sea urchin is a good candidate in microwave applications especially for radome integrations. According to the literature review, the results determined in previous traditional studies with radome applications are as given in Table 1. Table 1 presents the studies on dielectric measurements of various organic materials in microwave regions. These proposed materials can be used in microwave systems as substrate, dielectric resonator, and radome. As clearly shown in Fig. 7, P600, P800, P1000 and P1200 have 3.2, 2.3, 2.4 and 2.5 real dielectric constant at 10 GHz. In contrast, they have 0.82, 0.44, 0.52 and 0.56 imaginary dielectric constant at 10 GHz.

Table 1. Literature studies on dielectric measurements.

Material	Operating Frequency (GHz)	Aim application	Reference
Toxic marine invaders (*Diadema setosum*)	3.2-20	Radome	[19]
Polybutylene succinate (PBS)	2.3-11.7	Antenna substrate	[34]
Rice husk, rice straw, sugar cane bagasse and banana leaves	1-20	As a substrate material in microwaves	[35]
Methanol, ethanol, glycol, xylene	4.5	Not specified	[36]
Carbon teteachloride, carboncloroetylene, acetone, alcohol, heptane, toluene	0.2-20	Material sciences	[37]
Coal	2.216	Not specified	[38]
Teflon, wood, paper, white corn, yellow corn, sorghum	2.4-2.5	Not specified	[39]
Apple pulp waste	3-18	Absorbers	[40]
Calcined *P. caerulea* shells	1-20	Radome and substrate	***This study***

To show the feasible application area in microwave region, a traditional patch antenna is modelled and numerically analyzed. In this antenna configuration, the proposed P600, P800, P1000, and P1200 samples were

systematically integrated into the antenna layer within simulations to evaluate their feasibility for microwave system applications. The integration process accounted for material compatibility, dielectric properties, and potential interface losses to ensure a realistic representation of performance in practical implementations. The modelled antenna structure is shown in Fig. 8A which used P600, P800, P1000 and P1200 as dielectric substrate layer with 1mm thickness. This antenna design aims to operate at around 10GHz region that is between 6GHz and 14GHz frequency band. Fig. 8B illustrates the obtained return loss (S11) characteristics under different type of substrate materials. As shown, P600 has two resonance peaks at 7GHz and 12.4GHz with nearly -15dB and -13dB return loss values. Another material which is P800 shows resonance point at 10GHz with -23dB return loss value. Similarly, P1000 and P1200 has resonance at around 9.1GHz and 8.6GHz with -33dB and -23dB return loss values, respectively. These differences caused by the dielectric constant variations caused by calcined shell temperatures. This material is a good candidate for microwave antenna applications especially as a substrate layer which is given in Fig. 5 as an example.

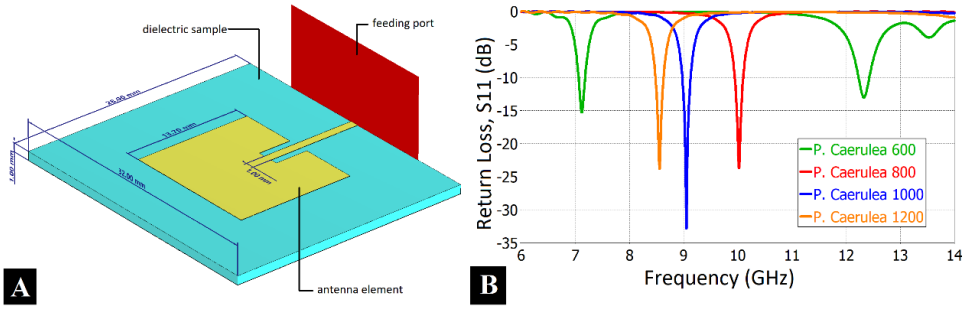


Figure 8. Patch antenna element (A) and Return Loss characteristics (B).

In addition, the loss factor of *P. caerulea* shells are in low level for low frequency region especially 2.5 GHz as illustrated in Figure 7. This loss level shows the application potential of *P. caerulea* shells in communication application such as microwave laminate fabrication and radome applications especially given in Fig. 8. The outcomes derived from complex permittivity measurements demonstrate that powdered materials from *P. caerulea* shells are highly promising for applications in microwave technology, particularly as substrate layers. These materials exhibit favorable low-loss characteristics, rendering them suitable for a spectrum of research applications, including but not limited to military radar, sensors, communication systems and medical applications.

9. Conclusion

This study delves into the microwave constitutive parameters of a biomaterial within the 1-20 GHz range, specifically focusing on calcined *P. caerulea* shells. These powder samples, derived from *P. caerulea* shells, were meticulously prepared at varying temperatures: 600, 800, 1000, and 1200°C. The process involved grinding the shells to transform them into powder. According to the SEM analysis results, the calcined *P. caerulea* shell powders exhibited a broad and rough structure at 600 °C. At 800 °C, surfaces with irregular shapes, roughness, and pores were recorded. As the temperature increased, the formation of CaO commenced, resulting in the formation of more pores. The morphology of CaO diverged from $CaCO_3$, displaying a dense, rough, and porous appearance between 1000°C and 1200 °C. Analysis revealed that *P. caerulea* shells calcined at 600 °C primarily consisted of $CaCO_3$, while those at other temperatures were mainly composed of CaO. However, at 800, 1000, and 1200 °C, $CaCO_3$ successfully transformed into CaO, with a slight increase in CaO peaks observed in the XRD spectrum at temperatures above 800°C.

Employing the open-ended coaxial probe method, the complex dielectric parameters of these categorized biomaterials were thoroughly investigated across the 1-20 GHz frequency spectrum. The measured dielectric results unequivocally indicate the significant potential of this biomaterial in the microwave frequency domain. The complex permittivity properties obtained from the measurements indicate that the proposed samples have significant potential for high-performance microwave applications. Their excellent impedance matching with air and low-loss characteristics make them promising candidates for microwave substrates, radomes, and the design of microwave circuits and resonators. While research on the microwave constitutive parameters of materials derived from marine invertebrates for antenna isolation remains limited, no prior studies have specifically explored the applicability of *P. caerulea*, a species abundantly found in the Mediterranean Sea, for radome technology. This

study, therefore, represents a pioneering effort in this field, filling a critical gap in the literature and demonstrating the feasibility of *P. caerulea* shells as a novel biomaterial for microwave applications.

Acknowledgment

The authors are thankful to the Center Laboratory of Iskenderun Technical University for providing the facility to carry out the work.

References

[1] Casal G, Aceña-Matarranz S, Fernández-Márquez D, Fernández N. Distribution and abundance patterns of three coexisting species of Patella (Mollusca Gastropoda) in the intertidal areas of the NW Iberian Peninsula: Implications for management, Fish Res 2018; 198: 86–98.
[2] Jenkins S, Coleman R, Burrows M, Hartnoll RG, Hawkins S. Regional scale differences in determinism of limpet grazing effects, Mar Ecol Prog Ser 2005; 287: 77–86.
[3] Prusina I, Peharda M, Ezgeta-Balic D, Puljas S, Glamuzina B, Golubic S. Life-history trait of the Mediterranean keystone species Patella rustica: growth and microbial bioerosion, Medit Mar Sci 2015; 16: 393.
[4] Hawkins SJ, Hartnoll RG, Grazing of intertidal algae by marine invertebrates, Oceanogr Mar Biol 1983; 21: 195–282.
[5] Arrontes J, Arenas F, Fernández C, J Rico, Oliveros J, Martínez B, Viejo R, Alvarez D. Effect of grazing by limpets on mid-shore species assemblages in northern Spain, Mar Ecol Prog Ser 2004; 277: 117–133.
[6] Moore P, Thompson RC, Hawkins SJ. Effects of grazer identity on the probability of escapes by a canopy-forming macroalga, J Experimen Mar Biol Ecol, 2007; 344: 170–180.
[7] Parpagnoli D, Pecchioli S, Santini G. Temporal determinants of grazing activity in the Mediterranean limpet *Patella caerulea*, Ethol Ecol Evol, 2013; 25: 388–399.
[8] Mauro A, Arculeo M, Parrinello N. Morphological and molecular tools in identifying the Mediterranean limpets Patella caerulea, Patella aspera and Patella rustica, J Experimen Mar Biol Ecol 2003; 295: 131–143.
[9] Bouzaza Z, Mezali K. Discriminant-based study of the shell morphometric relationships of Patella caerulea (Gastropoda: Prosobranchia) of the western Mediterranean Sea, Turk J Zool 2018; 42: 513–522.
[10] Vafidis D, Drosou I, Demetriou K, Klaoudatos D. Population Characteristics of the Limpet Patella caerulea (Linnaeus, 1758) in Eastern Mediterranean (Central Greece), Water 2020; 12: 1186.
[11] Navarro PG, Ramírez R, Tuya F, Fernandez-gil C, Sanchez-jerez P, Haroun RJ. Hierarchical Analysis Of Spatial Distribution Patterns Of Patellid Limpets In The Canary Islands, J Mollusc Stud 2005; 71: 67–73.
[12] Espinosa F, Guerra-García JM, Fa D, García-Gómez JC. Effects of competition on an endangered limpet Patella ferruginea (Gastropoda: Patellidae): Implications for conservation, J Experimen Mar Biol Ecol 2006; 330: 482–492.
[13] Paulo Cabral J. Shape and growth in European Atlantic Patella limpets (Gastropoda, Mollusca). Ecological implications for survival, Web Ecol 2007; 7: 11–21.
[14] Prusina I, Ezgeta-Balić D, Ljubimir S, Dobroslavić T, Glamuzina B. On the reproduction of the Mediterranean keystone limpet *Patella rustica* : histological overview, J Mar Biol Ass 2014; 94: 1651–1660.
[15] Duysak Ö, Azdural K. Evaluation of heavy metal and aluminium accumulation in a gastropod, patella caerulea L., 1758 in Iskenderun Bay, Turkey, Pak J Zool 2017; 49: 629–637.
[16] Küçükdermenci A, Lök A, Kirtik A, Kurtay E. The meat yield variations of Patella caerulea (Linnaeus, 1758) in Urla, Izmir Bay, Acta Biol Tur 2017; 30: 174–177.
[17] Yücel N, Kılıç E. Presence of microplastic in the Patella caerulea from the northeastern Mediterranean Sea, Mar Poll Bull 2023; 188: 114684.
[18] Uğurlu E. Using Patella caerulea as a biomaterial: Chitin and Chitosan, AUJES 2023; 4: 394–405.
[19] Uğurlu E, Duysak Ö, Alkurt FÖ, Karaaslan M, Franco AP. Utilization of Poisonous Marine invader in Development of Low Losses Microwave Devices, NÖHÜ Müh Bilim Derg 2023; 12: 1335–1340.
[20] Geng H, Chen M, Guo C, Wang W, Chen D. Marine polysaccharides: Biological activities and applications in drug delivery systems, Carbohydr Res 2024; 538: 109071.
[21] Shavit R. Radome electromagnetic theory and design, John Wiley & Sons, 2018.
[22] Panwar R, Lee JR. Performance and non-destructive evaluation methods of airborne radome and stealth structures, Meas Sci Technol 2018; 29: 062001.
[23] Gorgucci E, Bechini R, Baldini L, Cremonini R, Chandrasekar V. The Influence of Antenna Radome on Weather Radar Calibration and Its Real-Time Assessment, J Atmos Ocean Tech 2013; 30: 676–689.
[24] Yu J, Zhang K, Duan M, Lv W, Zhang X. Study on the stability of air traffic control radar radome under wind Load, IEEE, 2023: 1152–1155.
[25] Xing Z, Yang F, Yang J, Zhu X. Low-RCS Ka-band receiving and transmitting satellite communication antennas co-designed with high-performance absorbent frequency-selective radomes, J Electromagn Waves Appl 2023; 37: 190–206.
[26] Park HJ, Jeong SW, Yang JK, Kim BG, Lee SM. Removal of heavy metals using waste eggshell, J Environ Sci 2007; 19: 1436–1441.

[27] Öksüz KE. Sert Doku Uygulamaları İçin Makro Gözenekli Alüminyum Oksit-Bor Karbür Seramikleri, RTEUFEMUD 2023; 4: 65–75.
[28] Kaatze U. Techniques for measuring the microwave dielectric properties of materials, Metrologia 2010; 47: S91–S113.
[29] Gabriel C, Gabriel S, Grant EH, Grant EH, Halstead BSJ, Michael D, Mingos P. Dielectric parameters relevant to microwave dielectric heating, Chem Soc Rev 1998; 27: 213.
[30] Öksüz KE, Şereflişan H. Microstructure of Eobania vermiculata (Müller, 1774): SEM, F-TIR and XRD Methods, J Agricul Product 2022; 3: 42–47.
[31] Ferraz E, Gamelas JAF, Coroado J, Monteiro C, Rocha F. Recycling Waste Seashells to Produce Calcitic Lime: Characterization and Wet Slaking Reactivity, Waste Biomass Valor 2019; 10: 2397–2414.
[32] Soisuwan S, Phommachant J, Wisaijorn W, Praserthdam P. The Characteristics of Green Calcium Oxide Derived from Aquatic Materials, Procedia Chem 2024; 9: 53–61.
[33] Park K, Sadeghi K, Thanakkasaranee S, Park Y, Park J, Nam K, Han H, Seo J. Effects of calcination temperature on morphological and crystallographic properties of oyster shell as biocidal agent, Int J Applied Ceramic Tech 2021; 18: 302–311.
[34] Habib Ullah M, Mahadi WNL, Latef TA. Aerogel Poly (butylene succinate) Biomaterial Substrate for RF and Microwave Applications, Sci Rep 2015; 5: 12868.
[35] Zulkifli NA, Wee FH, Mahrom N, Yew BS, Lee YS, Ibrahim SZ, Am Phan AL. Analysis of Dielectric Properties On Agricultural Waste for Microwave Communication Application, MATEC Web Conf 2017; 140: 01013.
[36] Sekar V, Torke WJ, Palermo S, Entesari K. A Self-Sustained Microwave System for Dielectric-Constant Measurement of Lossy Organic Liquids, IEEE Trans. Microwave Theory Techn 2012; 60: 1444–1455.
[37] Zarubina AY, Kibets SG, Politiko AA, Semenenko VN, Baskov KM, Chistyaev VA. Complex permittivity of organic solvents at microwave frequencies, in: IOP Publishing, 2020: p. 062085.
[38] Marland S, Merchant A, Rowson N. Dielectric properties of coal, Fuel 2001; 80: 1839–1849.
[39] Hernandez-Gomez ES, Olvera-Cervantes JL, Corona-Chavez A, Sosa-Morales ME. Development of a low cost dielectric permittivity sensor for organic and inorganic materials in the microwave frequency range, in: 2014 IEEE 9th IberoAmerican Congress on Sensors, IEEE, Bogota, Colombia, 2014: pp. 1–4.
[40] Baltacioğlu K, Başar M, Karaaslan M, Alkurt F, Aripek S, Electromagnetic Analysis of Organic Waste and Blust Furnace Slag Mixtures, Eur Mech Sci 2021; 5: 148–152.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 351-361, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1566544

Impact of Airfoil Type and Placement on Aerodynamic Performance of Blended Wing Body Aircraft

Seyhun DURMUŞ[1*]
[1]Havacılık Yönetimi Bölümü, Edremit Sivil Havacılık Yüksekokulu, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye
[*1]drmsyhn@gmail.com

(Geliş/Received: 13/10/2024; Kabul/Accepted: 27/01/2025)

Abstract: The Blended Wing Body (BWB) design holds promise for the future by lowering total drag, emissions, fuel consumption, and noise levels. The aim of this study is to elucidate the influence of airfoil selection on the aerodynamic characteristics of the BWB, particularly focusing on the center body and outer wings. To achieve this objective, comparative analyses were conducted for four different Medium Altitude Long Endurance (MALE) Unmanned Aerial Vehicle (UAV) BWB designs, utilizing XFLR5 software and employing MH 60 and NACA 6412 airfoils. The maximum lift-drag ratio in the entire MH60 BWB design reached 26.98, while the implementation of the NACA 6412 airfoil on the outer wing led to a notable increase, resulting in a maximum lift-drag ratio of 31.83. This represents an impressive 18% enhancement in BWB's overall aerodynamic efficiency. Furthermore, the combination of a reflex airfoil on the center body, coupled with a high-lift airfoil on the outer wings, emerged as the optimal configuration, yielding the best aerodynamic performance among the tested designs. The study's findings have significant consequences for crafting future subsonic BWB aircraft with exceptional aerodynamic performance. This research adds valuable information to the ongoing development of advanced BWB designs by highlighting the importance of airfoil selection and configuration.

Key words: Blended wing body, Airfoil selection, MH60, NACA6412, MALE UAV.

Kanat Profili ve Yerleşiminin Gövde Kanat Harmanlı Uçakların Aerodinamik Performansına Etkisi

Öz: Gövde kanat harmanlı tasarım, toplam sürtünmeyi, emisyonları, yakıt tüketimini ve gürültü seviyelerini azaltarak gelecek için umut vaat etmektedir. Bu çalışmanın amacı, özellikle orta gövde ve dış kanatlara odaklanarak, kanatçık seçiminin Gövde kanat harmanlı tasarımın aerodinamik özellikleri üzerindeki etkisini aydınlatmaktır. Bu amaca ulaşmak için, XFLR5 yazılımı kullanılarak ve MH 60 ve NACA 6412 kanatçıkları kullanılarak dört farklı Orta İrtifa Uzun Dayanıklılık (MALE) İnsansız Hava Aracı (İHA) gövde kanat harmanlı tasarımı için karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. MH60 gövde kanat harmanlı tasarımının tamamında maksimum kaldırma-sürükleme oranı 26,98'e ulaşırken, NACA 6412 kanat profilinin dış kanata uygulanması kayda değer bir artışa yol açarak maksimum kaldırma-sürükleme oranının 31,83 olmasını sağlamıştır. Bu, Gövde kanat harmanlı tasarımın genel aerodinamik verimliliğinde %18'lik etkileyici bir artışı temsil etmektedir. Ayrıca, orta gövdede kuyruksuz bir kanat profili ile dış kanatlarda yüksek kaldırma kanat profili kombinasyonu, test edilen tasarımlar arasında en iyi aerodinamik performansı sağlayan optimum konfigürasyon olarak ortaya çıkmıştır. Çalışmanın bulguları, olağanüstü aerodinamik performansa sahip gelecekteki ses altı Gövde kanat uçaklarının üretilmesi için önemli sonuçlar doğurmaktadır. Bu araştırma, kanat seçimi ve konfigürasyonunun önemini vurgulayarak gelişmiş gövde kanat harmanlı tasarımlarının devam eden gelişimine değerli bilgiler katmaktadır.

Anahtar kelimeler: Gövde kanat harmanlı tasarım, Kanat profili seçimi, MH60, NACA6412, MALE İHA.

1. Introduction

Blended Wing Body (BWB) aircraft have significant potential for the future in terms of reducing total drag, emissions, fuel consumption, and noise. For BWB optimization, Gauvrit et al. [1] proposed 5 different disciplines as geometry, propulsion, structure, aerodynamics, and task. This study primarily focusses on geometry and aerodynamics without dealing with other optimization disciplines. In this study, the performance of UAV BWBs was evaluated based on the aerodynamic twist achieved using MH60 and NACA 6412 airfoils on the central fuselage and outer wings. Aerodynamic and geometric twist are two ways of achieving washout. In geometric twist, different angles of attack are given to the same airfoil, while in aerodynamic twist a wash-out/wash-in is achieved by using different airfoils at the wing root and at wing tip [2].

* Sorumlu yazar: drmsyhn@gmail.com Yazarın ORCID Numarası: [1]0000-0002-1409-7355

Bolsunovsky et al. [3] studied a TsAGI with a capacity of 750 passengers, and Liebeck [4] conducted the conceptual design of a BWB with a capacity of 800 passengers, which was the first study on passenger transport BWB in the literature. Other notable conceptual studies on passenger aircraft BWBs include Scholz's [5] Very Efficient Large Aircraft (VELA), Hilemann et al.'s [6] Sax-40 BWB, NASA's Environmentally Friendly Aviation (ERA) BWB Project [7], Boeing's Subsonic Ultra Green Aircraft Research (SUGAR) BWB design [8], Nickol's [9] HWB 216, HWB 301, HWB 400 designs, Mohr's [10] active control for flexible aircraft (ACFA) design, Gern's [11] Open Rotor Engine Integration On a BWB (OREIO), Dehpenaj and Nejat's [12] aerodynamic research on passenger plane (AEROPP) design, Prakasha et al.'s [13] A Aircraft 3rd Generation MDO for Innovative Collaboration of Heterogeneous Teams of Experts AGILE EU BWB, and Larrimer's [14] BWB MD-11 are some other conceptual studies in the literature for a passenger aircraft BWB. Blended Wing Body (BWB) aircraft designs have shown promising aerodynamic performance improvements over conventional aircraft. Studies have demonstrated that BWB configurations can achieve higher lift-to-drag (L/D) ratios, with improvements ranging from 9.4% to 21% compared to conventional designs [15-17]. These enhancements are primarily attributed to drag reduction, particularly at medium subsonic speeds [15]. The aerodynamic benefits of BWB designs vary depending on aircraft size, with wide-body BWBs showing greater potential for drag reduction compared to regional-class BWBs [16]. Additionally, distributed propulsion systems integrated into BWB designs can further improve aerodynamic performance, with one study reporting a cruise L/D ratio of 24.0 and enhanced low-speed lift characteristics [17].

The literature includes numerous studies on the BWB UAV concept [18-20]. Baig et al. [21] designed a small scale BWB with a center body with NACA 25111 and outer wing with MH78 airfoil. Hoe and Mohd [22] conducted a CFD study of conventional aircraft configuration versus BWB, and results showed that the BWB configuration showed a decrease in the total drag and an increase in lift to drag ratio. Chung [23] studied manufacturing and flight tests of an electrically powered flying-wing UAV. Communier et al. [24] verified that the XFLR5 analyses for an aircraft wing were consistent with the experimental wind tunnel results. Khushbash et al. [25], with the help of XLFR5 and CFD, performed analyzes of a micro flying wing and concluded that underpredicts the drag coefficient compared to CFD analysis, while XFLR overestimates the lift coefficient. Kaya et al. [26] studied the conceptual design of the VTOL-BWB using the XFLR5 tool and the Improved Blade Element and Momentum Theory (IBEMT). Siouris and Qin [27] studied the effect of wing sweep on BWB and concluded that the maximum lift to drag ratio was found, with an outer wing sweep angle of 45°. Hepplerle [28] studied the airfoils (MH45, MH60, etc.) used in tailless airplanes. Eppler [29] developed an airfoil series (E 325-E 340) for tailless aircraft. Liebeck [30] designed LNV109A to maximize the lift coefficient for BWB.

In this study, four different BWB UAVs created with NACA 6412 and MH 60 airfoil combinations on the central fuselage and outer wing in XFLR5 software were analyzed. Blended Wing Body (BWB) aircraft design studies have concentrated on optimizing both the body and wing profiles to achieve superior performance. Body profile studies emphasize improved internal volume for payload, fuel, and passenger accommodation, along with reduced structural weight compared to traditional tube-and-wing designs. The integrated body-wing geometry also enhances aerodynamic efficiency. Wing profile studies focus on minimizing wing tip vortices and induced drag, achieving improved lift distribution across the aircraft, ensuring more uniform pressure distribution compared to conventional wings, and enhancing the potential for laminar flow control. The original contribution of this study lies in its innovative configuration, which combines a reflex airfoil in the fuselage center with a high-lift airfoil on the outer wings. Additionally, it proposes a method to maximize aerodynamic performance through strategic airfoil selection. The basic problem addressed in this new design is improving the aerodynamic efficiency of Blended Wing Body (BWB) aircraft and overcoming the traditional limitations associated with wing and body profile aerodynamics. Current research suggests a unique airfoil combination that has not been previously explored in BWB studies. This combination optimizes lift distribution, reduces drag, and employs a systematic configuration design to achieve holistic aerodynamic performance improvements.

2. Material and Methods

The XFLR5 software, an advanced computational tool, employs the XFoil program to meticulously analyze airfoil performance by calculating crucial parameters such as pressure distribution, lift, and drag characteristics. Leveraging the capabilities of XFLR5, his study undertakes the design and evaluation of four distinct Blended Wing Body (BWB) configurations. When performing wing analysis in XFLR5, several typical assumptions are made to simplify complex aerodynamic interactions for computational analysis. These include steady-state flow

conditions, incompressible airflow, and inviscid flow near the wing surface. The analysis also assumes the application of linear aerodynamic theory, small angle of attack approximations, and the extension of two-dimensional airfoil characteristics to three-dimensional wing analysis. Furthermore, the wing structure is considered rigid without deformation, boundary layer and viscous effects are neglected, and uniform atmospheric conditions are assumed. Compressibility effects are also disregarded at low Mach numbers, allowing for a more straightforward evaluation of wing performance and characteristics.

In these BWB designs, both the MH 60 and NACA 6412 airfoils are strategically deployed across various sections, including the center body, blending area, and outer wing, of the Medium Altitude Long Endurance (MALE) BWB Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The NACA 6412 and MH 60 airfoils were selected for this analysis due to their distinct and representative characteristics in aerodynamic design. The NACA 6412 is a typical high-lift airfoil, characterized by its cambered profile that provides excellent lift generation at lower speeds, making it particularly suitable for applications requiring enhanced lifting performance. In contrast, the MH 60 airfoil is a classic example of a reflex airfoil design. Reflex airfoils are distinguished by their unique upper surface profile, which curves upward near the trailing edge, creating a distinctive geometric characteristic that influences its aerodynamic behavior. The MH 60 airfoil, known for its superior aerodynamic properties, was selected for its suitability in enhancing lift capabilities, while the NACA 6412 airfoil, renowned for its versatility and stability, was chosen to optimize performance across the BWB's different sections. To visualize the configuration of these airfoils, refer to Figure 1, which schematically displays the distinctive profiles of the NACA 6412 (Fig. 1(a)) and MH 60 (Fig. 1(b)) airfoils. This illustration provides a clear depiction of the geometric characteristics and relative placements of the selected airfoils within the BWB design.

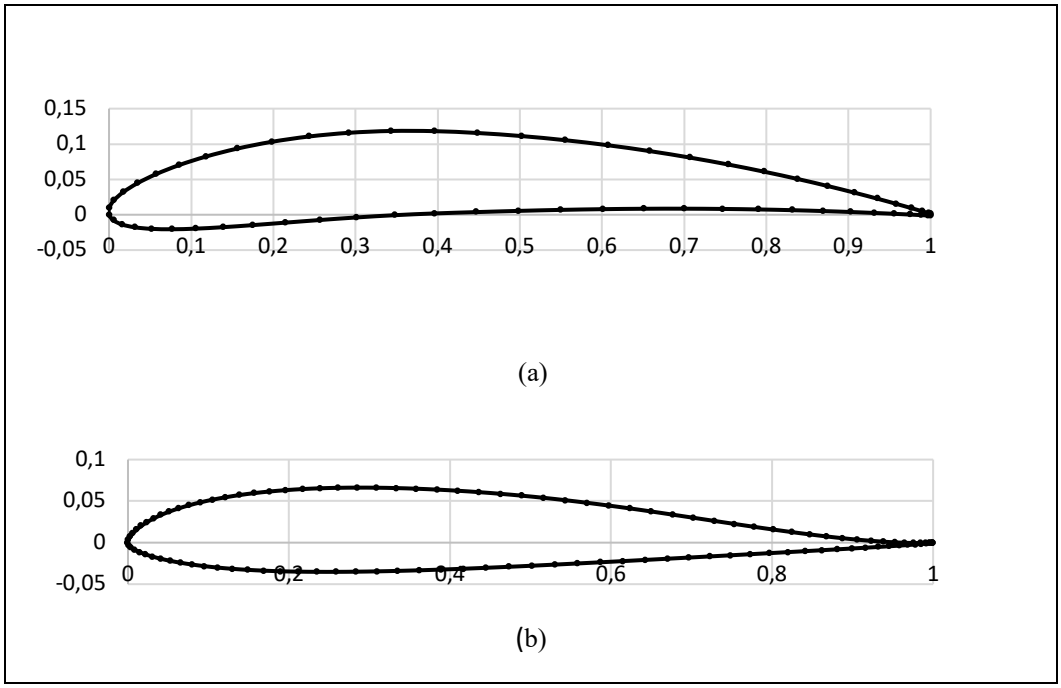


Figure 1. Schematic display of (a) the NACA 6412 airfoil and (b) the MH 60 airfoil.

The analysis was meticulously conducted using a comprehensive framework comprising a total of 1,880 panels within the XFLR5 software environment. This computational setup facilitated a detailed examination of the Medium Altitude Long Endurance (MALE) Blended Wing Body (BWB) design. The MALE BWB, characterized by a wingspan spanning 7.2 meters, features a root chord measuring 3 meters and a taper ratio of 0.067. These dimensional specifications play a pivotal role in determining the aerodynamic performance and structural integrity of the BWB UAV. For a comprehensive understanding of the mass distribution and size characteristics of the MALE BWB, refer to Fig. 2. This schematic depiction provides valuable insights into the surface panel

configuration, enabling a visual representation of the aircraft's structural layout and design parameters. Equations related to aerodynamic wings are given in Eq. 1.-Eq.3. The aspect ratio of a wing is calculated as:

$$Aspect\ ratio\ (AR) = \frac{b^2}{S} \tag{1}$$

where b is the wingspan and S is the wing area. The taper ratio of a wing is calculated as:

$$Taper\ ratio\ (\lambda) = \frac{C_t}{C_r} \tag{2}$$

where c_t is the chord length at the wingtip, and c_r is the chord length at the wing root. The mean aerodynamic chord (MAC) of a wing is calculated as:

$$Mean\ aerodynamic\ chord\ (MAC) = \frac{2}{S}\int_{y_1}^{y_2} c^2(y)dy \tag{3}$$

where S is the total wing area, c(y) is the local chord length at spanwise position y; y_1 and y_2 are the spanwise limits of the wing.

Wingspan (m)	7.2
Wing Area (m^2)	6.24
Aircraft Mass (kg)	200.0
Wing Load (kg/m^2)	32.051
Root Chord (m)	3.0
MAC (m)	1.651
Aspect Ratio	8.308
Taper Ratio	0.067

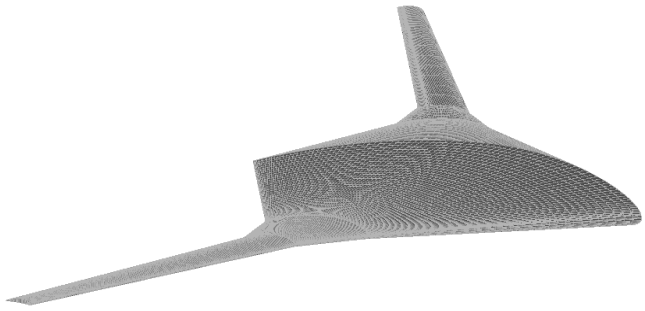


Figure 2. BWB design: size metrics and aerodynamic panel visualization.

Fig. 3 provides a visual representation of four distinct Blended Wing Body (BWB) designs, each tailored with unique airfoil configurations to explore their respective aerodynamic characteristics. The first BWB iteration [Fig. 3 (a)] utilizes the MH60 airfoil across its entirety, emphasizing the aerodynamic properties inherent to this specific profile. Conversely, the second BWB variant [Fig. 3 (b)] adopts the NACA 6412 airfoil exclusively, showcasing a different approach to aerodynamic optimization. In the third BWB design (Fig. 3 (c)), a hybrid configuration is employed, with the NACA 6412 airfoil strategically integrated into the center body while the MH60 airfoil is implemented in the outer wing region. This combination aims to leverage the strengths of each airfoil type for enhanced performance. Similarly, the fourth BWB iteration (Fig. 3 (b)) adopts a reverse hybrid

configuration, with the MH60 airfoil deployed in the center body and the NACA 6412 airfoil employed in the outer wing section. This design approach seeks to capitalize on the unique aerodynamic characteristics offered by each airfoil profile. To facilitate a comprehensive understanding of the aerodynamic performance associated with these diverse airfoil combinations, the results section presents detailed comparisons among the BWBs designed with different airfoil configurations. Through these analyses, valuable insights into the impact of airfoil selection on BWB aerodynamic performance are elucidated.

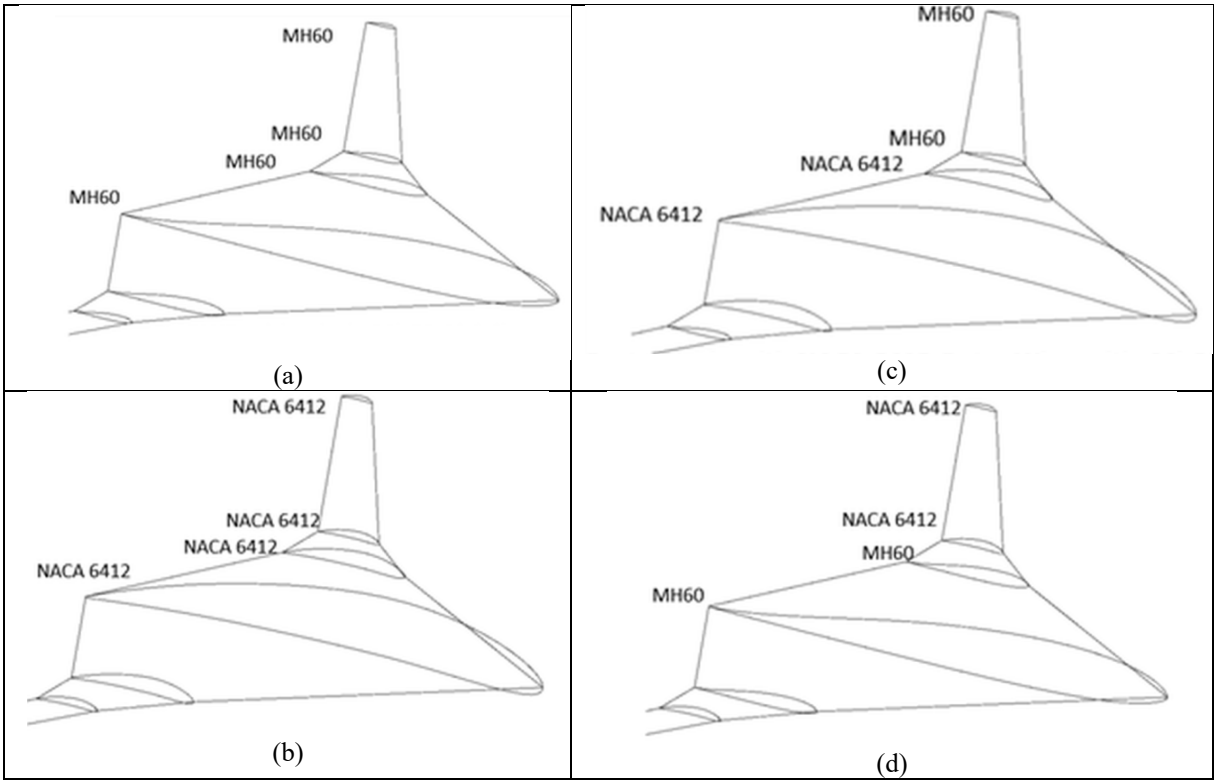


Figure 3. Airfoil Variations in Center Body and Outer Wings Across BWB Designs: (a) BWB with the whole MH60 airfoil, (b) BWB with the whole NACA 6412 airfoil, (c) BWB with a center body using NACA 6412 and an outer wing using MH 60, and (d) BWB with a center body using MH 60 and an outer wing using NACA 6412.

The analysis encompassed a comprehensive range of angles of attack, spanning from -6 to 8 degrees, to thoroughly evaluate the aerodynamic behavior of the Blended Wing Body (BWB) designs. These analyses were conducted under International Standard Atmosphere (ISA) sea level conditions, ensuring consistency in air characteristics across the evaluations. To facilitate detailed aerodynamic assessments, additional panels were strategically incorporated into the BWB designs. This augmentation allowed for a thorough analysis leveraging the vortex lattice method (VLM2) under fixed cruise speed conditions, even viscous flow complexities. Limitations of the XFLR5 software include computational constraints, in that the software exhibits limited accuracy when analyzing complex 3D geometries and is less sensitive for transonic and supersonic flow conditions. Additionally, XFLR5's analysis capabilities are limited and are primarily suitable for low-speed aerodynamic analysis. It cannot directly simulate compressibility effects and has limited turbulence modeling capabilities, further limiting its application in advanced aerodynamic studies. Since the current study focuses on steady flow conditions at low speeds, the absence of CFD does not introduce significant negative effects, as the scenarios analyzed fall within the capabilities of alternative methods like XFLR5.

3. Results

The analysis encompassed a comprehensive range of angles of attack, spanning from -6 to 8 degrees, to thoroughly evaluate the aerodynamic behavior of the Blended Wing Body (BWB) designs. These analyses were conducted under International Standard Atmosphere (ISA) sea level conditions, ensuring consistency in air characteristics across the evaluations. To facilitate detailed aerodynamic assessments, additional panels were strategically incorporated into the BWB designs. This augmentation allowed for a thorough analysis leveraging the vortex lattice method (VLM2) under fixed cruise speed conditions, even viscous flow complexities.

To understand the influence of airfoil selection across all BWB designs, lift and drag coefficients at various angles of attack were obtained and comparatively analyzed. Several aerodynamic characteristics of the four different BWBs were assessed, including CL vs. angle of attack curve, polar drag curve (C_L vs C_D,), C_L /C_D, vs angle of attack, and $\sqrt{{C_L}^3/{C_D}^2}$ vs angle of attack curve. The comparison of lift curves for all cases is depicted in Fig. 4. Figure 4 compares the lift curves for various airfoil designs, including the whole MH60 and NACA6412 airfoils as well as their fuselage and outer wing components. The plot shows the lift coefficient (Cl) across a range of angles of attack, providing insights into the aerodynamic performance of these airfoil configurations. As anticipated, the BWB design utilizing exclusively NACA6412 airfoils exhibited the highest lift coefficient, while the BWB design employing solely MH60 airfoils demonstrated the lowest. Notably, the BWB design featuring a center body with NACA 6412 airfoil and outer wing with MH60 airfoil exhibited a higher lift coefficient compared to the configuration with a center body employing MH60 airfoil and outer wing employing NACA 6412 airfoil.

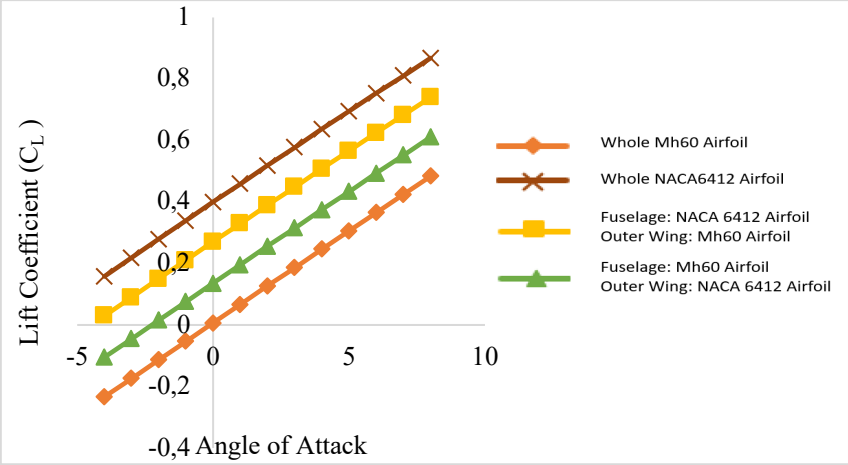


Figure 4. Lift curve comparison for various BWB designs.

The comparison of drag polar curves (C_L vs C_D curves) for all BWB designs is visually depicted in Figure 5. The drag polar comparison highlights the distinct aerodynamic characteristics of the NACA 6412 and MH60 airfoils for various BWB designs. The NACA 6412 exhibits higher lift at lower drag coefficients, indicating its suitability for high-lift applications. Conversely, the MH60 airfoil maintains more gradual lift increases with increasing drag, suggesting better stability. A notable observation from these curves is the distinct trends arising from the contrasting drag characteristics between the center body and the outer wings. This disparity led to the emergence of two separate polar curve trends. Interestingly, the BWB design featuring exclusively NACA6412 airfoils exhibited the highest coefficient of drag across all angles of attack. This phenomenon underscores the nuanced interplay between airfoil selection and aerodynamic performance. Remarkably, this design concept managed to achieve a balance between minimizing drag coefficient, similar to the performance of the entire MH60 design, while simultaneously attaining a higher lift coefficient, particularly evident at positive angles of attack. This achievement was made possible by strategically integrating NACA 6412 airfoils on the outer wings, thereby optimizing lift generation while mitigating drag.

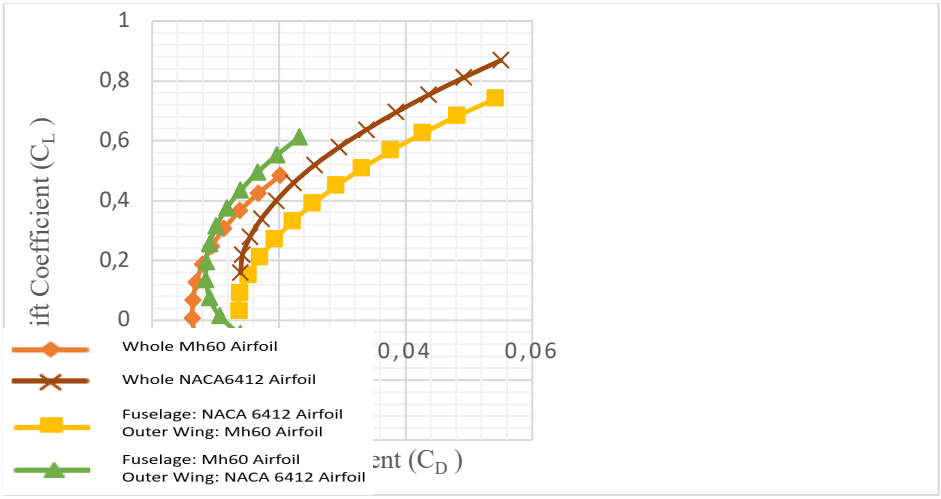


Figure 5. Drag polar curve comparison for various BWB designs.

The C_L/C_D ratios presented in Fig. 6 serve to simultaneously evaluate the drag and lift characteristics for aerodynamic efficiency comparison. The NACA 6412 airfoil exhibits a higher peak lift-to-drag ratio, indicating superior aerodynamic efficiency at certain angles of attack. In contrast, the MH60 airfoil maintains a more gradual lift-to-drag profile, suggesting better stall characteristics and overall stability. Among the analyzed configurations, the BWB design featuring an MH60 center-body with NACA 6412 outer wing demonstrates the highest aerodynamic efficiency based on the lift-to-drag ratio. Closely following is the entire MH60 BWB design, ranking second in terms of lift to drag ratio. For the entire MH60 BWB design, the maximum lift-drag ratio is recorded at 26.98, occurring at a 5-degree angle of attack. Conversely, the MH60 center-body with NACA 6412 outer wing BWB design achieves a superior lift-drag ratio of 31.83, observed at a 4-degree angle of attack. This configuration's use of the NACA 6412 airfoil on the outer wing yields an impressive 18% enhancement in aerodynamic performance (lift-to-drag ratio). While the BWB design featuring solely NACA 6412 airfoils exhibits superior performance at negative angles of attack, the MH60 configuration excels at positive angles of attack. Consequently, the synergistic combination of a reflex airfoil (MH60) on the center body and a high-lift airfoil (NACA 6412) on the outer wings emerges as the optimal configuration, yielding the best overall aerodynamic performance.

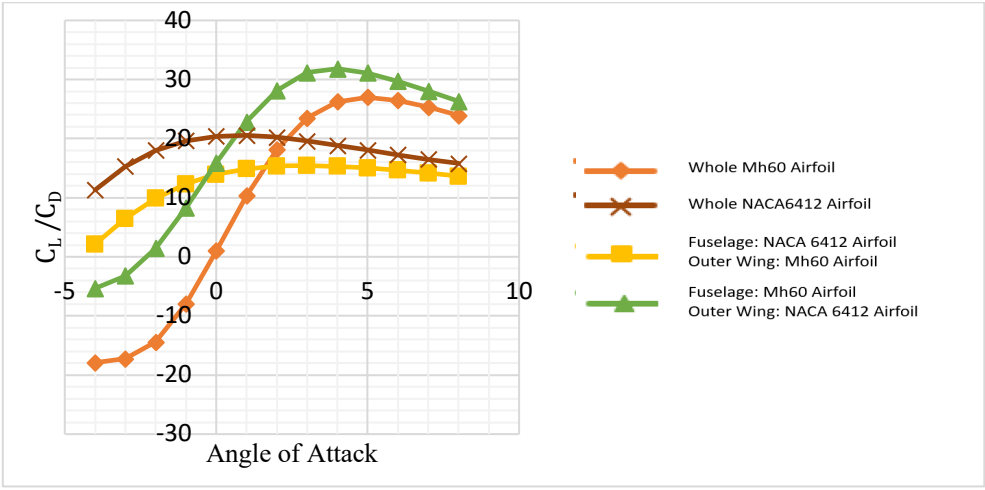


Figure 6. Lift to drag ratio (aerodynamic efficiency) curve comparison for various BWB designs.

The parameter $\sqrt{{C_L}^3/{C_D}^2}$ offers insight into both the minimum descent rate and the maximum endurance factor, providing valuable information regarding the overall performance of the aircraft. Figure 7 illustrates the variation of $\sqrt{{C_L}^3/{C_D}^2}$ with the angle of attack, depicting distinct curves for negative and positive angles of attack. The endurance curve comparison highlights key differences in the lift-to-drag ratios of the NACA 6412 and MH60 airfoils. The NACA 6412 exhibits higher peak lift-to-drag performance, indicating superior aerodynamic efficiency at certain angles of attack. Meanwhile, the MH60 maintains a more gradual endurance curve, suggesting better stall characteristics and overall stability. Notably, the airfoils exhibit different performance characteristics at varying angles of attack. At negative angles of attack, the NACA 6412 airfoil demonstrates favorable performance, while the MH-60 airfoil proves advantageous at positive angles of attack. This distinction is reflected in the formation of seperate curves for each airfoil type. For the BWB design with an MH60 center body and NACA 6412 outer wings, optimal performance in terms of both minimum descent rate and maximum endurance factor is achieved. Once again, the synergistic combination of the reflex MH60 airfoil on the center body and the high-lift NACA 6412 airfoil on the outer wings emerges as the configuration offering the minimum rate of descent, underscoring its efficiency in flight operations requiring prolonged endurance.

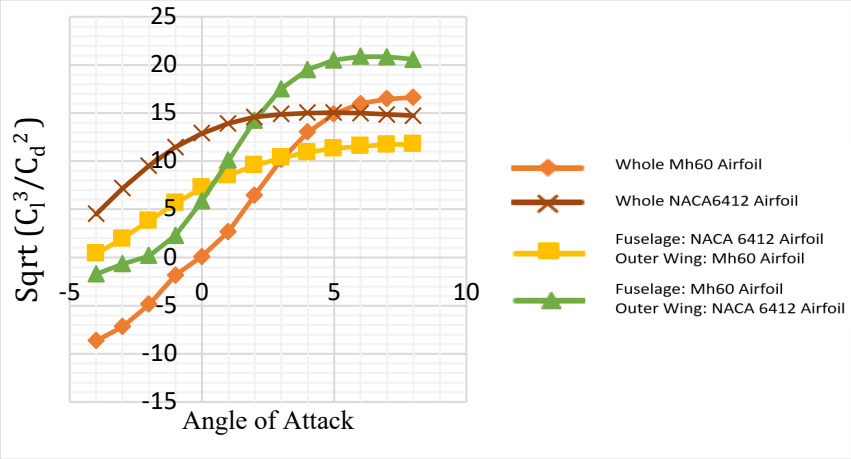


Figure 7. Endurance curve comparison for various BWB designs.

C_m vs. α (moment coefficient vs. angle of attack) curve is essential for understanding the stability and control characteristics of a BWB. Fig. 8 illustrates the variation of moment coefficient with the angle of attack. The moment coefficient curves reveal the different pitching moment characteristics of the NACA 6412 and MH60 airfoil configurations. The NACA 6412 exhibits a more linear moment coefficient trend, while the MH60 demonstrates a more pronounced reflex shape. This reflects the improved stability of the MH60 design, particularly at higher angles of attack. All configurations show negative slopes in the C_m vs. α curves, indicating that all designs are statically stable. The C_m starts positive and becomes negative as the angle of attack increases, passing through zero at a positive angle of attack for BWB with whole Mh60 airfoil. This suggests a stable design with a neutral point at a positive angle of attack, meaning it tends to pitch down as the angle of attack increases beyond this point. The curve of BWB with whole NACA 6412 airfoil shows a similar pattern to the Whole Mh60 Airfoil but with a steeper negative slope. The moment coefficient starts positive but decreases more rapidly, suggesting it reaches a neutral point at a lower angle of attack compared to the Whole Mh60 Airfoil. This design is more dynamically responsive to changes in angle of attack.

The moment coefficient of BWB made of fuselage with NACA 6412 airfoil and outer wing with Mh60 airfoil starts positive and transitions to negative, with a neutral point at a moderate angle of attack. The mix of airfoils provides a balanced characteristic between the Whole Mh60 and Whole NACA6412 airfoils, offering stability with moderate sensitivity to angle of attack changes. The moment coefficient of BWB made of fuselage with Mh60 airfoil and outer wing with NACA 6412 airfoil starts positive and gradually becomes negative, with the neutral point occurring at a higher angle of attack compared to the other configurations. This suggests a stable design with

a tendency to pitch down at higher angles of attack, providing a delayed but stable response to increasing angles of attack. Therefore, BWB made of whole NACA6412 airfoil offers greater dynamic response and sensitivity. BWB made of whole Mh60 airfoil provides stable and less sensitive characteristics. The mixed airfoil configurations have neutral points at intermediate angles of attack, with the NACA 6412 fuselage/Mh60 wing combination being more responsive. Mixed configurations provide a more gradual change in the moment's coefficient.

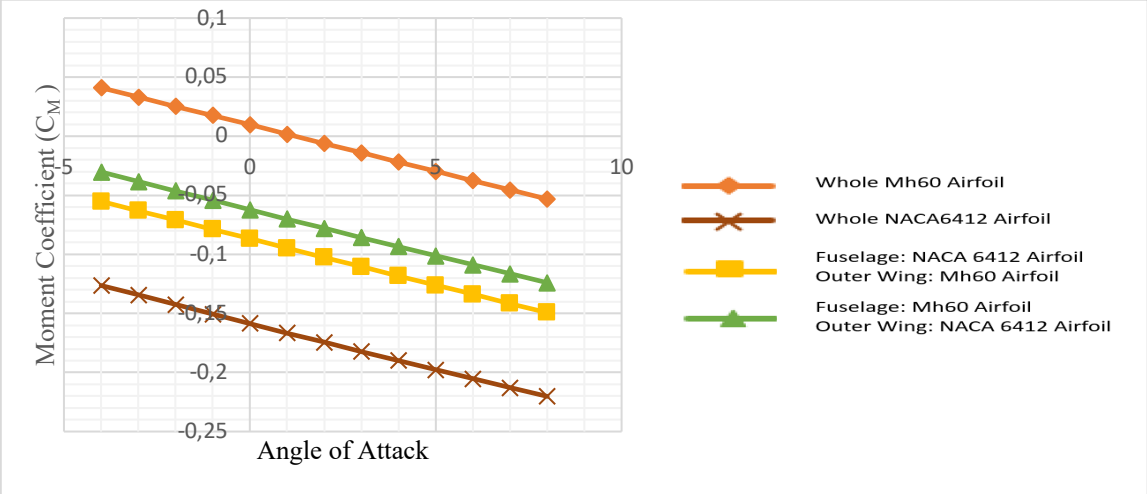


Figure 8. Moment coefficient curve comparison for various BWB designs.

The findings of the study underscore the advantages of employing the MH60 airfoil on the center body and the NACA 6412 airfoil on the outer wing. This configuration not only enhances aerodynamic efficiency, as evidenced by the superior lift-to-drag ratio, but also contributes to minimizing the descent rate and maximizing the endurance factor. The lower pressure coefficient observed across the center body in the MH60-NACA 6412 design indicates reduced drag and improved overall aerodynamic performance. These results confirm the effectiveness of reflex airfoils such as the MH60 in combination with high-lift airfoils like the NACA 6412, highlighting their synergistic impact on the BWB's aerodynamic characteristics.

In terms of accuracy, XFLR5 is based on linear potential flow methods, while CFD includes advanced turbulence and compressibility modeling. In terms of flow condition representation, XFLR5 is limited in handling complex or nonlinear flow scenarios, whereas CFD is excellent at capturing complex aerodynamic interactions and provides higher accuracy in transient and turbulent flow conditions. CFD provides more precise analysis of flow fields and pressure distributions using detailed mesh resolution and boundary layer modeling. The generalizability and validity of XFLR5 analyses are subject to several limitations and constraints. The generalizability of the software is limited by its dependence on linear aerodynamic methods, its limited ability to handle complex geometries, and its inadequate representation of real-world flow conditions. Experimental validation is essential to ensure the accuracy and reliability of computational predictions. This includes wind tunnel testing, full-scale prototype measurements, and experimental data collection under various flight conditions. Such comprehensive validation efforts are crucial to closing the gap between computational predictions and real-world aerodynamic performance.

4.Conclusion

The study focused on the selection of airfoils for the center body and outer wing of the blended wing body (BWB). A medium-altitude, long-endurance (MALE) UAV BWB was designed using the MH60 airfoil with sufficient number of panels in XFLR5 software. Based on considerations of lift-to-drag ratio, minimum rate of descent, and optimal endurance factors, the most efficient aerodynamic configuration was identified as the BWB design featuring an MH60 center body and NACA 6412 outer wing. In the BWB design with the MH60 center body and NACA 6412 outer wing, the maximum lift-drag ratio was recorded at 31.83, achieved at a 4-degree angle

of attack, representing an 18% improvement in aerodynamic performance compared to the whole MH60 BWB design. This configuration, utilizing the NACA 6412 airfoil on the outer wing, demonstrated enhanced aerodynamic efficiency. The utilization of a reflex airfoil on the center body combined with a high-lift airfoil on the outer wings emerged as the optimal choice for maximizing aerodynamic performance. The findings of this study hold significant potential to influence the widespread adoption of high-lift wing profiles for the outer wing and low-drag profiles for the main body of BWBs, thereby advancing the field of aerodynamic design in aerospace engineering. In the future, the performance of different airfoil studies will be investigated, which will be verified by CFD and wind tunnel tests. Advanced computational fluid dynamics (CFD) simulations with higher-resolution mesh and more sophisticated turbulence models to capture intricate flow characteristics. Experimental investigations using advanced measurement techniques like particle image velocimetry (PIV) to validate computational predictions. Comparative studies exploring the aerodynamic performance of hybrid airfoil designs that combine characteristics of high-lift and reflex configurations.

References

[1] Gauvrit-Ledogar J, Defoort S, Tremolet A, Morel F. Multidisciplinary overall aircraft design process dedicated to blended wing body configurations. Aviat Technol Integr Oper Conf. 2018;3025.

[2] Katz J, Plotkin A. Low-Speed Aerodynamics. Cambridge: Cambridge University Press; 2001.

[3] Bolsunovsky AL, et al. Flying wing—problems and decisions. Aircr Des. 2001;4(4):193-219.

[4] Liebeck RH. Design of the blended wing body subsonic transport. J Aircr. 2004;41(1):10-25.

[5] Scholz D. A student project of a blended wing body aircraft - From conceptual design to flight testing. EWADE 2007: 8th European Workshop on Aircraft Design Education; 2007 May 30-Jun 2; Samara, Russia.

[6] Hileman JI, Spakovszky ZS, Drela M, Sargeant MA, Jones A. Airframe design for silent fuel-efficient aircraft. J Aircr. 2010;47(3):956-69.

[7] Bonet JT, et al. Environmentally Responsible Aviation (ERA) Project-N+ 2 Advanced Vehicle Concepts Study and Conceptual Design of Subscale Test Vehicle (STV) Final Report. NASA; 2011.

[8] Bradley MK, Droney CK. Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase I Final Report. NASA CR-216847; 2011.

[9] Nickol C. Hybrid wing body configuration scaling study. AIAA Aerosp Sci Meet. 2012;337.

[10] Mohr B, Paulus D, Baier H, Hornung M. Design of a 450-passenger blended wing body aircraft for active control investigations. Proc Inst Mech Eng G J Aerosp Eng. 2012;226(12):1513-22.

[11] Gern FH. Conceptual design and structural analysis of an open rotor hybrid wing body aircraft. AIAA Struct Struct Dyn Mater Conf. 2013.

[12] Dehpanah P, Nejat A. The aerodynamic design evaluation of a blended-wing-body configuration. Aerosp Sci Technol. 2015;43:96-110.

[13] Prakasha PS, et al. Model-based collaborative design & optimization of blended wing body aircraft configuration: AGILE EU project. Aviat Technol Integr Oper Conf. 2018;4006.

[14] Larrimer B. Beyond Tube and Wing [Internet]. NASA; 2020 [cited 2024 Feb 5]. Available from: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/beyond_tube-and-wing_tagged.pdf

[15] Dakka S, Johnson O. Aerodynamic design and exploration of a blended wing body aircraft at subsonic speed. Int J Aviat Aeronaut Aerosp. 2019;6(5):17.

[16] Reist TA, Zingg DW. Optimization of the aerodynamic performance of regional and wide-body-class blended wing-body aircraft. AIAA Appl Aerodyn Conf. 2015.

[17] Yan WF, Wu JH, Zhang YL. Aerodynamic performance of blended wing body aircraft with distributed propulsion. Adv Mater Res. 2014;1016:354-8.

[18] Lehmkuehler K, Wong K, Verstraete D. Design and test of a UAV blended wing body configuration. Proc Int Counc Aeronaut Sci. 2012:23-8.

[19] Shim H, Park SO. Low-speed wind-tunnel test results of a BWB-UCAV model. Procedia Eng. 2013;67:50-8.

[20] Panagiotou P, Fotiadis-Karras S, Yakinthos K. Conceptual design of a blended wing body MALE UAV. Aerosp Sci Technol. 2018;73:32-47.

[21] Baig AZ, et al. A new methodology for aerodynamic design and analysis of a small scale blended wing body. J Aeronaut Aerosp Eng. 2018;7:1.

[22] Hoe PJ, Mohd NARN. Numerical prediction of blended wing body aerodynamic characteristics at subsonic speed. J Teknol. 2014;71(2).

[23] Chung PH, Ma DM, Shiau JK. Design, manufacturing, and flight testing of an experimental flying wing UAV. Appl Sci. 2019;9(15):3043.

[24] Communier D, et al. Aero structural modeling of a wing using CATIA V5 and XFLR5 software and experimental validation. AIAA Atmos Flight Mech Conf. 2015;2558.
[25] Khushbash S, Javed A, Shams TA. Computational analysis of low mass moment of inertia flying wing. Int Bhurban Conf Appl Sci Technol. 2021:204-11.
[26] Kaya D, Kutay AT, Özkanaktı H. Flight time calculation of a blended-wing-body UAV through improved blade element and momentum theory. Ankara Int Aerosp Conf. 2021.
[27] Siouris S, Qin N. Study of the effects of wing sweep on the aerodynamic performance of a blended wing body aircraft. Proc Inst Mech Eng G J Aerosp Eng. 2007;221(1):47-55.
[28] Hepperle M. Airfoil Design for Light Tailless Airplanes. 2004.
[29] Eppler R. Airfoil data. In: Airfoil Design and Data. Berlin: Springer; 1990. p. 163-512.
[30] Liebeck RH. Calculation of low Reynolds number flows at high angles of attack. J Aircr. 1991;28(4).

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 363-376, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1575957

6306 Sayılı Kanun Kapsamında Sunulan Riskli Yapı Tespit Yöntemiyle Az Katlı Betonarme Binaların Değerlendirilmesi: Elazığ-Sivrice (2020) Depremi Sonrasında Hasar Görmüş Bina Örneği

Nurbanu DEMİRBAŞ[1*], Ayşe ÇELİK[2], Fatma ORAN[3]
[1,2] İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
[3] İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
[*1]n.demirbas@firat.edu.tr, [2] aysecelik2999@gmail.com ,[3] ffatmaoran@gmail.com

(Geliş/Received: 30/10/2024; Kabul/Accepted: 26/02/2025)

Öz: Bu çalışmada, olası bir depremde yıkılma veya ağır hasar alma riski bulunan binaların tespitinde kullanılan riskli yapı tespit yönteminin etkinliği incelenmiştir. Bu amaçla, 24 Ocak 2020 tarihinde meydana gelen Elazığ-Sivrice depremi sonrasında hasar gören bina portföyünü temsilen seçilen Aydın Apartmanı 6306 sayılı kanun kapsamında sunulan Riskli Yapı Tespit Yöntemiyle değerlendirilmiştir. Riskli bina tespitinden elde edilen değerlendirme sonuçları az katlı betonarme bir binanın deprem sonrası gözlenen hasar durumu ile kıyaslanarak yorumlanmıştır. Çalışma sonucunda incelenen bina özelinde, (i) yöntemin, binanın yapısal kusurlarına bağlı olarak deprem sonrası oluşan yapısal hasar durumu ile uyumlu sonuçlar verdiği, (ii) eleman ve kat bazlı yapılan değerlendirme sonuçları ışığında, yöntemin düşey taşıyıcı elemanlar arasında en riskli elemanın tespitinde oldukça etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Betonarme Bina, Risk Değerlendirmesi, Kentsel Dönüşüm, Hasar Tespit Çalışmaları.

An Evaluation of Low-Rise Reinforced Concrete Buildings Using Detection of Risky Buildings Declaring Within The Scope of Law No: 6306. The Case of Damaged Building In Elazığ-Sivrice (2020)

Abstract: In this study, the effectiveness of the Detection of Risky Buildings Method used to identify buildings at risk of collapse or severe damage in the event of a potential earthquake was examined. For this purpose, the Aydın Apartment Building was selected as a representative example from the portfolio of building damaged in the Elazığ-Sivrice earthquake, which occurred on January 24, 2020. The building was evaluated using the Detection of Risky Buildings Method within the scope of Law No. 6306. The evaluation results obtained from the detecting risky buildings were assested by comparing them with the observed damage status after the earthquake. As a result of the study, in the specific this study; (i) the method gives results consistent with the observed structural damages after the earthquake due to structural deficiencies of the building, and ii) the method was found to be very effective in determining the most risky (vulnerable) element among the vertical structural elements, in the light of the evaluation results made on element and story basis.

Key words: Reinforced Concrete Buildings, Risk Assessment, Urban Transformation, Damage Assessment Studies.

1. Giriş

Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Kanunu (6306 sayılı) kapsamında [1], zemin veya yapılaşma nedeniyle can ve mal kaybı oluşma riski bulunan alanlar riskli alan olarak tanımlanmaktadır. Ekonomik ömrünü tamamlamış ya da olası bir deprem karşısında yıkılma veya ağır hasar alma riski bulunan yapılar ise riskli yapı olarak değerlendirilmektedir. Riskli yapıların tespiti bu kanunun EK-2 bölümünde belirtilen Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslara (RYTEİE) [2] göre değerlendirilmektedir. Bu yapıların tespiti kat maliklerinin talebi doğrultusunda Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından lisanslandırılmış kurum ve kuruluşlarca yapılmakta, riskli olarak belirlenen yapılara yıkım kararı verilmektedir. Literatürde 6306 sayılı kanun kapsamında sunulan riskli yapı tespiti ile ilgili saha çalışmaları bulunmaktadır. Anıl vd. [3] tarafından yapılan çalışmada, riskli alan ilan edilmesi planlanan bölge (İstanbul ili-Beyoğlu ilçesi) üzerinde saha çalışması yapılarak risk tespiti yapılan 113 adet betonarme binanın %98'i riskli yapı olarak değerlendirilmiştir. Türkel ve Tekeli [4] tarafından yapılan çalışmada ise riskli yapı tespitinde kullanılan bazı parametrelerin (malzeme sınıfı, sargı etkisi) etkinliğinin araştırılması amaçlanarak 100 adet mevcut betonarme bina incelenmiştir. Çalışma sonucunda,

* Sorumlu yazar: n.demirbas@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0003-4439-9706, [2] 0009-0001-7887-9073, [3] 0009-0000-3116-3863

malzeme sınıfı ve sargı etkisinin riskli yapı tespitinde oldukça etkin olduğu, beton dayanımı düşük olan, düz yüzeyli donatı kullanılan ve etriye sıklaştırması yapılmayan binaların riskli yapı sınıfında bulunma olasılığının yüksek olduğu belirtilmiştir. Bahşi vd. [5] tarafından yapılan çalışmada ise 6306 sayılı kanun kapsamında riskli yapı tespiti yapılan (kanunun yürürlüğe girdiği 2012 yılı ile 2022 yılı arasında) çok sayıda binanın sayısal verileri değerlendirilmiştir. 6306 sayılı kanun kapsamında incelenen binaların çoğunluğunu 2000 yılı öncesi inşa edilen binaların oluşturduğu ve yürürlükte olan yönetmelik/standartlarda belirtilen tasarım esaslarının çoğunun sağlanmadığı görülmüştür. Bahşi vd. [5] tarafından yapılan bu çalışmada riskli yapı tespiti yapılan 250000 adet binanın %99,6'sı riskli yapı olarak tespit edilmiştir.

6306 sayılı kanun kapsamında sunulan riskli yapı tespit yöntemi kentsel dönüşüm çalışmalarına yön vermekte, yöntemin kullanımı rezerv yapı alanlarında kentsel dönüşüm kapsamına alınacak binaların belirlenmesi bakımından büyük önem arz etmektedir. Elazığ-Sivrice Depremi (2020) ve Kahramanmaraş Depremi (2023) sonrasında riskli alan (kentsel dönüşüm alanları) olarak ilan edilen bölgelerde Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlükleri tarafından resen riskli yapı tespit çalışmalarına başlanmış ve riskli yapı olarak tespit edilen binaların yıkım çalışmaları yapılmıştır [6-7]. Riskli alan olarak ilan edilen bölgelerdeki bina stoku özellikleri incelendiğinde, binaların çoğunluğunun yürürlükte olan yönetmeliklerde verilen şartların çoğunu sağlamadığı, alınan mühendislik hizmetinin oldukça sınırlı olduğu görülmüştür [6]. Dolayısıyla bu binaların çoğunluğunun riskli bina olarak değerlendirilmesi olağandır.

Literatürde RYTEİE'de [2] önerilen riskli yapı tespit yöntemini konu alan çalışmaların, olası bir deprem sonrasında yıkılma ve ağır hasar alma riski bulunan binaların önceden tespiti üzerine yoğunlaştığı görülmüştür. Ancak riskli yapı tespit yöntemi kullanılarak belirlenen risk durumunun deprem sonrası binalarda oluşan risk durumu veya hasar durumu ile uyumu üzerine eleman bazında yapılan herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışmada RYTEİE'de az katlı binalar için önerilen riskli yapı tespit yöntemi, literatürden farklı olarak Elazığ-Sivrice Depremi (2020) sonrasında hasar gören bina portföyünü temsilen hasar almış az katlı bir binaya (Aydın Apartmanı) uygulanmıştır. Çalışma kapsamında, olası bir deprem sonrasında yıkılma veya ağır hasar alma riski bulunan binaların önceden tespitinde kullanılan riskli yapı tespit yönteminin etkinliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, binanın riskli yapı tespit yönteminden elde edilen sonuçları (*eleman ve kat bazlı yapılan değerlendirme sonuçları*) ile Elazığ-Sivrice depremi sonrası binada gözlenen hasar durumu kıyaslanarak az katlı betonarme binalar özelinde değerlendirme yapılmıştır.

2. Riskli Yapı Tespit Yöntemi

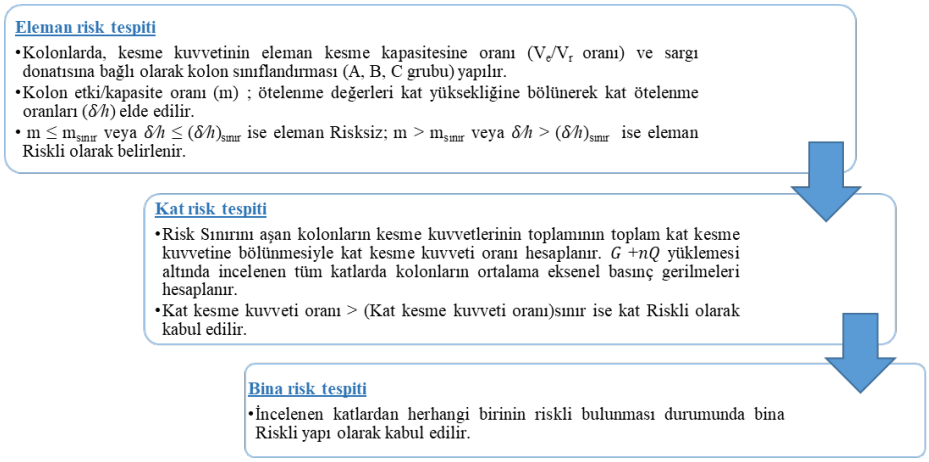
Olası bir afet (deprem, sel vb.) sırasında içerisinde yaşayanların can güvenliklerinin olmadığı yapılar riskli yapı olarak tanımlanmaktadır [8]. Riskli yapıların tespitinde uygulanacak hesap yöntemi detayları, incelenen binanın taşıyıcı sistem türü (betonarme, yığma ve karma sistemler) ve bina yükseklik sınıfına (az, orta ve yüksek katlı) bağlı olarak RYTEİE'nin [2] farklı bölümlerinde sunulmuştur. Bu çalışmada inceleme konusu binanın RYTEİE'ye göre az katlı betonarme bina sınıfında (toplam serbest kat adedi≤10 ve toplam bina yüksekliği≤30m) olması nedeniyle, bu bölümde az katlı betonarme binalar için önerilen risk tespit yöntemi açıklanmaktadır.

Az katlı betonarme binaların riskli yapı tespitinde modelleme aşamasından önce, binanın inceleme katı ve bodrum katında rölöve çalışması yapılmakta ve binadan bilgi toplanmaktadır. Bu noktada asıl amaç yerindeki binayı modele en doğru şekilde yansıtmaktır [9]. Rölöve çalışmasında, (i) binanın taşıyıcı sistem özellikleri, (ii) eleman boyutları, (iii) donatı detayları, (iv) taşıyıcı elemanların kattaki yerleşimi ve eksen açıklıkları ile dolgu duvar yerleşimi ve kalınlıkları belirlenmektedir. Binanın taşıyıcı sistem projeleri ile yerinde kontrol edilen eleman özellikleri karşılaştırılarak taşıyıcı sistem bilgi düzeyi katsayısı belirlenmektedir. Binanın projelerinin mevcut olmaması veya proje ve rölöve arasında herhangi bir uyumsuzluk olması durumunda asgari bilgi düzeyi; projelerin mevcut olması ve yerinde kontrol edilen taşıyıcı sistem özellik/detaylarının proje ile uyumlu olması halinde ise kapsamlı bilgi düzeyi kabul edilmektedir.

Bu yöntemde, yerinde mevcut beton dayanımının belirlenmesi amacıyla belirli sayıda kolon ve perde üzerinde tahribatsız yöntemle inceleme yapılmaktadır. En düşük dayanım değerlerinin elde edildiği kolon ve perde elemanların yarısından tahribatlı yöntemle beton numunesi alınmaktadır. Yerinde mevcut donatı dayanımı ve detaylandırmalarının belirlenmesi amacıyla ise belirli sayıda kolon ve perde üzerinde tahribatsız yöntemlerle incelemeler ve sıyırma işlemi yapılmaktadır. Elde edilen mevcut malzeme dayanımları RYTEİE'de [2] tanımlı olan asgari ve kapsamlı bilgi düzeyine ait katsayılar (asgari bilgi düzeyi için 0,9; kapsamlı bilgi düzeyi için 1 değeri) ile çarpılarak taşıyıcı elemanların kapasite hesabında kullanılmaktadır.

Değerlendirmede; rölöve ve bilgi toplama işleminden sonra binanın üç boyutlu analizi için sonlu eleman modeli kurulmaktadır. Binanın risk durumunun belirlenmesi için oluşturulan hesap modeli mod birleştirme yöntemi kullanılarak X, Y yönünde ve depremin her iki doğrultusu için analiz edilmektedir. Riskli yapı tespitinde,

değerlendirmede kullanılan hesap yöntemi genel olarak 3 aşamadan oluşmaktadır. Eleman risk tespitinden bina geneline doğru ilerleyen bu yöntemde sırasıyla elemanların, katların ve binanın risk durumu değerlendirilmektedir. (Şekil 1). Önerilen bu hesap yönteminde, tüm kolonlar göçme mekanizmalarına göre 3 farklı grupta sınıflandırılmaktadır; i) eğilme göçmesi-A grubu, ii) eğilme-kesme göçmesi-B grubu, iii) kesme göçmesi- C grubu. Sınıflandırmada, kesme kuvvetinin kesme kapasitesine oranı (V_e/V_r oranı) ve enine donatı detayı (sargılama etkisi) dikkate alınmaktadır (Tablo 1). Kolon ve kirişlerde V_e/V_r oran hesabı ayrıntılı olarak RYTEİE'nin [2] EK-D bölümünde verilirken, bu çalışmada V_e/V_r hesabı Şekil 2'de özet olarak verilmiştir. Şekil 2'de açıklanan iki farklı değerlendirmeden elde edilen minimum değer V_e/V_r değeri olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1. Riskli yapı tespiti yöntem algoritması.

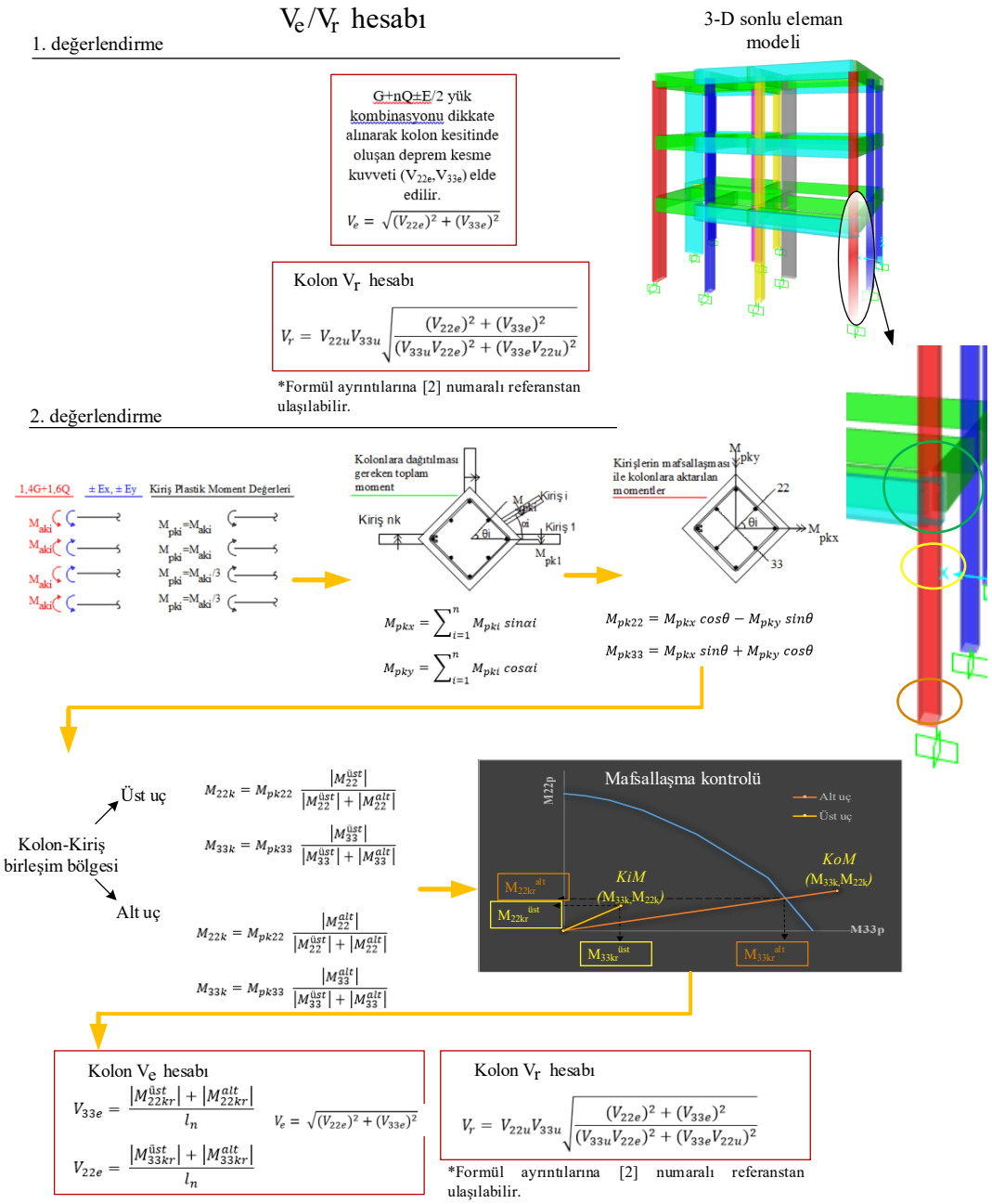
Tablo 1. Kolon sınıflandırma tablosu [2].

Ve/Vr	Aralığı s≤100 mm olan, her iki ucunda 135° kancalı etriyesi bulunan ve toplam enine donatı alanı $A_{sh} \ge 0{,}06 sb_k(f_{cm}/f_{ywm})$ denklemini sağlayan kolonlar	Diğer durumlar
$Ve/Vr \le 0{,}7$	A	B
$0{,}7 < Ve/Vr \le 1{,}1$	B	B
$1{,}1 < Ve/Vr$	B	C

Kolon sınıflandırmasının ardından, deprem etkisi altında elde edilen kesit moment değerleri, kolonların moment kapasitelerine bölünerek Etki/Kapasite Oranı (m) hesaplanmaktadır. Ötelenme değerleri kat yüksekliğine bölünerek ötelenme oranları (δ/h) elde edilmektedir. Elde edilen m ve δ/h değerleri Tablo 2'de kolon sınıflandırması ve eksenel yük oranına bağlı verilen sınır değerler ile kıyaslanarak eleman risk durumu belirlenmektedir. Tablo 2'de verilen sınır değerlerin aşılması halinde eleman riskli kabul edilmektedir.

Tablo 2. Kolonlar için sınır değerler [2].

A grubu kolonlar			
$N_k/(f_{cm} A_c)$	$m_{sınır}$	$(\delta/h)_{sınır}$	
≤ 0,1	5,0	0,035	
≥ 0,6	2,5	0,0125	
B grubu kolonlar			
$N_k/(f_{cm} A_c)$	A_{sh}/sb_k	$m_{sınır}$	$(\delta/h)_{sınır}$
≤ 0,1	≤0,0005	2,0	0,01
	≥0,006	5,0	0,03
≥ 0,6	≤0,0005	1,0	0,005
	≥0,006	2,5	0,0075
C grubu kolonlar			
$m_{sınır}$		$(\delta/h)_{sınır}$	
1.0		0.005	
*Tablodaki ara değerler doğrusal enterpolasyon ile bulunabilir.			



Şekil 2. Riskli bina tespitinde V_e/V_r hesabı.

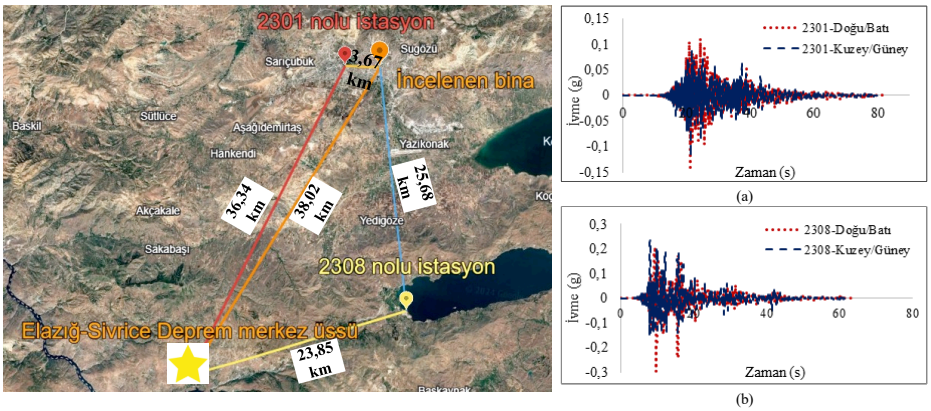
Eleman risk tespitinden sonraki adımda her kat için risk tespiti yapılmaktadır. Bu amaçla tüm katlarda, düşey yük etkisi altında tüm kolonların eksenel basınç gerilmeleri hesaplanmakta ardından kata ait ortalama eksenel basınç gerilmeleri elde edilmektedir. Kolonların ortalama basınç gerilme değerlerine bağlı olarak kat kesme kuvveti oranı sınır değerleri belirlenmektedir (Tablo 3). Riskli bulunan kolonların kesme kuvvetlerinin toplamının ilgili katta kat kesme kuvvetine bölünmesiyle hesaplanan kat kesme kuvveti oranı ile sınır değer karşılaştırması yapılarak ilgili katın risk durumu tespit edilmektedir. Kat kesme kuvveti oranlarının sınır değeri aşması halinde kat riskli olarak değerlendirilmektedir. Değerlendirme sonucunda, herhangi bir katın riskli bulunması durumunda bina Riskli yapı olarak tanımlanmaktadır.

Tablo 3. Riskli bina tanımlamasında kullanılan kat kesme kuvveti oranı sınır değerleri [2].

Kolon ortalama basınç gerilme değerleri	Kat kesme kuvveti oranı sınır değerleri
$\geq 0{,}65\ f_{cm}$	0
$0{,}1 f_{cm} \geq$	0,35
*Tablodaki ara değerler doğrusal enterpolasyon ile bulunabilir.	

3. Elazığ-Sivrice Depremi Sonrası Hasarlı Binalar Üzerine Yapılan İncelemeler

24 Ocak 2020 tarihinde merkez üssü Sivrice olan bir deprem meydana gelmiştir. 24 Ocak Elazığ-Sivrice depremi Elazığ ili başta olmak üzere çevre illerde de hissedilmiştir. Sivrice (Elazığ) depremine ilişkin veriler, AFAD-TADAS [10] veri tabanından elde edilmiştir. Depremin 24 Ocak 2020 tarihinde, yerel saatle 20:55'te meydana geldiği, büyüklüğünün Mw 6.8 olduğu, merkez üssünün 38.36° enlem ve 39.06° boylamda meydana geldiği ve odak derinliğinin 8.06 km olduğu belirlenmiştir. Depremin merkez üssü, Elazığ-Merkez ve Sivrice'de bulunan istasyonların konumları ile birbirlerine olan mesafeleri incelenmiş, Şekil 3'te 2301 ve 2308 numaralı istasyonlardan alınan ivme kayıtları her iki doğrultu için grafiksel olarak verilmiştir. İncelenen binaya en yakın mesafede bulunan ivme kayıt istasyonundan (2301-Elazığ/Merkez) elde edilen veriler incelendiğinde bu istasyonda kaydedilen maksimum yatay ivme değerinin 0.14 g olduğu tespit edilmiştir (Tablo 4).



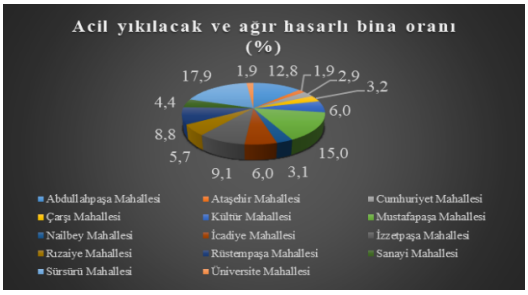
Şekil 3. Elazığ Depremi'nin merkez üssü ve incelenen binaya en yakın istasyonların konumları ile deprem ivme kayıtları a)2301 nolu istasyon, b)2308 nolu istasyon.

Tablo 4. Elazığ Depremi merkez üssüne ve incelenen binaya en yakın istasyonlardan alınan en büyük yer ivmesi değerleri

Deprem Kayıt İstasyonu	Enlem	Boylam	Depremin Merkez Üssüne Olan Mesafe (km)	İnceleme Konusu Binaya Olan Mesafe (km)	PGA(g)
Elazığ-Merkez (2301 İstasyon)	38.67043°	39.19267°	36,34	3,67	0,14
Elazığ-Sivrice (2308 İstasyon)	38.45063°	39.3102°	23,85	25,68	0,30

Deprem sonrası Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından il genelinde hasar tespit çalışmalarına başlanmış, kesin hasar tespit ve itiraz süreçleri ile birlikle yaklaşık üç aylık sürede hasar tespit çalışmaları tamamlanmıştır. İl genelinde 14.04.2020 tarihi itibariyle ilan edilen sonuçlara göre toplam 86.595 bina teknik ekiplerce incelenmiş olup, 16.606 adet bina acil yıkılması gereken ve ağır hasarlı binalar olarak sınıflandırılmıştır [6]. Hasar tespit çalışmaları sonucunda acil yıkılacak ve ağır hasarlı bina sınıfında bulunan binaların çoğunluğu Merkez Abdullah Paşa, Mustafa Paşa, Sürsürü ve Rüstem Paşa mahallelerinde bulunurken (Şekil 4), il genelinde yıkım ve hasar özellikle bu mahallelerde yoğunlaşmıştır [11]. Merkez Abdullah Paşa,

Mustafa Paşa, Rüstem Paşa ve Sürsürü mahalleleri Bakanlık tarafından başlatılan kentsel dönüşüm çalışmaları kapsamında Riskli Alan (kentsel dönüşüm alanları) olarak ilan edilmiştir [6].



Şekil 4. Elazığ ili merkez mahallelerinin bir bölümü hasar dağılımı [11].

Fırat Yapısal Hasarları Araştırma Grubu (FYHAG) tarafından yapılan saha incelemelerine dayanarak riskli alan ilan edilen bu mahallelerdeki bina stoku incelemelerinden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir [11].

- Deprem sonrası hasar gören bina stokunun çoğunluğu 1975-1998 yılları arasında inşa edilmiş olup, kat adedi 5-6 arasında değişen, betonarme çerçeve sistemli binalardan oluşmaktadır.
- Yapılan saha incelemelerinde, binaların inşa yıllarında yürürlükte olan yönetmelik/standartlarda belirtilen şartların çoğunu sağlamadığı görülmüştür. Taşıyıcı elemanlarda sarılma bölgelerinin oluşturulmamış olması, kesit üzerinde sargı etkisini olumsuz yönde etkileyen birçok durumla (250-350 mm arasında değişen geniş etriye aralıkları, çiroz kullanılmaması, kanca detaylarının 900 yapılması) karşılaşılması bu durumu göstermektedir.
- Sahada malzeme kalitesinin tespitinde gözlemsel olarak yapılan incelemelerde betonun elle karılan beton olduğu, düz yüzeyli donatı kullanıldığı görülmüştür. Deprem sonrası enkaz haline gelmiş binalardan alınan (sınırlı şartlar altında) numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda ise malzeme kalitesinin düşük olduğu (beton basınç dayanımı 7 ~10 MPa, donatı akma dayanımı 220 MPa) tespit edilmiştir.
- Ayrıca, riskli alan olarak tanımlanan mahallelerde incelenen bina stoku üzerinde binaların deprem davranışı üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğu bilinen yapısal düzensizlik durumlarının da mevcut olduğu görülmüştür. İncelenen binalar üzerinde plan düzensizliği, yumuşak/zayıf kat, kapalı çıkma durumları ile yaygın olarak karşılaşılmıştır. Ayrıca, bu binalarda taşıyıcı elemanların plan üzerinde simetrik dağılıma sahip olmaması ve güçlü kolon-zayıf kiriş koşulunun sağlanmaması durumları bina stokunun deprem davranışını olumsuz yönde etkilemiş, hasarı artırıcı rol oynamıştır.

3.1. Riskli alan olarak ilan edilen bölgede incelenen örnek bina: Aydın Apartmanı

Elazığ-Sivrice depremi sonrasında hasarın yoğun olarak gözlendiği Mustafa Paşa mahallesinde konumlanan Aydın apartmanı bu çalışmada, deprem sonrası riskli alan ilan edilmiş bölgelerdeki az katlı bina portföyünü temsilen seçilmiştir. Aydın apartmanı, 1992 yılında inşa edilmiş, 2020 yılında meydana gelen Elazığ-Sivrice depremi sonrasında yapılan hasar tespit çalışmaları sonucunda ağır hasar sınıfına alınmış ve binanın acil yıkımı gerçekleştirilmiştir. Depremden hemen sonra binanın yıkımına kadar geçen kısa süre içerisinde FYHAG tarafından yapılan incelemelerle binaya ait bazı bilgiler (inşa yılı, kat yükseklikleri, yapısal düzensizlik durumları) toplanmış ve hasar gözlemleri fotoğraflanmıştır.

Ön ve arka cephe görünümleri Şekil 5'te verilen Aydın apartmanı bodrum, zemin ve 4 normal kattan oluşmaktadır. Binanın zemin katı ticari, normal katları ise konut olarak kullanılmaktadır. Zemin katın ticari amaçlı kullanımı nedeniyle zemin katı normal katlara oranla daha yüksek olup, zemin kat yüksekliği 3,40 m, normal kat yüksekliği ise 2,70 m'dir. FYHAG tarafından yapılan saha çalışmaları sırasında (gözlemsel inceleme) elle karılan beton (C7~C10) ve düz yüzeyli donatı (S220) kullanıldığı, etriye aralığının yaklaşık 300 mm olduğu görülmüştür [11]. Ayrıca, binanın tasarımı aşamasında mimari fonsiyonellik göz önünde bulundurularak kolonların güçlü yönlerinin çoğunlukla ana caddeye dik doğrultuda yerleştirildiği görülmüştür (Şekil 6).

Bina üzerine yapılan incelemelerde, zemin katta bir adet kolonda kesme hasarı meydana gelmiştir. Bina üzerinde hem yumuşak/zayıf kat varlığının hem de plan üzerinde düşey taşıyıcıların güçlü yönlerinin tek doğrultuda yerleşiminin depremden sonra binada oluşan hasar üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.

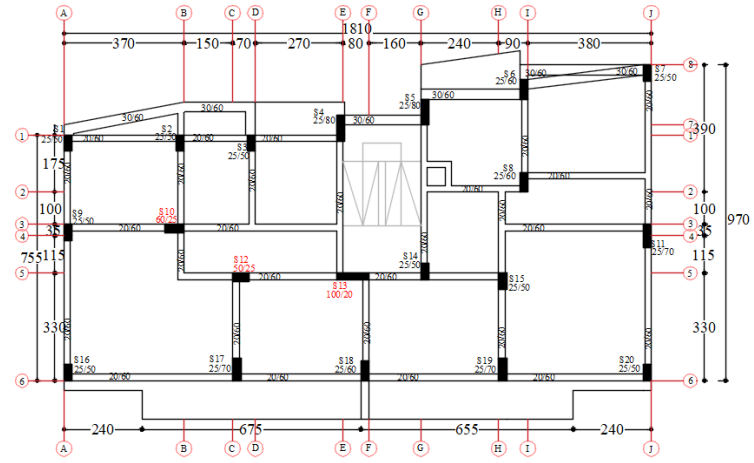


Şekil 5. Aydın apartmanı cephe görüntüleri.

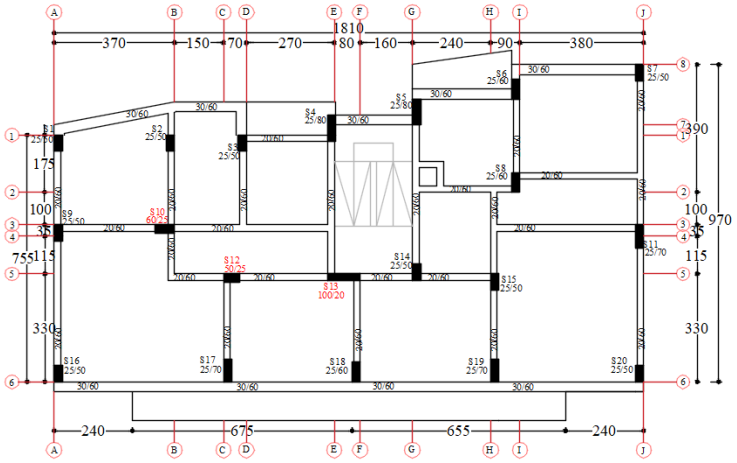
4. Modelleme Detayı

Çalışma kapsamında, 6306 Sayılı kanun kapsamında sunulan RYTEİE'ye göre az katlı betonarme binalar için önerilen risk tespit yöntemiyle Aydın Apartmanının risk durumu değerlendirilmiştir. Bu amaçla riskli yapı tespit yöntemine göre, incelenen binanın 3-boyutlu sonlu eleman modeli kurulmadan önce binanın taşıyıcı sistem projelerinin elde edilmesi ve/veya projenin yerinde kontrolünün yapılması gerekmektedir. Ancak Aydın Apartmanının Elazığ-Sivrice depreminden hemen sonra yıkımı gerçekleştirildiği için projenin yerinde kontrolünün yapılması mümkün olmamıştır. FYHAG tarafından yapılan saha çalışmasında binanın deprem sonrası yapısal hasar durumuna odaklanılmış, hasar nedenleri araştırılmış, bina hakkında sınırlı sayıda bilgi elde edilebilmiştir. Bu çalışmada, modelleme aşamasında Aydın Apartmanına ait il belediyesinden temin edilen taşıyıcı sistem projesi kullanılmıştır. Zemin ve normal katları için verilen kat planları ve düşey taşıyıcı eleman kesit detayları (Şekil 6) dikkate alınarak kat adedi ve kat yükseklikleri ile uyumlu olarak tüm katlar 3 boyutlu modele yansıtılmıştır. Proje üzerinde düşey taşıyıcı eleman kesit detaylarında etriyeler sarılma ve orta bölge için sırasıyla 100 mm ve 200 mm olarak belirtilmişken, bu çalışmada modelleme aşamasında etriye aralığı 300 mm [11] numaralı referanstaki saha gözlemleri esas alınarak) olarak kabul edilmiştir.

Riskli yapı tespitinde, yerinde mevcut malzeme dayanımlarının belirlenmesi amacıyla belirli sayıda kolon üzerinde tahribatsız/tahribatlı yöntemler kullanılarak inceleme yapılması gerekmektedir. Ancak Aydın Apartmanının deprem sonrasında acil yıkılacak bina sınıfına alınması sebebiyle yerinde mevcut malzeme dayanımlarının belirlenmesi de mümkün olmamıştır. Bu çalışmada malzeme dayanımlarının belirlenmesinde, FYHAG tarafından göçen binalardan alınan malzeme örneklerinin deney sonuçları esas alınmıştır. Mevcut beton basınç dayanımı 8 MPa, donatı akma dayanımı ise 220 MPa olarak alınmıştır. Projede verilen taşıyıcı sistem özelliklerinin yerinde kontrol edilmemiş olması nedeniyle hesaplarda mevcut malzeme dayanımları asgari bilgi düzeyi katsayısı (0,90 değeri) ile çarpılarak dikkate alınmıştır. Yapısal modellemede her kat için rijit diyafram kabulü yapılmış, döşemeler tanımlanmamıştır. Döşemelerden gelen yükler doğrudan kirişlere etki ettirilmiştir. Model SAP2000 [12] programı kullanılarak mod birleştirme yöntemiyle analiz edilmiştir. Model tasarımı ve analiz için gerekli bilgiler Tablo 5'te verilmiştir.



Zemin Kat Planı



Normal Kat Planı

	Zemin Kat			1. Kat		
	b/d	As	Etriye	b/d	As	Etriye
S1	25/50	6Ø14		25/50	6Ø14	
S2	25/50	10Ø14		25/50	8Ø14	
S3	25/50	8Ø14		25/50	6Ø14	
S4	25/80	10Ø14		25/80	10Ø14	
S5	25/80	10Ø14		25/80	10Ø14	
S6	25/60	8Ø14		25/60	8Ø14	
S7	25/50	6Ø14		25/50	6Ø14	
S8	25/60	8Ø14		25/60	8Ø14	
S9	25/50	8Ø14		25/50	6Ø14	
S10	25/50	10Ø14	Ø8/20-10	25/50	8Ø14	Ø8/20-10
S11	25/50	12Ø14		25/50	10Ø14	
S12	25/50	6Ø14		25/50	6Ø14	
S13	20/100	12Ø14		20/100	12Ø14	
S14	25/50	8Ø14		25/50	8Ø14	
S15	25/50	8Ø14		25/50	6Ø14	
S16	25/50	8Ø14		25/50	6Ø14	
S17	25/70	12Ø14		25/60	10Ø14	
S18	25/60	10Ø14		25/50	8Ø14	
S19	25/70	12Ø14		25/60	10Ø14	
S20	25/50	6Ø14		25/50	6Ø14	

	2. Kat			3. ve 4. Kat		
	b/d	As	Etriye	b/d	As	Etriye
S1	25/50	6Ø14		25/50	6Ø14	
S2	25/50	6Ø14		25/50	6Ø14	
S3	25/50	6Ø14		25/50	6Ø14	
S4	25/80	10Ø14		25/80	10Ø14	
S5	25/80	10Ø14		25/80	10Ø14	
S6	25/60	8Ø14		25/60	8Ø14	
S7	25/50	6Ø14		25/50	6Ø14	
S8	25/60	8Ø14		25/60	8Ø14	
S9	25/50	6Ø14		25/50	6Ø14	
S10	25/50	6Ø14	Ø8/20-10	25/50	6Ø14	Ø8/20-10
S11	25/50	8Ø14		25/50	6Ø14	
S12	25/50	6Ø14		25/50	6Ø14	
S13	20/100	12Ø14		20/100	12Ø14	
S14	25/50	6Ø14		25/50	6Ø14	
S15	25/50	6Ø14		25/50	6Ø14	
S16	25/50	6Ø14		25/50	6Ø14	
S17	25/50	8Ø14		25/50	6Ø14	
S18	25/50	6Ø14		25/50	6Ø14	
S19	25/50	8Ø14		25/50	6Ø14	
S20	25/50	6Ø14		25/50	6Ø14	

Şekil 6. Kat planları, projede verilen düşey taşıyıcı eleman boyut ve donatı detayları (ölçüler cm biriminde verilmiştir).

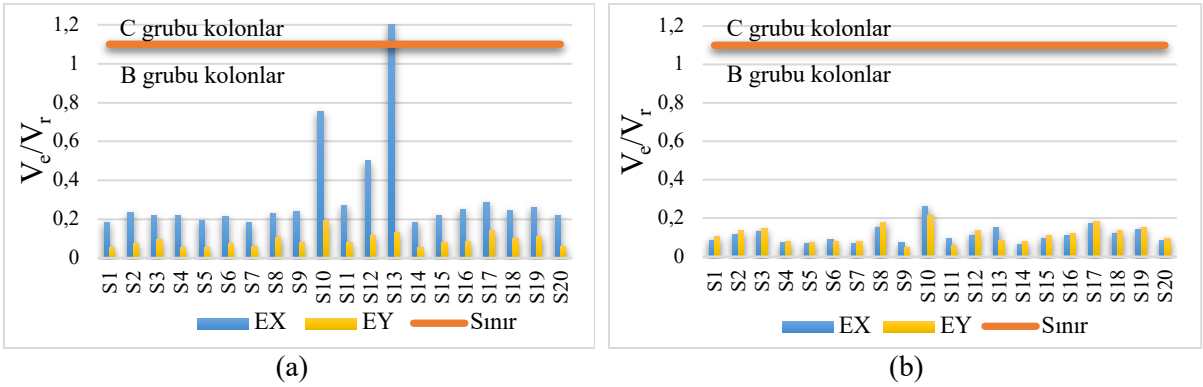
Tablo 5. Model tasarımı ve analize ait bilgiler.

İl/İlçe/Mahalle		Elazığ/Merkez/Mustafa Paşa
Bina kullanım tipi		Ticari+konut
Kat adedi		Bodrum+Zemin+4 Normal kat
Kat yüksekliği (m)	Zemin	3,40
	Normal	2,70
Mevcut malzeme dayanımı (MPa)	Beton	8
	Donatı	220
Döşeme kalınlığı (m)		0,12
Kaplama+sıva ağırlığı (kN/m^2)		1,50
Hareketli yük(kN/m^2)		2,00
Duvar yükü(kN/m^2)		2,40
Muatafa Paşa mahallesi zemin tipi		D sınıfı [13]
Hareketli yük azaltma katsayısı		0,30
Deprem düzeyi		DD-2
Tasarım spektral ivme katsayıları	S_{ds}	1,035
	S_{d1}	0,536

5. Aydın Apartmanın Risk Tespit Sonuçları

Risk değerlendirmesi yapılan Aydın apartmanının 3D sonlu eleman modeli mod birleştirme yöntemi kullanılarak x ve y yönlerinde depremin her iki doğrultusu (± EX, ± EY) için analiz edilmiştir. Riskli yapı tespitinde kullanılan yöntem gereği, eleman risk tespitinden bina geneline doğru ilerleyen aşamalı bir değerlendirme yöntemi benimsenmiştir.

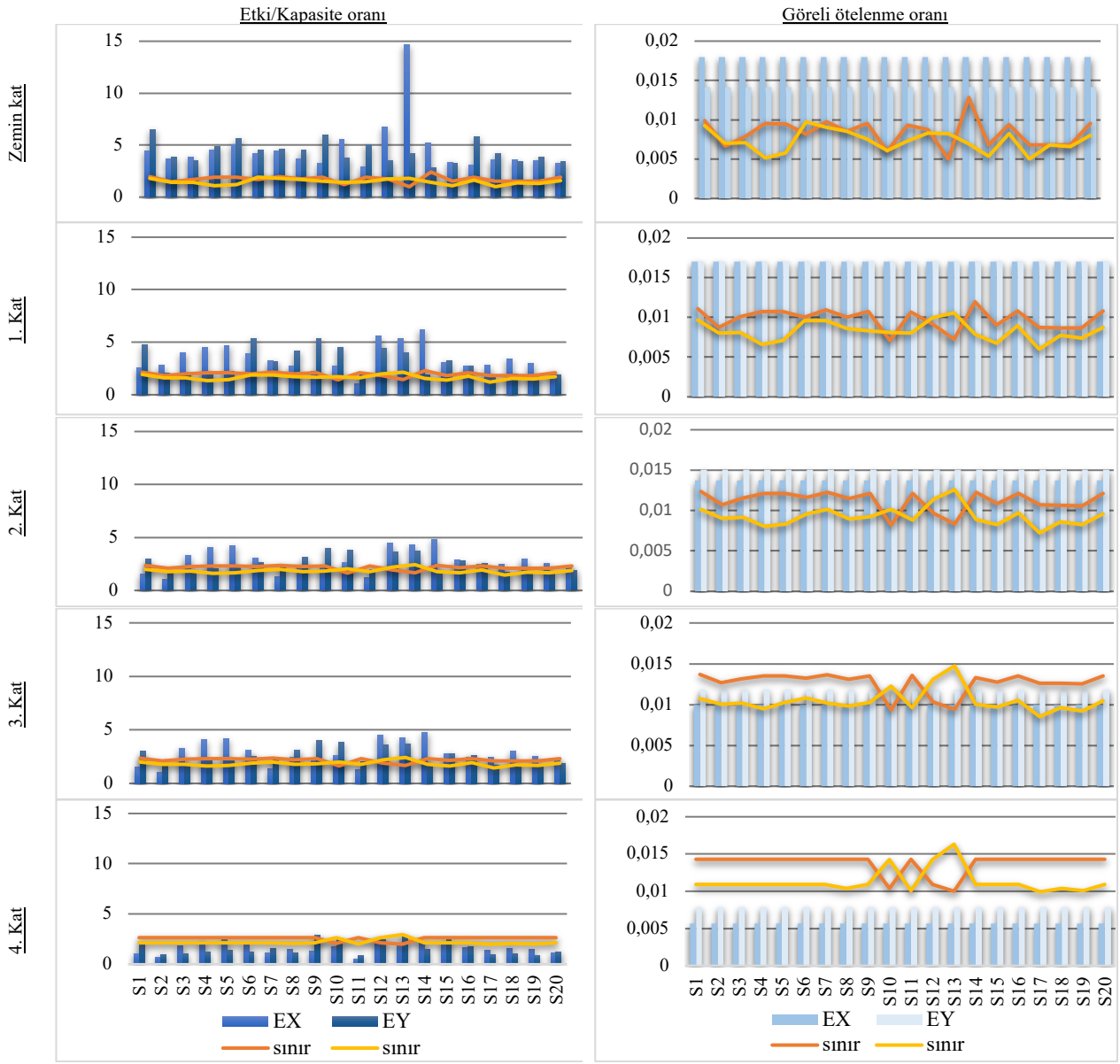
Eleman risk durum değerlendirmesinde ilk olarak model üzerinde tüm kolonların (S1-S20), kesme kuvvetinin eleman kesme kapasitesine oranları (V_e/V_r) hesaplanmıştır. V_e/V_r oranları ile elemanların enine donatı detayları (sargılanma durumları) dikkate alınarak kolon sınıfları (Tablo 1) belirlenmiştir. Saha çalışmaları kapsamında Aydın Apartmanı ile temsil edilen bina portföyünde genellikle etriyelerin 100 mm'den büyük aralıklar ile yerleştirildiği ve kancaların 90° yapıldığı görülmüştür. Dolayısıyla Tablo 1'üzerinden yapılan sınıflandırmada bu çalışmada V_e/V_r oranına bağlı olarak model üzerinde tüm kolonların B veya C sınıfında dağılım göstermesi beklenmektedir. Hesaplanan V_e/V_r değerlerinin B grubu ve C grubu ayrımı için verilen sınır değerin (Tablo 1, sınır değer =1,10) üzerinde kalması halinde kolonlar C grubu olarak, aksi halde B grubu olarak sınıflandırılacaktır. Şekil 7'de Zemin Kat ve 1. Katta bulunan kolonların V_e/V_r değerleri pozitif X ve Y yönü için grafiksel olarak verilmiştir. V_e/V_r değerleri incelendiğinde, en yüksek V_e/V_r değerinin pozitif X yönü için zemin katta bulunan S13 kolonunda elde edildiği görülmüştür. Zemin katta bulunan bir adet kolon (S13 kolonu) hariç model üzerinde bulunan tüm kolonların B grubu (eğilme-kesme göçmesi), zemin katta bulunan S13 kolonunun ise C grubu (kesme göçme mekanizması) sınıfında olduğu görülmüştür. Diğer normal katlarda bulunan elemanlar için 1. Kata benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle Şekil 7'de sadece Zemin ve 1. Katta bulunan eleman sonuçları grafiklerde paylaşılmıştır. Aynı zamanda hesaplamalar tüm katlarda X ve Y yönleri için depremin her iki doğrultusu için yapılmışken, grafiklerde en büyük değerlerin elde edildiği yön ve doğrultulara (+EX ve +EY) ait sonuçlar paylaşılmıştır.



Şekil 7. V_e/V_r oranına bağlı kolon sınıflandırması, a) Zemin Kat, b) 1.Kat

Kolon sınıflandırmasının ardından, kolonların etki/kapasite oranları (m) ve göreli ötelenme oranları (δ/h) hesaplanmış, kolon sınıfına bağlı olarak Tablo 2'de verilen sınır değerler ($m_{sınır}$ ve $(\delta/h)_{sınır}$) ile Şekil 8'de verilen grafiklerde karşılaştırılmıştır. Zemin katta bulunan elemanlarda üst katlara oranla genellikle daha büyük m değerleriyle karşılaşılmıştır. En yüksek etki/kapasite oranının (m) pozitif X yönü için zemin katta bulunan S13 kolonunda elde edildiği görülmüştür. Üst katlara doğru m değerlerinin S13 kolonu başta olmak üzere diğer tüm kolonlarda azaldığı, $m_{sınır}$ değerlerine yakın değerler aldığı görülmüştür. Bu durum üst katlara doğru elemanlardaki riskin azalmasına neden olmuştur. Özellikle son katta (4. Kat) bulunan elemanların çoğunda m değerleri sınır değerin altında kalmıştır.

Şekil 8 üzerinde göreli ötelenme oranları (δ/h) incelendiğinde ise, en büyük (δ/h) değerlerinin zemin katta elde edildiği görülmüştür. Bu durum üzerinde binanın zemin katının normal katlara oranla yüksek yapılması (zemin katın ticari amaçlı kullanılmakta) nedeniyle oluşan yumuşak kat mekanizmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Üst katlara çıkıldıkça göreli ötelenme oranlarının azaldığı ve $(\delta/h)_{sınır}$ değerlerine yakın değerler aldığı görülmüştür. Bu durum üst katlara doğru elemanlardaki riskin azalmasına neden olmuştur. Son katta bulunan elemanların tümü, 3. Katta bulunan elemanların ise birkaçının (δ/h) değerleri sınır değerin altında kalmıştır. Etki/kapasite oranı ve göreli ötelenme oranlarının sınır değer karşılaştırması sonucunda tüm katlarda elemanların (son katta bulunan çoğu eleman haricinde) risk sınırını aştığı görülmüştür (Tablo 6).



Şekil 8. Etki/kapasite (m) ve göreli ötelenme oranlarının (δ/h) sınır değer karşılaştırması.

Tablo 6. Eleman risk durumları

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Zemin kat	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Kat 1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Kat 2	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Kat 3	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Kat 4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓

	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20
Zemin kat	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Kat 1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Kat 2	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Kat 3	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Kat 4	✓	×	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓

* Tablo üzerinde riskli elemanlar × simgesi, risksiz bulunan elemanlar ise ✓ simgesi ile temsil edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı doğrultusunda, riskli bina tespit yöntemiyle yapılan değerlendirme sonuçları (eleman, kat risk durumlarını belirlenmesinde kullanılan m ve δ/h değerlerinin sınır değer kıyaslamaları) deprem sonrası hasar gözlemleri ile kıyaslanmıştır. Elazığ-Sivrice depremi sonrasında bina üzerinden yapılan incelemeler sonucunda en belirgin hasar zemin katta bulunan S13 kolonunda gözlenmiştir (Şekil 9). Kesme hasarı alan bu kolon (S13 kolonu) üzerinde ortalama 8 mm genişliğinde diyagonal kesme çatlağı oluşurken boyuna donatılarında burkulma meydana gelmiştir [11]. Zemin katta bulunan S13 kolonu haricinde diğer kolonlarda belirgin bir yapısal hasarla karşılaşılmamıştır (Şekil 10). Eleman risk durum değerlendirmesine göre, zemin katta bulunan S13 kolonu kesme göçmesi beklenen kolon sınıfına (C grubu kolon) alınmıştır. Ayrıca, sistem üzerinde C grubu olarak sınıflandırılan tek kolonun S13 kolonu olduğu, m ve δ/h değerlerinin diğer kolonlara oranla sınır değerlerin oldukça üstünde değerler aldığı görülmüştür.



Şekil 9. Elazığ-Sivrice depremi sonrasında zemin katta incelenen S13 kolonu, a) 45^0 kesme hasarı, b) kabuk betonda dökülme, c) boyuna donatıda burkulma, d) 8 mm boyutunda çatlak [11].



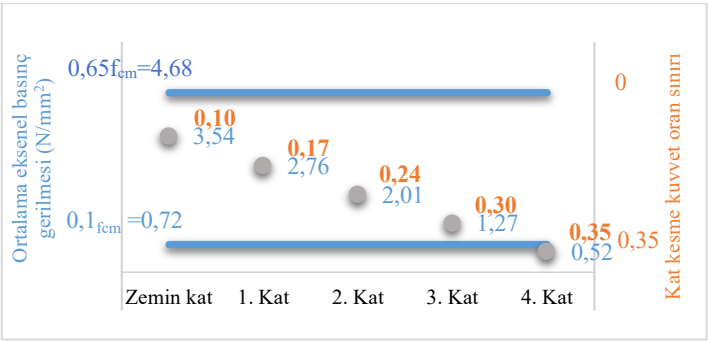
Şekil 10. Zemin katta belirgin hasar almayan kolonlar.

Eleman risk durumu belirlenen model üzerinde bir sonraki aşama olarak katların risk durumunun belirlenmesi gerekmektedir. Tablo 7'de tüm katlar için kolonların elde edilen kesme kuvvet değerleri verilmiş, her kat için risk sınırını aşan kolonların kesme kuvvetlerinin toplamı, kat kesme kuvvetine bölünerek kat kesme kuvveti oranları hesaplanmıştır. Katların risk durumunun belirlenebilmesi için, incelenen kata ait kesme kuvveti oranının Tablo 3'te belirtilen kesme kuvvet oranı sınır değerleri ile kıyaslanması gerekmektedir. Bu amaçla tüm katlar için kolonların eksenel basınç gerilme değerleri hesaplanmıştır. Tablo 7'de eksenel basınç gerilme değerleri toplamı katta bulunan toplam kolon sayısına bölünerek ortalama eksenel basınç gerilme değerleri elde edilmiştir.

Tablo 7. Katlara göre hesaplanan kesme kuvveti oranları ve ortalama eksenel basınç gerilmeleri.

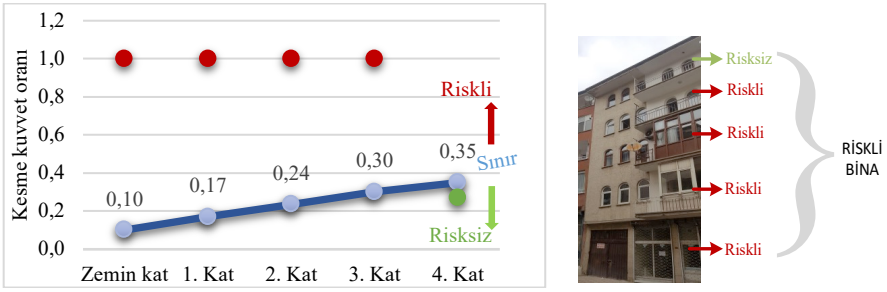
	Kesme kuvveti (kN)					Eksenel basınç gerilme değerleri (N/mm^2)				
	Zemin Kat	1. Kat	2. Kat	3. Kat	4. Kat	Zemin Kat	1. Kat	2. Kat	3. Kat	4. Kat
S1	92,21	78,05	29,43	26,68	13,60	2,91	2,24	1,64	1,04	0,43
S2	105,30	106,34	33,91	34,7	17,81	4,04	3,13	2,28	1,43	0,58
S3	108,05	173,24	130,19	95,57	54,42	3,61	2,77	2,02	1,27	0,53
S4	177,62	273,61	219,93	157,76	85,39	2,93	2,30	1,69	1,07	0,45
S5	178,95	279,85	227,06	164,08	91,72	2,94	2,31	1,70	1,08	0,46
S6	94,99	86,85	35,39	30,46	14,77	2,96	2,27	1,65	1,03	0,40
S7	127,30	187,82	133,44	99,53	57,25	3,51	2,68	1,95	1,22	0,50
S8	102,66	125,88	100,67	73,45	42,35	3,60	2,81	2,05	1,29	0,52
S9	72,33	68,36	56,01	42,47	26,7	3,26	2,58	1,88	1,17	0,46
S10	438,25	274,53	261,07	192,35	105,7	4,58	3,57	2,58	1,61	0,65
S11	82,89	37,42	37,20	24,35	7,95	3,01	2,37	1,73	1,08	0,43
S12	345,82	440,07	331,18	236,46	126,78	3,61	2,73	2,01	1,27	0,53
S13	2073,42	943,23	902,99	610,77	155,96	3,62	2,77	2,02	1,27	0,52
S14	129,93	252,28	188,04	130,64	67,53	3,55	2,81	2,06	1,30	0,54
S15	87,4	126,16	110,46	85,94	59,42	4,32	3,37	2,45	1,54	0,63
S16	79,41	103,76	91,78	68,9	45,02	3,15	2,46	1,79	1,12	0,45
S17	123,39	169,99	145,45	101,84	53,55	3,97	3,12	2,29	1,46	0,64
S18	112,78	177,56	148,91	108,07	62,43	3,95	3,11	2,28	1,46	0,63
S19	130,91	193,87	164,12	118,07	67,35	4,04	3,20	2,36	1,51	0,67
S20	72,82	83,54	74,88	50,97	24,71	3,19	2,53	1,84	1,16	0,48
Kesme kuvveti oranı:	**1**	**1**	**1**	**1**	**0,18**					
Ortalama eksenel basınç gerilmesi:						**3,54**	**2,76**	**2,01**	**1,27**	**0,52**

Elde edilen ortalama eksenel basınç gerilmesi değerlerine karşılık kesme kuvveti oranı sınır değerlerinin belirlenmesinde Şekil 11'de belirtilen grafik kullanılmıştır. Ortalama eksenel basınç gerilmesinin $0,65f_{cm}$ değerinden büyük olması halinde kesme kuvveti oranı sınırı sıfır iken; $0,1f_{cm}$ değerinden küçük olması halinde kesme kuvveti oranı sınır değeri 0,35 olarak verilmiştir (Şekil 11). Grafik üzerindeki ara değerler ise doğrusal enterpolasyon yapılarak belirlenmiştir.



Şekil 11. Katlara ait kesme kuvvet oran sınır değerlerinin belirlenmesi.

Hesaplanan kesme kuvveti oranları (Tablo 7), kesme kuvveti oranı sınır değerleri (Şekil 11) ile Şekil 12'de kıyaslanmıştır. Şekil 12'de verilen grafik incelendiğinde, son kat haricindeki tüm katlarda kesme kuvvet oranı sınırının aşıldığı görülmüştür. Dolayısıyla son kat haricindeki tüm katlar riskli olarak değerlendirilmiştir (Şekil 12). Riskli bina tespit yönteminde, bina üzerinde herhangi bir katın riskli bulunması halinde bina riskli bina olarak değerlendirilmelidir. Çalışma kapsamında, Aydın Apartmanının tüm katları için yapılan değerlendirme (x ve y yönleri ve depremin her iki doğrultusunda) sonucunda binanın Riskli Bina sınıfında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 12. Aydın Apartmanının risk değerlendirme sonucu.

6. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, Elazığ-Sivrice (2020) depreminden sonra ağır hasarlı olarak sınıflandırılan (*il genelinde yapılan hasar tespit sonuçlarına göre*) Aydın Apartmanı, 6306 sayılı kanun kapsamında az katlı betonarme binalar için sunulan risk tespit yöntemiyle değerlendirilmiştir. Binaların risk tespitinde kullanılan yöntemin etkinliği, deprem sonrası hasar almış az katlı bir bina özelinde değerlendirilmiştir. Eleman ve kat bazında riskli bina tespitinden elde edilen değerlendirme sonuçları binanın taşıyıcı elemanlarında gözlenen hasarları ile kıyaslanarak yorumlanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Riskli bina tespit yönteminin ilk aşaması olarak görülen kolon sınıflandırmasında, elemandan beklenen göçme mekanizması ile deprem sonrası oluşan hasar tipinin oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durumu zemin kattan çekilen hasarlı kolona ait fotoğraflar desteklemektedir. Dolayısıyla, eleman risk değerlendirme aşamasında kolonları esas alan bir değerlendirmenin kritik elemanların (deprem sonrası hasar alabilecek) belirlenmesinde yol gösterici olduğu söylenebilir.
- Değerlendirme konusu binanın, deprem sonrası gözlemlenen hasarı üzerinde yumuşak/zayıf kat kusurunun varlığı ile düşey taşıyıcıların çoğunun plan üzerinde güçlü yönlerinin tek doğrultuda (ana caddeye dik) yerleşimlerinin etkili olduğu düşünülmektedir. Riski yapı tespit yöntemiyle yapılan değerlendirme sonucunda en yüksek etki/kapasite (m) oranı ve göreli ötelenme oranlarının (δ/h) plan üzerinde güçlü yönleri ana caddeye paralel konumlanan zemin kat kolonlarında elde edildiği görülmüştür. Bu nedenle Aydın apartmanının eleman ve kat bazlı yapılan risk tespit değerlendirmesinin binanın yapısal kusurlarına bağlı olarak Elazığ-Sivrice depremi sonrası binada gözlenen hasarları ile uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Değerlendirme sonucunda Aydın Apartmanın son katı hariç tüm katları riskli bulunmuş, dolayısıyla bina geneli riskli bina olarak değerlendirilmiştir. Yöntemin mevcut bina stoku içerisinde riskli bina tespitindeki başarısının yanında özellikle düşey taşıyıcı elemanlar arasında en riskli elemanın tespitinde bu çalışma özelinde oldukça etkili bir yöntem olduğu görülmüştür.

Riskli yapı tespit yönteminin binanın yapısal kusur durumlarına bağlı olarak meydana gelen hasar durumunu yansıtabilmesinin yanında detaylı değerlendirme yöntemlerine göre kolaylıkla uygulanabilir bir yöntem olması nedeniyle az katlı eski bina stokunun risk değerlendirmesinde etkin olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.

Semboller

- V_e:düşey yükler ve deprem etkileri altında hesaplanan kesme kuvveti [kN]
- V_r: kolon, kiriş veya perde kesitinin kesme dayanımı [kN]
- s:etriye aralığı
- A_{sh}: toplam sargı donatısı alanı
- b_k: kolon veya perde başlık bölgesi çekirdeğinin enkesit boyutu [mm]

- f_{cm} : mevcut beton basınç dayanımı [MPa]
- f_{ywm} : boyuna donatı mevcut akma dayanımı [MPa]

Teşekkür

Makale kapsamında, 24 Ocak 2020 Elazığ-Sivrice depremi sonrasında saha çalışmalarında bulunan ve inceleme konusu bina hakkında bilgilerin toplanmasına katkı sağlayan Fırat Yapısal Hasarları Araştırma Grubu üyelerine teşekkürlerimizi sunarız. Gerçekleştirilen çalışmada: N.D., fikir sahibi, analiz sonuçlarının yorumlanması, makalenin yazılması, A.Ç. ve F.O., modelleme ve analizlerin tamamlanması iş paketlerinde katkı sağlamışlardır.

Kaynaklar

[1] T.C. Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi. Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun. Resmi Gazete: T.C Cumhurbaşkanlığı, 2012.

[2] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar. 6306 Sayılı Kanunun Uygulama Yönetmeliği: T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2019.

[3] Anıl Ö, Şahmaran M, Koçkar MK. 6306 Sayılı Kentsel Dönüşüm Yasası Risk Değerlendirme Tekniklerinin Saha Uygulaması: Beyoğlu Örneği. 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı; 11-13 Ekim 2017; Anadolu Üniversitesi.

[4] Türkel YE, Tekeli H. Konut Türü Betonarme Binaların Deprem Risk Değerlendirmesi. Politeknik Dergisi 2018; 21(3):669-680.

[5] Bahşi E, Dada A, Gümüş E, Cenikli S. 6306 Sayılı Kanun Kapsamında Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar Uyarınca Riskli Yapı Tespiti Yapılan Binaların Sayısal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi. Dirençlilik Dergisi 2023;7(1):153-169.

[6] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. https://elazig.csb.gov.tr/2020-yili-icerisinde-elazig-da-meydana-gelen-depremler-ve-sonrasinda-yapilan-calismalar-haber-260760. Erişim tarihi: "15-09-2024"

[7] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. https://kahramanmaras.csb.gov.tr/rezerv-alanlarin-yikim-islemi-devam-etmektedir.-haber-286838. Erişim tarihi: "15-09-2024"

[8] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. https://altyapi.csb.gov.tr/riskli-yapi-sureci-i-104285'. Erişim tarihi: "15-09-2024"

[9] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslara Yönelik Eğitim. https://altyapi.csb.gov.tr/riskli-yapilarin-tespit-edilmesine-iliskin-esaslara-yonelik-egitim-i-91755. Erişim tarihi: "15-09-2024"

[10] Türkiye İvme Veritabanı ve Analiz Sistemi. https://tadas.afad.gov.tr/map. Erişim tarihi: "15-09-2024"

[11] Şahin H, Alyamaç KE, Durucan AR, Demirel B, Ulaş Açıkgenç M, Bildik AT, Durucan C, Demir T, ve diğerleri. 24 Ocak 2020 Mw 6.8 Sivrice Depremi Elazığ Bölgesi Yapısal Hasarlar İnceleme ve Değerlendirme Raporu. Yapı ve Beton Uygulamaları ve Araştırma Merkezi Fırat Üniversitesi, 2020.

[12] CSI. SAP2000 Ultimate V24. Integr. Finite Elem. Anal. Des. Struct. Basic Anal. Ref. Manual, Comput. Struct. Acad. Perpetual Netw. Inc., Berkeley, California, USA, 2020.

[13] Palutoğlu M. Elazığ Kent Merkezinin Tektoniği Depremselliği ve Mikrobölgeleme. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2014.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 377-386, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1582954

Plentmiks Temel Tabakası Yapımında Krom Pasa Malzemesi Kullanımı ve Ekonomik Analizi

Mehmet Tevfik SEFEROĞLU[1*], Elif Nur ACI[1]
[1, 2] İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye
[*1] mtseferoglu@gmail.com, [2] acinur.elif@gmail.com

(Geliş/Received: 11/11/2024; Kabul/Accepted: 18/01/2025)

Öz: Bu araştırmanın amacı, Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ) standartlarına uygun tasarlanacak olan bir plentmiks temel (PMT) tabakası için Kop Dağı (Bayburt) krom maden sahasında cevher üretim faaliyetleri sonucu ortaya çıkan ve ekonomik değeri bulunmayan atıl durumdaki krom (Cr) pasa malzemesinin belirli oranlarda kullanımının sağlayacağı mali faydaların belirlenmesidir. Pasa karışım oranlarının maliyet analizleri yapılarak bir karayolunun PMT tabakası yapım maliyetleri de dahil olmak üzere krom pasasının temin noktasına olan mesafeye bağlı ekonomiklik değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışma neticesinde %100 Cr içerikli karışımının PMT tip-1 tabakalarında kullanımının mümkün olduğu ve %100 doğal agrega (Da) ile tasarlanan tabakaya kıyasla en uzak mesafe için bile %18'in üzerinde mali kazanç sağladığı belirlenmiştir. Cr pasa malzemelerinin, PMT tip-1 tabakaları için Da yerine alternatif olabileceği ve çevresel faydaların yanısıra tatmin edici ölçüde ekonomik fayda da sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Plentmiks temel tabakası, krom pasa malzemesi, maden atığı, geri dönüşüm, maliyet analizi.

Financial Analysis of the Use of Chrome Waste Material in the Construction of Plant mix Base Layer

Abstract: The purpose of this research is to determine the financial benefits of using certain proportions of chrome (Cr) waste material, which is a result of ore production activities in Kop Mountain (Bayburt) chrome mine site and has no economic value, for a plant mix base (PMB) layer to be designed in accordance with the Türkiye Highway Technical Specification standards. Cost analyses of waste mixture ratios were performed, and an economic evaluation was made depending on the distance to the chrome waste supply point, including the PMB layer construction costs of a highway. As a result of the study, it was determined that the use of the mixture with 100% Cr content in PMB type-1 layers is possible and provides a financial gain of over 18% even for the longest distance compared to the layer designed with 100% natural aggregate (NA). It was concluded that Cr waste materials can be an alternative to Da for PMB type-1 layers and that they will provide satisfactory economic benefits in addition to environmental benefits.

Key words: Plant mix base layer, Chrome waste material, mine waste, recycling, cost analysis.

1. Giriş

İnşaat sektörü ihtiyaçlar doğrultusunda sürekli yenilenme ve değişim sürecindedir. Tükenmek üzere olan doğal kaynakların korunması ve artan malzeme maliyetlerinin karşılanabilmesi için yeni yöntem ve kaynakların oluşturulması/geliştirilmesi gerekmektedir. Doğal malzeme kullanım oranlarının azaltılması, doğal kaynakların kontrollü kullanımı, düşük maliyetli ve kaliteli malzeme üretimi gün geçtikçe daha büyük bir zorunluluk haline gelmektedir. Bu nedenle, halihazırdaki hammadde rezervlerinin ve öz kaynakların kontrollü bir şekilde kullanımı önem taşımaktadır. Bu sebeple geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı önem arz etmektedir.

Agrega, karayolu tabakalarının en önemli ve en çok kullanılan malzemesidir. Agreganın yol tabakalarındaki kullanımı doğal agrega rezervlerini azalttığından ve yeni taş ocağı arayışlarına neden olduğundan, geri dönüşüm seçeneğinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu alandaki agrega ihtiyacını karşılamak için krom madenlerinden, cevheri çıkartıldıktan sonra atık durumunda olan krom (Cr) pasasının karayolu üstyapı tabakasında kullanılması hem ekonomik hem de çevreci bir geri dönüşüm yöntemi olabilir. Bu sayede atık pasalar yeniden değerlendirilerek taş ocaklarından elde edilen doğal agregaya (Da) olan ihtiyaç azalacak ve doğal rezervlerin tükenmemesine katkıda bulunulacaktır.

Son yıllarda tüm Dünya'da olduğu gibi ülkemizde de atıkların inşaat sektöründe agrega olarak kullanılabilirliği ve bunların ekonomik olarak değerlendirilmesine yönelik araştırmalar yapılmakta olup, bu çalışmaların sayısı her geçen gün artmaktadır. Literatür incelendiğinde yapılan çalışmaların yine de yetersiz olduğu

* Sorumlu yazar: mtseferoglu@gmaiil.com Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0003-4677-3335 [2] 0009-0005-7518-9025

ve genellikle magmatik kayaçlar [1], kalker kayaçlar [2] gibi doğal malzemelerin beton agregası olarak kullanılabilirliğini incelemeye yönelik çalışmalar olduğu görülmektedir. Bunun yanısıra uçucu kül, mermer atığı, geri dönüştürülmüş beton atığı (RCA) veya geri dönüştürülmüş asfalt atıklarının (RAP) da yol üstyapısında kullanımı ile ilgili çalışmalar da mevcuttur. Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu yapılan bir yol zemininden alınan numunelerin uçucu kül olmayan zemine kıyasla 10 kat daha büyük CBR değeri elde edilmiştir [3]. Başka bir çalışmada belirli oranlarda kireç-bentonit ve çimento-bentonit karışımlı kum numunelerine uçucu kül ikame edilerek, köy yolları gibi trafik yoğunluğu az yollarda zemin stabilizasyonu yapılmış, dolgu ve katkı malzemesi olarak uçucu kül kullanılmasının olumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir [4]. Son 10 yılda atık malzemelerin yol üstyapısında ya da betonda kullanılması durumunda ortaya çıkan mali kazanç ve üstyapıdaki mekanik etkileri gözlemleyen çeşitli araştırmalar incelendiğinde; Mermer maden atıklarının yol temel malzemesi olarak kullanılması durumunda Türkiye Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ) standartlarında belirtilen temel malzemesi kriterlerinin sağlanabildiği [5], kömür madeni atık malzemelerinin yol dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği [6], atık depo sahalarında depolanan mermer atıklarının bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakaları için KTŞ standartlarını sağlandığı ve mermer atıklarının agrega olarak kullanılmasının kalker agregaya göre daha ucuz olduğu [7], kurşun-çinko maden pasa atıkları ile hazırlanan betonlarda, karışımlardaki pasa oranının artmasının betonun mekanik ve fiziksel özelliklerine olumlu katkısı bulunduğu [8], RAP malzemesi, uçucu kül, çimento ve kireç katkı maddesi kullanılarak hazırlanan karışımların yapısal bağlayıcı kapasitesinin yüksek olduğu ve arazide başarılı sonuçlar verdiği [9], bozulmuş haldeki bitümlü sıcak kaplama aşınma tabakasından elde edilen RAP malzemesi ile doğal agrega ve bağlayıcı olarak da çimento kullanılarak plentmiks temel (PMT) tabakası yapımı ve nakliyesinin maliyetinde RAP kullanımın büyük ekonomik kazanç sağladığı [10], mermer madeni pasa atıklarının beton agregası olarak kullanılması halinde karbonat kökenli pasanın beton üretiminde agrega olarak kullanılabileceği, bu pasa malzemesinin kullanılmasıyla büyük ekonomik kazançlar elde edilebileceği ve bu gibi birçok farklı maden pasa malzemesinin kullanılmasının ekonomik kazançların yanı sıra çevresel faydalar oluşturabileceği sonucuna varılmıştır [11].

Bu çalışmada krom madenlerinde ekonomik değeri olan cevher ayrıştırıldıktan sonra geri kalan atık durumdaki krom pasa malzemelerinin, karayolu PMT tip-1 tabakasında agrega olarak kulanım oranı belirlenmiştir. Belirlenen oranlarda hazırlanan karışımlardan KTŞ standartlarına uygun olanlar için PMT yapım ve malzeme taşıma maliyetleri açısından maliyet analizleri yapılmıştır. Tamamı Da ile yapılacak olan bir PMT tabakasına göre, uygun Cr-Da karışımlarının ekonomiklik oranları belirlenmiştir.

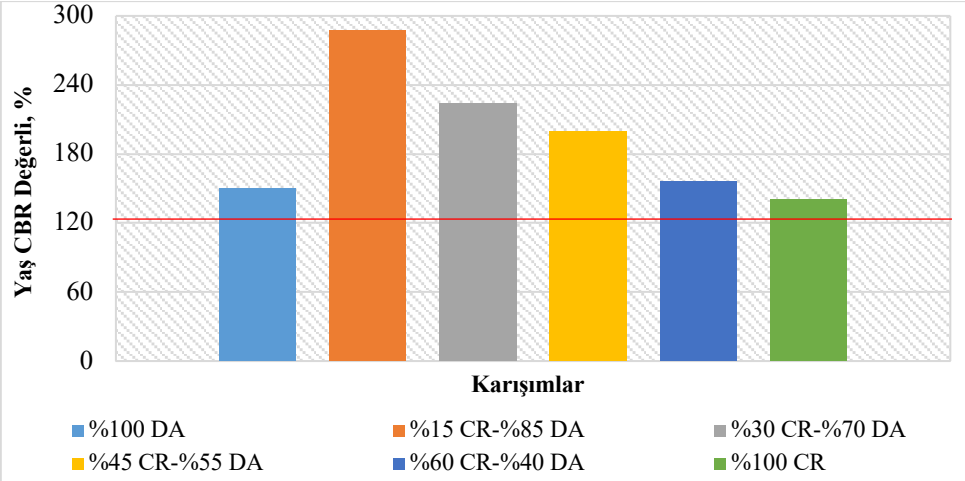
2. Materyal ve Yöntem

Cr pasası ve Da malzemesi çalışmada kullanılan malzemelerdir. Kullanılan doğal agreganın dane boyut içeriği 0-5 mm, 5-12 mm, 12-19 mm'lik gruplardan oluşmaktadır. Cr pasa malzemesi Bayburt Kop Dağı Krom Maden Ocağı'ndan temin edilmiştir. Elde edilen Cr pasası konkasörde kırma işlemine tabi tutularak maksimum dane boyutu 25 mm olacak biçimde ayarlanmıştır. Da yerine Cr ikame edilmesiyle, PMT tabakası tip-1 yapımı için farklı oranlarda karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bu karışımlar Tablo 1'de gösterilmekte olup, %100 Da karışımı da kontrol karışımı olarak hazırlanmıştır. KTŞ'nde PMT tip-1 için malzeme kriterleri; belirtilen gradasyon değerleri içerisinde kalması, 0,075 mm'den geçen filler malzeme oranının en fazla %10 olması ve yaş CBR değerinin minimum %120 olmasıdır [12]. Da ve Cr malzemeleri serim alanındaki silolara dane boyutlarına göre ayrı ayrı yerleştirilir. Karışım oranlarına göre hangi dane boyutundan hangi oranda isteniyorsa, istenilen kadar malzeme kayar bantlardan alınıp harmanlanır. Karışımların plentte harmanlanacak malzeme dane boyutuna göre oranları Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Karışımların dane boyutlarına bağlı karışım oranları.

Malzeme	**Da**			**Cr**
Dane boyut aralığı	0-5 mm	5-12 mm	12-19 mm	0-25 mm
Karışım oranları, %				
%100 Da	50	22	28	0
%15 Cr - %85 Da	45	20	20	15
%30 Cr - %70 Da	41	15	14	30
%45 Cr - %55 Da	30	10	15	45
%60 Cr - %40 Da	25	5	10	60
%100 Cr	0	0	0	100

Karışım numuneleri TS 3530 EN 933-1'e [13] göre elek analizi testine tabi tutulmuştur. Hazırlanan Cr-Da karışımlarına uygulanan elek analizi testi sonucu elde edilen gradasyon eğrileri KTŞ standartlarının PMT tip-1 için belirtilen limitler arasında kalmıştır. Ayrıca 0,075 mm'den küçük filler içeriği de %6 olarak belirlenmiş olup, en yüksek limit olarak belirtilen %10 kriterini sağlamaktadır. AASHTO T 193'e [14] göre yapılan yaş CBR testi sonuçlarına göre %100 Da ve Cr içeren karışımların tamamında KTŞ [12] minimum yaş CBR değeri olan %120 değerinin sağlandığı görülmekte olup krom pasasının karışımdaki oranı arttıkça CBR değerlerinde lineere yakın bir azalma olmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Karışımların yaş CBR test sonuçları.

3. Maliyet Analizi

Da ile Cr pasası karışımlarından oluşturulan PMT tip-1 tabakası yapımı için maliyet hesaplamalarını oluşturan giderler; malzemelerin maliyetleri, bu malzemelerin nakliye maliyetleri ve PMT tabakası yapım maliyetidir. Çalışmada kullanılacak olan Cr pasasının malzeme maliyeti, Cr bir atık olması ve kullanımı için bir bedel ödenmemesi sebebiyle malzeme maliyeti hesaplamalarına katılmamıştır.

Da malzemesi de Cr malzemesi de siloya karışımların hazırlanması için taşınmaktadır. Dolayısıyla malzemelerin, getirildikleri uzaklığa bağlı olarak bir siloya taşıma maliyeti mevcuttur. Doğal agreganın temin edildiği taş ocağı ile silo arasındaki mesafe 150 m olarak hesaplara katılmıştır. Cr pasasının her halükârda pasa atığının madenden uzaklaştırılıp atık depolama alanına götürülmesi için bir taşıma maliyetinin oluşacağı, serim alanına taşınmasının ilave bir maliyet oluşturmayacağı kabulüyle hesaplamalara katılmamıştır. Hazırlanan karışımların siloda harmanlanıp serim yapılacak çalışma sahasına taşınma maliyetlerinin, taşınan karışımın ne olduğu fark etmeksizin mesafenin aynı olması nedeniyle maliyet hesabına katılmamıştır. Malzeme nakliye maliyetlerinde yalnızca Cr pasasının maden alanından siloya olan taşıma maliyeti hesaplanmıştır. Maliyet analizi yapılacak olan PMT tip-1 tabakasının boyutlarının genişlik×uzunluk×kalınlık ölçülerinin sırasıyla 8 m×1.000 m×0,2 m olduğu kabul edilmiştir.

3.1. Da'nın Taş Ocağından Konkasöre Taşınma Maliyeti

Taş ocağından temini sağlanan Da, konkasör yardımıyla belirlenen dane boyutlarında kırılıp, ayrılarak depolanmak üzere serim sahasındaki silolara getirilir. Da malzemesinin, taş ocağından konkasöre taşıma maliyeti; taşıma uzunluğunun 150 m geçmemesi durumunda PMT tabakasının yapımı için gerekli birim fiyat kalemine dâhildir. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün (KGM) KGM/6100/3 pozuna [15] göre (elenmiş ve kırılmış taşıyla) PMT tabakası yapımında ocak ile konkasör arasındaki uzaklığın 150-10.000 m arasında olması veya 10.000 m'nin üzerinde olması durumlarında kazıdan farklı malzemelerinin taşınması için kullanılan iki poz numarası vardır. Bu pozlar Tablo 2'de verilmektedir [16,17]. Denklemlerdeki F taşıma maliyet tutarı (TL/ton), M ortalama taşıma uzaklığı (m), K motorlu araçlara ait taşıma katsayısı ve A zorluk katsayısıdır.

Tablo 2. Kazıdan farklı malzemelerinin taşınmasında kullanılan pozlar.

Poz No	Tanımı	
KGM 07.005/K	Kazıdan başka inşaat malzemesinin taşınması ≤ 10.000 m	**$F = A \times 1{,}25 \times K^{*} \times 0{,}00017 \times \sqrt{M}$**
	M	Ortalama taşıma mesafesi, m
KGM 07.006/K	Kazıdan başka inşaat malzemesinin taşınması > 10.000 m	**$F = A \times 1{,}25 \times K \times (0{,}0007 \times M + 0{,}01)$**
	M	Ortalama taşıma mesafesi, km
Her iki poz için	F	Tutar, TL
	K	Motorlu araçlara ait taşıma katsayısı
	A	Zorluk katsayısı
*K= 1.400 olup rayiç cetvelinde belirtilen (Poz 02.017) "Her cins ve tonajda motorlu araca ait" taşıma katsayısıdır.		

Kötü iklim koşulları gibi etkenler sebebiyle zor şartlarda yapılacak taşımalarda, işin özelliklerine göre, keşif yapılırken veya ihaleden önce idarecilerce onaylanmak kaydıyla belirlenen zorluk katsayısı, 1 (dahil) - 3 (dahil) arasında bir değerdir. Herhangi bir olumsuz durum olmayan koşullarda yapılacak taşımalarda bu katsayı, yine ilk keşif sırasında veya ihaleden önce 1'den küçük bir katsayı olarak kabul edilebilir. İlk keşif sırasında veya ihaleden önce bu katsayısının değeri tespit edilmemiş ise 1 olarak alınır [16]. Bu çalışmadaki hesaplamalarda A, 1 olarak kabul edilmiştir.

3.2. PMT Tabakası Yapım Maliyetleri

Elenmiş veya kırılmış ocak taşıyla PMT tabakası yapımında; malzeme, araç ve işçilik için KGM tarafından belirlenen ton (t) başına birim fiyatlar Tablo 3'te verilen KGM/6100/3 pozunda gösterilmektedir. Taş ocağı-konkasör arası 150 m'den fazla taşıma mesafesi, Da ve Cr pasasının plent sahasına, suyun işbaşına ve plente, karışımların serim noktasına nakliye tutarları birim fiyatlar haricindedir [15].

Tablo 3. PMT yapımı için kullanılan KGM/6100/3 pozu [15].

Rayiç No	Açıklama	2024 Birim Fiyat, TL/t
KGM/4103	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 19 mm (3/4") ve 12,5 mm (1/2") lik agrega hazırlanması	244,38
KGM/4105	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 12,5 mm (1/2") ve 9,5 mm (3/8") lik agrega hazırlanması	264,59
KGM/4107	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 4,75 mm (No.4) ve daha küçük agrega hazırlanması	280,74
KGM/4465/3	Plentmiks alttemel ve temel karışımı hazırlanması	52,81
KGM/4269	Malzemenin kantar ile tartılması	0,48
KGM/4466/5	Plentmiks temel ve alttemel karışımlarının elektronik duyargalı finişer ile serilmesi ve silindirle sıkıştırılması	126,09
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	104,79
Agrega ocağı ile konkasör arası mesafe 150 m'ye kadar taşınması fiyata dâhildir.		

Bu çalışmada teşkil edilecek PMT tip-1 tabakasının boyutları, AASHTO T 180 [18]'e göre gerçekleştirilen modifiye proktor testi ile belirlenmiş olan maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{maks}) değerleri ve gerekli olan toplam malzeme ağırlıkları Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. PMT tabaka yapımında kullanılacak toplam malzeme ağırlıkları.

Malzeme	Genişlik, m	Uzunluk, m	Kalınlık, m	γ_{maks}, t/m^3	Toplam malzeme ağırlığı, t
%100 Da	8	1.000	0,20	2,24	3.584,00
%15 Cr - %85 Da				2,252	3.603,20
%30 Cr - %70 Da				2,259	3.614,40
%45 Cr - %55 Da				2,268	3.628,80
%60 Cr - %40 Da				2,205	3.528,00
%100 Cr				2,069	3.310,40

3.3. Krom Pasa Malzemesi Siloya Taşıma Maliyetleri

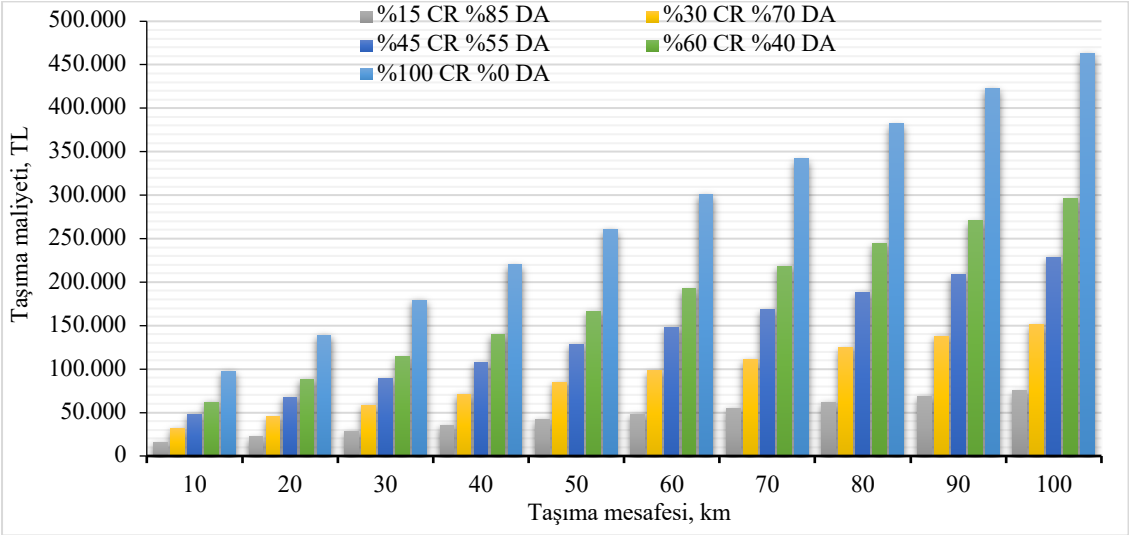
Cr pasasının maden ocağından silolara nakliye maliyeti Tablo 2'de verilen denklemler yardımıyla hesaplamalara dahil edilmiştir. Krom maden ocağının siloya olan uzaklığının 10.000 m'den fazla olduğu kabulüyle 07.006/K poz numarasından faydalanarak hesap yapılmıştır. Hazırlanan tüm karışımlar için Cr pasa malzemesinin siloya taşıma maliyetleri mesafeye bağlı olarak hesaplanarak Tablo 5'te gösterilmektedir.

Tablo 5. Cr pasa malzemelerinin farklı mesafelere bağlı olarak siloya taşınma maliyetleri.

Karışımlar	%100 Cr	%15 Cr - %85 Da	%30 Cr - %70 Da	%45 Cr - %55 Da	%60 Cr - %40 Da
Cr ağırlığı, t	3.310,40	540,48	1.084,32	1.632,96	2.116,8
Taşıma mesafesi, km	**Cr pasa malzemesi taşıma maliyetleri (maden sahasından siloya, TL)**				
10	98.484,40	16.079,28	32.258,52	48.580,56	62.974,80
20	139.036,80	22.700,16	45.541,44	68.584,32	88.905,60
30	179.589,20	29.321,04	58.824,36	88.588,08	114.836,40
40	220.141,60	35.941,92	72.107,28	108.591,84	140.767,20
50	260.694,00	42.562,80	85.390,20	128.595,60	166.698,00
60	301.246,40	49.183,68	98.673,12	148.599,36	192.628,80
70	341.798,80	55.804,56	111.956,04	168.603,12	218.559,60
80	382.351,20	62.425,44	125.238,96	188.606,88	244.490,40
90	422.903,60	69.046,32	138.521,88	208.610,64	270.421,20
100	463.456,00	75.667,20	151.804,80	228.614,40	296.352,00

Karışımlardaki Cr malzemesinin, temin edildiği maden ile silo arasındaki mesafenin 10-100 km arasında olmasından doğacak toplam siloya taşıma maliyetleri Şekil 2'de grafiksel olarak gösterilmektedir.

Karışımlardaki Cr oranı arttıkça malzemenin serim yapılacak alandaki silolara taşıma maliyeti de doğrusal olarak artmaktadır. Karışımda %100 Cr kullanılması durumunda 100 km uzaklığa taşınma maliyeti, %15 Cr içerikli karışımın taşınma maliyetinin yaklaşık 6 katıdır. Yapılan maliyet hesaplarında ilgili denklemlerde kullanılan A zorluk katsayısı 1 olarak kabul edilmiştir. Arazi ve iklim koşullarının da az zorlayıcı olması durumunda A, 1'den daha düşük olabilecek ve bu şekilde taşıma maliyeti de düşebilecektir.



Şekil 2. Karışımlardaki Cr pasasının farklı mesafelere göre siloya taşınma maliyetleri.

3.4. Karışımlardan PMT Yapım Maliyetleri

Geleneksel olarak %100 Da ile yapılacak bir PMT tabakası için KGM/6100/3 pozuna göre hesaplanan yapım maliyeti Tablo 6'da gösterilmektedir. Taş ocağı ile konkasör arasındaki uzaklığın 150 m'yi geçmediği kabul edilmiştir. Dolayısıyla taş ocağı ile konkasör arasındaki taşıma maliyetinin temel tabakası yapım maliyetine dahil edilmiştir. Bu maliyetlere, malzemelerin konkasörden serim yapılacak alana taşıma maliyeti dahil değildir. 1 km uzunluğunda bir yol için PMT tabakası yapımında kullanılacak %100 Da ağırlığı 3.584 t olarak belirlenmiştir.

Tablo 6. %100 Da malzemesi ile PMT yapım maliyeti.

Poz No	Tanımı	Kullanım Oranı, %	Miktar, t	2024 Birim Fiyat, TL	Tutar, TL
KGM/4103	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 19 mm (3/4") ve 12,5 mm (1/2") lik agregaların hazırlanması	28	1.003,52	244,38	245.240,22
KGM/4105	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 12.5 mm ve 4,75 mm. (No.4) lik agregaların hazırlanması	22	788,48	264,59	208.623,92
KGM/4107	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 4,75 mm (No.4) ve daha küçük agregaların hazırlanması	50	1.792,00	280,74	503.086,08
KGM/4465/3	Plentmiks alttemel ve temel karışımı hazırlanması	-	3.584,00	52,81	189.271,04
KGM/4269	Malzemenin kantar ile tartılması	-	3.584,00	0,48	1.720,32
KGM/4466/5	Plentmiks alttemel ve temel karışımlarının elektronik duyargalı finişerle serilmesi ve sıkıştırılması	-	3.584,00	126,09	451.906,56
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	-	3.584,00	104,79	375.567,36
Agrega ocağı ile konkasör arası 150 m mesafeye kadar taşınması fiyata dâhil				**Toplam**	**1.975.415,50**

Tablo 7'de %15 Cr - %85 Da karışımı için, PMT yapım maliyeti ve maden-serim alanı arasındaki uzaklığın 50 km olması durumuna göre KGM 07.006/K denklemi kullanılarak madenden serim alanına taşıma maliyeti hesap örneği gösterilmektedir. Krom için 0-25 mm malzeme hazırlanması pozu bulunmadığı için Özel poz/1 olarak isimlendirilmiş, atık sahasından ücretsiz temin edildiği için malzeme birim fiyatı kullanılmamıştır.

Tablo 7. %15 Cr - %85 Da karışımından yapılan PMT tabakası yapım ve nakliye maliyeti hesabı.

Poz No	Tanımı	Kullanım Oranı, %	Miktar, t	2024 Birim Fiyat, TL	Tutar, TL
KGM/4103	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 19 mm (3/4") ve 12,5 mm (1/2") lik agrega hazırlanması	20	720,64	244,38	176.110,00
KGM/4105	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 12,5 mm (1/2") ve 9,5 mm (3/8") lik agrega hazırlanması	20	720,64	264,59	190.674,14
KGM/4107	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 4,75 mm (No.4) ve daha küçük agrega hazırlanması	45	1621,44	280,74	455.203,06
KGM/4465/3	Plentmiks alttemel ve temel karışımı hazırlanması	-	3.603,20	52,81	190.284,99
Özel Poz/1	Krom pasasından 0-25 mm'lik agrega malzemesi hazırlanması	15	540,48	0	0
KGM/4269	Malzemenin kantar ile tartılması	-	3.603,20	0,48	1.729,54
KGM/4466/5	Plentmiks alttemel ve temel karışımlarının elektronik duyargalı finişerle serilmesi ve silindirle sıkıştırılması	-	3.603,20	126,09	454.327,49
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	-	3.603,20	104,79	377.579,33
KGM 07.006/K	Kazıdan başka inşaat malzemesinin taşınması >10.000 m (Cr nakliyesi)	**F = A × 1,25 × K × (0,0007 × M + 0,01)**			283.752,00
		A	1		
		K	1.400		
		M, km	50		
		Miktar, t	3.603,20		
				Toplam	**2.129.660,54**

Hazırlanan karışımlar KTŞ'nde PMT tabakası için gereken kriterleri sağlamıştır. Da'nın temin edildiği taş ocağının siloya 150 m'den yakın olduğu, dolayısıyla da PMT yapım maliyetine dahil olduğu kabul edilmiştir. Tüm karışımlar için PMT yapım maliyetleri ve Cr malzemesinin siloya taşınma maliyetleri toplamı 10-100 km aralığındaki mesafeler için ayrı ayrı hesaplanmış olup Tablo 8'de gösterilmektedir.

Karışımlardaki Cr oranı arttıkça malzemenin serim yapılacak alandaki silolara taşıma maliyeti de doğrusal olarak artmaktadır. Karışımda %100 Cr kullanılması durumunda 100 km uzaklığa taşınma maliyeti, %15 Cr içerikli karışımın taşınma maliyetinin yaklaşık 6 katıdır. Yapılan maliyet hesaplarında ilgili denklemlerde kullanılan A zorluk katsayısı 1 olarak kabul edilmiştir. Arazi ve iklim koşullarının da az zorlayıcı olması durumunda A, 1'den daha düşük olabilecek ve bu şekilde taşıma maliyeti de düşebilecektir.

Karışımlardaki Cr oranı arttıkça malzemenin serim yapılacak alandaki silolara taşıma maliyeti de doğrusal olarak artmaktadır. Karışımda %100 Cr kullanılması durumunda 100 km uzaklığa taşınma maliyeti, %15 Cr içerikli karışımın taşınma maliyetinin yaklaşık 6 katıdır. Yapılan maliyet hesaplarında ilgili denklemlerde kullanılan A zorluk katsayısı 1 olarak kabul edilmiştir. Arazi ve iklim koşullarının da az zorlayıcı olması durumunda A, 1'den daha düşük olabilecek ve bu şekilde taşıma maliyeti de düşebilecektir.

Tablo 8'de belirtilen %100 Da ile yapılacak PMT tabakası için konkasörden-serim yapılacak alandaki siloya uzaklığın 150 m geçmemesi durumunda toplam maliyet yaklaşık olarak 1.975.415,50 TL olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi %100 Cr karışımı için, temel tabakası yapım maliyeti tamamı %100 Da'dan yapılacak bir temel tabakasına kıyasla 10-100 km arasındaki tüm mesafelerde daha ekonomik olmaktadır.

PMT tabakasının %100 Da yerine, Cr pasası karışımlarının kullanılması durumunda elde edilecek toplam kâr-zarar karşılaştırılmıştır. Krom pasasının madenden, serim alanındaki siloya olan mesafesinin 100 km uzaklıkta olması durumu hesaplanıp Tablo 9'da gösterilmektedir.

Tablo 8. PMT yapımı dahil Cr pasa atık malzemesinin siloya taşınma maliyeti.

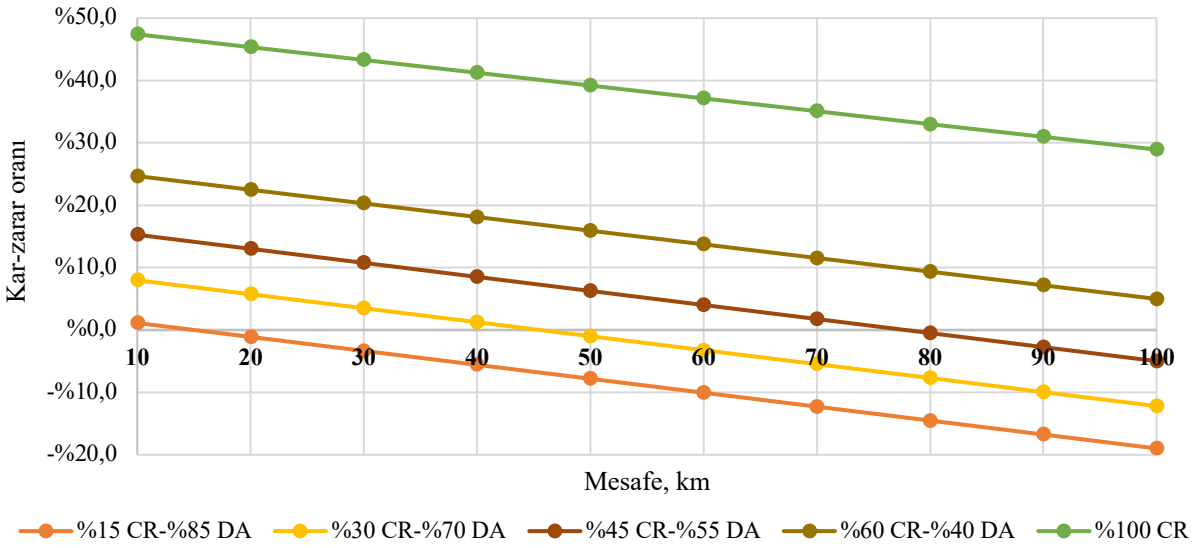
Karışımlar	**%15 Cr-%85 Da**	**%30 Cr-%70 Da**	**%45 Cr-%55 Da**	**%60 Cr-%40 Da**	**%100 Cr**	**%100 Da**
Ağırlık, t	3.603,20	3.614,40	3.628,80	3.508,00	3.310,40	3.584,00
Taşıma mesafe, km	**Tutar (Malzeme taşıma maliyeti dahil PMT yapım maliyeti, TL)**					
10	1.953.103,74	1.817.772,48	1.673.813,02	1.488.013,40	1.039.200,77	1.975.415,50
20	1.997.242,94	1.862.048,88	1.718.265,82	1.531.231,4	1.079.753,17	
30	2.041.382,14	1.906.325,28	1.762.718,62	1.574.449,4	1.120.305,57	
40	2.085.521,34	1.950.601,68	1.807.171,42	1.617.667,4	1.160.857,97	
50	2.129.660,54	1.994.878,08	1.851.624,22	1.660.885,4	1.201.410,37	
60	2.173.799,74	2.039.154,48	1.896.077,02	1.704.103,4	1.241.962,77	
70	2.217.938,94	2.083.430,88	1.940.529,82	1.747.321,4	1.282.515,17	
80	2.262.078,14	2.127.101,28	1.984.982,62	1.790.539,4	1.323.619,57	
90	2.306.217,34	2.171.983,68	2.029.435,42	1.833.757,4	1.363.619,97	
100	2.350.356,54	2.216.260,08	2.073.888,22	1.876.975,4	1.404.172,37	

Tablo 9. Karışımlardan sağlanan kar-zarar oranları (maden-silo arası mesafe 100 km için).

Karışım	**Tutar, TL/km**	**Kâr (+) / Zarar (-) Miktarı, TL**	**Kâr oranı, %**
%100 Da	1.975.415,50	0	0
%15 Cr - %85 Da	2.350.356,54	-374.941,04	0
%30 Cr - %70 Da	2.216.260,08	-240.844,58	0
%45 Cr - %55 Da	2.073.888,22	-98.472,72	0
%60 Cr - %40 Da	1.876.975,4	+98.440,1	4,98
%100 Cr	1.404.172,37	+571.243,13	28,92

Hazırlanan tüm karışımlar için tamamı %100 Da ile yapılacak bir geleneksel PMT tip-1 tabakasına kıyasla, Cr kullanımından sağlanacak kar ve zarar miktarlarının Cr malzemesinin temin edildiği noktadan serim alanındaki siloya olan mesafesine bağlı değişimleri Şekil 3'te grafik şeklinde gösterilmektedir.

Karışımlardaki Cr içeriği arttıkça, geleneksel olarak %100 Da ile yapılan PMT tabakasına kıyasla, sağlanan kar oranı artmaktadır. %100 Cr karışımının ile en yüksek kar oranları elde edilmiştir. %100 Cr ve %60 Cr içerikli karışımlar 10-100 km mesafe için de %100 Da ile yapılacak temel tabakasından daha karlı olmaktadır. En düşün Cr içerikli karışım olan %15 Cr karışımı ise yaklaşık 15 km uzaklıktan temin edilmesi durumunda kar sağlamaktadır. Özellikle, Cr pasa malzemesinin temin edildiği noktanın serim alanına yakın olması durumunda elde edilen karın belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Örneğin bu taşıma mesafesinin 100 km olması durumunda%100 Cr'den sağlanacak kar oranı %28,92 iken, 10 km olması durumunda %47,4 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. Tüm karışımların %100 Da'dan yapılacak PMT tabakasına kıyasla kar-zarar oranları.

Hesaplamalarda pasa malzemesinin maden noktasından temin edildiği kabul edilerek taşıma maliyetleri hesaplanmıştır. Fakat Cr madeni işlenip cevheri alındıktan sonra pasa malzemesi olarak atık depo alanlarına taşınmaktadır. Bu durumda Cr paşasının bir taşıma maliyeti olmaktadır. Dolayısıyla bu hesaplamalardaki Cr pasası için maden-serim alanı arasındaki taşıma bedelinden maden-atık sahası taşıma bedelini çıkartarak daha ekonomik bir hesaplama yapmak mümkündür. Cr pasasından yapılacak bir PMT tabakası ile ekonomik getirinin yanısıra, hem depolama alanındaki atık birikimi azaltılmış, hem de daha az Da malzemesi kullanılarak daha çevreci bir tasarım yapılmış olacaktır.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, %100 Da malzemesi ile yapılan PMT tip-1 tabakasında Da yerine Cr pasa malzemesinin kullanılması durumunda sağlanacak ekonomik kar-zarar durumu için maliyet analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır:

Kullanılan Cr pasa atık malzemesinin ve Da ile olan karışımlarının No. 200 elek altında kalan malzeme (filler) oranı %6 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuç KTŞ PMT tip-1 tabakası için üst limit olan %10 oranı koşulunu sağlamaktadır.

Karışımlardaki γ_{maks} değeri %45 Cr kullanımına kadar artmış, daha yüksek Cr kullanılması durumunda azalmıştır. En yüksek CBR değeri %15 Cr - %85 Da oranında karıştırılan numuneden elde edilirken, karışımdaki Cr oranın artması CBR değerinin lineere yakın olarak azalmasına sebep olmuştur. KTŞ tarafından kullanılma olanağına sahip temel tabakası için yeterli görülen minimum CBR değeri (%120) koşulu tüm Cr içeren karışımlarda sağlanmıştır. Krom pasa malzemesi karışımlarının tamamında yaş CBR şişme yüzdesi %0 olarak belirlenmiş olup, bu değer numunenin şişmesinin olmadığı sonucunu ortaya koymuştur.

Cr pasasının %100 Da yerine ikame edildiğinde ekonomik kazanımlar sağladığı belirlenmiştir. Karışımlardaki Cr oranı arttıkça serim yapılacağı alana olan Cr malzemesi taşıma maliyeti de artmaktadır. Karışımda %15 Cr kullanılması durumunda 100 km uzaklığa nakliye ücreti %100 Cr karışımının nakliye maliyetinin 1/6'i kadardır.

1 km uzunluğunda 8 m genişliğinde 0,20 m kalınlığındaki bir temel tabakası için %100 Da ile serimi yapılan PMT tip-1 tabakası yapım maliyeti (taş ocaklarından kırılıp serim alanına taşıma mesafesi hariç) yaklaşık 1.975.415,50 TL olarak tespit edilmiştir. Bu maliyet referans alındığı takdirde, en büyük kâr oranı, malzeme maliyeti olmamasından dolayı %100 Cr karışımından elde edilmektedir.

Cr malzemesinin temin noktası ile serim yeri arasındaki mesafe arttıkça malzeme taşıma maliyetleri arttığı için kar azalmıştır. Fakat, bu mesafenin 100 km olması durumunda bile %100 Cr ve %60 Cr-%40 Da karışımları, %100 Da ile yapılacak bir PMT tabakasından daha ekonomik olmaktadır.

%15 Cr-%85 Da karışımıyla yapılacak bir PMT tabakasının yaklaşık 15 km'lik bir taşıma mesafesi söz konusu olması durumuna kadar ekonomiktir. Ama daha uzak mesafelerde zarar ettirmektedir. Öyle ki 100 km mesafede %100 Da'ya kıyasla yaklaşık %19 zarar ettirdiği görülmektedir.

Teşekkür

Bu araştırma, Gümüşhane Üniversitesi GÜBAP2904:Madencilik İhtisaslaşma Destek Programı tarafından 23.F5110.04.01 nolu proje ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

[1] Özdemir MÜ. Gümüşhane Yöresi magmatik kayaçların beton agregası olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane, Türkiye, 2014.
[2] Köse MD. Gümüşhane Yöresi kalker örneğinin ince öğütülmüş agrega olarak beton bileşiminde kullanılabilirliği, taze betonun kıvamına ve beton basınç dayanımına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane, Türkiye, 2011.
[3] Şenol A, Edil TB. Uçucu kül ile stabilize edilen yumuşak zeminlerin CBR sonuçlarının değerlendirilmesi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, Eylül 2004, İTÜ, Türkiye.
[4] Özbayoğlu F, Gürel A, Aydın E. Termik santral desülfojipslerinin değerlendirilmesi. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Bildiriler Kitabı, 1997, 145-157.
[5] Yakşe G, Ural N. Atık mermer parçalarının yol temel malzemesi olarak değerlendirilmesi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2015; 2(2): 53-61.
[6] Amrani M, Taha Y, el Haloui Y, Benzaazoua M, Hakkou R. Sustainable reuse of coal mine waste: Experimental and economic assessments for embankments and pavement layer applications in Morocco. Minerals 2020; 10(10): 851.
[7] Okubay M. Bitümlü sıcak karışımlarda agrega olarak mermer atığı kullanımının araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 2016.
[8] Çullu M. Kurşun-çinko maden artığı kayaçlarla üretilen betonların mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması. Politeknik Dergisi 2018; 21(2): 427-435.
[9] Ganne VK. Long-term durability studies on chemically treated reclaimed asphalt pavement (RAP) materials. MSc, University of Texas, Arlington, 2009.
[10] Seferoğlu AG, Seferoğlu MT, Akpınar MV. Türkiye'de geri dönüşüm asfalt kaplamaların (RAP) bağlayıcısız temel tabakalarında kullanılabilirliği ve şartname gereksinimleri. Yapı Dünyası Dergisi 2017; 254: 21-26.
[11] Ceylan H, Mança S. Mermer parça atıklarının beton agregası olarak değerlendirilmesi. Teknik Bilimler Dergisi 2013; 3(2): 21-25.
[12] Türkiye Karayolu Teknik Şartnamesi. Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2013.
[13] TS 3530 EN 933-1: Agregaların geometrik özellikleri için deneyler Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini-eleme metodu, Türk Standartları Enstitüsü (TSE). Ankara, 2015.
[14] AASHTO T 193. Standard method of test for the California bearing ratio. The American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DC, 2013.
[15] http://www.birimfiyat.net/kgm-6100-3-plent-miks-temel-yapilmasi-kirilmis-ve-elenmis-ocak-tasi-ile. 2024.
[16] http://www.birimfiyat.net/07.005-k-kazidan-baska-insaat-malzemelerinin-tasinmasi-10-000-m.ye-kadar. 2024.
[17] https://www.birimfiyat.net/07.006-k-kazidan-baska-ins.malzemesinin-tasinmasi-10000-mt
[18] AASHTO T 180. Standard method of test for moisture-density relations of soils using a 4.54 kg rammer and a 457 mm drop. The American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DC, 2017.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 387-400, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1598597

Stroke Classification in Brain Computed Tomography Images Using Vision Transformers and GAN-based Data Augmentation

Erdem YELKEN[1*], Murat CEYLAN[2]
[1,2] Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye
[*1] e218121001002@ktun.edu.tr, [2] mceylan@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 09/12/2024; Kabul/Accepted: 21/03/2025)

Abstract: This study presents an innovative approach to stroke classification. The research utilizes brain computed tomography (CT) images to distinguish between three classes: "no stroke" "ischemic stroke" and "hemorrhagic stroke" employing Vision Transformers (ViTs), a deep learning-based method incorporating attention mechanisms. In this work, ViTs were effectively applied as a powerful method for image-based classification. To enhance model performance, various training strategies and data augmentation techniques were implemented. Specifically, GAN-based architectures such as SRGAN (Super-Resolution GAN) and BSRGAN (Blind Super-Resolution GAN) were used to expand the dataset and improve its diversity. These GAN-based augmentation techniques significantly improved the model's overall performance and classification accuracy. The Vision Transformer model was rigorously evaluated through multi-class classification tasks using a range of performance metrics. In the three-class classification task, the model achieved 99.06% accuracy, 98.18% precision, 98.94% recall, and a 98.54% F1-score. For the binary classification of ischemic vs. hemorrhagic stroke, the model reported 99.78% accuracy, 99.02% precision, 99.66% recall, and a 99.26% F1-score. In the binary classification of stroke presence, the model achieved 98.68% accuracy, 97.80% precision, 98.54% recall, and a 98.14% F1-score. These findings demonstrate the potential of Vision Transformers to assist in faster and more reliable stroke diagnosis and highlight their contribution to the development of decision support systems in medical applications.

Key words: Stroke classification, vision transformers, CT imaging, data augmentation, deep learning.

Beyin Bilgisayarlı Tomografi Görüntülerinde Görü Dönüştürücüler ve GAN Tabanlı Veri Artırma Kullanılarak İnme Sınıflandırması

Öz: Bu çalışma, inme sınıflandırması için yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Araştırmada, beyin bilgisayarlı tomografi (BT) görüntüleri kullanılarak "inme yok", "iskemik inme" ve "hemorajik inme" olmak üzere üç farklı sınıfı ayırt etmeyi amaçlayan, dikkat mekanizmaları içeren derin öğrenme tabanlı bir yöntem olan Görü Dönüştürücüler (GD) uygulanmıştır. GD modelleri, bu çalışmada görüntü verisi sınıflandırması için güçlü ve etkili bir yöntem olarak kullanılmıştır. Modelin performansını artırmak amacıyla çeşitli eğitim stratejileri ve veri artırma teknikleri uygulanmıştır. Özellikle, GAN tabanlı SRGAN (Süper Çözünürlük GAN) ve BSRGAN (Kör Süper Çözünürlük GAN) mimarileri, veri setini genişletmek ve çeşitliliği artırmak için kullanılmıştır. Bu GAN tabanlı artırma teknikleri, modelin genel başarımını ve sınıflandırma doğruluğunu önemli ölçüde iyileştirmiştir. Görü Dönüştürücü modeli, çok sınıflı sınıflandırma görevleri kapsamında çeşitli performans ölçütleriyle kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Üç sınıflı sınıflandırma görevinde model, %99,06 doğruluk, %98,18 hassasiyet, %98,94 duyarlılık ve %98,54 F1 skoru elde etmiştir. Hemorajik ve iskemik inme sınıflandırmasında modelin doğruluğu %99,78, hassasiyeti %99,02, duyarlılığı %99,66 ve F1 skoru %99,26 olarak raporlanmıştır. İkili "inme var/yok" sınıflandırmasında ise model, %98,68 doğruluk, %97,80 hassasiyet, %98,54 duyarlılık ve %98,14 F1 skoru elde etmiştir. Bu bulgular, Görü Dönüştürücüler'in hızlı ve güvenilir inme teşhisine katkı sunma potansiyelini ve tıbbi uygulamalarda karar destek sistemlerinin gelişimine önemli ölçüde katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: İnme sınıflandırması, görü dönüştürücüler, BT görüntüleme, veri artırma, derin öğrenme.

1. Introduction

Stroke is a condition that occurs when blood flow to the brain tissue is suddenly interrupted or reduced and is one of the leading causes of death and disability worldwide [1]. Strokes are divided into two main categories: ischemic stroke (blockage of brain vessels) and hemorrhagic stroke (bleeding due to rupture of brain vessels) [2]. According to the World Health Organization (WHO), stroke affects approximately 15 million people each year, 5

* Corresponding author: e218121001002@ktun.edu.tr. Authors' ORCID Numbers: [1] 0000-0001-9307-2959, [2] 0000-0001-6503-9668

millions of whom are permanently disabled [1]. The recovery process after a stroke is quite complex and long-term, so early diagnosis and accurate treatment planning are vital [3,4].

The main methods used today for stroke diagnosis include imaging techniques such as CT, magnetic resonance imaging (MRI), and cerebral angiography [3]. CT imaging is usually the first choice because it is fast and widely available [4]. However, each of these methods has its advantages and limitations. For example, CT scans may be limited in detecting early blood flow changes in brain tissue, such as ischemic stroke, because these changes usually take some time to become visible on CT [5]. Magnetic resonance imaging can provide higher-resolution images and more clearly reveal differences in brain tissue. However, the high cost of MRI devices and the longer scanning process can disadvantage patients with time constraints in emergencies [6].

The rapid development of artificial intelligence and deep learning techniques has enabled significant advances in medical imaging and has provided new-generation alternatives to traditional analysis methods [7,8]. In this field, convolutional neural networks (CNNs), in particular, are widely used in stroke classification in the medical image field because of their high accuracy and generalization capacity [9,10,11,12]. However, Vision Transformers (VTs) have recently attracted more attention in image processing and have shown superior performance compared to CNNs in some tasks [13]. Vision Transformers are based on the transformer architecture that derives its foundation from the successes in natural language processing (NLP) and optimizes information processing by using attention mechanisms in image processing processes [14,15]. These models can capture prominent features with attention mechanisms, mainly by providing effective learning in large data sets, and can model relationships in a global context more effectively, unlike ESAs [16]. Thus, they offer significant advantages in image analysis in medical imaging [17].

In recent years, deep learning methods in medical imaging have made significant progress in the diagnosis of serious neurological conditions such as stroke by learning on large data sets [18,19]. Okimoto et al. conducted a study aimed at improving the visualization of acute brain infarcts in CT images using deep learning techniques [20]. Zhu et al. emphasized the potential of artificial intelligence to increase diagnostic support in healthcare services in their study examining how deep learning models were applied to CT and MRI images for ischemic and hemorrhagic stroke classification [21]. Miyamoto et al. showed that an artificial intelligence-supported system could be effective in increasing the diagnosis and classification accuracy in directing stroke patients to the right treatment, especially in hospitals where there is no neurologist, and reported high success rates with 88.7% and 86.1% accuracy rates [22]. Shakunthala et al. classified ischemic and hemorrhagic stroke using magnetic resonance imaging (MRI) data and showed that this approach achieved 94.8% accuracy [23]. Altıntas et al. classified ischemic, hemorrhagic, and normal brain CT images using deep learning models and reported that the AlexNet model achieved 90.89% accuracy with transfer learning approaches [24].

Recent studies have comparatively evaluated different deep learning approaches for stroke classification in brain CT images. Koska et al. performed stroke classification using the dataset provided in the TEKNOFEST 2021 artificial intelligence health competition, which was also used in this study, and reported that it achieved 91% accuracy with MobilNetV2 and 88% accuracy with EfficientNetB0 [25]. Cinar et al. developed a hybrid approach by combining different models such as EfficientNetB0, ResNet50, VGG19 with machine learning algorithms and showed that the EfficientNetB0 + SVM model achieved 95.13% accuracy [26]. On the other hand, there are also studies in the literature that address the effectiveness of ViT models for brain stroke diagnosis. Katar et al. tested the success of stroke classification in unbalanced and balanced data scenarios using the ViT model and showed that 98.75% accuracy was achieved with data augmentation methods [27]. In addition, the Grad-CAM algorithm visualized the regions where the model focused and revealed that it could increase the clinical interpretability of the model. Cinar et al. compared models such as EfficientNetB0, ResNet101, VGG19, MobileNet-V2 and GoogleNet with transfer learning methods and reported that the EfficientNet-B0 model showed the best performance with an accuracy rate of 97.93% [28].

Vision Transformers have shown superior performance in various medical imaging applications and their success has been confirmed by many studies in the literature [29, 30]. For example, in the study by Li et al. it was shown that Vision Transformers can be used as an effective tool in the diagnosis of Alzheimer's disease in brain MRI images [31]. The same study suggested that Vision Transformers can further improve model performance when combined with different data augmentation techniques. In addition, it has been stated that Vision Transformers provide high accuracy in chest X-rays in the diagnosis of COVID-19 [32] and have been successfully applied in two-dimensional CT images in the diagnosis of pancreatic cancer [33]. In addition, studies have been conducted where Vision Transformers are used for medical imaging purposes in stroke assessments and yielded effective results. Ayoub et al. achieved an overall accuracy rate of 87.51% in classifying brain CT scan slices using the ViT architecture and showed high sensitivity in locally identifying stroke patients [34]. Abbaoui et al. The study conducted by [35] demonstrated the superior performance of the ViT-b16 model in ischemic stroke

classification. These findings indicate that Vision Transformer models have a wide potential in the field of medical imaging and their performance can be further improved with various data augmentation techniques.

This study aims to increase the accuracy of stroke diagnosis using the Vision Transformer model. This study, conducted on the Ministry of Health stroke dataset, aims to classify three different classes, namely “no stroke” “ischemia” and “hemorrhagic” In the study, a comparison of traditional data augmentation methods with Generative Adversarial Network (GAN) based data augmentation methods was made. In addition, the performance of the model was evaluated with 5-fold cross-validation. This study aims to contribute significantly to the literature by revealing the effect of using Vision Transformers and GAN-based data augmentation techniques in stroke diagnosis. The findings may contribute to healthcare professionals making more accurate diagnoses and improving treatment plans.

2. Materials and Methods

2.1. Dataset and preprocessing

In this study, a publicly available brain CT dataset belonging to the Ministry of Health of the Republic of Turkey and compiled by Koc et al. was used. The dataset is fully anonymized and does not contain any personal or clinical data. Accordingly, due to the anonymous nature of the dataset, its use in academic research does not constitute any ethical violation. The dataset consists of a total of 6650 computed tomography images. 4427 of these images are non-stroke images and 2223 are stroke images. Images containing stroke were classified according to stroke types; 1130 of them are ischemic type stroke and 1093 of them are hemorrhagic type stroke [36].

The dataset was created with data collected from the e-Pulse and Teleradiology Systems of the Ministry of Health of the Republic of Turkey. The images were reviewed in detail by 7 radiologists over a 6-week period and divided into three categories: “no stroke”, “ischemic stroke” and “hemorrhagic stroke”. Stroke regions in images containing stroke were marked by experts and checked for accuracy. The data provided by the General Directorate of Health Information Systems of the Ministry of Health are presented in DICOM and PNG formats with a size of 512×512 pixels. The dataset contains three different types of images: original images, mask images and superimposed versions of mask images on original images [36].

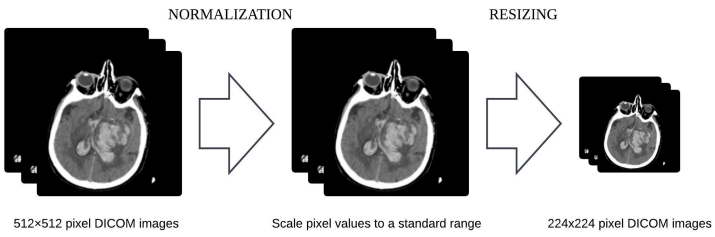


Figure 1. Data preprocessing flowchart.

The images in the dataset were subjected to a standard preprocessing process for analysis. As shown in Figure 1, the images were first normalized in this process. Normalization aims to scale the pixel values of the images to a specific range and thus enable the model to learn more consistently and effectively. Then, all the images were resized to the same size; this step facilitates the process by standardizing the input dimensions used in the model’s training. Finally, the image data was converted into tensors. Tensors are multidimensional data structures that deep learning models can process, and representing image data in this format allows the model to process the data more effectively. Data preprocessing steps help the model process the data more effectively and increase stroke classification performance.

2.2. Data augmentation techniques

Data augmentation techniques are widely used to increase the diversity of training data, improving the generalization capabilities of deep learning models and reducing the risk of overfitting. In this study, both traditional data augmentation methods and GAN- based data augmentation techniques are applied.

2.2.1. Traditional data augmentation methods

Traditional data augmentation methods aim to create new images by applying various transformations on existing images. These techniques increase the overall performance of the model by allowing it to see a wider variety of data and reduce the risk of overfitting. Horizontal flipping helps the model learn and recognize symmetrical patterns by flipping the images horizontally with a 50% probability. In a study conducted by Shorten and Khoshgoftaar, it was stated that horizontal flipping is a frequently preferred data augmentation method in the field of medical image processing and increases the generalization ability of the model. Applying random rotations between -30 and 30 degrees to the images allows the model to better understand and process images from different angles. The use of such rotation angles is among the techniques widely recommended in data augmentation strategies [32]. Cropping and padding techniques make it easier for the model to generalize in regions with missing information by randomly removing or adding up to 20% of the image. Brightness settings increase the model's robustness to different lighting conditions by changing the image brightness between 80% and 120% and provide consistent performance in various scenarios. It was also emphasized in the same study that such brightness adjustments are effective in increasing the robustness of medical images to different scanning conditions. These measures play an important role in the processing of medical images obtained under different scanning conditions [37,38].

2.2.2. GAN based data augmentation

Generative Adversarial Networks (GANs) are deep learning models that enable two neural networks, the generator and the discriminator, to compete with each other to produce realistic data [39]. In this study, the GAN-based data augmentation method was evaluated comparatively with traditional data augmentation methods. Although traditional methods (reflection, rotation, brightness change, etc.) can increase the generalization capacity of the model to a certain extent, they are limited to the variations in the existing data set and do not have the ability to produce new examples. In contrast, GANs increase the diversity of the data set by creating synthetic images similar to the original data distribution and contribute to the model's better learning of rare classes. Especially since data limitation is a common problem in the field of medical imaging, GAN-based data augmentation methods offer a significant advantage for data sets with limited sample size.

GAN-based data augmentation techniques increase the generalization performance of the model during the training process, but they also have some disadvantages. First, the training of GANs requires high computational cost compared to traditional data augmentation methods. In addition, GANs may have a problem that can cause the generated synthetic images to get stuck in certain patterns. In addition, it should be evaluated whether the generated images are clinically realistic. Therefore, the GAN-assisted data augmentation process has been meticulously optimized and carefully implemented to increase the generalization ability of the model. In this study, two different GAN architectures were used.

2.2.2.1. SRGAN (Super-Resolution GAN)

SRGAN is an advanced GAN architecture that produces high-resolution images from low-resolution images. This model is trained to obtain high-resolution versions of low-resolution images, and in this process, a 4-fold augmentation is performed using pre-trained VGG19 model weights [40]. SRGAN allows more detailed analyses by increasing the resolution, especially in medical imaging. In Figure 2 and Figure 3, examples produced by SRGAN show the results of ischemic and hemorrhagic data sets, respectively. SRGAN contributes to the model's training process and increases its accuracy with the high-resolution images it produces. In addition, the images produced by SRGAN attract attention with their high PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) and SSIM (Structural Similarity Index Measure) values; this reveals the quality of the produced images and their closeness to the original.

2.2.2.2. BSRGAN (Blind Super-Resolution GAN)

BSRGAN is an improved version of the SRGAN model and is capable of producing more realistic and diverse high-resolution images. BSRGAN produces more robust and generalizable images by better modeling the noise and distortions present in the training data. In the training of BSRGAN, a special training strategy was applied to obtain four times higher resolution versions from low resolution images and hyperparameters such as loss function, learning rate and filter sizes were meticulously tuned and optimized to increase the accuracy of the model. The

most obvious advantage of BSRGAN is that it processes the noise and distortions in the images more effectively, making low quality and corrupted data more realistic. This method increases the ability of the model to generalize better under different data conditions and improves its performance. Examples generated by BSRGAN in Figure 2 and Figure 3 show the results for ischemic and hemorrhagic data sets. Images generated by BSRGAN, just like SRGAN, have high PSNR and SSIM values; This supports the quality of the generated images and their similarity with real images [41].

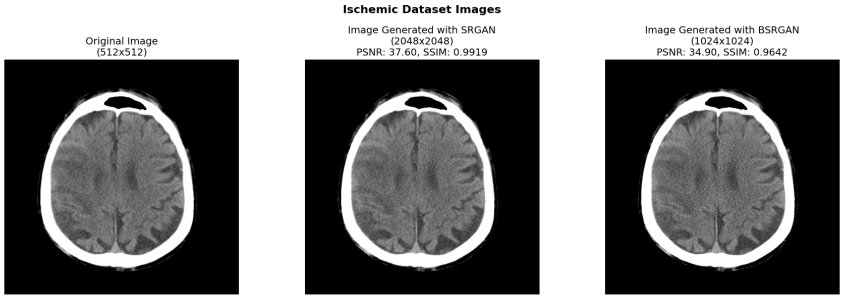


Figure 2. Example images of the ischemic dataset obtained with GAN-Based data augmentation methods.

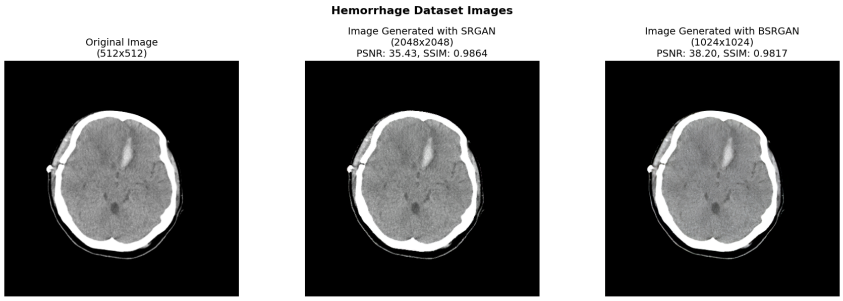


Figure 3. Example images of the hemorrhage dataset obtained with GAN-Based data augmentation methods.

Although SRGAN and BSRGAN models perform similar tasks, they offer different data augmentation strategies. While SRGAN produces more detailed and clear images by increasing the resolution, BSRGAN provides more accurate and realistic data by considering the noise and distortions in the images. While the images obtained with SRGAN enable the model to learn fine details, the data produced by BSRGAN increases the model's classification accuracy in low-quality and distorted images. In addition, the high PSNR and SSIM values of the images produced with these methods increase the image quality and model accuracy [42]. The use of these two models together expands the generalization capacity of the model by representing the various variations in the datasets more comprehensively and improves the classification performance. This allows more reliable and sensitive results in medical imaging studies.

Table 1. Number of Samples of the Dataset According to Data Augmentation Methods.

Data Augmentation Method	No Stroke	Ischemic	Hemorrhagic	Total
None	4427	1130	1092	6649
Traditional	4427	4427	4427	13281
GANs	4427	4369	4369	13165

The dataset has three different classes: no-stroke, ischemic, and hemorrhagic, and the number of samples for each class is given in Table 1. When data augmentation methods are not used, the imbalance between the classes is noticeable. To reduce the class imbalance, classical data augmentation methods and GAN architecture were applied. This shows that different data augmentation techniques play an important role in ensuring the balance of the dataset.

2.3. Vision transformers

Vision Transformers have emerged as a significant innovation in the field of image processing in recent years. This model was developed by adapting the transformer architecture, which has achieved great success in the field of natural language processing (NLP), to image processing tasks. Unlike traditional CNNs, the VIT model processes images in small patches and allows these patches to be analyzed sequentially with attention mechanisms. This method allows the model to preserve the sequential information of these patches by taking each image patch as a separate input and adding positional coding. Attention layers learn the relationships of these patches with each other and use multi-head attention mechanisms to capture important features. In this way, ViT models can effectively learn on large datasets and better represent complex features [43,44].

In the input layer of the model, images are divided into patches of a certain size (e.g., 16x16 pixels) and these patches are converted to a vector by linear projection [43]. Positional coding is added to preserve the sequential information of these patches, as in the transformer architecture. Then, attention layers process these vectors with multi-header attention mechanisms. Each attention header is used to learn different types of information and capture important features. The information from the attention layers is represented at a higher level through a feedforward neural network (MLP) and the features obtained in the final stage are transmitted to an output layer for classification. Each of these stages, the steps of the model from input to output and the operations performed in each step are given in Figure 4.

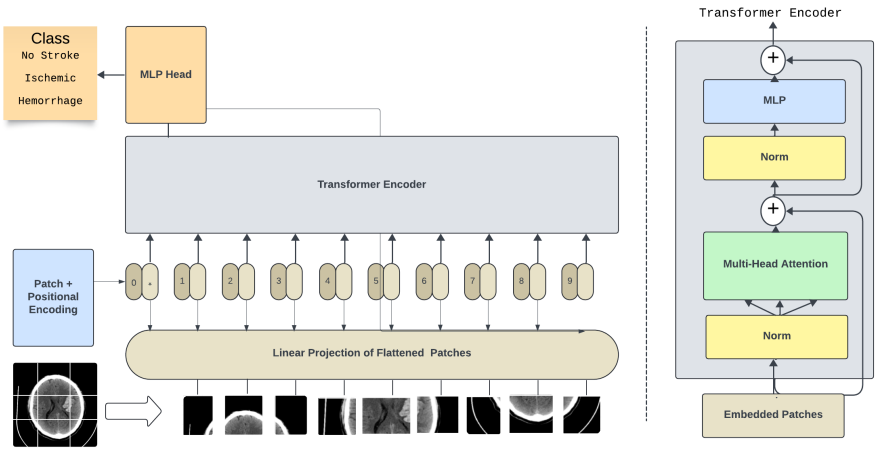


Figure 4. Vision Transformers model overview.

This study applies various strategies and configurations to train the VIT model. A pre-trained VIT model on a large-scale dataset is utilized in the first stage. In particular, the google/vit-base-patch16-224-in21k model, which is trained on the ImageNet-21k dataset, is taken as a basis (https://huggingface.co/google/vit-base-patch16-224-in21k, accessed on May 25, 2024). ImageNet-21k is a large-scale dataset containing 14 million images with a resolution of 224×224 pixels and approximately 22,000 classes, and the training performed on this dataset increases the general feature extraction ability of the model [40]. This approach is built on the transfer learning methodology, which enables the use of the knowledge acquired in the source domain to improve the performance of the target domain [45]. During the training process, the input images were brought to a standard resolution of 224×224 pixels, aiming for the model to work on a more homogeneous and consistent input set. This standardization was considered an important step towards increasing the model's classification accuracy and overall performance.

2.4 Training processes

The training processes of the ViTs model are an important stage used to increase the success of deep learning models. In this process, it is aimed to carefully determine the parameters of the model, to apply strategies to prevent overfitting during training, and to optimize the generalization ability of the model. The model was trained on the CentOS 7 operating system with three NVIDIA GeForce RTX 2080 (total 24 GB VRAM) and 24 GB RAM.

In order to evaluate the performance of the model and prevent overfitting, 5-fold cross-validation was used. This method allows the model to be trained on each part by dividing the dataset into five equal parts. In this way, it is a useful approach to understand how well the model generalizes on different data parts.

The model parameters used in the training process were carefully selected to optimize the performance and generalization ability of the model. The parameters in Table 2 were determined by considering both literature studies and previous experimental results. The learning rate was selected as 2×10^{5}, and this value was optimized to ensure the stability of the model during the learning process. Parameters such as the number of hidden layers and the number of attention heads were determined to prevent overfitting while increasing the capacity of the model. Different parameter combinations were tested in the trial-and-error process, and the structure that gave the best results was adopted. In this process, the accuracy values on the training sets were monitored.

Table 2. Vision Transformer Model Parameters for Training.

Model Parameters	Parameter Values
Learning Rate	2×10^{-5}
Number of Epochs	100
Number of Hidden Layers	12
Number of Attention Heads per Encoder Layer	12
Patch Size	16
Weight Decay	0.01

The hyperparameters specified in Table 2 were carefully determined to provide an optimum balance between the complexity of the model, the learning process, and the generalization ability. The learning rate was manually adjusted to ensure the stability of the model in the optimization process, and the number of hidden layers and the number of attention heads were determined to increase the learning capacity of the model. Parameters such as the learning rate, the number of epochs, and the number of hidden layers were optimized to prevent the model from overfitting and to obtain the best generalization ability. Different hyperparameter combinations were tested experimentally, and the structure that gave the best results was selected using the trial-and-error method. In this process, the accuracy rate of the model, loss function values, and generalization performance were analyzed to determine the most suitable structure.

The training process began by dividing the dataset into two as training and validation. The training data was used for the learning process of the model, and the validation data was separated to evaluate the generalization performance of the model. During the training of the model, the performance of the model was measured via the loss function at the end of each epoch. The loss function used in this process was optimized to minimize the accuracy rate of the model's predictions. The early stopping technique was also used during training. This technique aimed to prevent overfitting by stopping training when the performance on the validation set did not improve. In this process, the epoch that gave the best performance was recorded and training was completed.

The results obtained during training clearly demonstrate the success of the model in the multi-classification task and the effects of different data augmentation methods on the model performance. In the graphs presented in Figure 5, the learning curve of the model is shown depending on the accuracy value. In the graphs, three different data augmentation methods for multi-classification were examined: No Data Augmentation, Traditional Data Augmentation and GAN-Based Data Augmentation. This comparison clearly demonstrates the effects of different data augmentation techniques on the training accuracy of the model.

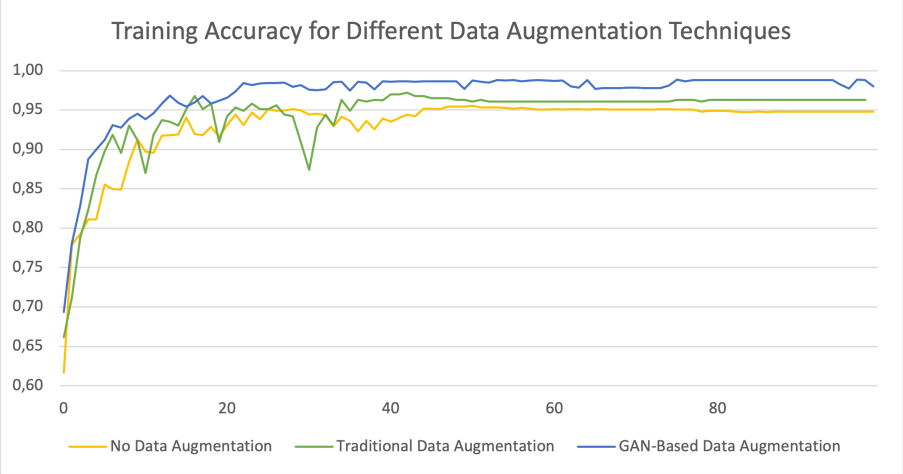


Figure 5. Training accuracy for different data augmentation techniques across epochs.

3. Results

This section presents in detail the results of binary and multi-class classification experiments, the effects of data augmentation techniques on model performance, and the findings.

Key metrics such as accuracy, precision, recall, and F1 score were utilized to evaluate model performance. True Positives (TP) indicate correctly predicted positive instances, whereas True Negatives (TN) correspond to correctly predicted negative instances. Conversely, False Positives (FP) represent incorrectly predicted negative instances as positive, and False Negatives (FN) indicate incorrectly predicted positive instances as negative. These metrics are mathematically defined as given in Equation 1, Equation 2, Equation 3, and Equation 4:

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \tag{1}$$

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \tag{2}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \tag{3}$$

$$F1\ Score = 2\ x\ \frac{Precision\ x\ Recall}{Precision+Recall} \tag{4}$$

3.1. Binary classification results

The binary classification results were evaluated on two distinct classification problems. The first problem involved distinguishing between ischemic and hemorrhagic stroke cases, while the second problem focused on classifying whether a stroke was present or not (stroke vs. no stroke). This evaluation was conducted to assess the model's classification performance across both categories comprehensively. The results for each classification category are summarized in Table 3 and Table 4.

Table 3 shows the binary classification results performed on hemorrhagic and ischemic stroke categories. The accuracy, precision, recall and F1 score values obtained using data augmentation methods were calculated by 5-fold cross-validation method, and the mean values and standard deviations of the relevant metrics are presented in the table. The results reveal that GAN-based data augmentation method has significantly higher performance than other methods. In particular, the accuracy, precision, recall and F1 score values obtained with GAN-based data augmentation were calculated as 99.78 ± 0.3, 99.02 ± 0.4, 99.66 ± 0.3 and 99.26 ± 0.4, respectively. Standard deviations (±) show the variations of the model in different validation layers.

Table 3. Binary classification results (Hemorrhagic and İschemic Stroke).

Data Augmentation Method	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1 Score (%)
None	94.48 ± 0.1	93.66 ± 0.3	94.28 ± 0.2	94.00 ± 0.1
Traditional	95.96 ± 0.2	95.12 ± 0.3	95.82 ± 0.3	95.38 ± 0.2
GAN	99.78 ± 0.3	99.02 ± 0.4	99.66 ± 0.3	99.26 ± 0.4

Figure 6 is constructed using the average values of the confusion matrices obtained from the 5-fold cross-validation processes and represents the generalization performance of the model.

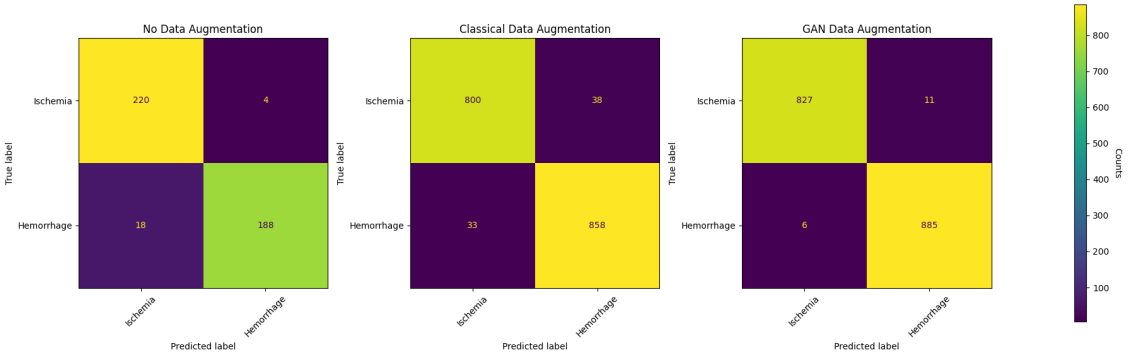


Figure 6. Binary classification confusion matrices (Hemorrhagic and Ischemic Stroke).

Table 4 summarizes the binary classification results performed in the categories of stroke and no stroke. The results obtained with the 5-fold cross-validation method again show that the GAN-based data augmentation method provides the highest performance. In this category, the accuracy, precision, recall and F1 score values obtained with GAN-based data augmentation are determined as 98.68 ± 0.2, 97.80 ± 0.3, 98.54 ± 0.3 and 98.14 ± 0.3, respectively. Standard deviations (±) show the variations of the model in different validation layers.

Table 4. Binary classification results (No-stroke and Stroke).

Data Augmentation Method	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1 Score (%)
None	94.28 ± 0.3	93.38 ± 0.2	94.08 ± 0.5	93.68 ± 0.4
Traditional	95.80 ± 0.4	94.88 ± 0.2	95.60 ± 0.3	95.18 ± 0.2
GAN	98.68 ± 0.2	97.80 ± 0.3	98.54 ± 0.3	98.14 ± 0.3

Figure 7 is constructed using the mean values of the confusion matrices obtained from the 5-fold cross-validation processes and represents the generalization performance of the model.

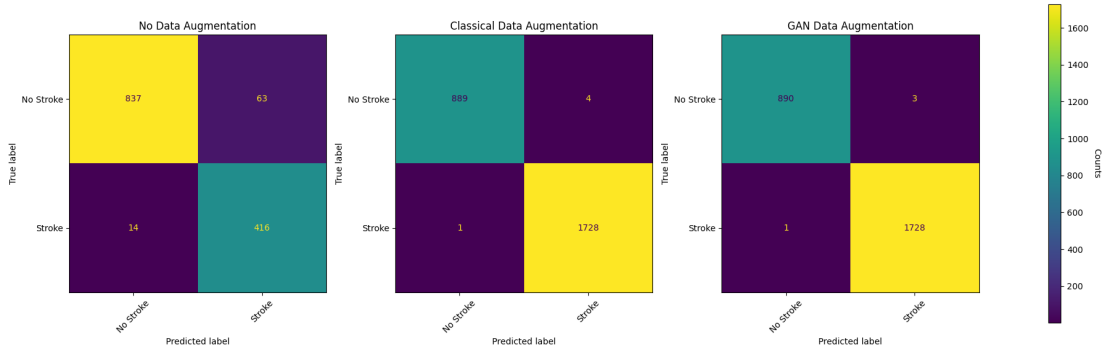


Figure 7. Binary classification confusion matrices (Stroke and No Stroke).

3.2. Multiple classification results

Table 5 shows the multiple classification results obtained using different data augmentation methods. The results are calculated with 5-fold cross-validation, and the accuracy, precision, recall and F1 score metrics are presented separately for each class. In order to better analyze the effect of data imbalance on model performance, weighted metrics are also evaluated in the case without data augmentation. The results in the table show that the GAN-based data augmentation method significantly improves the model performance and reduces the performance differences between classes, especially in imbalanced datasets.

Table 5. Multiple classification results: No Stroke, Ischemic, Hemorrhagic.

Data Augmentation Method	Class	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1 Score (%)
None	No Stroke	95.70 ± 0.3	97.73 ± 0.5	95.84 ± 0.4	96.86 ± 0.3
	Hemorrhagic	98.04 ± 0.4	95.41 ± 0.4	94.11 ± 0.2	94.11 ± 0.4
	Ischemic	95.86 ± 0.2	82.96 ± 0.4	92.23 ± 0.4	87.35 ± 0.4
Traditional	No Stroke	99.33 ± 0.4	99.44 ± 0.6	99.88 ± 0.5	99.66 ± 0.2
	Hemorrhagic	86.28 ± 0.2	90.99 ± 0.2	94.33 ± 0.2	92.63 ± 0.2
	Ischemic	86.16 ± 0.2	94.55 ± 0.2	90.66 ± 0.2	92.56 ± 0.2
GAN	No Stroke	99.89 ± 0.2	99.89 ± 0.2	99.78 ± 0.2	99.83 ± 0.5
	Hemorrhagic	99.16 ± 0.3	98.57 ± 0.3	98.81 ± 0.4	98.69 ± 0.3
	Ischemic	99.12 ± 0.3	98.76 ± 0.3	98.65 ± 0.3	98.79 ± 0.3

Figure 8 is constructed using the average values of the confusion matrices obtained from the 5-fold cross-validation processes and represents the generalization performance of the model.

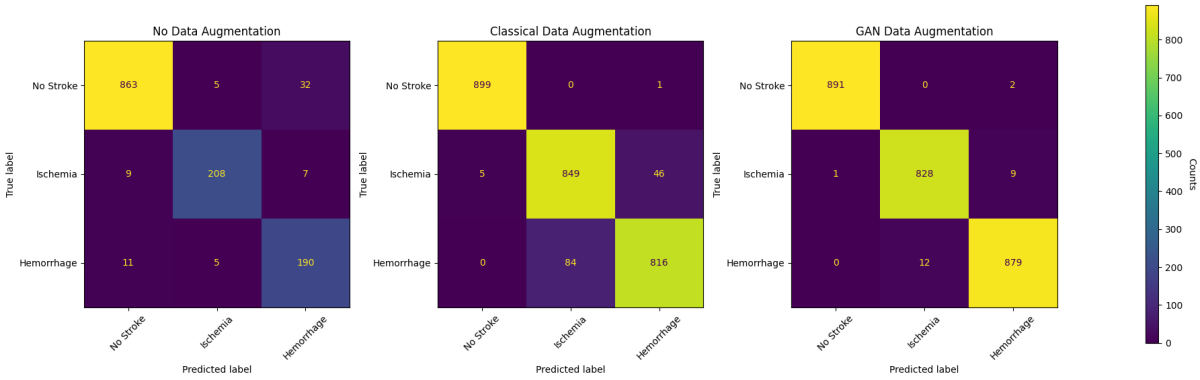


Figure 8. Multiple classification confusion matrices.

The impact of traditional and GAN-based data augmentation methods on model performance is clearly demonstrated by the tables and graphs presented above. While traditional data augmentation methods improve the generalization ability of the model by increasing the diversity of the dataset, GAN-based data augmentation methods provide even higher performance thanks to the generation of high-quality and diverse data. The overall performance of the VITs model has been significantly increased by the effect of data augmentation techniques. While the results obtained without data augmentation show how the model performs on a limited dataset, traditional and GAN-based data augmentation methods have proven to be effective tools to maximize the potential of the model. In particular, GAN-based data augmentation provided significant improvements in the accuracy, precision, recall and F1 scores of the model. In particular, GAN-based data augmentation significantly increases the model performance on imbalanced datasets, indicating that it can be a reliable approach in clinical applications.

4. Discussion

In this study, integrating ViTs with GAN-based data augmentation methods for stroke classification have provided a significant performance improvement compared to existing approaches in the literature. GAN-based data augmentation techniques, used to address the lack of diversity in datasets with limited size, have enriched the model's learning capacity and increased the representational power of the dataset, enabling superior classification results. The attention mechanisms within the ViT model have captured fine details, especially in low-contrast brain CT images, elevating the model's accuracy to higher levels.

The originality of this study lies in the ViT model's ability to classify ischemic, hemorrhagic, and normal conditions effectively and reliably detect the presence of a stroke. When compared to studies on the same dataset in the literature, it was found that the GAN-supported data augmentation method significantly increased the model's accuracy and introduced an innovative approach to classification performance. Remarkably, the synthetic data generated by the GAN were observed to enhance the model's generalization capacity despite limited data sources, making a meaningful contribution to the learning process.

The comparative results presented in Table 6 demonstrate that the proposed model exhibits competitive and successful performance compared to previous studies utilizing the same dataset in the literature. Specifically, the ViT-based model, enhanced by effective attention mechanisms and GAN-supported data augmentation strategies, has achieved higher classification accuracy than existing methods. The Advanced D-UNet model developed by Yalcin and Vural attained accuracy rates of 98.9% and 98.5% for stroke/no-stroke and hemorrhagic/ischemic classification tasks, respectively. In contrast, the proposed ViT model, when integrated with GAN-based data augmentation, achieved accuracy rates of 99.7% and 98.6% for these tasks, indicating comparable or superior performance to previous approaches. Similarly, Karatas et al. conducted a two-step classification process. In the first step, Stroke "(CVD) / No Stroke (Normal)" classification was performed, achieving 99.72% accuracy. In the second step, hemorrhagic and ischemic stroke classification was conducted, reaching 99.51% accuracy. The proposed model attained results close to this level, demonstrating its competitive performance in stroke classification. The model developed by Cinar et al. using an EfficientNetB0 and SVM combination reported an accuracy of 95.13%, while the study by Koska et al. reported accuracy rates of 91.0% and 88.0% for MobileNetV2 and EfficientNetB0 models, respectively. Given these comparisons, the proposed model demonstrates superior performance over these studies.

The results obtained from the proposed model indicate that, compared to existing deep learning-based methods in the literature, the effective integration of attention mechanisms and GAN-supported data augmentation contributes to higher generalization capability. Particularly in imbalanced datasets, the GAN-based data augmentation method has been shown to improve class balance and enhance model performance. Additionally, the use of attention mechanisms not only increases accuracy rates but also ensures more stable and reliable classification results. These findings highlight the significant contribution of the proposed approach to improving the accuracy and reliability of deep learning-based models for stroke diagnosis. Future research directions should focus on facilitating the integration of this model into clinical applications and evaluating its generalization capacity on large-scale datasets.

In this study, comparisons were made with traditional data augmentation methods in order to examine the effect of synthetic data generated by GANs on model performance. The obtained results show that GAN-based data augmentation improves the class balance especially in imbalanced data sets and increases the accuracy rate of the model. However, there are some limitations of the proposed method. GAN-based data augmentation requires high computational costs; this requires more processing power and time especially during the training process and may create operational difficulties when integrating the model into clinical applications. In addition, since the data set used represents a limited patient population, the generalization capacity of the model should be evaluated on different clinical settings. This reveals the need to test the model on larger data sets and emphasizes the importance of future studies to examine its performance on different patient groups. In the future, optimization techniques can be applied to run the model at lower costs and comparative analyses can be performed with different data sets.

The main objective of this study is to evaluate the effect of the ViT based model and GAN supported data augmentation methods on stroke classification performance. Therefore, Explainable Artificial Intelligence (XAI) methods were not directly applied in the study. However, in future studies, the decision mechanism of the model can be analyzed in more detail by using XAI techniques such as Grad-CAM and SHAP. Thus, it can be visualized which regions the model takes into account more and contribute to the interpretation of clinical experts.

Table 6. Classification results obtained in the literature and in this study using the stroke dataset.

Study	Proposed Model	Problem	Accuracy (%)
Yalcin and Vural (2022) [47]	Advanced D-UNet	Binary Classification (Stroke vs. No Stroke)	98.9
		Binary Classification (Hemorrhagic vs. Ischemic)	98.5
Karatas et al. (2022) [48]	ResNet50	Binary Classification (Stroke vs. No Stroke)	99.7
	Inception-v3	Binary Classification (Hemorrhagic vs. Ischemic)	99.5
Cinar et al. (2023) [26]	EfficientNetB0 + SVM	Binary Classification (Hemorrhagic vs. Ischemic)	95.1
Cinar et al. (2023) [28]	EfficientNet-B0	Binary Classification (Hemorrhagic vs. Ischemic)	98.7
Katar et al. (2023) [27]	Vision Transformer (ViT)	Binary Classification (Stroke vs. No Stroke)	98.7
Koska et al. (2024) [25]	MobilNetV2 / EfficientNetB0	Binary Classification (Hemorrhagic vs. Ischemic)	91.0 / 88.0
This Study	Vision Transformer with Traditional Data Augmentation	Binary Classification (Hemorrhagic vs. Ischemic)	96.4
		Binary Classification (Stroke vs. No Stroke)	96.3
		Multi-class Classification (No Stroke, Hemorrhagic, Ischemic)	96.3
	Vision Transformer with GAN-based Data Augmentation	Binary Classification (Hemorrhagic vs. Ischemic)	98.6
		Binary Classification (Stroke vs. No Stroke)	99.7
		Multi-class Classification (No Stroke, Hemorrhagic, Ischemic)	99.0

As a result, the proposed ViT model offers an innovative approach in the field of stroke classification, demonstrating a performance that can compete with powerful models in the existing literature such as Advanced D-UNet and ResNet50. The high accuracy rates achieved by the model support fast and accurate stroke diagnosis and are promising for early intervention in clinical applications. The proposed method, thanks to the ViT model combined with GAN-supported data augmentation, has the potential to obtain reliable and stable results even under limited data conditions, creating a strong foundation for further research in the field of medical imaging.

5. Conclusion

This study presents an innovative approach in stroke classification by combining the VT model with GAN based data augmentation techniques. The experimental results show that the proposed method achieves high accuracy rates in both binary and multi-class classification tasks and exhibits a competitive performance compared to other deep learning-based approaches in the existing literature. In particular, the GAN-supported data augmentation method has improved the class balance in imbalanced data sets and increased the generalization ability of the model.

One of the most important contributions of the proposed model is that it can better capture low-contrast stroke lesions using the attention mechanism of VIT compared to traditional CNN based approaches. In addition, successful results have been obtained even with limited and imbalanced data sets thanks to GAN-based data augmentation. Compared to similar studies in the literature, the proposed method stands out with its high accuracy rates and offers a potential use in clinical decision support systems.

The findings of this study show that by increasing the effectiveness of deep learning techniques in the field of medical imaging, a more reliable and faster approach can be provided in early diagnosis and clinical decision processes. In particular, since timely diagnosis of stroke is of vital importance, the classification success of the developed model can provide a critical advantage in terms of patient management. In future studies, it is planned to test the model with data sets containing larger and more diverse patient populations. In addition, by integrating Explainable Artificial Intelligence methods, the decision mechanism of the model can be better understood and made interpretable for clinical experts. In addition, it is recommended to conduct comprehensive tests with hospital collaborations to evaluate the applicability of the model in real clinical settings. In conclusion, this study shows that the combined use of Vision Transformers and GAN-based data augmentation methods provides an effective

and reliable method for stroke diagnosis. The findings provide an important basis for the future potential use of VIT-based models in medical artificial intelligence applications.

References

[1] World Health Organization. The top 10 causes of death. Retrieved from https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death, 2018.

[2] Benjamin EJ, Blaha MJ, Chiuve SE, Cushman M, Das SR, Deo R et al. Heart disease and stroke statistics—2017 update: a report from the American Heart Association. Circulation 2017; 135(10): e146-e603.

[3] Donnan GA, Fisher M, Macleod M, Davis SM. Stroke. Lancet 2008; 371(9624): 1612-1623.

[4] González RG. Clinical MRI of acute ischemic stroke. J Magn Reson Imaging 2012; 36(2): 259-271.

[5] Akbarzadeh MA, Sanaie S, Kuchaki Rafsanjani M, Hosseini MS. Role of imaging in early diagnosis of acute ischemic stroke: a literature review. Egypt J Neurol Psychiatr Neurosurg 2021; 57: 1-8.

[6] Moonis M, Fisher M. Imaging of acute stroke. Cerebrovasc Dis 2001; 11(3): 143-150.

[7] Litjens G, Kooi T, Bejnordi BE, Setio AAA, Ciompi F, Ghafoorian M et al. A survey on deep learning in medical image analysis. Med Image Anal 2017; 42: 60-88.

[8] Suganyadevi S, Seethalakshmi V, Balasamy K. A review on deep learning in medical image analysis. Int J Multimed Inf Retr 2022; 11(1): 19-38.

[9] Gautam A, Raman B. Towards effective classification of brain hemorrhagic and ischemic stroke using CNN. Biomed Signal Process Control 2021; 63: 102178.

[10] Neethi AS, Niyas S, Kannath SK, Mathew J, Anzar AM, Rajan J. Stroke classification from computed tomography scans using 3D convolutional neural network. Biomed Signal Process Control 2022; 76: 103720.

[11] Shakunthala M, HelenPrabha K. Classification of ischemic and hemorrhagic stroke using Enhanced-CNN deep learning technique. J Intell Fuzzy Syst 2023; Preprint: 1-16.

[12] Chen R, Cai Y, Wu J, Liu H, Peng Z, Xie Y et al. Artificial intelligence-based identification of brain CT medical images. In: AOPC 2022: Biomedical Optics; January 2023. Vol. 12560. pp. 53-58.

[13] Wieser M, Siegismund D, Heyse S, Steigele S. Vision transformers show improved robustness in high-content image analysis. In: 2022 9th Swiss Conference on Data Science (SDS); June 2022. pp. 71-72.

[14] Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, Uszkoreit J, Jones L, Gomez AN et al. Attention is all you need. In: Advances in Neural Information Processing Systems; 2017. Vol. 30.

[15] Dosovitskiy A. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. arXiv preprint arXiv:2010.11929, 2020.

[16] Takahashi S, Sakaguchi Y, Kouno N, Takasawa K, Ishizu K, Akagi Y et al. Comparison of vision transformers and convolutional neural networks in medical image analysis: A systematic review. J Med Syst 2024; 48(1): 1-22.

[17] Azad R, Kazerouni A, Heidari M, Aghdam EK, Molaei A, Jia Y et al. Advances in medical image analysis with vision transformers: a comprehensive review. Med Image Anal 2024; 91: 103000.

[18] Simo AMD, Kouanou AT, Monthe V, Nana MK, Lonla BM. Introducing a deep learning method for brain tumor classification using MRI data towards better performance. Inform Med Unlocked 2024; 44: 101423.

[19] Chavva IR, Crawford AL, Mazurek MH, Yuen MM, Prabhat AM, Payabvash S et al. Deep learning applications for acute stroke management. Ann Neurol 2022; 92(4): 574-587.

[20] Okimoto N, Yasaka K, Fujita N, Watanabe Y, Kanzawa J, Abe O. Deep learning reconstruction for improving the visualization of acute brain infarct on computed tomography. Neuroradiology 2024; 66(1): 63-71.

[21] Zhu G, Chen H, Jiang B, Chen F, Xie Y, Wintermark M. Application of deep learning to ischemic and hemorrhagic stroke computed tomography and magnetic resonance imaging. Semin Ultrasound CT MR 2022; 43(2): 147-152.

[22] Miyamoto N, Ueno Y, Yamashiro K, Hira K, Kijima C, Kitora N et al. Stroke classification and treatment support system artificial intelligence for usefulness of stroke diagnosis. Front Neurol 2023; 14: 1295642.

[23] Shakunthala M, HelenPrabha K. Classification of ischemic and hemorrhagic stroke using Enhanced-CNN deep learning technique. J Intell Fuzzy Syst 2023; Preprint: 1-16.

[24] Altıntaş M, Öziç MÜ. Performance evaluation of different deep learning models for classifying ischemic, hemorrhagic, and normal computed tomography images: transfer learning approaches. Konya J Eng Sci 2024; 12(2): 465-477.

[25] Koska İÖ, Koska Ç, Fernandes A. Automatic stroke classification: Domain knowledge injection augmented transfer learning approach. Anatol Clin J Med Sci 2024; 29(3): 260-267.

[26] Çınar N, Kaya B, Kaya M. Classification of brain ischemia and hemorrhagic stroke using a hybrid method. In: 2023 4th International Conference on Data Analytics for Business and Industry (ICDABI); IEEE; 2023. pp. 279-284.

[27] Katar O, Yıldırım O, Eroğlu Y. Vision transformer model for efficient stroke detection in neuroimaging. In: 2023 4th International Informatics and Software Engineering Conference (IISEC); IEEE; 2023. pp. 1-6.
[28] Çınar N, Kaya B, Kaya M. Brain stroke detection from CT images using transfer learning method. In: 2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT); IEEE; 2023. pp. 595-599.
[29] Azad R, Kazerouni A, Heidari M, Aghdam EK, Molaei A, Jia Y et al. Advances in medical image analysis with vision transformers: a comprehensive review. Med Image Anal 2024; 91: 103000.
[30] Henry EU, Emebob O, Omonhinmin CA. Vision transformers in medical imaging: A review. arXiv preprint arXiv:2211.10043, 2022.
[31] Li Z, Wang Y, Yu J, Guo Y, Cao L, Gao J et al. Brain MRI image classification for Alzheimer's disease diagnosis based on DenseNet and Vision Transformer. arXiv preprint arXiv:2103.03732, 2021.
[32] Liang S, Zhang W, Gu Y. A hybrid and fast deep learning framework for COVID-19 detection via 3D chest CT images. In: Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision; 2021. pp. 508-512.
[33] Xia Y, Yao J, Lu L, Huang L, Xie G, Xiao J et al. Effective pancreatic cancer screening on non-contrast CT scans via anatomy-aware transformers. In: Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2021, 24th International Conference; 27 September–1 October 2021; Strasbourg, France. Springer International Publishing; 2021. Vol. 24. pp. 259-269.
[34] Ayoub M, Liao Z, Hussain S, Li L, Zhang CW, Wong KK. End-to-end vision transformer architecture for brain stroke assessment based on multi-slice classification and localization using computed tomography. Comput Med Imaging Graph 2023; 109: 102294.
[35] Abbaoui W, Retal S, Ziti S, El Bhiri B. Automated ischemic stroke classification from MRI scans: Using a vision transformer approach. J Clin Med 2024; 13(8): 2323.
[36] Koç U, et al. Artificial intelligence in healthcare competition (Teknofest-2021): Stroke data set. Eurasian J Med 2022; 54(3): 248-253.
[37] Shorten C, Khoshgoftaar TM. A survey on image data augmentation for deep learning. J Big Data 2019; 6(1): 1-48.
[38] Perez L, Wang J. The effectiveness of data augmentation in image classification using deep learning. arXiv preprint arXiv:1712.04621, 2017.
[39] Goodfellow I, Pouget-Abadie J, Mirza M, Xu B, Warde-Farley D, Ozair S et al. Generative adversarial nets. In: Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS); 2014. Vol. 27. pp. 2672-2680.
[40] Ledig C, Theis L, Huszár F, Caballero J, Cunningham A, Acosta A et al. Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR); 2017. pp. 4681-4690.
[41] Zhang K, Liang X, Gao H, Van Gool L, Timofte R. Designing a practical degradation model for deep blind image super-resolution. In: Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV); 2021. pp. 4791-4800.
[42] Wang Z, Bovik AC, Sheikh HR, Simoncelli EP. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. IEEE Trans Image Process 2004; 13(4): 600-612.
[43] Dosovitskiy A, Beyer L, Kolesnikov A, Weissenborn D, Zhai X, Unterthiner T et al. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. arXiv preprint arXiv:2010.11929, 2020.
[44] Guo MH, Xu TX, Liu JJ, Liu ZN, Jiang PT, Mu TJ et al. Attention mechanisms in computer vision: A survey. Comput Vis Media 2022; 8(3): 331-368.
[45] Ridnik T, Ben-Baruch E, Noy A, Zelnik-Manor L. ImageNet-21K pretraining for the masses. arXiv preprint arXiv:2104.10972, 2021.
[46] Yosinski J, Clune J, Bengio Y, Lipson H. How transferable are features in deep neural networks? In: Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS); 2014. Vol. 27. pp. 3320-3328.
[47] Yalçın S, Vural H. Brain stroke classification and segmentation using encoder-decoder based deep convolutional neural networks. Comput Biol Med 2022; 149: 105941.
[48] Karataş AF, Doğan V, Kılıç V. Artificial intelligence-based cerebrovascular disease detection on brain computed tomography images. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2022; (41): 175-182.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 401-410, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1599232

Hikâye Kitapları için Transformatör Tabanlı Bir Özetleme Modeli

Mehtap ÜLKER[1*], A. Bedri ÖZER[2]
[1,2] Computer Engineering Department, Firat University, Elazig, Turkey
[*1] m.ulker@firat.edu.tr, [2] bedriozer@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 10/12/2024; Kabul/Accepted:13/03/2025)

Öz: Günümüzde, doküman özetleme için önerilen birçok model olmasına rağmen hikâye kitaplarını ele alan özetleme modelleri sınırlıdır. Bu problemi ele almak için yeni bir transformatör tabanlı özetleme modeli önerilmiştir. Önerilen model, KeyBERT, DistilBERT-NER, TF-IDF ve BART modelinden oluşmaktadır. KeyBERT ve TF-IDF, anahtar kelimeler çıkarılması için kullanılmıştır. DistilBERT-NER ise hikâye kitaplarından varlık isimleri çıkarımı için kullanılmıştır. Varlık isimleriyle bu anahtar kelimeler birleştirilerek İngilizce hikâye kitapları için transformatör tabanlı bir özetleme modeli oluşturulmuştur. Önerilen model, ince ayar yapılarak eğitilmiş T5, BART ve PEGASUS modelleriyle karşılaştırılmış ve sonuçlar insanlar tarafından değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen modelin temel yöntemlere kıyasla Rouge-L - F1 değeriyle hikâye özetlemede daha yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Metin Özetleme, Soyutlamalı Yöntem, KeyBERT, DistilBERT, TF-IDF.

Transformer-Based Summarization Model for Story Books

Abstract: Recently, although there are many proposed models for document summarization, summarization models for storybooks are limited. To address this problem, a new transformer-based summarization model is proposed. The proposed model consists of KeyBERT, DistilBERT-NER, TF-IDF and BART. KeyBERT and TF-IDF are used for keyword extraction. DistilBERT-NER was used to extract entity names from storybooks. By combining these keywords with entity names, a transformer-based summarization model for English storybooks was created. The proposed model is compared with the fine-tuned T5, BART and PEGASUS models and the results are evaluated by humans. The experimental results show that the proposed model achieves higher values of Rouge-L - F1 in story summarization compared to the baseline methods.

Key words: Text summarization, Abstractive method, KeyBERT, DistilBERT, TF-IDF.

1. Giriş

Doküman özetleme, günümüzdeki en popüler araştırma konularından biridir. Bu alandaki en temel istekleri kullanıcıların ihtiyaç duydukları bilgilere hızlı bir şekilde ulaşabilmesidir. Ancak, bir dokümandan önemli bilgilerin manuel olarak çıkarılması, zorlu ve zaman alıcı bir süreçtir. Metin özetleme temelde çıkarımlı ve soyutlamalı olmak üzere iki farklı şekilde uygulanmaktadır. Çıkarımlı yöntemlerde, kaynak dokümandaki en önemli cümleler çıkarılarak özetlenmektedir. Soyutlamalı yöntemlerde ise dokümandan yeni kelimelerle yeniden yazılarak özet oluşturulmaktadır. Bu açıdan, soyutlamalı yaklaşımlar insan tarafından oluşturulan özetlere benzemektedir. Dolayısıyla çıkarımlı yaklaşımlara göre uygulanması daha zordur [1, 2].

Derin öğrenme yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte, soyutlamalı metin özetleme alanında başarılı sonuçlar elde edilmiştir [3]. Metin özetleme yöntemlerinde, kelimeler arasındaki ilişkileri daha etkili bir şekilde çıkarabildiği için transformatör tabanlı dil modelleri (BERT, ROBERT, vb.) sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak, bu dil modelleri metindeki tüm kelimeleri dikkate alarak anlamsal ilişkileri çıkarmada zorluk yaşamaktadır ve dolayısıyla doküman özetleme konusunda performansları da sınırlı kalmaktadır [4, 5]. Doküman özetleme, metinden anlamsal bilgilerin çıkarılması ve bu bilgilerin anlamlı ve tutarlı bir şekilde cümlelere dönüştürülmesi amacını taşımaktadır. Uzun dokümanlarda, cümleler arasındaki anlamsal bütünlüğü koruyarak özet oluşturmak doküman uzunluğu artıkça daha da zor bir durumdur. Graf tabanlı modeller [3, 6] ile dokümanın hiyerarşik yapısını ele alarak özetlemek mümkün olduğu için uzun dokümanlar da özetlenebilmektedir. Bunun yanı sıra, doküman ait belirleyici önemli kelimelerle uzun dokümanları özetlemek mümkündür. Bu amaçla kullanılan yöntemlerin başında anahtar kelime ve varlık ismi çıkarımı gelmektedir. Anahtar kelimeleri çıkarmak için istatistiksel tabanlı, graf tabanlı (TextRank, LexRank) veya derin öğrenme tabanlı otomatik anahtar kelime çıkarma (AKE) yöntemleri kullanılmaktadır [7]. Anahtar kelimeler, metnin içeriğini hızlı bir şekilde anlamamıza yardımcı olan kelime ya da

* Sorumlu yazar: m.ulker@firat.edu.tr Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0001-8680-8518, [2] 0000-0002-8005-7386

kelime gruplarıdır [8]. AKE yöntemlerine ek olarak, varlık isimleri çıkarma (NER) teknikleri de soyutlamalı metin özetlemesinde genellikle tercih edilen yöntemlerdendir [9]. Ancak, metin üretimi genellikle transformatör tabanlı anahtar kelime çıkarma ve NER yöntemlerine odaklanmamıştır. Du ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada [10], biyomedikal dokümanları özetlemek için alan bilgisi ve cümle pozisyonu bilgisini kullanan bir model önerilmiştir. Xiao ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada [11], cümle füzyonu ve kooperatif pekiştirmeli öğrenmeye dayalı bir özetleme model geliştirmiştir. Cai ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada ise [3], SciBERT ve Graph Attention Networks (GAT) kullanan bir özetleme modeli önerilmektedir. Moirangthem ve diğerleri [12], uzun dokümanları özetlemek için zaman temelli hiyerarşik işaretçi üretici ağ tabanlı bir özetleme modeli önermektedir. Liang ve diğerleri, sosyal medya metinlerini özetlemek için seçici pekiştirilmiş sıralıdan sıralı dikkatli ağı modeline dayalı bir özetleme yöntemi önermiştir. BART modelinin gelişmesiyle birlikte, metin üretme son zamanlarda hızla gelişim göstermektedir. BART modeli yapısı gereğince iki yönlü kodlayıcı ve otoregresif kod çözücüyü içermektedir. Otoregresif kod çözücü GPT modellerinde kullanılan bir kod çözücü yöntemidir. Çıktı olarak üretilen özelliği tekrar girdi olarak kullanmaktadır [14]. Transformatör tabanlı modeller, yerel belirteçler ve global belirteçler arasındaki anlamsal ilişkileri keşfetmede oldukça kullanışlıdır. Ancak dokümanın uzunluğunun artmasıyla anlamsal ilişkilerin yakalanması problemi ortaya çıkmaktadır. Bu problemi çözebilmek için BART modeline dayalı yeni yöntemler önerilmiştir. Wang ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada [5], BART ile bütünleşmiş yeni bir konu asistanı modeli önerilmiştir. Yu ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada [15], uzman olmayan kişiler özet üreten BART tabanlı bir model geliştirilmiştir. Bajaj ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, BART tabanlı bir modelle sıkıştırılmış dokümanda özet üretme yöntemi önerilmiştir.

Metin özetlemede önerilen yöntem kadar kullanılan giriş metni de oldukça önemlidir. Çoğu model, BART, BERT ve SciBERT gibi modellerin belirli bir belirteç sınırına sahip olması nedeniyle dokümanın tamamını işleyemez [3]. Bu nedenle, özet oluşturulurken Otomatik Anahtar Kelime Çıkartma (AKE) ile çıkarılan anahtar kelimelerden yararlanılmaktadır. Christia ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada [17], TF-IDF algoritması ile çıkarılan anahtar kelimelerden özet oluşturmayı önerilmiştir. Deng ve diğerleri [18], TextRank algoritması ile çıkarılan anahtar kelimelere dayalı bir metin özeti oluşturmayı öneren bir model geliştirilmiştir. Li ve diğerleri [19], TextRank algoritması ile çıkarılan anahtar kelimeleri kodlayan bir özetleme modeli önermiştir. TF-IDF, metindeki kelimelerin sıklığına göre anahtar kelimeleri çıkaran güçlü bir algoritmadır. Ancak, kelimelerin anlamsal bilgisini göz ardı etmektedir [20]. Bu nedenle, anahtar kelime çıkartma işlemi için genellikle TextRank algoritmasına geniş bir şekilde odaklanılmaktadır. Anahtar kelimelerin yanı sıra, bu çalışmada girdi metni olarak varlık isimlerine de odaklanılmıştır. Xiao ve diğerleri [11], cümle gruplamada varlıkları kullanan bir metin özetleme modeli önermiştir. Li ve diğerleri [21], graf tabanlı ağlarda varlık isimlerini kullanarak bir özet oluşturmuştur. Koncel-Kedziorski ve diğerleri [6], graf tabanlı ağlardaki varlık isimlerini ve ilişkileri makalenin başlığıyla birleştirerek bir özetleme modeli sunmuşlardır. Xiaoye ve diğerleri [22], BERT kodlayıcı ile çıkarımlı özetleme sürecinde modelin metnin tamamı yerine ana konunun içeriğine odaklanmasını sağlamak için anahtar ifadeleri kullanmayı amaçlayan KeyBERTSUM yöntemini sunmuştur. Yoo ve diğerleri [23], metin özetleme için diyalogdaki ana konuyu yakalamak zorluğuna değinerek anahtar kelimeleri kullanarak diyalog özetleme modeli önermişlerdir. Zhao ve diğerleri [24], hikâye kitapları için eğitim içerikli sorular üretmek adına soru türü tahmini ve olay odaklı özetlemeden oluşan yeni bir model önermiştir. Hikâyedeki paragrafta öne çıkan olayları, eğitimsel sorular üretmek için özetlemek hala çözülmemiş bir problem olarak ifade edilmiştir. Özetleme için BART tabanlı olay odaklı özetleme yöntemi geliştirilmiştir. Eğitim verilerini elde etmek için kural tabanlı bir yöntemle eğitimsel soru-cevap çiftleri oluşturulmuş ve değerlendirme için kullanılmıştır. Ling ve diğerleri [25], metin özetlemede olgusal tutarsızlığın etkilerini azaltmak ve tutarlı özetler oluşturmak amacıyla, PEGASUS modelini temel alan COFACTSUM modelini önermiştir. Soyutlamalı özetleme süreçlerinde metindeki tutarsızlıkların azaltılması ve özetlerin daha tutarlı hale getirilmesi araştırmacıların temel hedefi olarak belirlenmiştir. Upadhyay ve diğerleri [26], film senaryolarını edebi yorumlarla özetlemek için BART tabanlı bir model önermiştir. Ancak, modelin maksimum kelime uzunluğu nedeniyle başarılı özetler üretemediği belirtilmiş ve bu nedenle iyileştirilmesi gerektiği üzerinde durulmuştur.

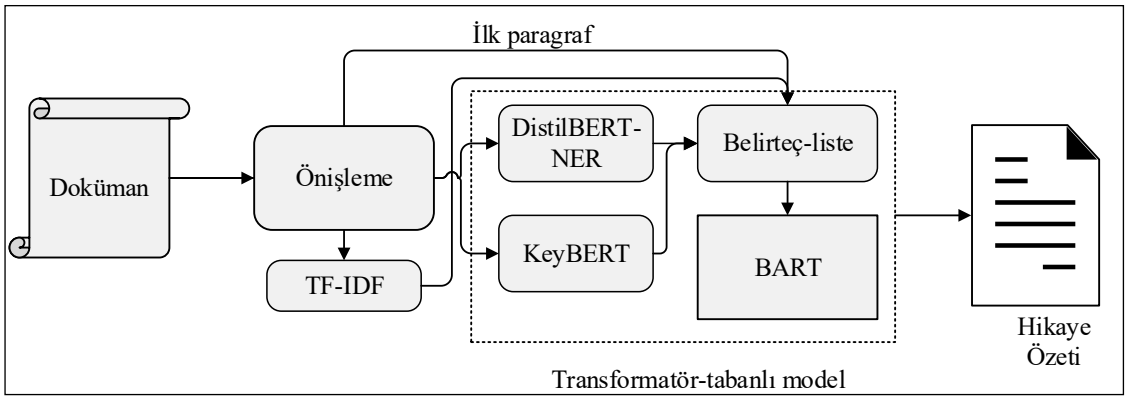
Bu çalışmada, anahtar kelimeler ve varlık isimleri kullanılarak hikâye özetlerini oluşturmayı amaçlayan yeni bir Transformatör tabanlı model önerilmektedir. Anahtar kelimeler, BERT tabanlı bir model aracılığıyla, varlık isimleri ise DistilBERT-NER modeli ile çıkarılmıştır. Çalışmada, KeyBERT ve NER modelini birleştirerek yeni bir belirteç listesi oluşturulmuştur. Transformatör tabanlı model, İngilizce hikâye kitaplarını özetlemek için eğitilmiştir.

2. Önerilen Yöntem

Bu çalışmada, DistilBERT-NER, KeyBERT ve TF-IDF tabanlı bir hikâye kitaplarını özetleme modeli önerilmiştir. Önerilen model, Şekil 1'de gösterilmiştir. İlk olarak, dokümanda bulunan durak kelimeler ve sayılar kaldırılmıştır. Ardından, DistilBERT-NER ile çıkarılan varlık isimleri ve KeyBERT kullanılarak yeni bir belirteç listesi oluşturulmuştur. Ayrıca, bu belirteç listesi dokümanın ilk paragrafına eklenmiştir. Transformatör tabanlı model, bu belirteç listesiyle ince ayar olarak oluşturulmuştur. Önerilen modelin algoritması aşağıda verilmiştir.

Doküman özetleme algoritması

girdi ←önişleme(doküman)
1. Varlık ismi ← DistilBERT-NER (girdi)
2. Anahtar kelimeler ←KeyBERT (girdi, 3-gram) & KeyBERT (girdi, 4-gram) & TF-IDF(girdi)
3. Token-list ←Varlık ismi ∪ Anahtar kelimeler ∪ İlk-Paragraf
4. Hikâye Özeti ←BART (Token-list)



Şekil 1. Transformatör tabanlı özetleme modeli.

BART, transformatör tabanlı bir dil modelidir. Bu modelin girdisinde anahtar kelime çıkarımı (KeyBERT, TF-IDF) ve varlık ismi çıkarımı (DistilBERT-NER) yöntemleri ile çıkarılan kelimeler kullanılmıştır. BART modelinde, öncelikle girdi bilgisi kopyalanmaktadır. Modelin performansını artırmak için belirteç maskeleme, belirteç silme, cümle sıralaması değiştirme, doküman döndürme ve metin doldurma gibi fonksiyonlar geliştirilmiştir. Daha az kelime kullanarak bu fonksiyonların işlevselliği de azaltılmıştır. KeyBERT, anahtar kelimeleri çıkarmak için transformatör tabanlı bir yaklaşımdır. Kelimeler arasındaki anlamsal ilişkileri belirlemede oldukça etkili bir yöntemdir. Anahtar kelimeler arasındaki benzerlikler kosinüs benzerliği ile hesaplanmıştır. Bu çalışmada, 3-gram ve 4-gram olacak şekilde anahtar kelimelerin çıkarımı yapılmıştır. Bu kelimeler varlık isimleri ve metnin ilk paragrafıyla birleştirilerek hikâyenin bölümünün özetlenmesi amaçlanmıştır.

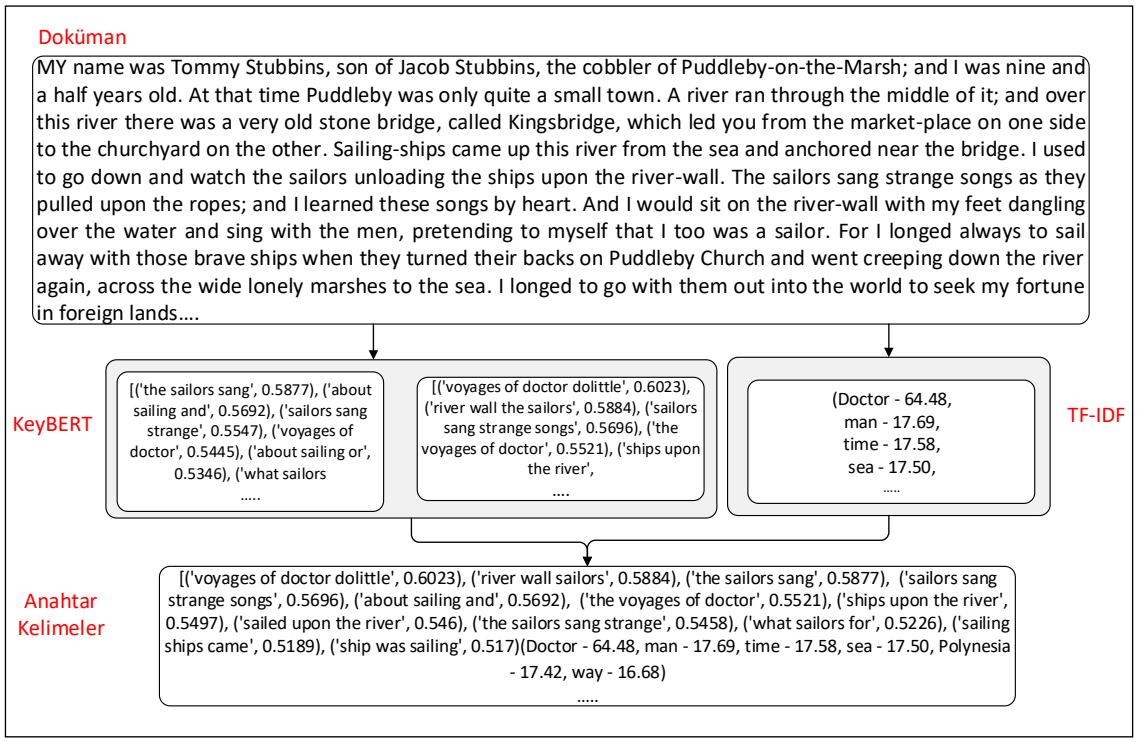
2.1. KeyBERT tabanlı anahtar kelime çıkarımı

KeyBERT, bir dokümandaki anahtar sözcükleri BERT modeli ve kosinüs benzerliğine dayalı olarak çıkarma yöntemidir [27]. KeyBERT modeli olarak "distilbert-base-nli-mean-tokens" versiyonu kullanılmıştır. KeyBERT'in en önemli avantajlarından biri, anahtar kelime niteliği taşıyan kelime gruplarının çıkarabilmesidir. Bu çalışmanın kapsamında, 3-gram ve 4-gram olacak şekilde anahtar kelimeler çıkarılmıştır. Ardından, her iki türde ortak olan anahtar ifadeler birleştirilmiştir. TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency) algoritmasında, metindeki kelimelerin sıklığına göre içeriği en iyi şekilde tanımlayan kelimeler çıkarılmaktadır. TF-IDF değerlerini hesaplamak için, terim sıklığı (TF) ve ters doküman sıklığı (IDF) aşağıdaki Denklem 1'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$TF - IDF_i = TF_{ij} * \log_e \frac{|D|}{Df_i} \quad (1)$$

Burada, TF_{ij} i kelimesinin j dokümanda kaç kez geçtiğini ifade etmektedir. |D| doküman sayısını ifade etmektedir. Df_i i kelimesini içeren dokümanların sayısını ifade etmektedir. Anahtar kelime seçimi aşağıda maddeler halinde sunulmuştur. Şekil 2'de ise anahtar kelime çıkarımı gösterilmiştir.

- Anahtar kelimeler, 3-gram ve 4-gram olmak üzere sıralama işlemine tabi tutulmaktadır.
- İki terim benzer içeriklerde yer alıyorsa ve aynı skora sahipse, en yüksek skora sahip olan terim seçilmektedir.
- "is, are, were, was" gibi bağlam dışı kelimeler anahtar kelimelerden tamamen çıkarılmaktadır.
- TF-IDF algoritmasıyla elde edilen anahtar kelimeler, skorlarına bakılmaksızın listenin sonuna eklenmektedir.



Şekil 2. KeyBERT-tabanlı anahtar kelime çıkarımı.

2.2. DistilBERT-NER

DistilBERT, BERT modelinin mimarisine benzer yapıya sahiptir. Ancak, DistilBERT, BERT'in hızının %97'sini korurken, BERT'te belirteç türü yerleştirmeleri ve havuzlama katmanlarını içermemektedir. NLP'de kelime gömme ve ön eğitimin yöntemlerinin kapsamlı analizi modern doğrusal cebir çerçeveleri, katman normalizasyonu ve doğrusal katman gibi Transformatör mimarisinde kullanılan işlemlerin çoğu için optimize etmiştir. Ayrıca, modelin gizli katmandaki değişikliklerin, katman sayısı gibi diğer parametrelerdeki değişikliklere kıyasla hesaplama verimliliği üzerinde daha az etkisinin olduğu gösterilmiştir. DistilBERT, katman sayısını azaltarak daha verimli bir model ortaya koymaktadır [28].

DistilBERT-NER, dokümandan varlık isimlerini çıkarmak için geliştirilmiş bir modeldir. Bu aşamada, DistilBERT-NER modelinin "distilbert-base-multilingual-cased-ner-hrl" versiyonu kullanılmıştır. Çıktı katmanının aktivasyon fonksiyonu GELU olarak seçilmiş ve nöron sayısı, varlık etiket kategorilerinin sayısına göre eşit olarak belirlenmiştir. Böylece, dokümandan varlık türleri olarak (yerler- LOC, organizasyonlar- ORG ve kişiler- PER) çıkarımı yapılmıştır. DistilBERT-NER ile çıkarılan tüm varlık isimleri, anahtar kelimelerle birlikte kullanılmaktadır.

3. Araştırma Bulguları ve Tartışma

Önerilen model, bu çalışma kapsamında hazırlanan StoryBookSum veri seti ile temel yöntemlerle karşılaştırılmıştır.

3.1. Veri seti

Önerilen modeli değerlendirmek için 7500 İngilizce hikâye kitabı bölümünden oluşan StoryBookSum veri setini önerilmiştir. Kitap bölümleri, model tarafından üretilen özetlerin değerlendirilmesi için kullanılmıştır. Veri seti, hazırlanan kitapların tüm bölümlerini içermektedir. Belirteç listesi, bölümün anahtar kelimeleri, varlık isimleri ve bölümün ilk paragrafı çıkarılarak hazırlanmıştır. Tablo 1'de veri seti özelliklerine yer verilmiştir.

Tablo 1. StoryBookSum veri kümesi özellikleri.

Veri seti	Doküman Sayısı	Kaynak	Ort. Varlık ismi
		Ort. kelime	
StoryBookSum	7500	15557,4	15,14

3.2. Değerlendirme Ölçütleri

Rouge metriği (Recall Oriented Understudy of Gisting Evaluation), yazar tarafından oluşturulan özet ile model tarafından oluşturulan özetin benzerliğini n-gram tabanlı olarak hesaplayan ölçüm yöntemidir [29]. Yaygın olarak kullanılan üç değerlendirme metriği ROUGE-1, ROUGE-2 ve ROUGE-L'dir. En uzun ortak sıralı söz öbeğinin (LCS- Longest Common Subsequence) örtüşmesine dayalı hesaplama yöntemi Rouge-L özetleme modelinin performansını göstermek için diğerlerinin ölçüm yöntemlerinden daha fazla tercih edilmektedir. ROUGE-N'in hesaplaması, Denklem 2'te verilmiştir.

$$ROUGE - N = \frac{\sum_{S\in\{referans\ özet\}} \sum_{gram_n \in S} C_{eşleşme}\ (gram_n)}{\sum_{S\in\{referans\ \}} \sum_{gram_n \in S} C\ (gram_n)} \quad (2)$$

Burada, $gram_n$ n kelimeli sözcükleri, $C\ (gram_n)$ hedef özette $gram_n$ bulunma sıklığı, $C_{match}(gram_n)$ kelime kümesi $gram_n$ 'in hedef ve referans özette bulunma sıklığını ifade etmektedir. Denklem 3, 4 ve 5'te detaylı olarak ROUGE-L hesaplanmasına yer verilmiştir.

$$Anma_{LCS} = \frac{LCS(X,Y)}{m} \quad (3)$$

$$Duyarlılık_{LCS} = \frac{LCS(X,Y)}{n} \quad (4)$$

$$F_{LCS} = \frac{2 * Anma_{LCS} * Duyarlılık_{LCS}}{(Anma_{LCS} + Duyarlılık_{LCS})} \quad (5)$$

Burada, X model tarafından üretilen özeti, Y orijinal özeti ifade etmektedir. LCS ise en uzun ortak alt diziyle çıkarılan kelime sayısını, m ise orijinal özetteki n gramların sayısı, n ise hedef özetteki n-gramların sayısını ifade etmektedir.

ROUGE skoru, üretilen özet ile gerçek özetleri n-gramların ile örtüşmesine bağlı olarak karşılaştırmaktadır. Ancak, bu ölçüt tek başına üretilen özetlerin kalitesini kanıtlamak için yeterli değildir. Bu problemi ele almak amacıyla, üretilen özetler insan değerlendirme ölçütüne de tabi tutulmuştur. Fleiss'in kappa katsayısı, iki veya daha fazla gönüllü arasında yapılan karşılaştırmalı anlaşmanın güvenilirliğini ölçmek için kullanılmaktadır. Fleiss'in kappa katsayısı, Denklem 6'da hesaplanmaktadır. Bu denklemle ilgili gerekli hesaplamaları sağlayan eşitlikler Denklem 7, 8, 9 ve 10'da verilmiştir [30].

$$K = \frac{\bar{P} - \bar{P_e}}{1 - \bar{P_e}} \tag{6}$$

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_i^N P_i \tag{7}$$

$$\bar{P_e} = \sum_{j=1}^k \rho_j^2 \tag{8}$$

$$\rho_j = \frac{1}{N * n} \sum_{i=1}^N n_{ij} \tag{9}$$

$$P_i = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^N n_{ij} \, (n_{ij} - 1) \tag{10}$$

Burada N değerlendirilecek örneklem sayısını, n toplam değerlendirici sayısını, k değerlendirmede kullanılacak kategori sayısını ifade etmektedir. K değeri 0 ile 1 arasında bir değer olarak hesaplanmaktadır. Bu değer 1'e ne kadar yakınsa değerlendiriciler arasındaki tutarlılık o kadar yüksektir.

3.3. Temel Yöntemler

Önerilen modelin performansı, temel modellerle karşılaştırılmıştır. Bu modeller, haber makaleleri, finansal metinler ve diyalog metinleri gibi veri setleriyle eğitilerek oluşturulmuş özetleme modelleridir. Bu modeller, hikâye kitaplarıyla karşılaştırılabilir oldukları için tercih edilmiştir. Temel yöntemler aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır.

- T5, metin tabanlı dil problemlerini ele almak için geliştirilmiş bir dil modelidir [31]. Bu çalışmada, haber verileriyle eğitilmiş T5 tabanlı dil modeli kullanılmıştır [32].
- $BART_{XSUM}$, BBC makalelerinden toplanan 226.711 haber makalesinden oluşan XSum veri setiyle önceden eğitilmiş modeldir [14, 33].
- $BART_{Large}$, CNN/DailyMail veri setiyle eğitilmiş bir temel dil modeldir [14, 33]. Bu çalışmada, veri setiyle eğitilmiş BART model kullanılmıştır [34].
- PEGASUS, özellikle soyutlama metni özetleme olmak üzere çeşitli NLP görevlerini gerçekleştirmek için büyük veri kümeleriyle Transformatör tabanlı bir kodlayıcı-kod çözücü modelidir [35]. Bu çalışmada, finansal dokümanlarla eğitilmiş PEGASUS dil modeli kullanılmıştır [36].

3.4. Değerlendirme Sonuçları

Önerilen modelin performansı, StoryBookSum veri seti üzerinde temel yöntemlerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonuçları, Tablo 2'de sunulmuştur. Bu çalışmada, hikâye kitaplarının tamamını okumak yerine, kitaptaki anahtar kelime, varlık isimleri ve ilk paragrafı ile anahtar çıkarımı yapılarak oluşturulan belirleyici kelimelerle özet oluşturulması hedeflenmiştir.

Tablo 2'deki sonuçlara göre, önerilen model, Rouge-L %15,88 F1 değeriyle diğer modellere kıyasla en iyi performansı sergilemektedir. Bu sonuçlardan önerilen modelin kelimeler ve varlık isimleri arasındaki ilişkileri daha etkili bir şekilde çıkarabildiği ve daha başarılı özetler oluşturduğu görülmektedir. Bu çalışma kapsamında, varlık ismi olarak kişi isimleri, yer isimleri gibi bilgi çıkarımları yapılmıştır. Tablo 2'deki sonuçlardan insanlar veya yerler arasındaki ilişkilerin belirlenmesiyle girişten daha az belirteç listesiyle bir kitap özeti oluşturulabilir. Ancak burada önemli olan, varlık isimleri arasındaki anlamsal ilişkilerin belirlenmesidir. Bu ilişki çıkarımı olmadığı için hikâye bölümünün ilk paragrafı belirteç listesine dâhil edilmiştir. T5, BART ve PEGASUS, önerilen modele göre düşük sonuçlar elde etmiştir. Bu fark, modellerin eğitim verileri ve hedef görevlere özgü olmalarından kaynaklanmaktadır.

Önerilen model, StoryBookSum veri setiyle eğitilmiştir. Bu veri kümesi hikâyenin belirleyici kelimeleriyle eğitilerek oluşturulmuştur. Bu çalışmada, giriş olarak verilen belirteç listesinden hikâyeyi özetleyebilmesi amaçlanmaktadır. Dolayısıyla model, hikâyenin bütünüyle değil hikâyenin bir kısmından özetlenmesi odaklanmaktadır. Haliyle dokümandaki kelimelerin tamamı verilmediği için Rouge-1/2/L değerleri de özetleme

için çok büyük başarı sağlamadığı ancak özetleme için bir temel oluşturduğu ve diğer modellerden daha üstün olduğu da görülmektedir. Ayrıca, hikâyeler bölüm-bölüm ele alınmıştır. Her bir bölüme ait özet bölümü bulunmamaktadır. Model tarafından çıkarılan özetler bölüm bazında karşılaştırıldığı için Rouge-1/2/L değerleri yüksek çıkmamıştır. Bu modelin başarısının artmasında belirteç listesine varlık isimlerinin yanı sıra ilişki çıkarımı ya da anahtar kelime sayısının arttırılmasıyla hikâye oluşturmanın başarısını arttıracaktır.

Hikâye kitaplarında bölümlere ait özetlerin olmaması ve her bir bölüme ait özetin bölüm bazında karşılaştırılması Pre-trained modellerin başarını da etkilediği görülmektedir. Hikâye kitapları, yapısı gereğince bölüm şeklinde düzenlenmiş dokümanlardır. Bölümlerde kişi, konum gibi bilgilerin korunması hikâyedeki bütünlüğün sağlanması için oldukça önemli bir husustur. NER ile bu bilgilerin çıkarımı yapılmış anahtar kelimeler ve ilk paragrafla birleştirilerek modelin oluşturulması gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2, önerilen modelin dokümanın tamamı olmadan temel modellerden daha başarılı bir özet üretildiği görülmektedir. Önerilen modelin, diğer yöntemlere karşılaştırıldığında Rouge-L değerinin %15,88 F1 değeriyle özet üretmede daha başarılı olduğu görülmektedir. Kelimeler arasındaki ilişkiyi açığa çıkaran ifadelerin ve belirteç listesinin olmaması, veri seti boyutu, eğitim kümesi özelliği bu değerin ortaya çıkmasının ana nedenidir.

Tablo 2. Değerlendirme sonuçları.

Model	**StoryBookSum Veriseti**		
	ROUGE-1 (F1)	ROUGE-2 (F1)	ROUGE-L (F1)
T5-finetuned	12,08	3,96	11,56
PEGASUS	3,85	0,70	3,25
BART-finetuned	10,07	5,51	9,34
$BART_{XSUM}$	8,92	0,87	8,07
Önerilen model	19,15	5,36	15,88

Tablo 2'deki sonuçlardan, T5-finetuned ve BART-finetuned modellerinde yaklaşık 4 ROUGE-L değeri farkıyla başarılı bir şekilde özetler ürettiği görülmektedir En düşük ROUGE-L puanı ise daha kısa özetler üreten $BART_{XSUM}$ ve Pegasus modellerinde elde edilmiştir. Önerilen modelde, özet üretmenin, temel yöntemlerle özet üretmekte daha başarılı sonuçlar ürettiği görülmektedir. Tablo 2'de görüldüğü üzere değerlendirme Rouge-N değerleriyle karşılaştırılmıştır. Rouge-L değeri, orijinal özet ile model tarafından üretilen özetin arasındaki en uzun ortak alt diziyi (LCS) temel alarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplama, üretilen özet ile orijinal özet arasındaki eşleşen en uzun ortak alt diziye dayalı olarak yapılır. Bu hesaplama yönteminde, üretilen hikâye bölümü ile orijinal hikâye bölümündeki özetler arasındaki en uzun ortak alt dizi belirlenir. Denklem 3, 4, ve 5'e göre ROUGE-L değeri hesaplanmaktadır. Bu değer, iki farklı özet arasında örtüşen en uzun kelime ortak alt dizinin kelime sayısına, üretilen özetin uzunluğuna, orijinal özetin uzunluğuna bağlıdır.

Önerilen model, bir kitap bölümünü hızlı bir şekilde özetlemek için, anahtar kelimeler, varlık isimleri ve bölümün ilk paragrafından oluşan bir belirteç listesi ile bir temel oluşturmaktadır. Kelime sayısının sınırlı olması nedeniyle, üretilen özet ile orijinal özet arasındaki en uzun ortak alt dizi (LCS) değeri de sınırlı kalmaktadır. Haliyle LCS değerinin özet uzunluğuna oranı bu değerin %15,88 çıkmasına neden olmuştur. Ancak, önerilen modelin hikâye kitabındaki temel niteleyici kelimelerle özet oluşturmak için temel oluşturduğu bu sonuçlardan açık bir şekilde görülmektedir.

Tablo 3'te, önerilen modele göre yapılan insan değerlendirme sonuçları verilmiştir. Değerlendirme kriteri olarak beş ölçüt dikkate alınmıştır. Değerlendirme kriterleri aşağıdaki gibidir:

- Kısalık: Üretilen özetin gereksiz bilgi içermemesi,
- Bilgilendiricilik: Üretilen özetin orijinal özetteki gibi önemli bilgiler içermesi,
- Tutarlılık: Üretilen özetin içeriği ile orijinal özetin içeriğinin örtüşmesi,
- Okunabilirlik: Üretilen özetin anlaşılabilir olması,
- Dilbilgisi: Üretilen özetin dilbilgisi kurallarına uymasıdır.

Yukarıdaki kriterlere göre, beş kişiye modelin ürettiği özetlerin bölümün içeriğiyle ne kadar uyumlu olduğu sorulmuştur. Her bir katılımcıya rastgele 20 doküman seçmesi ve bunları 0 (en kötü) ile 5 (en iyi) arasında bir puanla değerlendirmesi istenmiştir. Değerlendirme sonuçlarına Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. İnsan değerlendirme sonuçları.

	Kısalık	**Bilgilendiricilik**	**Tutarlılık**	**Okunabilirlik**	**Dilbilgisi**
Ort/Var.	1,60 (0,18)	2,50(0.21)	2,40(0,27)	4,58(0,21)	4,65 (0,12)
Fleiss kappa	0,28	0,31	0,34	0,65	0,69

Fleiss'in kappa katsayısı 1'e ne kadar yakınsa, gönüllüler arasındaki tutarlılık o kadar yüksektir [27]. Tablo 3'teki sonuçlara göre, önerilen modelin dilbilgisi ve okunabilirlik kriterleri açısından iyi yazılmış cümleler ürettiğini göstermektedir. Diğer kriterler ROUGE L ölçütü ile birlikte değerlendirildiğinde, modelin bölümün özetini oluşturduğu görülmektedir. Ancak bu kriterler için iyileştirme yapılması gerekmektedir. Tablo 4, önerilen model tarafından üretilen özetleri içermektedir. Tablo 4'te orijinal kaynak olarak dokümana ait metinlere yer verilmiştir. Bu metinler hikâye bölümünün bir kısmını içermektedir.

Tablo 4. Önerilen modelle üretilen hikâye özetleri.

Hikaye-No	Orijinal kaynak	Model tarafından üretilen özet
#1	My name was Tommy Stubbins, son of Jacob Stubbins, the cobbler of Puddleby-on-the-Marsh; and I was nine and a half years old. At that time Puddleby was only quite a small town. A river ran through the middle of it; and over this river there was a very old stone bridge, called Kingsbridge, which led you from the marketplace on one side to the churchyard on the other……	Tommy Stubbins grew up in Puddleby, a small town on the Marsh. His father Jacob was a cobbler and his mother was a housewife. He recalls sailing with his father and playing with the cats and dogs. He also recalls his friend Matthew Mugg, the cat's-meat-man, and his father's mussel-boat. The story ends with a trip to the seaside with Tommy's father, to buy mussels and lobsters for the family's dinner.
#2	The servants at the Hotel de Chalusse, one of the most magnificent mansions in the Rue de Courcelles in Paris, were assembled in the porter's lodge, a little building comprising a couple of rooms standing on the right hand side of the great gateway. Here, as in all large mansions, the "concierge" or porter, M. Bourigeau, was a person of immense importance, always able and disposed to make any one who was inclined to doubt his authority, feel it in cruel fashion. As could be easily seen, he held all the other servants in his power. He could let them absent themselves without ……	She insisted on acting alone and persuaded others to follow suit. nearly you She, why am I so exceptional? this quickly from the state of young servants The general was thrilled to discover that his uncle's friend had been defying foes by undermining. He servants and he smiled miserably. Could He, sir, have been an army there abruptly across the street from the general? Usually, it's a cunning, ugly life that is revealed. The c's study calculated startled everyone more, and the gentleman twenty hoped it wasn't an irascible friend who was worried about matters. He laughed and said, It's his money man, bachelor, fresh little banks known leave house …..
#3	There was a heavy silence in the air. The lights were dim, and the shadows deep. A silhouette appeared in the corner of the room, its footsteps echoing softly. The woman, holding the knife in her hand, carefully scanned her surroundings. Her eyes seemed lost in something, as if searching for something unseen. Every movement, every glance, seemed to signal impending danger. Suddenly, a sound broke the silence, a faint whistle, followed by ……..	The waiters' gloves were neatly folded. After a time of restoration, she murmured to him, and he frowned as he saw his terrified body lying in CY. Her BA brightly lying there made him notice the balcony and intensify the veranda. Emerging hands ordered KA clearly to observe as he tried to take steps and a married figure in the night room lamps heard him signaling some calmness and shuddering blood he lit softly as he traveled. The woman questioned, looking, reached down and sternly nodded down the knife..

4. Sonuç

Hikâye kitapları genellikle bölüm şeklinde düzenlenmiş uzun dokümanlardır. Dolayısıyla dokümandaki akışı sağlayarak metni özetlemek oldukça zordur. Bu çalışmada, anahtar kelime çıkarma ve varlık isimlerinin eşleştirilmesi için TF-IDF, KeyBERT ve DistilBERT-NER yöntemlerini kullanarak, hikâye kitabı gibi bölümlerin özetlenmesine yönelik yeni bir Transformer tabanlı model önerilmiştir. Önerilen model, TF-IDF ve KeyBERT'ten çıkarılan anahtar kelimelerin kesişimini, DistilBERT-NER aracılığıyla çıkarılan varlık isimlerini birleştirerek tutarlı özetler üretmeyi amaçlamaktadır. Her bölümün kısa bir bölümle özetlenmesi amaçlanmaktadır. Bu nedenle, belirteç listesi bölümün ilk paragrafı, transformatör tabanlı varlık ismi çıkarma, transformatör tabanlı anahtar kelime çıkarma ve TF-IDF anahtar kelime çıkarma yardımıyla üretilmiştir. Transformatör tabanlı model, belirteç listesi ile ince ayarla eğitilmiştir. Önerilen model, hikâye kitabı bölümlerinden çıkarılan kelimelerle transformatör tabanlı model kullanarak özetleme için temel bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışma sonucunda elde edilen veri önerilen modelin performansını ve temel modellere göre üstünlüğünü göstermektedir. Önerilen modelin özetleri daha etkili bir şekilde ürettiğini göstermektedir. İnsan değerlendirme sonuçlarından üretilen özetlerin okunabilirlik ve dil bilgisi açısından uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu model, varlık isimleri gibi daha fazla niteleyici kelimelerle anlamsal ilişki çıkarımı modelin başarısının artacağını göstermektedir. Gelecekteki çalışmalarda, özetlere varlık isimlerinin arasındaki anlamsal ilişkilerin eklenmesiyle modelin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

Kaynaklar

[1] Alomari A, Idris N, Sabri AQM and Alsmadi I. Deep reinforcement and transfer learning for abstractive text summarization: A review, Comput Speech Lang 2022; 71:101276.

[2] Li P, Lu W and Cheng Q. Generating a related work section for scientific papers: an optimized approach with adopting problem and method information, Scientometrics 2022; 127(8), 4397-4417.

[3] Cai X, Liu S, Yang L, Lu Y, Zhao J, Shen D and Liu T. COVIDSum: A linguistically enriched SciBERT-based summarization model for COVID-19 J Biomed Inform 2022; 127:103999.

[4] Altmami NI and Menai MEB. Automatic summarization of scientific articles: A survey, J King Saud Univ-Comput Inf Sci 2020; 34(4), 1011-1028.

[5] Wang Z, Duan Z, Zhang H, Wang C, Tian L, Chen B, Zhou M. Friendly topic assistant for transformer based abstractive summarization. Empir Methods Nat Lang Process 2020; 485-497.

[6] Koncel-Kedziorski R, Bekal D, Luan Y, Lapata M and Hajishirzi H. Text generation from knowledge graphs with graph transformers, arXiv preprint arXiv:1904.023422, 019.

[7] Huang Z and Xie Z. A patent keywords extraction method using TextRank model with prior public knowledge , Complex Intell Syst 2022; 8(1), 1-12.

[8] Qiu D, Zheng Q. Improving TextRank Algorithm for Automatic Keyword Extraction with Tolerance Rough Set. Int J Fuzzy Syst 2022; 24(3).

[9] Khademi ME, Fakhredanesh M. Persian automatic text summarization based on named entity recognition. Iran J Sci Technol Trans Electr Eng 2020; 1-12.

[10] Du Y, Zhao Y, Yan J and Li Q. UGDAS: Unsupervised graph-network-based denoiser for abstractive summarization in biomedical domain, Methods 2022; 203, 160-166.

[11] Xiao L, He H, Jin Y. FusionSum: Abstractive summarization with sentence fusion and cooperative reinforcement learning. Knowl-Based Syst 2022; 243: 108483.

[12] Moirangthem DS and Lee M. Abstractive summarization of long texts by representing multiple compositionalities with temporal hierarchical pointer generator network, Neural Networks 2020; 124, 1-11.

[13] Liang Z, Du J and Li C. Abstractive social media text summarization using selective reinforced Seq2Seq attention model, Neurocomputing 2020; 410, 432-440.

[14] Lewis M, Liu Y, Goyal N, Ghazvininejad M, Mohamed A, Levy O, Stoyanov V, Zettlemoyer L. BART: Denoising sequence-to-sequence pre-training for natural language generation, translation, and comprehension, arXiv preprint arXiv:1910.13461, 2019.

[15] Yu T, Su D, Dai W and Fung P. Dimsum@ laysumm 20: Bart-based approach for scientific document summarization, arXiv preprint arXiv:2010.09252, 2020.

[16] Bajaj A, Dangati P, Krishna K, Ashok Kumar P, Uppaal R, Windsor B, Brenner E, Dotterrer D, Das R, McCallum A. Long Document Summarization in a Low Resource Setting using Pretrained Language Models, arXiv preprint arXiv:2103.00751, 2021.

[17] Christian H, Agus MP, Suhartono D. Single document automatic text summarization using term frequency-inverse document frequency (TF-IDF). ComTech 2016; 7(4): 285-294.

[18] Deng Z, Ma F, Lan R, Huang W and Luo X. A two-stage Chinese text summarization algorithm using keyword information and adversarial learning, Neurocomputing 2021; 425:117-126.

[19] Li C, Xu W, Li S, Gao S. Guiding generation for abstractive text summarization based on key information guide network. NAACL HLT 2018; 2: 55-60.

[20] Salton G, Buckley C. Term-weighting approaches in automatic text retrieval. Inf Process Manag 1988; 24(5): 513-523.
[21] Li J, Tang T, Zhao WX, Wei Z, Yuan NJ and Wen JR. Few-shot knowledge graph-to-text generation with pretrained language models, arXiv preprint arXiv:2106.01623, 2021.
[22] Xiaoye W and Mizuho I. Extractive Summarization Utilizing Keyphrases by Finetuning BERT-Based Model. In International Conference on Asian Digital Libraries, Cham: Springer International Publishing, 2022; 59-72.
[23] Yoo C, Lee H. Improving Abstractive Dialogue Summarization Using Keyword Extraction. Appl Sci 2023; 13(17): 9771.
[24] Zhao Z, Hou Y, Wang D, Yu M, Liu C and Ma X. Educational question generation of children storybooks via question type distribution learning and event-centric summarization. arXiv preprint arXiv:2203.14187, 2022.
[25] Ling Z, Xie Y, Dong C and Shen Y. Enhancing Factual Consistency in Text Summarization via Counterfactual Debiasing. In Proceedings of the 31st International Conference on Computational Linguistics 2025, pp. 7912-7924.
[26] Upadhyay A, Bhavsar N, Bhatnagar A, Singh M and Motlicek P. Automatic summarization for creative writing: BART based pipeline method for generating summary of movie scripts. In Proceedings of The Workshop on Automatic Summarization for Creative Writing, 2022, pp. 44-50.
[27] Liu Y, Maier W, Minker W and Ultes S. Empathetic dialogue generation with pre-trained RoBERTa-GPT2 and external knowledge. In Conversational AI for Natural Human-Centric Interaction: International Workshop on Spoken Dialogue System Technology, Singapore: Springer Nature Singapore, 2022; 67-81.
[28] Sanh V, Debut L, Chaumond J and Wolf T. DistilBERT, a distilled version of BERT: Smaller, faster, cheaper and lighter, arXiv preprint arXiv:1910.01108, 2019.
[29] Lin CY, Rouge: A package for automatic evaluation of summaries. In Text summarization branches out, 2024; 74-81.
[30] Falotico R, Quatto P. Fleiss' kappa statistic without paradoxes. Qual Quant 2015; 49(2): 463-470.
[31] Raffel C, Shazeer N, Roberts A, Lee K, Narang S, Matena M, Zhou Y, Li W, Liu PJ. Exploring the limits of transfer learning with a unified text-to-text transformer. J Mach Learn Res 2020; 21(140): 1-67.
[32] İnternet: T5-base fine-tuned fo News Summarization URL: https://huggingface.co/mrm8488/t5-base-finetuned-summarize-news, Son Erişim Tarihi: 08.12.2024.
[33] Xu J, Desai S and Durrett G. Understanding neural abstractive summarization models via uncertainty. arXiv preprint arXiv:2010.07882, 2020.
[34] İnternet: T5-base fine-tuned fo News Summarization URL: https://huggingface.co/philschmid/bart-large-cnn-samsum, Son Erişim Tarihi: 08.12.2024.
[35] Zhang J, Zhao Y, Saleh M and Liu P. Pegasus: Pre-training with extracted gap-sentences for abstractive summarization. In International Conference on Machine Learning, 2020; 11328-11339.
[36] İnternet: T5-base fine-tuned fo News Summarization URL: https://huggingface.co/human-centered-summarization/financial-summarization-pegasus, Son Erişim Tarihi: 08.12.2024.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 411-421, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1602191

Stereotaktik Girişimlerde Trajeksiyon Oluşturmak için Vasküler Risk Haritasının Otomatik Üretilmesi

Mustafa ŞAHİN[1*], Muhammed Fatih TALU[2], Sait ÖZTÜRK[3]
[1] Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye
[2] Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye
[3] Tıp Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, Türkiye
[*1] mustafa.sahin@hku.edu.tr, [2] fatih.talu@inonu.edu.tr, [3] sait.ozturk@altinbas.edu.tr

(Geliş/Received: 16/12/2024; Kabul/Accepted:03/03/2025)

Öz: Beyin içerisinde hedeflenen noktaya güvenli bir şekilde ulaşmak önemli bir konudur. Trajeksiyon (giriş-hedef) boyunca kritik beyin yapılarına girilmemesi hedeflenir. Klasik planlamada beyin yapıları (AC, PC, MC), giriş ve hedef noktaları cerrah tarafından manuel işaretlenir. Zaman alıcı ve yüksek risk barındıran bu sürecin bilgisayar destekli yazılımlarla desteklenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmalar incelendiğinde, beyin yapılarının (beyin, tümör, vasküler ağ) tespit edilerek giriş risk haritasının otonom üretildiği bir hedefleme sisteminin bulunmadığı görülmektedir. Ayrıca özgün bir trajeksiyon risk hesabı modeli önerilmektedir. Bu model iki seviyeli vasküler ağı sınıra uzaklığa göre gri ölçeğe dönüştürerek vasküler yapıdaki sınır ile merkez noktanın riske etkisini düzenler. Vasküler ağdaki bu güncelleme daha doğru bir risk haritasının elde edilmesini sağlamıştır. Beyin ve tümör yapılarının tespitinde sırayla HD-BET ve SwinUnet modelleri kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın doğrulama faaliyetlerinde iki farklı beyin cerrahının manuel trajeksiyon verileri kullanılmıştır. Önerilen otomatik trajeksiyon tespit yaklaşımının cerrahlarla kıyaslandığında yaklaşık %50 daha düşük risk değerli trajeksiyon belirleyebildiği görülmektedir. Bir sonraki çalışmada, tümör yerine STN yapıları hedeflenerek risk haritaları üretilecek ve epilepsi operasyon güvenliğinin arttırılması hedeflenecektir.

Anahtar kelimeler: Beyin hedefleme, Stereotaktik cerrahi, trajeksiyon, vasküler yapı, risk haritası, biyopsi.

Automatic Generation of Vascular Risk Maps for Trajectory Planning in Stereotactic Interventions

Abstract: It is an important issue to reach the target point in the brain safely. It is aimed not to enter critical brain structures during the traction (entry-target). In classical planning, brain structures (AC, PC, MC), entry and target points are marked manually by the surgeon. This time-consuming and high-risk process needs to be supported by computer-aided software. When the studies conducted in this field are examined, it is seen that there is no targeting system where brain structures (brain, tumor, vascular network) are detected and the entry risk map is produced autonomously. In addition, a unique traction risk calculation model is proposed. This model converts the two-level vascular network to gray scale according to the distance to the boundary and regulates the effect of the boundary and the center point in the vascular structure on the risk. This update in the vascular network provided a more accurate risk map. HD-BET and SwinUnet models were used respectively in the detection of brain and tumor structures. Manual traction data of two different neurosurgeons were used in the verification activities of the study. It is seen that the proposed automatic traction detection approach can determine tractions with approximately 50% lower risk values compared to surgeons. In the next study, risk maps will be produced by targeting STN structures instead of tumors and the aim will be to increase the safety of epilepsy operations.

Key words: Brain targeting, Stereotactic surgery, traction, vascular structure, risk map, biopsy.

1. Giriş

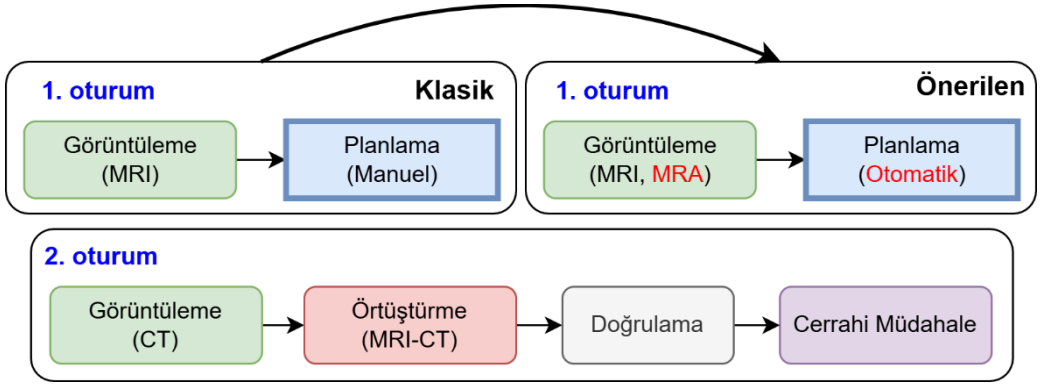
Stereotaktik cerrahi, beyin içerisindeki hedeflere kesin ve doğru bir şekilde ulaşmak ve bunlar üzerinde ablasyon, biyopsi, enjeksiyon, stimülasyon, implantasyon gibi eylemleri gerçekleştirmek için kullanılan bilgisayar destekli bir yöntemdir [1]. Modern tıptaki teknik gelişmelere paralel olarak, parkinson, epilepsi, tümör ve trigeminal nevralji tedavisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Beyin cerrahi Stereotaktik uygulamada hasta kafasına metal bir çerçeve takılır. Bu sayede üç boyutlu yerel bir koordinat uzayı oluşturulur. Bu yerel uzayda hedef noktaya ulaşmak için çerçeve eksenlerindeki açı değerlerinin hesaplanması gerekir. Bilgisayarla fiziksel bağlantısı bulunan çerçevenin açı değerleri özel

[*] Sorumlu yazar: mustafa.sahin@hku.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1]0009-0006-1701-4566, [2]0000-0003-1166-8404, [3]0000-0002-7655-0127

yazılımlarla (örn. İnomed [2]) hesaplanır. Bunun için öncelikle hastadan MRI, BT veya Ultrason gibi görüntüleme teknikleriyle elde edilen çekimlerin cerrah tarafından ilgili yazılım kullanılarak incelenmesi ve gerekli planlama prosedürünü tamamlaması gerekir. Örneğin biyopsi planlama sürecinde tümörlü bölgenin merkez konumu (hedef nokta), AC, PC ve MC noktaları ve kafatasından girilecek giriş noktası gibi tüm bilgilerin hassas bir şekilde belirlenmesi ve işaretlenmesi gerekir. Bu süreç tamamlandıktan ve giriş-hedef trajeksiyonu belirlendikten sonra ilgili açı değerleri üretilerek operasyona başlanır.

Planlama aşamasının tamamlanma süresi ortalama 221 ± 39 dakika (yaklaşık 4 saat) olarak hesaplanmıştır [3]. Planlamadaki işaretlemelerin manuel yapılması ve zaman alıcı olması nedeniyle genellikle cerrahi müdahale bir sonraki gün gerçekleşir (Şekil 1). İlk oturumda görüntüleme ve planlama faaliyetleri gerçekleştirilirken ikinci oturumda cerrahi müdahale gerçekleşir.



Şekil 1. Klasik ve önerilen Stereotaktik cerrahi yaklaşımı.

Cerrahi müdahale esnasında komplikasyonlar, hemorajik olaylar ve nörolojik defisitlere neden olabilecek durumlardan kaçınılması gerekir. Bunun için planlama sürecinde aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmesi büyük önem taşır:

1. Delme açıklığının doğrusal trajektorisinde (trajeksiyon) herhangi bir damar yapısı bulunmamalıdır.
2. Trajektori, motor korteks gibi işlev düzeyi yüksek bölgelerle mümkün mertebe kesişmemelidir.
3. En kısa trajeksiyon uzunluğu genellikle tercih edilmelidir.

Güvenli bir giriş noktasının belirlenmesi operasyon başarısı için son derece kritik bir adımdır. Bununla birlikte planlama sürecinin hızlandırılması ikinci bir ihtiyaç olarak karşımıza çıkmaktadır. Önerilen tam otomatik planlama yöntemiyle her iki gereksinimin karşılanması hedeflenmiştir.

Trope ve arkadaşları, belirgin tümör yapısına sahip 8 hastadan (6 erkek ve 2 kadın) elde edilen çoklu modalite verilerini kullanarak otomatik ve manuel trajeksiyon planlama arasındaki farkı inceleyen bir çalışma yapmıştır [4]. Hastalardan dört tarama (T1, FLAIR, DTI ve fMRI) verisi alınmış ve tüm taramaların T1'e örtüşmesi gerçekleştirilmiştir. Hedef nokta T1 üzerinde manuel işaretlenmiştir. Kafatası dış yüzeyi, ventrikül ve damar yapıları manuel olarak bölütlenmiştir. İlk olarak kafatası bölütü bir örgü (mesh) modeline dönüştürülmüştür. Ventrikül bölütlemede ITKSnap yazılımında bulunan alan-genişleme tekniği kullanılmıştır. Kan damarları için Watershed ve Çizge Kesim (graph cut) tabanlı bir bölütleme yöntemi tercih edilmiştir. Bölümleme sonuçları cerrah tarafından manuel düzeltilmiştir. Yüz, kulak, yarım küre, serebellum ve beyin sapı yüzeyleri manuel silinmiştir. Kalan yüzey bölgelerindeki noktalar aday giriş noktaları olarak kullanılmıştır. DTI ve fMRI modaliteleri görsel, işitsel ve motor bölgelerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Planlama aşamasında manuel, görsel ve otomatik olmak üzere üç farklı yöntem karşılaştırılmıştır. Manuel yöntemde, giriş noktasını cerrah tarafından manuel belirlenmiştir. Görsel yöntemde, bölümleme sonuçları üst üste renkli çizildi ve cerrah renkli modeli kullanarak giriş noktasını belirlemiştir. Otomatik yaklaşımda, kafatası örgüsü 1000 noktaya indirgenerek her noktanın risk skoru hesaplanmıştır. Farklı bir cerrah üç yöntem sonucu içerisinden bir seçim yapmıştır. Trope, trajeksiyon riskinin damar yapısına minimum uzaklıkla ters orantılı olduğunu ifade etmiş ve riskli yapıya yakın olmanın beklenen risk olasılığını arttırdığı ifade etmiştir.

Sparks ve arkadaşları, epilepsi cerrahisi için anatomi odaklı bir trajeksiyon planlama modeli önermiştir [5]. Bu model, epileptojenik bölgedeki elektrot yerleşimi için güvenli trajeksiyon ve hedef nokta belirleme sorununa bir çözüm sunmuşlardır. Trajektoriler boyunca kritik yapılara (kan damarları) olan kümülatif mesafeyi değerlendirmiş ve trajeksiyon uzunluğu, açısı ve kritik yapılarla (arterler, damarlar veya sulkuslar) kesişme gibi cerrahi kısıtlamalar doğrultusunda uygun olmayan trajektorileri filtrelemiştir. Kan damarlarına olan kümülatif mesafeye dayalı bir risk puanı hesaplayarak uygun trajeksiyon seçimi yapmıştır.

Hani ve arkadaşları, Stereotaktik beyin biyopsisi için otomatik trajeksiyon planlamasına yönelik bir bilgisayar destekli yazılım olan SurgiNav'ı değerlendirmiştir [6]. Kritik yapı olarak sulkusları dikkate almış ve trajeksiyon riskini 0 (en düşük risk) ile 2 (en yüksek risk) arasında bir puanla değerlendirmişlerdir. 0 risk puanı, trajektorinin en yakın sulkustan en az 10 mm uzaklıkta olduğunu belirtirken, 2 risk puanı, trajektorinin bir sulkus ile kesiştiği anlamına geldiği ifade edilmiştir. Yazılım, en düşük riskli beş trajektoriyi belirleyerek cerrahın tercihine sunmaktadır.

Zanello ve arkadaşları, otomatik Stereotaktik planlama araçlarının kapsamlı bir incelemesi ile ilgili bir çalışmayı [3]. İlgili çalışmada, otomatik trajeksiyon seçim yöntemlerinin manuel yapılan seçime kıyasla damar yapılarından daha uzakta seçimler sağladığı gösterilmiştir. Araştırmada, otomatik seçilen trajektorilerin damar yapılarına olan mesafesinin [2.47-7.0] mm arasında olduğu, manuel yöntemlerde ise bu mesafenin [1.96-4.78] mm arasında değiştiği ifade edilmektedir. Bu bulgular, tıbbi uygulamalar için bilgisayar destekli planlama araçlarının önemini vurgulamaktadır.

Hu ve arkadaşları, çerçeve tabanlı Stereotaktik biyopsi ile robot destekli biyopsiyi karşılaştıran bir çalışma sunmuşlardır [7]. 151 hasta biyopsisi (47 çerçeve tabanlı, 107 robot tabanlı) incelenmiştir. MRI ve MRA verilerinin girdi olarak kullanıldığı bu çalışmanın planlama aşamasında, SinoPlan adlı bir yazılım kullanılmıştır. SinoPlan, 3d damar yapısını otomatik çıkarabilen ve belirlenen yörüngenin damara değip değmediği bilgisini üretebilen bir yazılımdır. Ancak SinoPlan'da Giriş ve Hedef noktalar cerrah tarafından manuel girilmektedir. Yapılan biyopsinin kalitesi belirlenirken TPE (Target Error Point) ve EPE (Entry Error Point) metrikleri kullanılmıştır. TPE, cerrahın manuel belirlediği tümör merkezi ile tümör yapısı içerisine sığabilecek maksimum çaplı dairenin merkezi arasındaki piksel farkını ifade etmektedir. Buna karşılık, EPE ise, planlanan giriş ile gerçek giriş noktaları arasındaki mesafeyi temsil eder. Cerrahi planlama doğruluğu bu iki metrik değerin düşük elde edilmesiyle mümkün olduğu ifade edilmiştir.

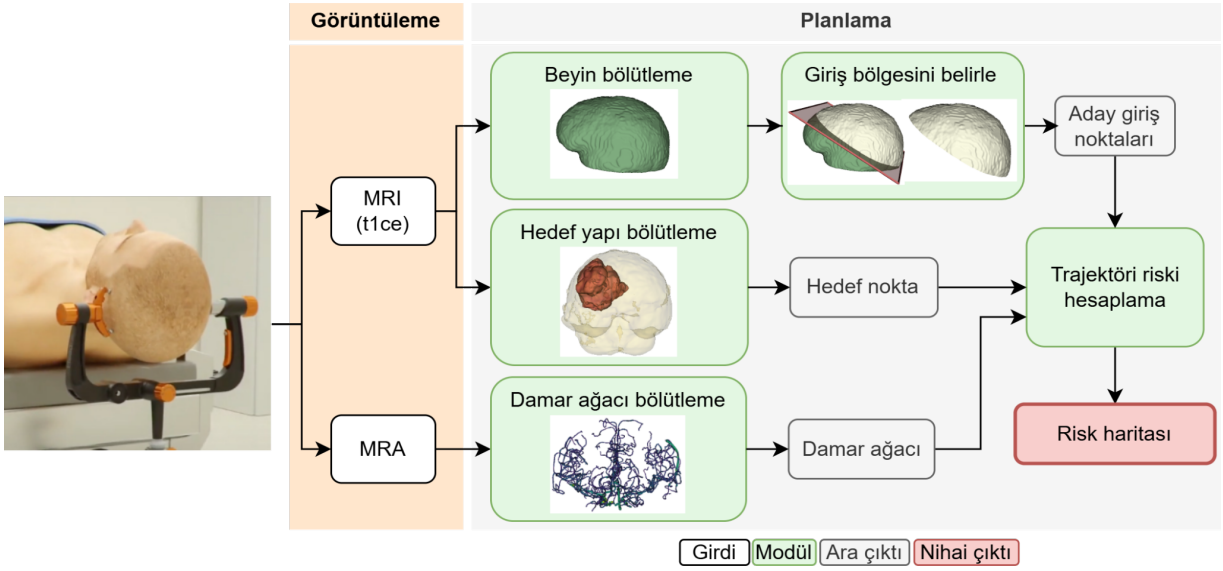
Önerilen otomatik planlama yönteminin bahsedilen yöntemlerden farklılıkları aşağıda listelenmektedir:

1) Lokal risk değerinin hesaplanmasında matematiksel olarak özgün bir risk modeli önerilmektedir. İki silindirik yapının iç içe kullanımına dayanan bu yaklaşımda damar yapısına en yakın nokta yerine yerel silindirik yapıların birlikte kullanımı önerilmektedir.
2) Mevcut yöntemlerin tamamında damar yapısı iki seviyeli ifade edilirken, önerilen yaklaşımda damar yapısındaki her bir nokta sınır hattına uzaklığına göre farklı bir değerle temsil edilmektedir. Bu sayede merkezdeki bir noktanın riske etkisi ile sınırdaki bir noktanın etkisi birbirinden farklılık göstermektedir.
3) Mevcut yöntemlerde giriş nokta sayısının yüksek olması problemi kabalaştırma tekniğiyle çözülürken, önerilen yöntemde vektörel programlama tekniği kullanıldığı için kabalaştırmaya ihtiyaç duyulmayıp tüm yüzey noktalarının risk değeri kısa bir sürede hesaplanabilmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Önerilen planlama yöntemi

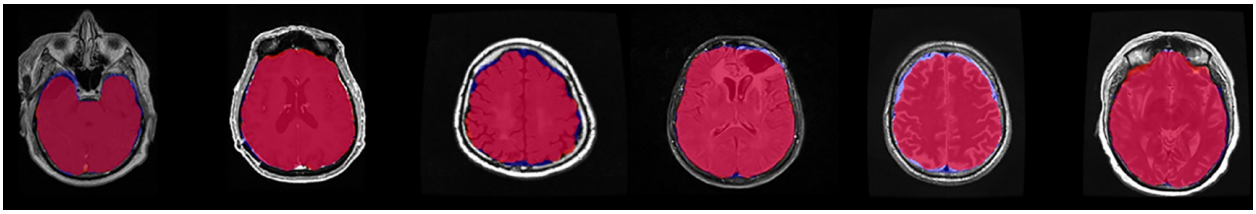
Şekil 2'de önerilen planlama yönteminin aşamaları gösterilmektedir. Bu yöntem iki modalite (MRI ve MRA) verisini girdi olarak kullanmaktadır. İlk aşamada bağımsız üç yapının (beyin, tümör ve damar) bölütleme faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. İkinci aşamada, beyin yapısında giriş bölgesinin belirlenmesi işlemleri yapılarak aday giriş noktaları elde edilmektedir. Bununla birlikte tümör yapısının merkez noktası hesaplanarak hedef nokta olarak işaretlenir. Son aşamada, tüm ara çıktılar (aday giriş noktaları, hedef nokta ve damar yapısı) trajeksiyon riski hesaplama modülüne iletilir ve genel risk haritası üretilir. Bu bölümün devamında önerilen yöntemin modülleri sırayla açıklanmaktadır.



Şekil 2. Önerilen otomatik risk haritası üretme yönteminin aşamaları.

2.2 Beyin bölütleme

Beyin yapısının içerisinde bulunan hedef noktaya ulaşmak için ilk olarak beyin bölgesinin bölütlenmesi gerekir. Bu aşamada araştırmacıların kullanımına açılan HD-BET [8] modeli kullanılmıştır. HD-BET, Heidelberg Üniversitesi Hastanesi Nöroradyoloji Bölümü ile Alman Kanser Araştırma Merkezi Tıbbi Görüntü Hesaplama Bölümünün birlikte tamamladıkları ortak bir projenin ürünüdür. HD-BET'in farklı modalitelerde (prekontrast T1-w, postkontrast T1-w, T2-w ve FLAIR) beyin bölgesini yüksek doğrulukta tespit edebilme kabiliyeti birçok çalışmada tercih edilmesini sağlamıştır. Bu yönüyle HD-BET yönteminin klasik yaklaşımlarından (FSL BET, AFNI 3DSkullStrip, Brainsuite BSE, ROBEX ve BEaST) üstünlüğü ispatlanmıştır. Şekil 3'te altı farklı MRI verisinden tespit edilen beyin bölgeleri (kırmızı renkle) gösterilmektedir.



Şekil 3. Altı farklı MRI verisinden beyin bölgesinin tespiti.

2.3 Giriş bölgesinin belirlenmesi

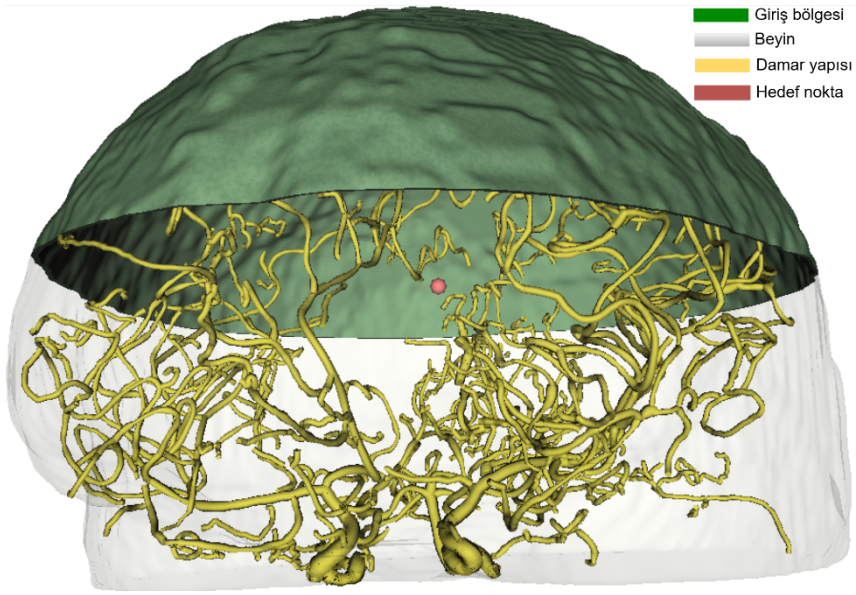
Hastalar özellikle estetik kaygılardan dolayı yüz bölgesinden giriş yapılmasını istememekte, mümkünse beyin cerrahının saç bölgesinden giriş yapmasını tercih etmektedir. Bu talebin karşılanabilmesi için beyin yapısı giriş için uygun olan ve olmayan şeklinde iki parçaya bölünür. Bölme düzleminin konumu beyni çevreleyen dikdörtgen prizma koordinatları kullanılarak rahatlıkla tespit edilebilmektedir. Düzlemin alt bölgesinde kalan kısım giriş için uygun olmayan bölge olarak atanır ve uygun olan üst bölgeyle (Şekil 3-Giriş bölgesini belirle modülündeki beyaz bölge) devam edilir. Bu bölgede yaklaşık 40-50 bin nokta bulunabilmektedir. Önerilen yöntemde bu noktaların tamamı "aday giriş noktası" olarak değerlendirilir.

2.4 Hedef nokta tespiti

Hedef nokta, cerrahın beyin içerisinde ulaşmak istediği noktadır. Bu nokta epilepsi hastalarında STN hücresi içerisinde bulunurken, tümörlü vakalarda tümör çekirdeğinin merkezi olmaktadır. Bu çalışmada pilot uygulama olarak tümörlü vakalar ele alındığı için hedef nokta derken daima tümör merkezi kastedilmektedir. Tümörlü bölgenin yapay zekâ modeliyle otomatik tespit edilebilmesi için 1200 hasta verisini içeren BraTS2021 veri kümesi kullanılmıştır [9]. Bu veri kümesi, her bir hastadan elde edilen dört modalite (T1, T2, T1ce ve Flair) çekimini ve uzmanlar tarafından hazırlanmış katmanlı (çekirdek, gelişim, ödem) tümör etiket verisini içermektedir. Tüm verilerin [1mm, 1mm, 1mm] çekim parametresine ve [240, 240, 155] çözünürlük değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu çalışmada tümörün tüm geometrik yapısının bölütlenmesine ihtiyaç duyulmadığı, buna karşılık sadece tümör merkez noktasının tespitine odaklanıldığı için katmanlı etiket verisi birleştirilerek iki seviyeli (binary) tümör yapısı oluşturulmuştur. Bu dönüşüm bölütleme probleminin basitleşmesine neden olduğu için dört modalite kullanmaya gerek duyulmamış, bunun yerine sadece t1ce modalitesi kullanılarak bölütleme yapılmıştır. Bölütleme faaliyeti için Monai kütüphanesindeki [10] **SwinUnet** modeli kullanılmıştır. Eğitim ve test süreçlerinde sırayla 1100 adet ve 100 adet veri kullanılmıştır. Test sonuçları incelendiğinde tümör merkezinin %91 başarımla (dice skoru) doğru tespit edilebildiği görülmüştür. Dört modalite yerine tek modalite kullanılması ve çıktının iki seviyeli olması doğruluğu arttırmakla birlikte, hesaplama maliyetinin düşmesine ve eğitim sürecinin daha hızlı gerçekleşmesine neden olmuştur.

2.5 Damar ağacının tespiti

MRA verilerinden damar yapısının otomatik çıkarılabilmesi için **ITKTubeTK** [11] veri kümesi kullanılmıştır. Bu veri kümesi, 110 adet hastadan elde edilen MRA çekim verilerini ve etiketlenmiş damar modellerini içermektedir. Verilerin işlenmesi için açık kaynaklı bir platform olan Monai kütüphanesindeki **3d_Unet** modeli kullanılmıştır. Beyin damar ağacı (Şekil 4-sarı renkte olan) ortalama **%85** doğrulukla tespit edilebilmektedir.



Şekil 4. Örnek bir hastanın MRI ve MRA verilerinden elde edilen giriş bölgesi, hedef nokta ve beyin damar ağacının gösterimi.

2.6 Trajektori risk değerinin hesaplanması

Önerilen risk hesaplanma modeli Şekil 5'te gösterilmektedir. Buna göre trajektoriyi merkeze alan biri r_1 (yeşil) diğeri r_2 (mavi) yarıçaplı iki silindirik yapı kullanılmaktadır. Yeşil silindirik yapıyla trajektorinin tehlikeli bölgesi (V_1), mavi silindirik yapıyla trajektörinin yerel risk bölgesi (V_2) temsil edilmektedir. Şekilde E aday giriş

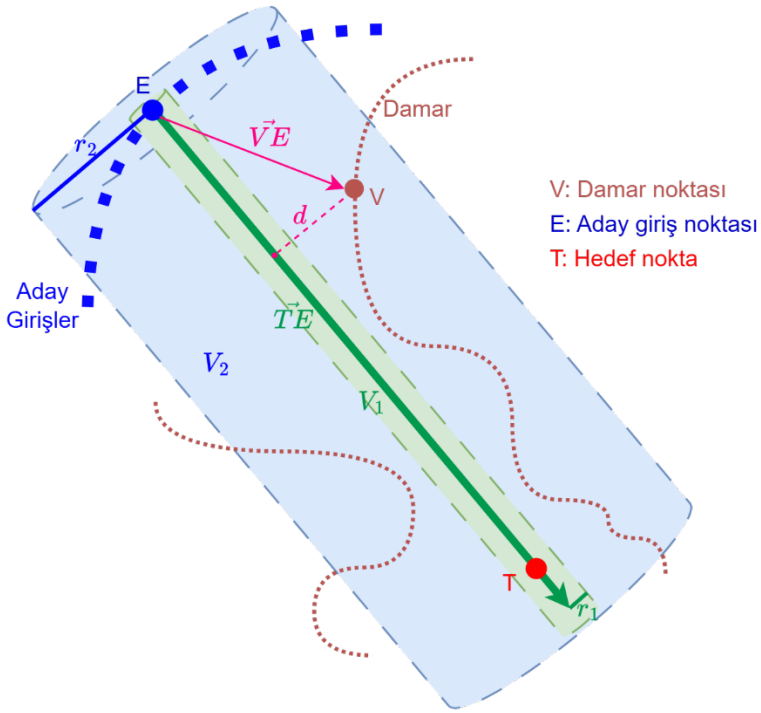
noktasını, T hedef noktayı ve V damar noktasını temsil etmektedir. Trajektori riski hesaplanırken ilk olarak her bir damar noktasının trajektoriye olan dik uzaklığı (d) hesaplanır ve D listesinde biriktirilir (Denklem 1-4).

$$\overrightarrow{VE} = V - E \tag{1}$$

$$\overrightarrow{TE} = T - E \tag{2}$$

$$d = norm\left(\frac{cross\left(\overrightarrow{VE}, \overrightarrow{TE}\right)}{\|\overrightarrow{TE}\|}\right) \tag{3}$$

$$D = [d_1, d_2, \dots, d_n] \tag{4}$$



Şekil 5. Önerilen risk hesaplama modeli.

Damar noktalarının trajektoriye olan uzaklıkları hesaplandıktan sonra tehlikeli bölge V_1 içerisinde damar olup olmadığı kontrol edilir. Herhangi bir damar yapısına rastlandığında trajeksiyon risk değeri $TR = \infty$ olarak atanır (Denklem 5). Bu durum trajeksiyon doğrultusu üzerinde damar yapısının bulunduğu ve bu aday giriş noktasının operasyon için yüksek riskli olacağı anlamını taşır.

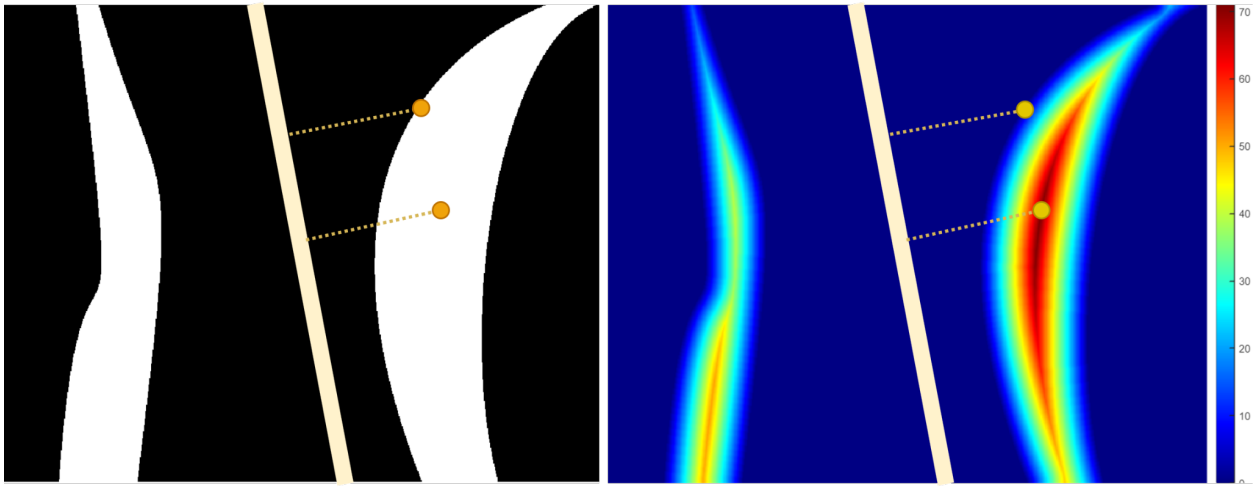
$$TR = \infty \qquad \left(\sum_{i=1}^{n} d_i \leq r_1\right) > 0 \tag{5}$$

Tehlikeli bölgede (V_1) damar yapısının bulunmaması durumunda yerel risk bölgesine (V_2) geçilir. Bu bölgedeki bir damar noktasının trajeksiyon riskine etkisini hesaplamak için Denklem 6'da gösterilen yaklaşım kullanılmaktadır.

$$R_i = \begin{cases} c_i * e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{d_i}{\sigma}\right)^2} & d_i \leq r_2 \\ 0 & diğer \end{cases} \tag{6}$$

Bu denklemde i. damar noktasının trajeksiyon riskine etkisi (R_i), trajektoriye uzaklığı (d_i) ve damar sınır hattına uzaklığı (c_i) parametreleri ile gösterilmektedir. Uzaklık ile risk etkisi birbirine ters orantılıdır. Damar trajektoriye ne kadar uzaksa riske etkisi o derece düşüktür. Tersine olan bu etkiyi yumuşak bir şekilde hesaplayabilmek için $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ ile gösterilen normal dağılım fonksiyonu kullanılmıştır. Normal dağılım fonksiyonu $\pm 3\sigma$ aralığında küme değerlerinin %99 gibi yüksek bir seviyesini ifade ettiği için 3σ değeri mavi silindirin yarıçapına eşitlenir ve $\sigma = r_2/3$ olarak bulunur. Bu şekilde r_2 yarıçapından daha küçük (V_2 içinde kalan) damar noktalarından yumuşak bir etkisi elde edilirken uzaktaki (V_2 dışında kalan) damar noktalarının risk üzerine etkisi ortadan kaldırılır.

Bununla birlikte, bu çalışmanın özgün katkılarından biride, c_i parametresinin ilk defa trajeksiyon risk hesaplamasında kullanılmasıdır. Bu parametrenin etkisini daha iyi anlayabilmek için Şekil 6'daki görseller dikkatlice incelenebilir. Buna göre, klasik risk hesaplama yaklaşımlarında damar yapısı iki seviye (0 ve 1) olarak ifade edilir (Şekil 6-sol). Bu yaklaşımda sarı renkli trajektoriye eşit uzaklıkta bulunan farklı damar noktalarının riske etkisi aynı olmaktadır. Oysa trajektorinin damar merkezindeki bir noktaya yakınlığı ile sınırdaki bir noktanın yakınlığının farklı risk etkisine sahip olması istenir. Bu beklentinin karşılanabilmesi için önerilen yaklaşımda damar yapısı iki seviye yerine gri ölçekli bir sunumla temsil edilir (bak Şekil 6-sağ). Böylece damar üzerindeki her nokta sınıra olan uzaklık değeri ile temsil edilir. Damar noktasının bu farklı temsili risk hesabına c_i katsayısı olarak yansır. Böylece merkezindeki bir noktanın riske etkisi büyük olurken, sınırdaki noktanın etki değeri düşürülür.



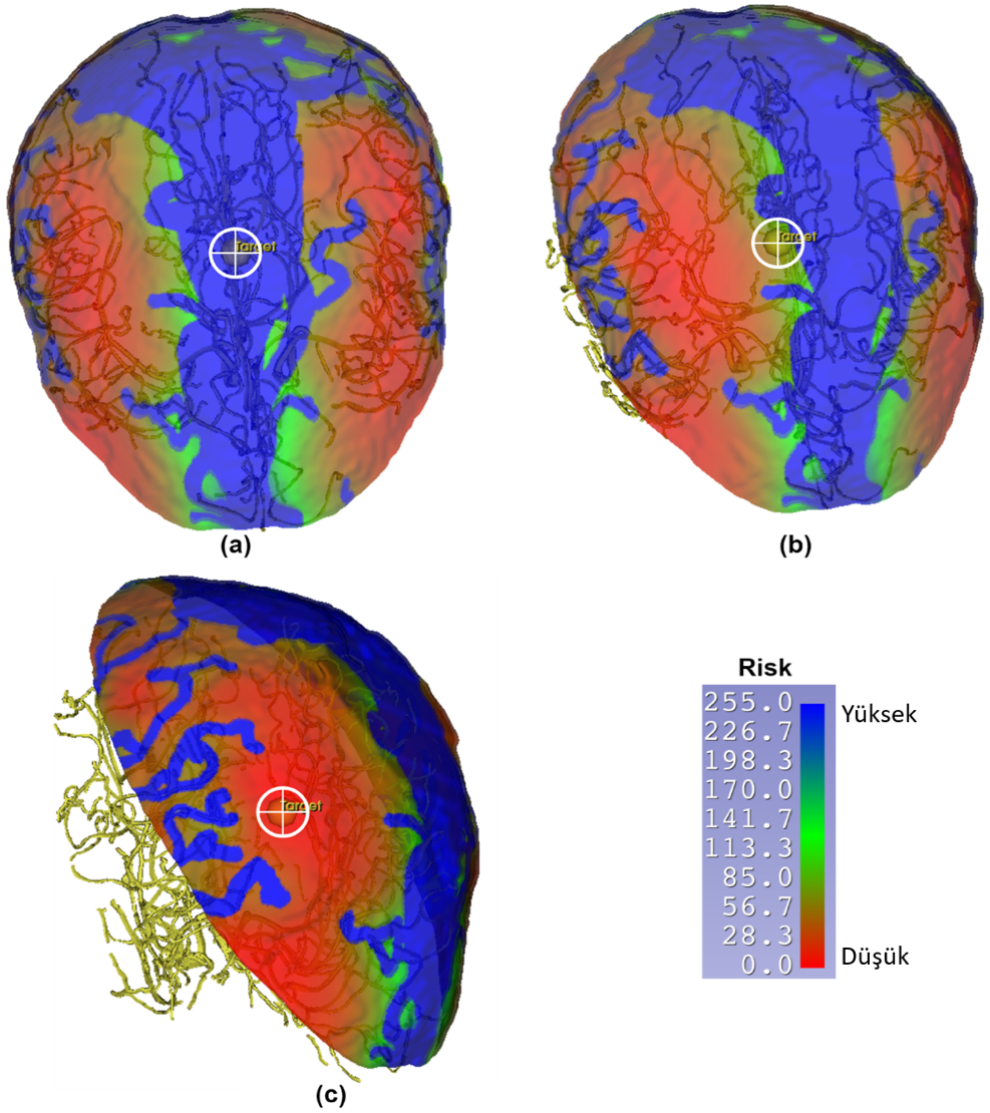
Şekil 6. Damar yapısının farklı konumlarındaki noktaların trajeksiyon (sarı) riskine etkisi. (a) (sol) Klasik yaklaşımda iki noktanın riske etkisi aynı. (b) Önerilen yaklaşımda iki noktanın riske etkisi farklı.

V_2 içerisindeki her bir damar noktasının trajektoriye olan risk değeri R_i hesaplandıktan sonra toplam risk değeri (TR) hesaplanarak aday giriş noktasına atanır (Denklem 7). Böylece giriş bölgesindeki tüm aday giriş noktalarının bir risk değeri elde edilerek genel risk haritası üretilir.

$$TR = \sum_{i=1}^{k} R_i \tag{7}$$

2.7 Risk haritasının farklı perspektiflerden izlenimi

Bu bölümde, "Otomatik üretilen bir risk haritasını inceleyen cerrah farklı risk seviyeli aday giriş noktalarından hedefe baktığında nasıl bir görüntü görmektedir?" sorusu yanıtlanmaktadır. Bu soruya net bir yanıt verebilmek için örnek bir hastanın MRI ve MRA verileri kullanılmış ve risk haritası üretilmiştir. Daha sonra üretilen risk haritasındaki üç farklı aday giriş noktasından hedefe dik bakılarak görseller elde edilmiştir (Şekil 7). Görsellerdeki aday giriş noktaları beyaz artı şeklinde hedef sembolüyle gösterilmektedir. Buna göre yüksek riskli trajektorinin (a) arka plandaki damar yapısına direk temas ettiği net bir şekilde görülmektedir. Orta riskli trajeksiyon (b)'den hedefe bakıldığında damar yapısına değmediği, ancak trajektorinin yerel risk bölgesi içerisinde önemli oranda damar yapısının bulunduğu anlaşılmaktadır. Son olarak düşük riskli trajeksiyon (c)'den hedefe bakıldığında oldukça temiz bir ilerleyişin gerçekleştirilebileceği net bir şekilde görülür. Cerrahın operasyon öncesi üretilen bu risk haritasını görmesi ve en uygun giriş noktasını tercih etmesi istenir. Bu sayede damar yapısının bozulması/zedelenmesinden kaynaklı komplikasyonların önüne geçilmesi hedeflenmektedir.



Şekil 6. Üç farklı risk değerine sahip aday giriş noktasından hedefe doğru bakış. (a) yüksek riskli, (b) orta riskli, (c) düşük riskli.

2.8 Doğrulama faaliyetleri

Tablo 1. 41 hasta verisinde iki farklı cerrahın ve önerilen yöntemin seçtiği trajeksiyon bilgileri.

	Seçilen en iyi trajektorinin (SET) yerel risk değeri				SET'in uzunluğu (mm)				SET'e en yakın damar noktası uzaklığı (mm)		
01	688	3580	**317**		70,39	70,85	**63,39**		3,30	0,04	**5,39**
02	1447	973	**243**		**69,74**	71,25	87,02		3,74	4,10	**8,16**
03	719	720	**73**		**68,53**	72,68	72,96		3,71	4,55	**11,07**
04	1328	1438	**860**		77,17	76,90	**64,51**		0,18	0,37	**1,66**
05	1768	862	**531**		72,21	68,52	**63,60**		0,14	0,69	**0,77**
06	1786	1686	**833**		75,35	76,48	**69,06**		0,41	**0,66**	0,32
07	728	1507	**377**		67,26	**59,06**	66,38		3,75	1,70	**5,86**
08	1271	1418	**722**		84,57	82,57	**72,32**		**1,52**	1,29	0,30
09	2064	1364	**1107**		84,12	79,92	**65,52**		1,43	**2,19**	1,76
10	2151	2173	**1276**		79,90	82,22	**62,23**		0,09	0,98	**1,44**
11	1884	2172	**1051**		67,04	**65,40**	67,80		**0,11**	0,06	0,05
12	1142	1348	**712**		87,42	87,00	**66,98**		1,96	0,17	**2,20**
13	1085	856	**395**		68,52	81,90	**62,84**		2,49	0,10	**5,20**
14	491	302	**134**		**83,66**	84,17	86,21		5,55	8,60	**9,75**
15	1665	2023	**1274**		92,89	92,95	**75,48**		0,97	0,12	**2,53**
16	1773	2184	**1259**		70,08	71,51	**67,01**		0,26	0,17	**0,52**
17	2705	2575	**1489**		89,31	84,03	**57,10**		0,07	0,13	**0,36**
18	1129	916	**372**		71,32	**68,61**	79,41		1,82	1,34	**2,99**
19	1289	1040	**745**		89,91	89,44	**73,92**		0,14	1,05	**1,72**
20	267	691	**88**		72,86	90,75	**70,00**		**6,29**	1,13	4,18
21	2701	2643	**1943**		80,25	81,39	**63,95**		0,12	0,18	**0,77**
22	655	64	**21**		**75,01**	75,20	78,90		3,58	10,73	**12,63**
23	1044	1227	**328**		81,77	**74,36**	86,35		**4,42**	2,99	3,86
24	753	951	**372**		78,44	72,20	**70,10**		4,86	3,01	**5,08**
25	1307	1465	**449**		74,03	74,57	**65,90**		3,77	0,19	**6,43**
26	2101	732	**179**		**66,51**	67,88	74,01		1,20	4,99	**7,57**
27	415	139	**34**		70,41	**70,28**	88,97		4,67	8,72	**10,59**
28	351	552	**23**		69,49	75,28	**68,92**		4,07	3,90	**10,84**
29	1071	1585	**561**		81,15	**76,82**	96,83		5,63	0,10	**7,15**
30	785	545	**74**		76,44	92,69	**65,13**		0,15	6,30	**10,28**
31	273	54	**46**		71,62	71,24	**70,91**		4,52	**9,17**	8,51
32	980	1066	**746**		81,23	77,69	**70,09**		**0,21**	0,11	0,10
33	221	888	**104**		**74,54**	76,19	76,67		**9,34**	2,71	9,42
34	344	228	**54**		76,39	75,19	**69,14**		5,10	5,89	**10,76**
35	842	965	**58**		82,45	85,73	**73,18**		0,64	0,72	**11,70**
36	510	333	**71**		85,12	88,93	**77,95**		5,32	7,61	**9,83**
37	1284	643	**242**		74,80	72,17	**64,17**		0,38	2,66	**7,55**
38	441	362	**75**		80,85	83,38	**67,59**		3,05	2,43	**8,12**
39	667	993	**183**		87,04	89,37	**66,25**		2,82	3,05	**7,02**
40	100	132	**25**		86,90	85,48	**76,14**		7,65	7,05	**12,13**
41	231	161	**9**		80,11	78,69	**75,44**		5,99	3,88	**13,15**

Bu çalışmadaki son Ar-Ge faaliyeti olarak önerilen yöntem tarafından seçilen en düşük risk değerli trajeksiyon ile iki farklı beyin cerrahı tarafından yapılan trajeksiyon seçimlerinin birlikte değerlendirilmesi yapılmıştır. Karşılaştırma için ITKTubeTK veri setindeki 41 kişiden alınan veriler kullanılmıştır. İlk olarak beyin içerisindeki hedeflenen nokta belirlenmiş ve iki farklı cerraha ilgili nokta gösterilerek operasyon yapılması durumunda hangi noktadan giriş yapacaklarını belirlemeleri istenmiştir. Cerrahlar tarafından yapılan manuel aday giriş noktalarının belirlenmesiyle ortaya çıkan trajektoriler kaydedilmiştir. Daha sonra önerilen yöntem yardımıyla otomatik tespit edilen en düşük risk değerli trajektoriler kaydedilmiştir. Elde edilen üç trajeksiyon hakkında hesaplanan bilgiler Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1, trajektoriler ile ilgili üç farklı değeri (yerel risk değeri, trajeksiyon uzunluğu ve damar noktasına uzaklık) içermektedir. Yerel risk değerleri incelendiğinde, tüm hastalar için önerilen yöntem tarafından seçilen trajektorinin cerrahlar tarafından seçilenden daha düşük risk değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü önerilen yöntem beyin giriş bölgesindeki tüm noktaları taramakta ve hepsinin risk değerini hesaplayıp minimum olanı seçmektedir. Bu nedenle daha düşük risk değerli bir trajektorinin bulunamayacağı açıktır.

Cerrah 1, Cerrah 2 ve önerilen trajektorilerin ortalama risk değerleri incelendiğinde sırasıyla 1084, 1111 ve 474 olduğu görülür. Bunun anlamı, önerilen yöntem sırasıyla Cerrah 1 ve Cerrah 2'ye kıyasla %56,27 ve %57,33 daha düşük risk değerine sahiptir. Elde edilen bu sonuçlar önerilen yöntemin düşük riskli trajeksiyon belirleme başarısını ortaya koymaktadır.

Öte yandan, önerilen yöntemle bulunan minimum riskli trajektorinin 29 kişide en kısa mesafeye sahip olduğu ve 12 kişide en kısayı bulamadığı görülmektedir. Uzunluk açısından her zaman en kısa trajektorinin bulunmaması beklenen bir sonuçtur. Çünkü bu çalışmada araştırmacılar damar yapısına çarpma riski minimize etmeye odaklanmıştır. Bu nedenle, trajeksiyon uzunluğu parametresi risk modeline dâhil edilmemiştir.

Tablonun en sağ kısmında, trajektorilerin damar yapısına olan minimum mesafe değerleri gösterilmektedir. Güvenli bir operasyon için bu mesafe değerinin maksimum olması hedeflenmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, önerilen yaklaşımla belirlenen 33 trajektorinin vasküler yapıdan en uzak bölgede olduğu görülmektedir. Geriye kalan 8 trajeksiyonda ise önerilen yaklaşım minimum risk değerine sahip olmasına rağmen, elle belirlenen trajektorilere kıyasla vasküler yapıya daha yakınlaştığı görülmektedir. Bu sonuçlar, optimum trajektorinin seçilip seçilmeyeceğine ilişkin güven aralığı hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Cerrahlar için, düşük riskli bir trajeksiyonda bile, damar yapısına olan minimum mesafe sürekli dikkate alınması gereken bir parametredir.

3.Sonuç

Bu çalışmada, stereotaktik cerrahide kullanılmak üzere yeni bir otomatik trajeksiyon tespit yaklaşımı önerilmiştir. Beyin biyopsi gibi özel bir uygulama alanı seçilmiş ve önerilen yaklaşımın mevcut yaklaşımlara üstünlük/eksiklik karşılaştırmaları yapılmıştır. Önerilen yaklaşımla komplikasyon riskini en aza indirme ve cerrahların düşük riskli bölgeden girmesini sağlama konusunda etkileyici sonuçlar sunulduğu görülmektedir.

Geliştirilen otomatik risk haritası üretme yazılımı, MRI ve MRA verilerini girdi olarak almaktadır. MRI verisi kullanılarak hastanın beyin bölgesi ve tümörlü yapının otomatik bölütlenmesi gerçekleştirilirken, MRA verisinden damar ağacı yapısı elde edilmektedir. Tüm bu bölütleme faaliyetlerinde açık kaynaklı olarak araştırmacıların kullanımına açılan Monai kütüphanesi kullanılmıştır. Bölütleme sonuçları tek bir risk hesaplama modülünde toplanır. Bu modül giriş izni bulunan tüm beyin bölgesi yüzey noktaları ile hedef nokta arasındaki trajektorilerin yeni önerilen risk modelini kullanarak hesaplar. Bu model iç içe iki silindirik yapının kullanımına dayanır. Trajektori merkezli bu silindirlerden içteki silindir girilmesi yasak bölgeyi temsil ederken, dıştaki silindir risk hesabının yapıldığı yerel bölgeyi temsil eder.

Model kullanılarak seçilen trajektorinin doğrulama faaliyetleri için iki farklı beyin cerrahı tarafından seçilen trajektoriler kullanılmıştır. 41 hasta verisi üzerinde gerçekleştirilen doğrulama faaliyetleri sonucunda, önerilen modelin tarafından otomatik tespit edilen trajektorilerin Cerrah 1 ve Cerrah 2 tarafından seçilen manuel trajektorilere kıyasla %56,27 ve %57,33 daha düşük risk değerine sahip olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar önerilen yöntemin düşük riskli trajeksiyon belirleme başarısını ortaya koymaktadır. Bir sonraki çalışmada risk haritasının hesaplanmasına sadece damar yapısı değil, beynin fonksiyonel bölgelerinin risk hesabına etkileri incelenecektir.

Teşekkür

Araştırmamızı 122E495 numaralı projeyle destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) içten şükranlarımızı sunmak isteriz. Sağladıkları fon, çalışmamızın gerçekleştirilmesinde kritik bir rol oynadı. Bu nedenle, yardımları için TÜBİTAK'a minnettarız.

Kaynaklar

[1] Stereotaktik Cerrahi, https://tr.wikipedia.org/wiki/Stereotaktik_cerrahi. Erişim tarihi: 09.07.2024.
[2] inomed Medizintechnik GmbH (2019), Stereotactic Brachytherapy for Brain Tumors – surgical workflow – inomed. https://www.youtube.com/watch?v=1v-e47FCUwU
[3] Zanello M, Carron R, Peeters S. et al. İntraoperatif kullanım için otomatikleştirilmiş beyin cerrahisi stereotaktik planlaması: literatürün ve bakış açılarının kapsamlı bir incelemesi. Neurosurg Rev 2021;44, 867-888.
[4] Trope M, Shamir RR, Joskowicz L. et al. The role of automatic computer-aided surgical trajectory planning in improving the expected safety of stereotactic neurosurgery. Int J CARS 10, 2015;1127–1140.
[5] Sparks R, Vakharia V, Rodionov R, et al. Anatomy-driven multiple trajectory planning (ADMTP) of intracranial electrodes for epilepsy surgery. Int J Comput Assist Radiol Surg. 2017;12(8):1245-1255.
[6] Hani J. Marcus, Vejay N. Vakharia, Rachel Sparks, Roman Rodionov, Neil Kitchen, Andrew W. Anna Miserocchi, Lewis Thorne, Sebastien Ourselin, John S. Duncan, (2019). "Computer-Assisted Versus Manual Planning for Stereotactic Brain Biopsy: A Retrospective Comparative Pilot Study", Operative Neurosurgery 0:1–6.
[7] Hu Yue, Cai Pu, Zhang Huawei, Adilijiang Aihemaitiniyazi, Peng Jun, Li Yun, Che Shanli, Lan Fei, Liu Changqing, (2022), A Comparation Between Frame-Based and Robot-Assisted in Stereotactic Biopsy, Frontiers in Neurology, Vol=13, Issn=1664-2295.
[8] Isensee F, Schell M, Tursunova I, Brugnara G, Bonekamp D, Neuberger U, Wick A, Schlemmer HP, Heiland S, Wick W, Bendszus M, Maier-Hein KH, Kickingereder P. Automated brain extraction of multi-sequence MRI using artificial neural networks. Hum Brain Mapp. 2019; 1–13.
[9] BraTS, 2020, Veri kümesi, Erişim tarihi: 10.09.2023 https://www.kaggle.com/datasets/awsaf49/brats2020-training-data
[10] Project Monai, AI Toolkit for Healthcare Imaging, Erişim tarihi: 12.04.2023 https://github.com/Project-MONAI/tutorials
[11] TubeTK, Segmentation, registration, and analysis of tubular structures in images. Erişim tarihi: 07.08.2023. https://public.kitware.com/Wiki/TubeTK/Data

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 423-432, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1603738

Electricity Consumption of Electric Vehicles in Türkiye and its Share in Total Electricity Consumption: 2030 Projection

Habip SAHIN[1*]
Department of Electricity and Energy, Fırat University, 23119, Elazig, Türkiye
[*]habipsahin@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 18/12/2024; Kabul/Accepted: 03/02/2025)

Abstract: The rapid expansion of electric vehicles (EVs) and the accompanying increased demand for electricity will put a huge burden on the electrical system. In this paper, the electricity consumption of EVs is analyzed by using realized data and is forecasted for near future. The weighted average value of rated consumption for EVs in Turkish market is found to be 175 W/km. Until 2030, it is estimated that electricity consumption will increase by 2.5% annually on average. It is predicted that the electricity consumption shares of EVs in general consumption, which was 0.03% for 2023, will increase to 0.64% by 2030. Based on these findings, Türkiye should turn to renewable and sustainable energy sources and support renewable-supported smart charging systems to meet increasing demand for electricity in a more environmentally and economically sustainable manner.

Key words: Electric vehicles, Electricity, Electricity consumption, Electricity generation.

Türkiye'de Elektrikli Araçların Elektrik Tüketimi ve Toplam Elektrik Tüketiminde Payı: 2030 Projeksiyonu

Öz: Elektrikli araçların hızlı yayılımı ve buna eşlik eden artan elektrik talebi, elektrik sistemine büyük bir yük getirecektir. Bu çalışmada, elektrikli araçların elektrik tüketimi geçmiş veriler kullanılarak analiz edilmiş ve yakın geleceğe yönelik tahminlerde bulunulmuştur. Türkiye pazarındaki elektrikli araçlar için ortalama ağırlıklı tüketim değeri 175 W/km olarak bulunmuştur. 2030 yılına kadar elektrik tüketiminin yıllık ortalama %2,5 artması beklenmektedir. 2023 için toplam tüketimde %0,03 olan elektrikli araçların elektrik tüketimindeki payının, 2030 yılında %0,64'e yükselmesi öngörülmektedir. Bu bulgulara dayanarak, Türkiye'nin artan elektrik talebini daha çevre dostu ve ekonomik olarak sürdürülebilir bir şekilde karşılayabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmesi ve yenilenebilir destekli akıllı şarj sistemlerini desteklemesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Elektrikli araçlar, Elektrik, Elektrik tüketimi, Elektrik üretimi.

1. Introduction

Supply and sustainability of energy are very significant and vital for all countries, also local and global environmental effects of energy consumption is another important issue. Although, to reduce these effects, precautions are taken at both worldwide and local scales, emissions from energy production and consumption recovered in 2023 to reach highest annual level ever [1]. Shifting from conventional vehicles based on fossil fuels to green fuel vehicles using electricity or hydrogen will make excessive contributions to decrease the environmental effects [2]. To promote this trend, electric vehicles (EVs), having higher cost than conventional ones, are supported [3]. In Türkiye, the tax for special consumption (SCT) applied to EVs ranges from 10 to 60%, while these values are between 45% and 220% for conventional vehicles [4].

In the literature, various studies have been conducted on the EV market and EV infrastructures in Türkiye. Tunçel examined the attitudes and purchase intentions towards EVs among Turkish consumers [5]. In this study, in an emerging market, a new personal antecedent of EV purchase intention is revealed by observing the influence of various aspects of motivated consumer innovativeness with an emphasis on the consumer perspective. Gönül and et al. illustrated a framework of position of Türkiye in EV technologies by evaluating the current EV stock and infrastructure of charging stations, as well as regulations, research and development activities about EVs. [6]. It was concluded that acceptance of EVs in Türkiye is low compared to developed countries, and therefore social awareness about electric vehicles should be increased. In their study conducted in 2024, Çetin and Taşdemir estimated the electric vehicle sales in Türkiye for the following 2 years with the optimized SARIMA model [7].

[*] Habip Sahin: habipsahin@firat.edu.tr ORCID : 0000-0002-0907-2022

According to their results, a steady upward trend in EV sales was predicted, with sales projected to be around 96,076 units by January 2024, 108,559 units in July 2024, and 100,676 units in December 2025. Ağbulut improved different artificial intelligence algorithms to forecast energy demand up to 2050 for the transportation sector in Türkiye [8]. It was forecasted that the annual growing rate of energy demand would be 3.7%. In this study, EVs were not specifically mentioned in the aspect of electricity consumption, but an overall analysis was made for the transportation sector. Ünal analyzed electricity consumption using artificial neural network methods [9]. As a result of the study, it was determined that the best result was obtained by obtaining the RMSE value of 0.0157 and the R value of 0.9976, which were taken as the performance measure of the 2-layer feedforward backpropagation neural network. Pala estimated electricity consumption in Türkiye using time series [10]. The research examined Türkiye's per capita electricity consumption between 1965 and 2022, utilizing both deep learning and statistical models for forecasting. The TBATS model emerged as the most effective in producing accurate predictions. The findings indicate a consistent increase in electricity consumption per individual over the years. Therefore, developing energy policies that prioritize sustainability, environmental conservation, and energy security was essential. Gençer and Bediroğlu examined the relationship between electric vehicle sales, carbon emissions and electricity consumption [11]. According to the results obtained, a cointegration relationship was found between electric vehicle sales and electricity consumption. In line with these results, FMOLS Fourier Cointegration coefficient estimate was calculated. Burunkaya and Demirkol analyzed the effects of increasing usage of EVs on the electricity distribution network for Türkiye [12]. It was observed that EV charging creates a serious fluctuation and load profile in terms of the distribution grid, in peak hours. Coban and et al. examined EV-Grid interaction for Turkish electricity system [13]. By applying the proposed algorithms, it was shown that optimal bi-directional V2G effects are important in distribution systems with high penetration of EVs. It was revealed that by applying such solutions in the field of electromobility, energy system stability and energy independence can be achieved by obtaining the desired synergy effect. Coban and et al. conducted research on estimating energy consumption of EVs [14]. The study provided a scaled estimate of EV home charging in Türkiye, concluding that an average EV adds 3.1 kWh per day to the overall household load, well below the amount assumed by grid regulators. Ekici et al. studied on EVs, electric vehicle charging systems and the current status of charging infrastructure in Türkiye [11]. The study conducted a comprehensive review of worldwide electric vehicle charging systems within the framework of electric vehicles, charging stations, installations and implementation of standards in Türkiye. The distribution of charging stations in Türkiye was analyzed in terms of location, region, type, infrastructure requirements and future projections.

In this paper, the bidirectional interaction between EVs and electrical energy is examined in detail. With the increasing usage of EVs, it places a great burden on electricity consumption, which is used as an energy source, and therefore on power grid. In this respect, Türkiye's electricity generation and consumption data is examined and estimated until 2030. It is one of the few studies in the literature in which this distinction is made. In the literature, the relationship between electric vehicles and electricity consumption in Türkiye has not been clearly quantified. In this study, the electricity consumption of electric vehicles and their direct share in total electricity consumption are calculated for both past and future years. Additionally, by separately analyzing electricity generation and consumption while accounting for inefficiencies in transmission and distribution, this study contributes to the existing body of literature. This study is one of the first to identify the sales figures, types, and consumption patterns of EVs in the Turkish market and to project their widespread adoption by 2030.

2. Material and Methods

Annual intensity of consumed electricity and sales of EV s in Türkiye are estimated until 2030 by using Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) technique to reveal the electricity consumption of EVs in operating conditions and its share in total consumption. Therefore, this method is applied for time series data of sales figure of EV s and total electricity generation and consumption.

ARIMA is derived from the autoregressive model (AR), the moving average model (MA), and ARMA models, combination of AR and MA [16]. In order to use the ARIMA model, the time series must be stationary and there must be no missing data. To set up the ARIMA model, MINITAB statistical software package is used. The mean-square error (MS), is used to check the accuracy of the fitted model. Although the MS is not very informative by itself, it can be used to compare accuracy of different ARIMA models [16]. Generally, smaller values of the MS specify a more suitable model.

In this study, ARIMA (1,2,2) model, which is used to estimate EV sales figures until 2030, is an important parameter that affects all other results of the study. The expression of the general ARIMA(p,d,q) pattern is shown in Eq. 1 [17].

$$\left(1-\phi_1 B-\cdots-\phi_p B^p\right)(1-B)^d y_t = c+\left(1+\theta_1 B+\cdots+\theta_q B^q\right)\varepsilon_t \quad (1)$$

where,p is order of the autoregressive part, d is degree of first differencing involved, q is order of the moving average part, ϕ, θ are parameter constants, B is notation for backshift and ε_t denotes white noise.
If the equation for general ARIMA (1,2,2) is rewritten (Eq. 2);

$$(1-\phi B)(1-B)^2 y_t = c+(1+\theta_1 B+\theta_2 B^2)\varepsilon_t \quad (2)$$

Table 1. ARIMA models can be estimated with EV sales data and the parameters of the models.

Parameters	(0,2,1)	(0,2,2)	(1,2,1)	(1,2,2)
ϕ_1			0.182	-0.11
θ_1	0.811	0.625	0.823	0.76
θ_2		0.214		0.8
c	4142	3897	3356	3587
MS	$4.34*10^8$	$4.39*10^8$	$4.76*10^8$	$3.44*10^8$

The ARIMA models are determined to be ARIMA (1, 1, 3) for electricity generation, ARIMA (1, 1, 4) for total electricity consumption, ARIMA (1, 2, 2) for EV sales and ARIMA (0, 1, 3) for average mileage per year.

2.1. Electricity generation and consumption in Türkiye

ARIMA models are created using datasets, provided from Türkiye Elektrik İletim Dağıtım Anonim Şirketi (TEİAŞ), for electricity generation between 1993 and 2023. In the light of these datasets, the amount of electricity that will be generated and consumed are estimated for the years from 2024 until 2030 with the ARIMA (I, I, 3) and ARIMA (I, I, 4) models, respectively. Since there is no nuclear power plant (NPP) currently in power production in Türkiye, data on nuclear are not available.

The realized and forecasted data is given in Fig.1 together for the years between 2010 and 2030. When the electricity generation and consumption are considered after 2010, it can be seen in Fig.1 that both generally increase except for the years 2019 and 2022. In these years, although the decline in generation was more obvious, the decline in consumption was very limited. The reason for this decline is due to Türkiye's economic reasons rather than the pandemic covering 2020 and 2021. The electricity generation for 2010 and 2023 is 211,207.7 GWh and 331,148.9 GWh, respectively and it is estimated to be 399450.4 GWh in 2030. The electricity consumption for 2010 and 2023 is 172,050.6 GWh and 289,371.7 GWh, respectively and it is estimated to be 345828.9 GWh in 2030. The consumption value for the first 11 months of 2024 is 317501.8 GWh, and when the estimated December is added, it corresponds to a value of approximately 347000 GWh [18]. According to the forecast model, production for 2024 is estimated to be 338453.8 GWh. This shows that the accuracy rate of the model is 97.54%.

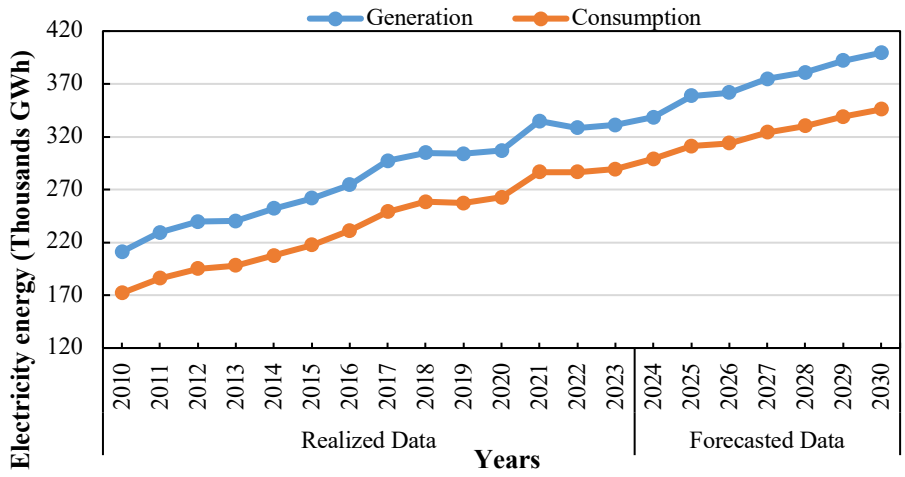


Figure 1. Realized and forecasted electricity generation and consumption from 2010 to 2030.

2.2. Turkish electric vehicle market

EV sales in Türkiye officially started in 2012 and two kinds of taxes are collected on the EV sale, first one is Value Added Tax (VAT) and second one is Special Consumption Tax (SCT) [19]. The value of VAT was applied as 18% until July 2023, but as of this date it has been increased to 20% [20]. SCT was applied up to engine power as 3%, 7% and 15% for under 85 kW, 86-120 kW interval and over 121 kW until 202, respectively [21]. In 2021, rates were reassessed to 10%, 25% and 60% respectively for the same intervals [22]. In July 2022, in addition to engine power, tax base criterion was also added to the determination of SCT. With this change, SCT was determined as 10% for EV s having an engine power under 160 kW and tax base under 700,000 ₺; 40% for tax base is over 700,000₺; 50% for those having an engine power over 160 kW and tax base under 750,000 TL; 60% for others [23]. In 2023, the tax base criteria was updated to 1,250,000₺ and 1.350.000₺, respectively [24]. With the last update made at the end of 2023, the value of 1,250,000₺ has been updated to 1,450,000₺ [25]. EVs are divided into three groups, the first one is pure or battery electric vehicles (BEV), the second one is extended range electric vehicle (EREV) and the final one is plug-in hybrid electric vehicles (PHEV). Since EREVs do not cause electricity consumption, they are outside the scope of this study. BEVs constitute the overwhelming majority of EV sales in Türkiye. EV sales varied in the interval of 2012 and 2019 and had not shown much progress (Fig. 2). There is a logarithmic increase in sales after 2016. I Although, sales figures quadrupled almost every year between 2019 and 2023, the share of EV sales in the light commercial vehicle (LCV) market, including passenger cars, was able to exceed the 1 % threshold, reaching 1.3% in 2022 [26]. The increase in sales figures has slowed down in the last year, and for the first ten months, the sales figure of 2024 is 50.8% higher than in 2023 [27].

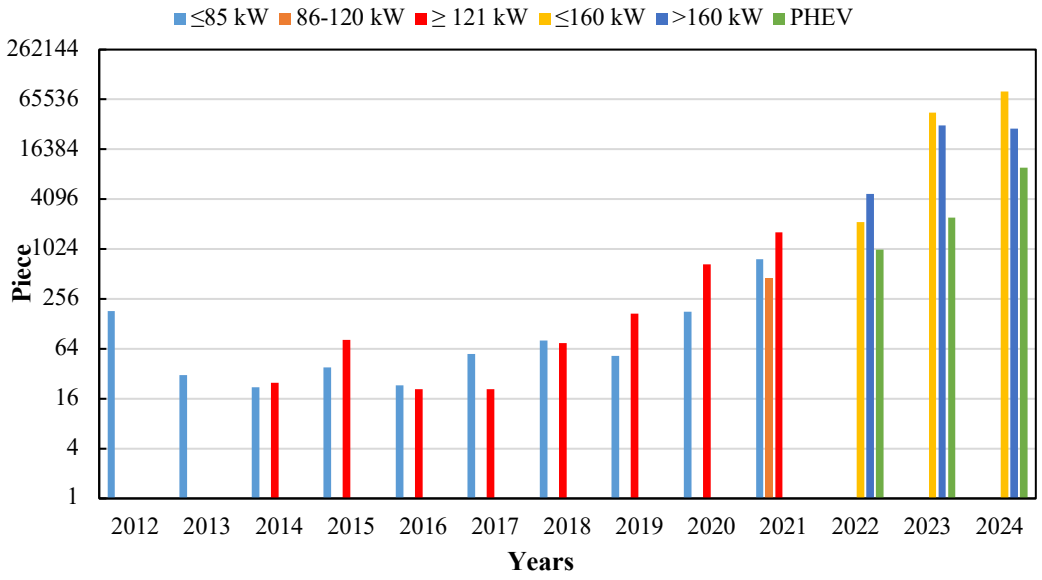


Figure 2. Annual sales volume of EV between 2012 and 2024 in Türkiye [28].

Sales data between 2024 and 2030 were estimated with the ARIMA (1,2,2) model using EV sales data from 2012 to 2023, and the results are shown in Fig. 3. Considering the problems in vehicle supply chain throughout the world after the pandemic and that TOGG will only be supplied to the domestic market in the first years, the introduction of a domestic electric car for sale in the Turkish market, where the demand for EVs has increased considerably in recent years, will increase this demand even more [29,30].

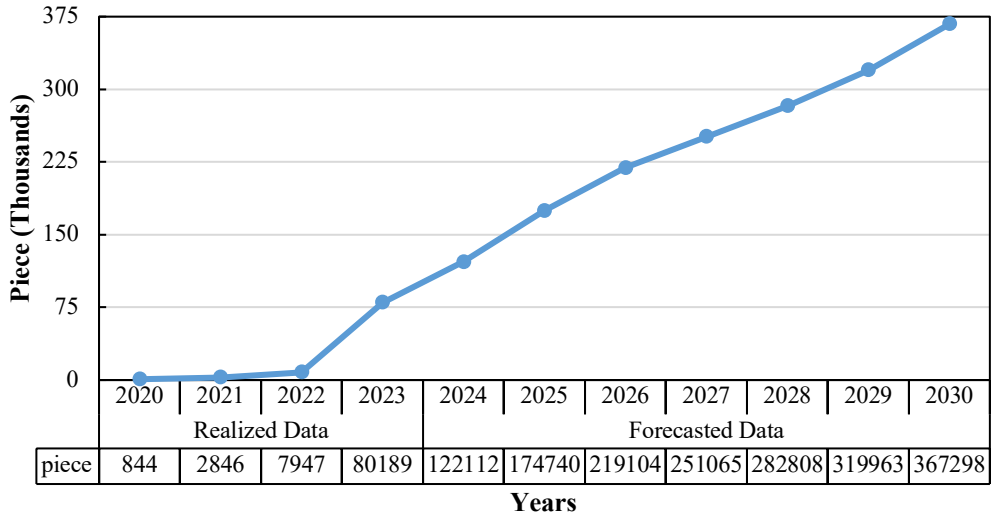


Figure 3. Realized and forecasted values for annual sales volume of EV between 2020 and 2030 in Türkiye.

The total number of EV sales in 2023 reached 80,189 pieces and it is 120,944 for 2024 [28]. It is estimated that this number will reach 367,298 in 2030. Considering that the annual electric vehicle sales volume for 2024 are predicted to be 122,112 units according to the forecast model, it is seen that an accuracy rate of 99.04% is achieved.

2.3. Electricity consumption of electric vehicles in Türkiye

To calculate total electricity consumption of EVs, it is essential to first establish the energy consumption values for EVs. Typically, EVs have two types of consumption values: rated consumption (RC) and vehicle consumption (VC). RC, including charging losses, is the official figure provided by the companies, while VC represents the battery energy consumed while driving. The RC values, based on the Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP) Class 3 for EVs available in Türkiye, are used. In Table 2, RC and VC values and sales figures are specified for top 10 EV brands in Turkish market for 2023.

Table 2. Rated and vehicle consumption values and sales figures of EVs on sale in Turkish market in 2023 [31].

Vehicle model	Pieces	Rated consumption (Wh/km)	Vehicle consumption (Wh/km)
TOGG T10X	19583	191	169
Tesla Model Y	12150	169	140
Renault Megane E-Tech	2892	161	137
MG 4	2842	163	140
Skywell ET5	2541	172	156
Citroen e-C4	1881	149	122
Opel Corsa e	1777	158	131
Renault ZOE	1772	174	132
Opel Mokka e	1757	160	138
Dacia Spring	1483	145	114
Weighted average	-	175	150

The weighted average (WA) values for rated and vehicle consumption are calculated by Eq.3 [32].

$$WA = \frac{\sum(v_i * CV_i)}{\sum v_i} \quad (3)$$

where v_i is number of each brand, CV_i is consumption value of each vehicle. Based on the sales and consumption data for EVs, the values are calculated as 175 Wh/km for RC and 150 Wh/km for VC as weighted average. The annual mileage of EVs are also considered to calculate the total consumption of EVs. Based on these calculated values, predictions are made until 2030. For the years between 2016 and 2022, TURKSTAT published annual average mileage of LCVs. From 2016 to 2022, these values are given as 13117, 13107, 13776, 13325, 12474, 13048 and 13415 km/year, respectively [33]. However, these values are not given separately for EVs. Considering that they are preferred especially for shorter distances due to range concerns and difficulty in finding a charging station, and they are not preferred especially for long intercity trips, their annual average kilometers will be less than traditional vehicles. Davis determined that the average annual mileage of EVs is 61.8% of that of conventional ICEVs [34]. In the light of this data, in this study, the average annual mileage values of EVs are taken as 61.8% of the values given by TURKSTAT and are determined using the ARIMA (0, 1, 3) model for the forecast years (Fig.4).

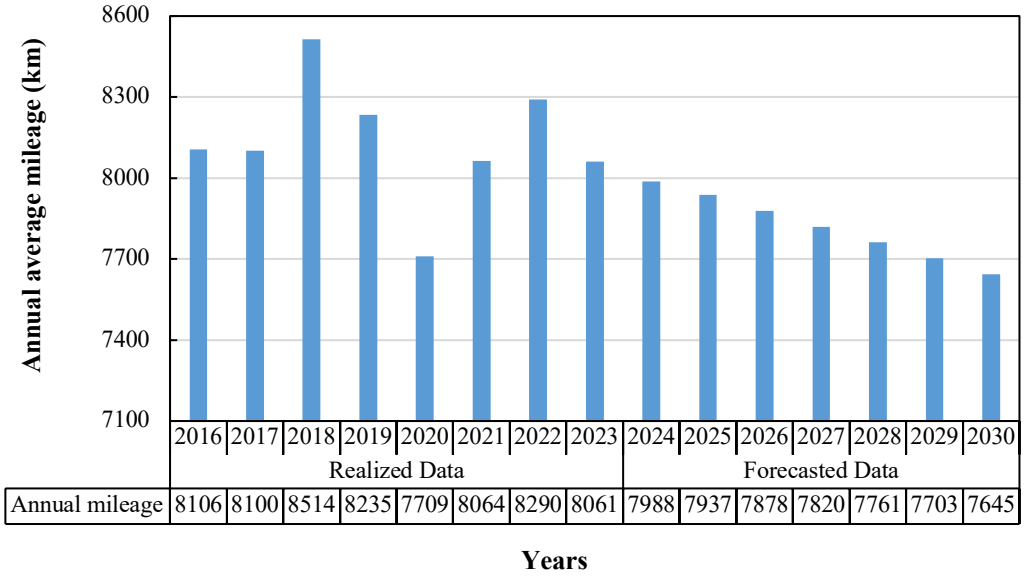


Figure 4. Realized and forecasted values for annual average mileage of EVs.

3. Results and Discussion

As EV usage grows, a key issue will be the electricity consumption of EVs and the capacity to supply the rising demand. To estimate the annual consumption of EVs, sales data, average mileages, and calculated weighted average RC values are used. Determining the annual consumption by EVs requires first calculating the number of vehicles in that year. The effective number of EVs for each year is determined by summing sales from earlier years and adding half of the current year's sales, assuming consistent sales distribution (Eq.4) [35]. The total consumption of EVs for a year is then found by using Eq.5 [35].

$$N_{eff,i} = \sum n_{i-1} + n_i/2 \quad (4)$$

$$E_{c,i} = N_{eff,i} \times RC \times M \times 1GWh/10^9 Wh \quad (5)$$

where $N_{eff,i}$ is effective number of EV and n_i is sales figures of EV for the year i. $E_{c,i}$ is consumption of EV for the year i and M is annual mileage. Realized and forecasted values for annual total mileage and cumulative number of EVs are given in Fig. 5.

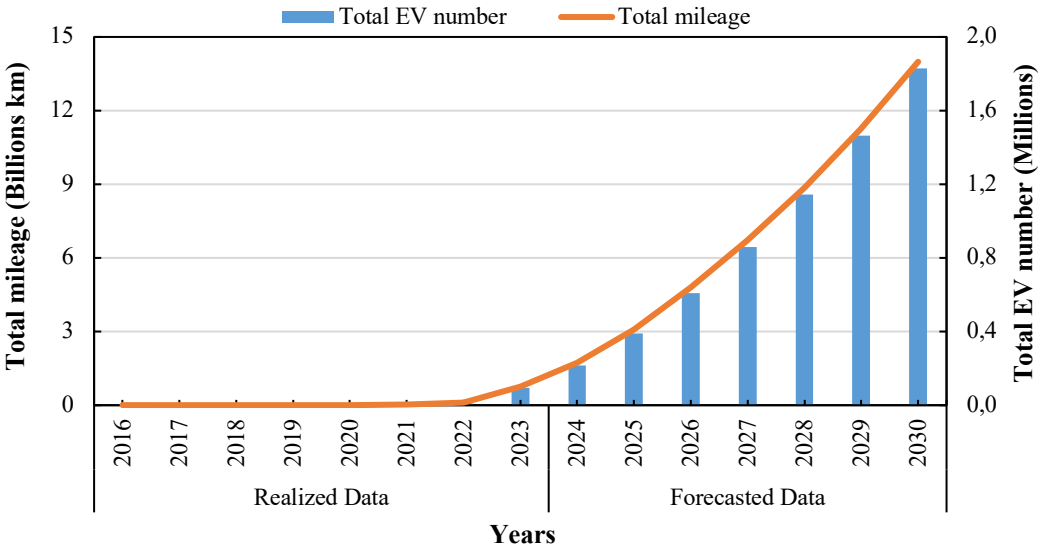


Figure 5. Realized and forecasted values for annual total mileage and cumulative number of EVs.

While the number of LCV type electric vehicles currently registered in traffic is around 170 thousand, it is estimated that this number will exceed 1 million in 2028 and1.8 million in 2030. Calculated and estimated annual electricity consumption values of EVs and their ratio to total consumption values are given in Fig. 6.

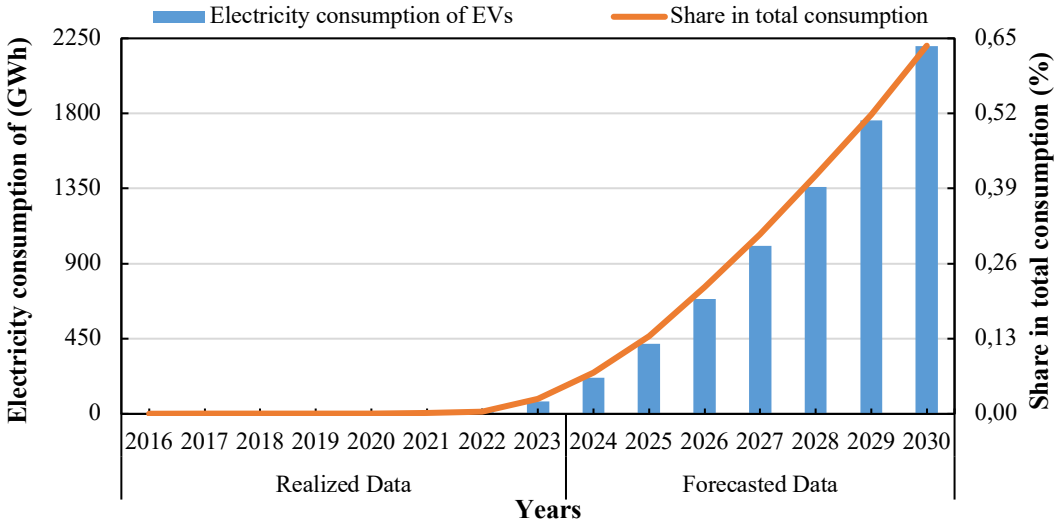


Figure 6. Annual electricity consumption of EVs and its share in total consumption in Türkiye.

Despite the rapid and significant increase in the number of EVs and the associated electricity consumption, the share of EVs in total electricity consumption remains very low. In 2023, the effective number of vehicles is around 50 thousand and EV-related electricity consumption is calculated as 74.3 GWh. This value corresponds to only 0.03% of the total consumption of 289371.7 GWh. It is estimated that the effective number of EVs will be around 1.65 million in 2030 and the electricity consumption from EVs will be 2203.9 GWh. Considering that the total electricity consumption for the same year is estimated as 345828.9 GWh, thus, only 0.64% of the total consumption will be realized by EVs.

Türkiye's installed electricity generation capacity has grown annually, reaching 110,914 MW by 2023, with a utilization factor of 48.8% based on theoretical operating hours. [36]. These values actually mean that Türkiye

will not face major problems in terms of generation infrastructure in meeting the increasing electricity demand. The resources used as primary energy sources in the electricity generation to meet the rapidly increasing demand in an environmentally friendly and sustainable manner are also of great importance. The renewable energy installed capacity in Türkiye has consistently grown each year, reaching 63,160.6 MW in 2023, with its proportion of the total installed capacity rising to 56.9% [37]. Although renewables accounted for 56.9% of installed capacity in 2023, their share in actual generation was 42.3%, reflecting a significantly lower utilization factor. This discrepancy is due to the variability of renewable energy sources (RES), which fluctuate by year, season, and even time of day. Meeting the increasing demand with RES is also of great importance in terms of domestic resource use for Türkiye, which is poor in terms of fossil fuel resources. Switching to non-renewable sources will raise the emission intensity of electricity consumption, leading to higher emissions associated with EVs and dependence on foreign energy. This situation is not sustainable both environmentally and economically for Türkiye.

Another concern is that the electric power demand from EV usage will be unevenly distributed, with higher demand in densely populated areas. As a result, even if the overall installed capacity is adequate, the existing grid infrastructure may struggle to support demand in these high-density regions. The most effective and rapid solution to address this issue is the implementation of smart charging systems. Smart charging helps manage the increased energy demand by shifting loads away from peak hours, thereby reducing strain on the power grid. More sustainable outcomes can be achieved by combining smart charging systems with renewable energy sources [38]. With smart charging applications, charging costs and operational cost of grid can be decreased by l0% to 30% [39]. In Türkiye, which is very rich in renewable energy resources, smart charging systems can be backed by wind and solar energy, allowing for a smoother adaptation to the rapid growth of EVs and effectively addressing potential challenges. While no extra load is created on the power grid with solar energy during peak hours, wind energy, whose surplus cannot be utilized with the decreasing electricity demand at night, can also be brought into the economy.

4. Conclusion and Policy Implications

With this study, it is estimated that the number of EVs will increase expressively over the next decade. As the number of registered vehicles increases, the electricity consumption of EVs will also increase. As a result, it becomes important to estimate the potential electricity consumption demand and its impact on the electricity grid in order to ensure the stability of the nationwide energy system. As rising energy demand will greatly impact the current electricity system, the government will must to adapt by expanding generation capacity and grid to supply this demand. This issue will attract more and more attention as Türkiye will produce its domestic EV. Enhancing grid capacity is crucial not only for maintaining endurance and security of the electricity supply but also for minimizing losses occurring in transmission and distribution. On the electricity generation side, the important issue is the main sources to be used to meet this significant increase and the emission intensities of these resources. RES should be the first choice here, as they are both more sustainable and more environmentally friendly.

Given Türkiye's potential, utilizing RES is crucial for reducing both greenhouse gas emissions and reliance on foreign energy. Due to their high capacity for consistent output and low emissions, nuclear power plants may be considered a secondary priority. This study offers some important implications for future research in order to make a more detailed forecast of the rapidly growing EV market and the resulting increase in electricity demand. With EVs gaining a significant place in the market, clearer feedback can be obtained and thus research will be able to provide more precise estimations. The resolution of the forecasts, currently made on an annual basis, can be increased by analyzing the driving and charging patterns of EV owners.

The weighted average consumption data for EVs are calculated as 175 Wh/km for RC and 150 Wh/km for VC. This study presents a projection for 2030. It is estimated that annual sales of electric vehicles will reach 367 thousand and the number of electric vehicles in traffic will reach 1.8 million in 2030. It is estimated that electricity generation will increase to 400 thousand GWh and consumption to 346 thousand GWh, and the share of electric vehicles in total consumption will increase to 0.64% in 2030.

The future scope of this study is to support modeling with artificial intelligence so that variables that depend on many parameters such as electricity production and consumption can be made more accurately.

References

[1] IEA. CO_2 Emissions in 2023 2024. https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023 (accessed November 2, 2024).
[2] EEA. Transport and environment report 2021: Decarbonising road transport - the role of vehicles, fuels and transport demand. 2022.
[3] Parker N, Breetz HL, Salon D, Conway MW, Williams J, Patterson M. Who saves money buying electric vehicles? Heterogeneity in total cost of ownership. Transp Res Part D Transp Environ 2021;96:102893.
[4] GİB. Special Consumption Tax - List No (II) 2022. https://www.gib.gov.tr/fileadmin/mevzuatek/otv_oranlari_tum/05072022_II_sayili_liste.pdf (accessed November 18, 2022).
[5] Tunçel N. Intention to purchase electric vehicles: Evidence from an emerging market. Res Transp Bus Manag 2022;43:100764.
[6] Gönül Ö, Duman AC, Güler Ö. Electric vehicles and charging infrastructure in Turkey: An overview. Renew Sustain Energy Rev 2021;143:110913.
[7] Çetin B, Taşdemir Ç. Forecasting Electric Vehicle Sales Using Optimized SARIMA Model : A Two-Year Predictive Analysis. Veri Bilim 2024;7:41–51.
[8] Ağbulut Ü. Forecasting of transportation-related energy demand and CO_2 emissions in Turkey with different machine learning algorithms. Sustain Prod Consum 2022;29:141–57.
[9] Ünal ŞN. Yapay Sinir Ağları Yöntemleri İle Elektrik Tüketimi Analizi. Karabük Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim Fakültesi Derg 2024;4:98–111.
[10] Pala Z. Prediction of Electricity Consumption in Türkiye with Time Series. Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik Mimar Fakültesi Derg 2023;4:32–40.
[11] Gençer YG, Bediroğlu G. Elektrikli Araç Satışları, Karbon Emisyonu ve Elektrik TüKetimi Arasındaki İlişkinin İncelenmesi. Elektron Sos Bilim Derg 2024;23:1192–209.
[12] Burunkaya M, Demirkol OF. Increase in the use of electric vehicles and its potential effects on electricity distribution network and situation analysis for Turkey. Proc - 2019 6th Int Conf Electr Electron Eng ICEEE 2019 2019:33–7.
[13] Coban HH, Lewicki W, Sendek-Matysiak E, Łosiewicz Z, Drożdż W, Miśkiewicz R. Electric Vehicles and Vehicle–Grid Interaction in the Turkish Electricity System. Energies 2022, Vol 15, Page 8218 2022;15:8218.
[14] Coban HH, Bajaj M, Blazek V, Jurado F, Kamel S. Forecasting Energy Consumption of Electric Vehicles. Proc - 2023 IEEE 5th Glob Power, Energy Commun Conf GPECOM 2023 2023:120–4.
[15] Ekici YE, Dikmen İC, Nurmuhammed M, Karadağ T. A Review on Electric Vehicle Charging Systems and Current Status in Turkey. Int J Automot Sci Technol 2021;5:316–30.
[16] Ediger VŞ, Akar S. ARIMA forecasting of primary energy demand by fuel in Turkey. Energy Policy 2007;35:1701–8.
[17] 8.5 Non-seasonal ARIMA models. Forecast Princ Pract (2nd Ed) n.d. https://otexts.com/fpp2/non-seasonal-arima.html (accessed May 20, 2023).
[18] TEİAŞ. Aylık Elektrik Üretim-Tüketim Raporları 2024. https://www.teias.gov.tr/aylik-elektrik-uretim-tuketim-raporlari (accessed January 7, 2025).
[19] ODD. Turkish Passenger Car and Light Commercial Vehicle Market. Press Release 2013;90:18–9.
[20] T.C. Resmî Gazete. Mal ve Hizmetlere Uygulanacak Katma Değer Vergisi Oranlarının Tespitine İlişkin Kararda Değişiklik Yapılmasına Dair Karar (Karar Sayısı: 7346) 2023. https://www.resmigazete.gov.tr/fihrist?tarih=2023-07-07 (accessed November 4, 2024).
[21] GİB. Special Consumption Tax - List No (II) 2011. https://www.gib.gov.tr/fileadmin/mevzuatek/otv_oranlari_tum/13_10_2011_II_sayili_liste.htm (accessed November 11, 2022).
[22] GİB. Special Consumption Tax - List No (II) 2022. https://www.gib.gov.tr/fileadmin/mevzuatek/otv_oranlari_tum/02022021_II_sayili_liste.pdf (accessed November 11, 2022).
[23] GİB. Special Consumption Tax - List No (II) 05072022 2022.
[24] GİB. Special Consumption Tax - List No (II) 03032023 2023.
[25] GİB. 4760 Sayılı Özel Tüketim Vergisi Kanununa ekli (II) Sayılı Listede Yer Alan Bazı Malların Özel Tüketim Vergisi Oranlarına Esas Özel Tüketim Vergisi Matrahlarının Yeniden Tespiti Hakkında Karar (Karar Sayısı: 7803) 2023. https://www.gib.gov.tr/gibmevzuat (accessed November 2, 2024).
[26] Erce H. Passenger Car and Light Commercial Vehicle Market. Automot Distrib Assoc Press Release 2023:1–18.
[27] Erce H. Passenger Car and Light Commercial Vehicle Market. Automot Distrib Mobil Assoc Press Release 2024:1–18.
[28] Erce H. Passenger Car and Light Commercial Vehicle Market 2025:1–18.
[29] Sun X, Liu G, Hao H, Liu Z, Zhao F. Modeling potential impact of COVID-19 pandemic on global electric vehicle supply chain. IScience 2022;25:103903.
[30] HABERTURK. TOGG'un üretim rakamı açıklandı! Liderliğe oynayacak... 2022. https://www.haberturk.com/togg-un-uretim-rakami-aciklandi-liderlige-oynayacak-3532991-ekonomi (accessed November 11, 2022).
[31] EV Database. Energy consumption of full electric vehicles EV Database n.d. https://ev-

database.org/cheatsheet/energy-consumption-electric-car (accessed November 12, 2022).
[32] Cheng J, De Waele W. Weighted average algorithm: A novel meta-heuristic optimization algorithm based on the weighted average position concept. Knowledge-Based Syst 2024;305:112564.
[33] TurkStat. Vehicle-kilometer Statistics 2022. https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Vehicle-kilometer-Statistics-2020-45784 (accessed November 12, 2022).
[34] Davis LW. How much are electric vehicles driven? Appl Econ Lett 2019;26:1497–502.
[35] Zheng J, Sun X, Jia L, Zhou Y. Electric passenger vehicles sales and carbon dioxide emission reduction potential in China's leading markets. J Clean Prod 2020;243:118607.
[36] TEİAŞ. Turkish Electricity Transmission Company - Electrical Characteristics by Turkey's Installed Capacity and Gross Generation 2024. https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri (accessed November 7, 2024).
[37] TEİAŞ. Turkish Electricity Transmission Company - Annual Development of Renewable Based Installed Capacity Share in Türkiye Total Installed Capacity (2000-2023) 2024. https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri (accessed November 7, 2024).
[38] Ekren O, Hakan Canbaz C, Güvel ÇB. Sizing of a solar-wind hybrid electric vehicle charging station by using HOMER software. J Clean Prod 2021;279:123615.
[39] Dixon J, Bukhsh W, Edmunds C, Bell K. Scheduling electric vehicle charging to minimise carbon emissions and wind curtailment. Renew Energy 2020;161:1072–91.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 433-441, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1604593

The Statistical Methods for Precipitation Prediction with Trend Analysis

Fatih Şevgin[1*]
[1] Department of Construction Technology, Vocational School of Technical Sciences, Muş Alparslan University, Muş, Türkiye
[*1]f.sevgin@alparslan.edu.tr

(Geliş/Received: 20/12/2024; Kabul/Accepted: 03/02/2025)

Abstract: This study investigates the condensation of water vapor in the atmosphere, precipitating to the ground in either solid or liquid form. This meteorological variable exhibits temporal and spatial variations influenced by climate change and other factors. To better analyze the effects of climate change on precipitation, the Konya Closed Basin was selected as the research area. Key parameters and datasets critical for various sectors and activities—from hydraulic structure design to irrigation planning—were identified. Seasonal and annual precipitation trend analyses were conducted for the provinces of Aksaray, Ankara, Isparta, Mersin, and Nevşehir using statistical methods, including the Mann-Kendall test, Spearman's Rho, and the Innovative Şen Test, with the aid of XLSTAT software. The results revealed negative precipitation trends in Aksaray, Ankara, and Nevşehir, while positive trends were observed in Isparta and Mersin. Additionally, complementary data were collected from the Muş Meteorology Provincial Directorate to support the findings.

Keywords: Precipitation, Trend analysis, Mann-Kendall, Spearman Rho, Innovative Şen Test.

Trend Analizi ile Yağış Tahmini için İstatistiksel Yöntemler

Öz: Bu çalışmada atmosferdeki su buharının yoğunlaşması ve daha sonra katı veya sıvı formda yere çökmesi araştırılmıştır. Bu meteorolojik değişken, iklim değişikliği ve diğer faktörlerden etkilenen zamansal ve mekansal değişimler göstermektedir. İklim değişikliğinin yağış üzerindeki etkilerini daha iyi analiz edebilmek için Konya Kapalı Havzası araştırma alanı olarak seçilmiştir. Hidrolik yapı tasarımından sulama planlamasına kadar çeşitli sektörler ve faaliyetler için kritik öneme sahip anahtar parametreler ve veri kümeleri belirlenmiştir. Mann-Kendall testi, Spearman's Rho ve Yenilikçi Şen Testi gibi istatistiksel yöntemler kullanılarak Aksaray, Ankara, Isparta, Mersin ve Nevşehir illeri için mevsimsel ve yıllık yağış eğilimi analizleri XLSTAT yazılımının yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Aksaray, Ankara ve Nevşehir'de olumsuz yağış eğilimleri ortaya koyarken, Isparta ve Mersin'de olumlu eğilimler gözlenmiştir. Ayrıca bulguları desteklemek için Muş Meteoroloji İl Müdürlüğü'nden tamamlayıcı veriler toplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Yağış, Trend analizi, Mann-Kendall, Spearman Rho, Yenilikçi Şen testi.

1. Introduction

In the existing literature, various methods have been employed for precipitation forecasting, ranging from traditional statistical approaches to advanced artificial intelligence techniques. In recent years, rapid advancements in technology and the increased standard of living have driven a significant rise in the consumption of fossil fuels. This surge in fossil fuel usage has, in turn, led to a substantial increase in greenhouse gas emissions, which profoundly impact almost all meteorological variables. The effects of these gases, which intensify global warming, vary across regions and basins, with their most pronounced influences observed on temperature and precipitation patterns [1]. Precipitation has emerged as a critical area of research among these meteorological variables due to its direct and widespread implications for environmental systems and human activities.

Changing climate conditions have introduced significant temporal and spatial variations in precipitation. Excessive precipitation can result in severe hydrological events such as floods and inundations, while insufficient precipitation may lead to prolonged droughts, with devastating consequences for agriculture, water supply, and ecosystems. Furthermore, technological advancements and the expansion of urban areas have adversely affected the efficiency of precipitation utilization. Increased technological development has escalated water consumption, while urbanization has accelerated surface runoff rates, reducing the capacity for natural water retention and storage in the environment [2,3].

Given that climate change is a primary driver of variability in precipitation patterns, understanding its potential impact is paramount for the sustainable planning and management of water resources. Statistical trend

* Sorumlu yazar: f.sevgin@alparslan.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-1984-8162

analysis is a critical tool for this purpose, enabling researchers to identify temporal patterns of increase or decrease in precipitation within a time series [4,5]. These analyses are crucial for addressing practical needs in sectors such as agriculture, irrigation, energy production, and the design of hydraulic structures. By detecting trends in precipitation, it becomes possible to develop strategies for mitigating risks associated with both excessive and insufficient rainfall.

Among the various statistical methods available, the Mann-Kendall test has proven to be particularly effective due to its non-parametric nature and its robust application to hydrometeorological time series [6]. This test, along with other techniques such as Spearman's Rho and the Innovative Şen Test, has been extensively utilized in the literature for identifying trends in precipitation data. Additionally, recent advancements have expanded the scope of precipitation forecasting to include artificial intelligence methods, offering new opportunities for more accurate and comprehensive analyses.

Partal and Kahya analyzed Türkiye's precipitation using the Mann-Kendall test, a statistical method and identified a decreasing trend along certain coastal areas of the Black Sea region [7]. Lefadani et al., employed ANN, ANFIS, and MIKE11/NAM models to forecast precipitation in Iran's Eskandari basin. Their study concluded that the results predicted by the ANFIS and ANN models were more accurate than those predicted by the MIKE11/NAM model [8]. Patel and Parekh utilized the ANFIS method to predict monthly monsoon precipitation at the Gandhinagar station. They developed a hybrid model with seven membership functions, incorporating wind speed, temperature, and relative humidity as three input variables, and reported highly successful results [9]. Sojitra also used the ANFIS method to create two datasets for developing predictive models based on 35 years of rainfall data from Udaipur City. In addition to considering variables such as average temperature, evaporation, and humidity, the authors achieved successful outcomes using Generalized Bell and Gaussian membership functions [10]. Öztopal and Şen employed both the Innovative Şen and Mann-Kendall methods to analyze trends in temperature and precipitation data from 16 meteorological stations across the Black Sea Region. Their study revealed that the Mann-Kendall method identified an increasing trend in precipitation and temperature at seven of the stations. In contrast, the Innovative Şen method indicated an upward trend in both temperature and precipitation at all stations, with the trends being largely consistent across the two methods. This demonstrated that the Innovative Şen method provided a more comprehensive view of the regional climatic shifts, aligning with the increasing trend observed across the majority of the study stations [11, 12]. Similarly, Coşkun conducted a trend analysis of seasonal and annual precipitation data from seven stations within the Van Lake closed basin, utilizing the Mann-Kendall, Spearman's Rho, and Innovative Şen methods. The analysis revealed a general decreasing trend in precipitation across the entire basin, suggesting that the region may be experiencing a long-term reduction in rainfall. This finding highlights the need for further investigations into the implications of reduced precipitation on water resources and agriculture in the Van Lake basin [13]. Aydın and Öz also focused on the Van Lake basin, analyzing trends in both temperature and precipitation data using the Innovative Şen, Mann-Kendall, and Spearman-Rho methods. Their findings indicated a clear decreasing trend in precipitation in the Erciş and Ahlat districts, while no significant trend was identified in other districts. In contrast, the temperature data revealed an absence of trends in the Erciş and Ahlat districts, but an increasing trend was observed across all other districts. These findings point to regional variability in precipitation trends within the Van Lake basin and suggest that localized climate patterns may be influencing the observed temperature and precipitation trends [14]. Yaman et al., investigated the relationship between precipitation and runoff using artificial intelligence techniques such as ANFIS and GEP. The models' performance was measured using Root Mean Square Error (RMSE), the coefficient of determination (R^2), and other statistical criteria. The study found that the predictions made by the GEP and ANFIS methods were closely aligned [15].

In this study, the seasonal and annual total precipitation data of the Konya Closed Basin were analyzed for trends using Spearman's Rho, Mann-Kendall, and Innovative Şen methods. The research focuses on the Konya Closed Basin, with trend analyses conducted on monthly total precipitation data from the provinces of Aksaray, Ankara, Isparta, Mersin and Nevşehir. While existing studies have established that temperature trends across the country exhibit a consistent increase, precipitation trends show significant spatial variability, either increasing or decreasing depending on the specific basin or region. This study offers a focused analysis of precipitation trends in a geographically unique closed basin, contributing to the understanding of localized hydrometeorological responses to climate change.

2. Method

2.1. The Spearman-Rho Test

It is a non-parametric statistical method. The test requires that the data be arranged in either ascending or descending order. The rank statistic value, $R(x_i)$, is determined by sorting the data set in ascending order, and the Spearman-Rho test statistic value, r_s, is calculated using the following Equation 1. [16, 17].

$$r_s = 1 - 6[\sum_{i=1}^{n}(R(x_i) - i)^2]/(n^3 - n) \quad (1)$$

For the data set under evaluation, when the analyzed r_s distribution approaches a normal distribution with n>30, the calculated Z values are compared with $Z_{\alpha/2}$ (1.96) obtained from normal distribution tables at a 95% significance level. The Z value explains the test statistic r_s and is calculated using Equation 1,2. If the calculated Z value is greater than $Z_{\alpha/2}$ (1.96), it indicates the presence of a trend. If the r_s value is positive, it signifies an increasing trend, whereas a negative value indicates a decreasing trend [17].

$$Z = r_s\sqrt{n-1} \quad (2)$$

2.2. The Mann-Kendall Test

This method is one of the statistical techniques used to detect parametric analyses and is among the primary methods used for identifying trends in hydrological and climatological data [18]. The use of this test is also recommended by the World Meteorological Organization (WMO). It has been observed that this method performs better than other methods, particularly in determining trend analyses [19]. In this method, the null hypothesis Ho is based on the assumption that there is no trend. The test statistic can be given as in Equation 3:

$$S = \sum_{k=1j}^{n-1} k \sum_{k+1}^{n} \mathrm{sgn}(xj - xk) \quad \text{and} \quad \mathrm{Sgn}(x) = \begin{cases} +1, x > 0 \\ 0, x = 0 \\ -1, x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

It is calculated using the following equation. In the equation, x_j, x_k, and n represent the observed values in year, year, and the total number of years, respectively. However, if the total number of years exceeds 10 (n>10), the following Equation 4,5 will be applied.

$$\mu_s = 0 \text{ ve } = \sigma_s = \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} \quad (4)$$

$$z = \begin{cases} \frac{(s-1)}{\sqrt{\mathrm{var}(s)}} & s > 1 \\ 0 \; s = 0 \\ \frac{(s+1)}{\sqrt{\mathrm{var}(s)}} & s < 1 \end{cases} \quad (5)$$

The distribution of the Z statistic shown in the figure follows a standard normal distribution. If the Z value is smaller than the critical value Z/2 , the null hypothesis is accepted, indicating that there is no trend in the time series under investigation. If the Z value is greater than Z/2 , it is concluded that there is a trend. If the s value is negative, the trend is decreasing; if positive, the trend is increasing [20].

2.3. The Innovative Sen Test

The recorded meteorological data series is divided into two equal parts centered around the median year. Each sub-series is then ordered separately in ascending order. The first sub-series (X_i) is plotted on the X-axis and the second sub-series (X_j) on the Y-axis, forming a Cartesian coordinate system. If the data points align along the 1:1 line, it indicates no trend. However, if the points lie in the lower triangle below the 1:1 line, it suggests a decreasing trend; if they are in the upper triangle, it indicates an increasing trend [21, 22].

The innovative nature of the Şen method (Figure 1) lies in its adaptability to nearly all data sets. This method was applied by Şen (2012) to the Menzelet Dam, Aslantas Dam, and Cizre station. The same method was later

applied by Şen (2013) to Uludağ/Bursa, Merkez/Bursa, and the Euphrates River. Most recently, it was used on long-term temperature data sets recorded at the Göztepe, Florya, Edirne, Bursa, and Bolu stations [23].

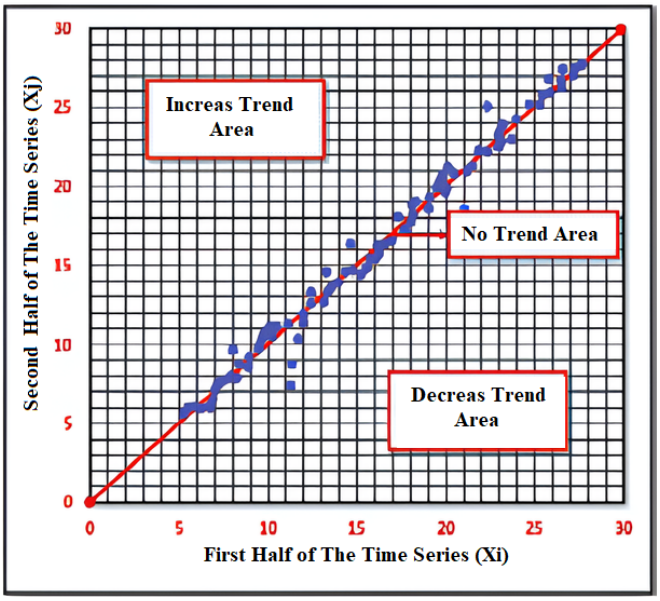


Figure 1. Sen Method [23].

3. Results and Discussion

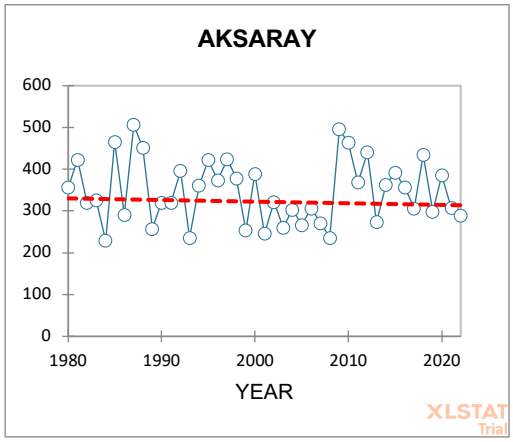
To determine the trends in seasonal and total precipitation data at the stations within the Konya Closed Basin, data from 1980-2022 were tested using the Mann-Kendall and Spearman's Rho methods, and the resulting values are presented in Table 1. According to these results, when examining annual precipitation amounts, a negative trend was observed in Aksaray and Nevşehir, while a positive trend was noted in Isparta, Mersin, and, to a very low extent, Ankara. However, these trends are not statistically significant.

Table 1. Results of Mann-Kendall and Spearman Tests for Precipitation Data in the Konya Closed Basin.

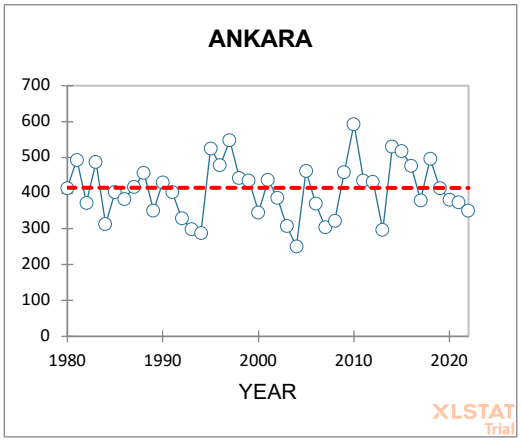
Method	Mann-Kendall and Spearman'ın Rho's				
Period	Spring	Summer	Autumn	Winter	Annual
Aksaray	-0.217/-0.309	0.050/0.088	-0.052/-0.075	0.127/0.183	-0.032/-0.048
Ankara	-0.059/-0.079	0.094/0.151	-0.102/-0.131	0.061/0.088	0.00/0.033
Isparta	0.00/-0.011	0.217/0.277	0.018/0.041	0.092/0.154	0.103/0.180
Mersin	0.010/ 0.011	0.085/ 0.125	-0.039/-0.063	0.050/0.090	0.039/0.061
Nevşehir	-0.104/-1.141	0.162/0.242	-0.229/-0.321	0.070/0.095	-0.081/-0.102
* %95 (a=0.05) indicates the significance level within the confidence interval					

As seen in Table 1, a statistically significant negative trend is observed in Aksaray during the spring season. In contrast, Isparta shows a statistically significant positive trend during the summer season. Lastly, Nevşehir exhibits a statistically significant negative trend in the autumn season. No significant trends were detected in the

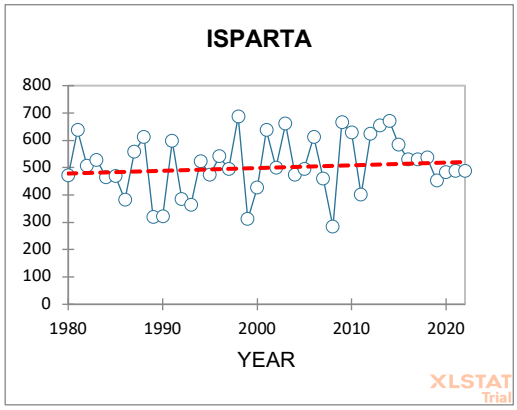
seasonal data for the remaining provinces. Furthermore, on an annual basis, no statistically significant trends were observed in any of the provinces.



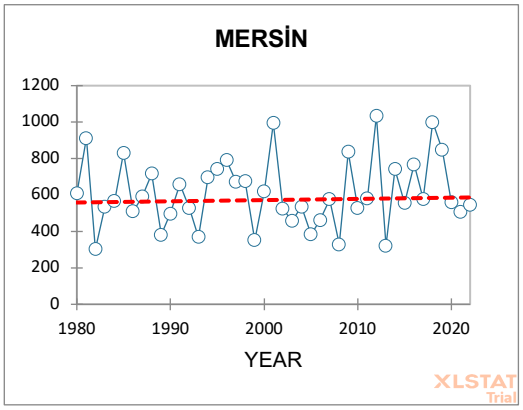
a



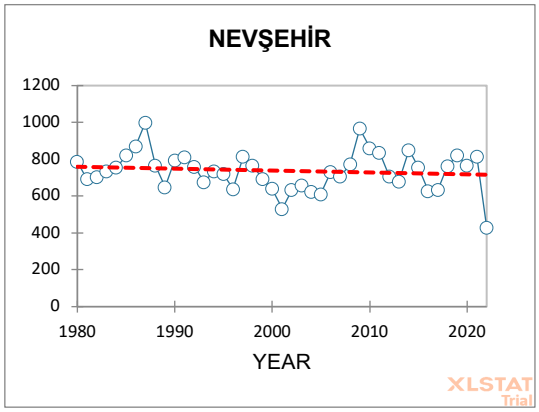
b



c



d



e

Figure 2 (a-e). Trend Directions of Precipitation in the Provinces within the Konya Closed Basin

The results presented in Figure 2(a-e) show that there is a high level of agreement between the Mann-Kendall and Spearman Rho tests. In Figure 2a, a negative precipitation trend was detected for Aksaray province in the

spring season, and both tests confirm this trend. When Figure 2b is examined, a positive precipitation trend is clearly observed in Ankara in the summer season, and this finding is supported by both test methods. When seasonal precipitation changes are considered for Isparta province in Figure 2c, it is understood that the general trends do not show a statistically significant difference. In Figure 2d, no significant change was detected in precipitation trends for Mersin province, and the test results also support this situation. Finally, in Figure 2e, the negative trend observed in Nevşehir in the autumn season was found to be statistically significant and was consistent with both the Mann-Kendall and Spearman Rho tests. These results reveal that precipitation trends in the examined regions show seasonal differences and that the statistical tests used generally produce consistent results.

The Şen trend analysis results presented in Figure 3(a-e) reveal a general trend regarding annual precipitation trends in the provinces examined. According to the analysis results, a decrease in annual precipitation is observed in Aksaray, Ankara, and Nevşehir provinces, while an increasing trend is determined in other provinces. While a negative precipitation trend is detected in Aksaray in Figure 3a, a similar decreasing trend is observed for Ankara in Figure 3b. When Figure 3e is examined, the decrease in annual precipitation in Nevşehir is remarkable. On the other hand, an increasing trend in precipitation is observed in Isparta in Figure 3c and Mersin in Figure 3d.

These findings are generally consistent with the statistical values obtained from the Mann-Kendall and Spearman Rho tests. However, when a holistic evaluation is made regarding the trend analysis, it is seen that the determined trends are not statistically significant. This situation reveals that long-term climate dynamics in regions with high precipitation variability should be analyzed in more detail.

The findings for the five stations within the Konya Closed Basin are presented in Table 2. Accordingly, in Ankara, both positive and negative trends are observed, indicating that the trend direction has varied over time. Similarly, in Mersin, both positive and negative trends are noted; however, a general observation reveals a consistent positive trend. Over the years, Nevşehir has also shown both positive and negative trends, with the trend direction fluctuating. In Aksaray, both positive and negative trends are evident, and the trend direction has also shifted. In contrast, Isparta exhibits an overall positive trend.

Table 2. Seasonal and Annual Rainfall Trends of Basin Stations (1980-2022).

Method	Mann-Kendall and Spearman'ın Rho's				
Period	Spring	Summer	Autumn	Winter	Annual
AKSARAY	↓	↑	↓	↑	↓
ANKARA	↓	↑	↓	↑	●
ISPARTA	●	↑	↑	↑	↑
MERSİN	↑	↑	↓	↑	↑
NEVŞEHİR	↓	↑	↓	↑	↓

↓ : Statistically Negative Decrease/Positive Increase

↑↓ : A statistically insignificant negative decrease and positive increase

● : No trend

Between 1980 and 2022, based on the average precipitation findings in the provinces of Aksaray, Ankara, Isparta, Mersin, and Nevşehir, it was determined that the trends in Ankara and Mersin were not statistically significant. On the other hand, statistically significant trends were identified in Aksaray during spring, in Isparta during summer, and in Nevşehir during autumn. Lastly, there is no annual trend in Ankara.

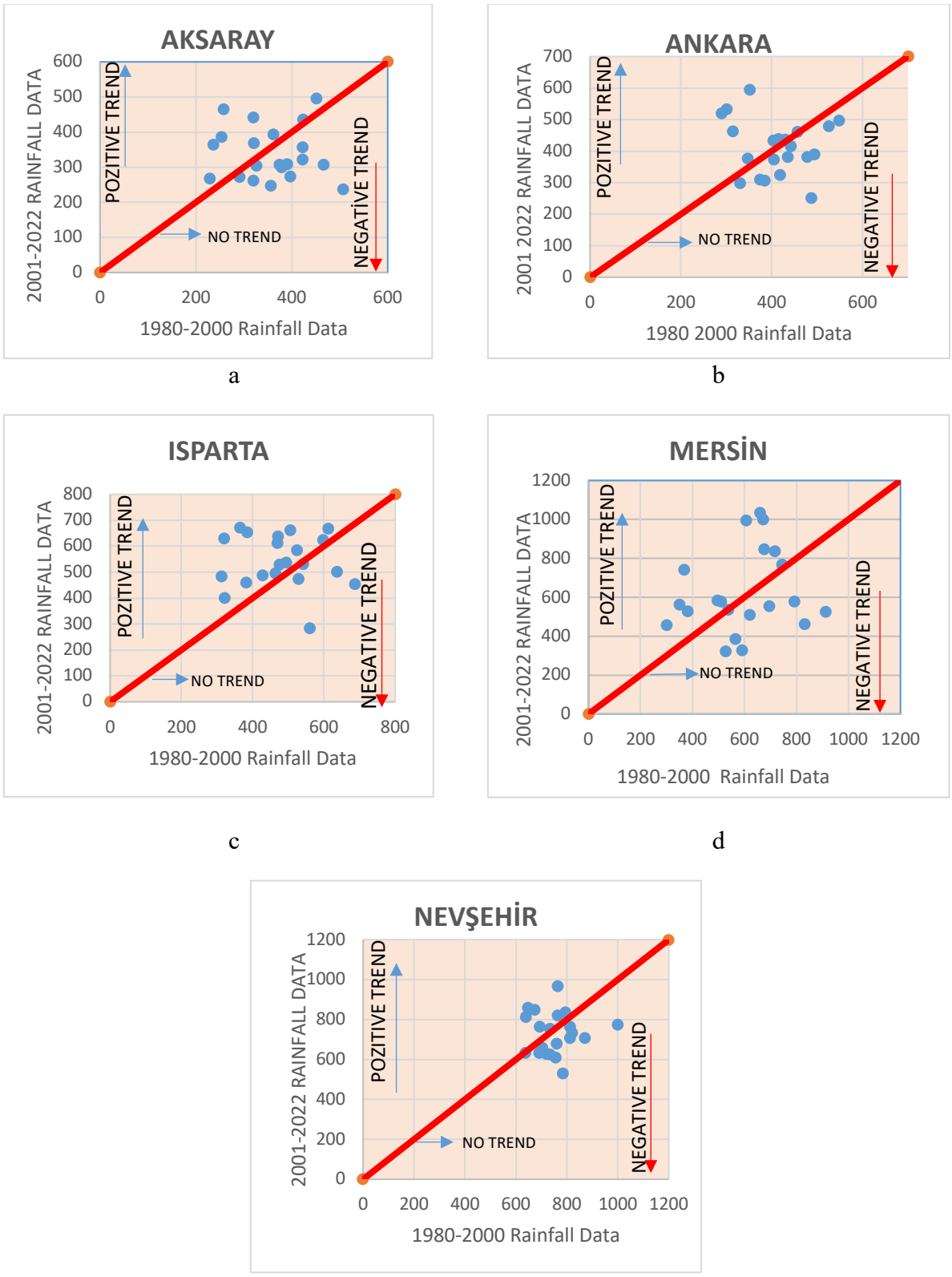


Figure 3 (a-e). Trend Directions of Rainfall Data According to the Şen Trend Test.

4. Conclusions

The ongoing changes in precipitation patterns driven by global warming continue to have significant effects on countries around the world. From a meteorological standpoint, precipitation and temperature are among the most affected variables by global warming. The accurate prediction of precipitation patterns is essential for the design and sizing of hydraulic structures, as well as for the effective management and development of water resources. Türkiye, with its 25 hydraulic basins, faces diverse climatic conditions, and the Konya Closed Basin, in particular, is recognized as one of the driest regions in the country. This study aimed to analyze the trends in seasonal and annual total precipitation data for the provinces of Aksaray, Ankara, Isparta, Mersin, and Nevşehir within the Konya Closed Basin over the period from 1980 to 2022.

The trend analyses were conducted using the Mann-Kendall and Spearman's Rho methods, revealing that annual precipitation amounts in Aksaray and Nevşehir exhibited a negative trend, whereas Isparta, Mersin, and to a lesser extent, Ankara showed a positive trend. However, none of these trends were statistically significant. Further analysis using the Innovative Şen method indicated that while precipitation decreased in Aksaray, Ankara, and Nevşehir, an increasing trend was observed in the remaining provinces. Notably, the statistical values derived from the Mann-Kendall and Spearman's Rho tests were found to be in close alignment, reinforcing the consistency of the results across the methods used.

Despite these observed trends, none of the patterns reached statistical significance, suggesting that the overall trend in precipitation within the Konya Closed Basin from 1980 to 2022 is not statistically meaningful. This implies that global warming has not yet exerted a significant impact on precipitation variability in this region. In other words, the changes in precipitation, whether increases or decreases, do not appear to be substantial enough to warrant significant concern at this time.

Given that the Konya Closed Basin is already characterized by arid conditions, it is imperative to focus on strategies that minimize water losses and leakage. To this end, the promotion of water-efficient agricultural practices, including conscious irrigation management, the expansion of dry farming techniques, and the efficient use of existing water resources becomes essential. These measures are critical for sustaining water availability and ensuring the long-term resilience of the basin, particularly in the face of potential future changes in climate conditions.

References

[1] Şevgin F, Öztürk A. Variation of temperature increase rate in the Northern Hemisphere according to latitude, longitude and altitude: the Turkey example. Sci Rep 2024; 14(1): 18207.

[2] Hussain S, Lu L, Mubeen M, Nasim W, Karuppannan S, Fahad S, et al. Spatiotemporal variation in land use land cover in the response to local climate change using multispectral remote sensing data. Land 2022; 11(5): 595.

[3] Ghimire U, Shrestha S, Neupane S, Mohanasundaram S, Lorphensri O. Climate and land-use change impacts on spatiotemporal variations in groundwater recharge: A case study of the Bangkok Area, Thailand. Sci Total Environ 2021; 792: 148370.

[4] Yuce MI, Esit M. Drought monitoring in Ceyhan basin. Turk J Appl Water Eng Res 2021; 9(4): 293-314.

[5] Topçu E. Testing of Drought Exceedance Probability Index (DEPI) for Turkey using PERSIANN data for 2000-2021 period. Ital J Agrometeorol 2021; 15-28.

[6] Gocic M, Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. Glob Planet Change 2013; 100: 172-182.

[7] Partal T, Kahya E. Trend analysis in Turkish precipitation data. Hydrol Process 2006; 20(9): 2011-2026.

[8] Lafdani EK, Nia AM, Pahlavanravi A, Ahmadi A, Jajarmizadeh M. Daily rainfall-runoff prediction and simulation using ANN, ANFIS and conceptual hydrological MIKE11/NAM models. Int J Eng Technol 2013; 1(1): 32-50.

[9] Patel J, Parekh F. Forecasting rainfall using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). Int J Appl Innov Eng Manag 2014; 3(6): 262-269.

[10] Sojitra M, Purohit R, Pandya P. Comparative study of daily rainfall forecasting models using adaptive-neuro fuzzy inference system (ANFIS). Curr World Environ 2015; 10(2): 529.

[11] Öztopal A, Şen Z. Innovative trend methodology applications to precipitation records in Turkey. Water Resour Manag 2017; 31: 727-737.

[12] Sarıoglugil A, Tutar A. On ruled surface in Euclidean space E^3. Int J Contemp Math Sci 2007; 2(1): 1-11.

[13] Coşkun S. Van gölü kapali havzasinda yağişlarin trend analizi. Mühendislik Bilim Tasarım Derg 2020; 8(2): 521-532.

[14] Aydın M, Öz A. Van Gölü Havzasında hidrometeorolojik verilerin eğilim analizi. Çukurova Univ Mühendis Fakültesi Derg 2021; 36(2): 441-456.

[15] Yaman Y, Önen F. Yağış-akış ilişkisinin GEP ve ANFIS ile modellenmesi. Dicle Univ Mühendis Fakültesi Mühendis Derg 2023; 14(3): 489-498.

[16] Yue S, Wang C. The influence of serial correlation on the Mann-Whitney test for detecting a shift in median. Adv Water Resour 2002; 25(3): 325-333.
[17] Soydan NG, Gümüş V, Şimşek O, Gerger R, Ağun B. Seyhan Havzası aylık ortalama akım ve yağış verilerinin trend analizi. Dicle Univ Mühendis Fakültesi Mühendis Derg 2016; 7(2): 319-327.
[18] Burn DH, Elnur MAH. Detection of hydrologic trends and variability. J Hydrol 2002; 255(1-4): 107-122.
[19] Bulut H, Yeşilata B, Yeşilnacar Mİ. Atatürk Baraj Gölü'nün bölge iklimi üzerine etkisinin trend analizi ile tespiti. GAP V. Mühendislik Kongresi 2006; 79-86.
[20] Kisi O, Ay M. Comparison of Mann-Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River. J Hydrol 2014; 513: 362-375.
[21] Şen Z. Innovative trend analysis methodology. J Hydrol Eng 2012; 17(9): 1042-1046.
[22] Şen Z. Trend identification simulation and application. J Hydrol Eng 2014; 19(3): 635-642.
[23] Çeribaşı G. Batı Karadeniz Havzasının yağış verilerinin yenilikçi Şen yöntemi ile analizi. J Environ Prot Ecol 2018; 19(1): 15-24.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 443-452, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1606527

Bitümlü Sıcak Karışımların Lineer Olmayan Kırılma Analizi

Ragip İNCE[1*], Buğrahan Fatih FURTANA[2]
[1,2] İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
[*1]rince@firat.edu.tr, [2] bffurtana@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 24/12/2024; Kabul/Accepted: 03/02/2025)

Öz: Son yıllarda beton, kaya ve asfalt gibi yarı-gevrek malzemelerin kırılma parametrelerini tayin etmek için, kübik veya silindirik kompakt numunelerin kullanımı artmaktadır. Diğer taraftan, asfalt ve kaya malzemelerinin kırılma mekaniği testlerinde yarım daire eğilme (YDE) numuneleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu testlerde yük-deformasyon ilişkisinin tespitinde genellikle makinenin yükleme çenesinin deformasyonu dikkate alınmaktadır. Bu nedenle sunulan çalışmada, daha gerçekçi deformasyon ölçümü sağlayan bir çerçeve sistemi geliştirilerek bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde test edilmiştir. Burada geliştirilen bu deney düzeneği sayesinde, bitümlü sıcak karışımlardan imal edilen çentikli YDE numunelerinin normal ve düşük sıcaktaki performansını değerlendirmek için kullanılması hedeflenmiştir. Bu çalışmanın çıktısı, aynı zamanda Ülkemizde son 5 yılda kış aylarında meydana gelen şiddetli depremler neticesinde, deprem bölgelerinde gözlemlenen karayolu hasarlarının kırılma mekaniği prensipleriyle analizini mümkün kılacağından, sadece ulusal değil uluslararası düzeyde güvenirliği yüksek tasarımların gerçekleştirilmesini sağlayacaktır. Bu çalışmada, oda sıcaklığında test edilen YDE numunelerinde lineer ve lineer olmayan kırılma tokluğu arasında %50 civarında farkın olduğunu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Bitümlü Sıcak Karışım, Kırılma mekaniği, Yarım Daire Eğilme (YDE) Numuneleri.

Non-linear Fracture Analysis of Hot Mix Asphalts

Abstract: The use of cubic or cylindrical compact samples has been increasing in order to determine the fracture parameters of quasi-brittle materials such as concrete, rock and asphalt. On the other hand, semi-circular bending (SCB) samples are widely used in fracture mechanics tests of asphalt and rock materials. However, in these fracture tests, the deformation of the stroke of the test machine is commonly taken into account in measuring the load-deformation relationship. Therefore, a frame system, which provides more permanent deformation, was developed and subsequently tested on bituminous hot mixture samples. The test apparatus developed in the presented work will be used to evaluate the performance of notched SCB samples manufactured from bituminous hot mixtures at normal and low temperatures. The output of this study will also enable the analysis of the road damages observed in earthquake zones as a result of the severe earthquakes which occurred in the winter months in the last 5 years in our country with the principles of fracture mechanics, and will enable the realization of highly reliable designs not only at the national but also at the international level. In this study, it was determined that there was a difference of around 50% between linear and non-linear fracture toughness in YDE specimens tested at room temperature.

Key words: Hot Mix Asphalt, Fracture mechanics, Semi-Circular Bending (SCB) Samples.

1. Giriş

Beton, asfalt ve kaya gibi yarı-gevrek malzemelerden üretilmiş yapı elemanlarının göçmesini tanımlamak için kırılma mekaniği tabanlı lineer olmayan kırılma modelleri geliştirilmiştir. Bununla beraber, tersinir yüklemelere maruz beton, asfalt ve kaya gibi malzemelerden üretilen yapı elemanlarında hasar oluşmadan önce elemanın kritik kesitlerinde çatlaklar gelişebilmekte ve taşıyıcı eleman yumuşama adı verilen dayanım kaybına maruz kalabilmektedir. Çatlamış veya yerel hasarlara uğramış bir taşıyıcı eleman, sadece kırılma mekaniği modelleri veya yaklaşımları kullanılarak çözümlenebilir [1-3].

Yukarıdaki bilgilerin ışığında kırılma mekaniği, taşıyıcı elemanın bünyesinde yer alan gerilme yığılmasını arttıran boşluk ve çatlak gibi kusurları dikkate alarak bu kusurların kritik seviyeye erişebileceği durumları tespit etmeye çalışır. 1920'lerde Griffith [4] tarafından bünyede var olan bir çatlağın gelişmesi için gerekli olan enerjiyi yeni oluşacak yüzey enerjisi ile dengede olması gerektiğini öne sürerek Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) temelini atmıştır. 1960'larda Kaplan [5] tarafından, LEKM'nin prensipleri harç (ince daneli) ve beton (iri daneli) karışımlara uygulanmıştır. Bununla beraber, 1970'lerde yapılan birçok laboratuvar çalışması, LEKM teorinin harç ve beton gibi yarı-gevrek malzemelere uygulanamayacağını ortaya koymuştur. Bu olumsuzlukları dikkate alan

* Sorumlu yazar: rince@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-9837-8284, [2] 0009-0007-7171-9089

beton teknolojisi sahasında çalışan uzmanlar ve bilim adamları, lineer olmayan kırılma mekaniği modellerini ileri sürmüşlerdir [1, 6-10].

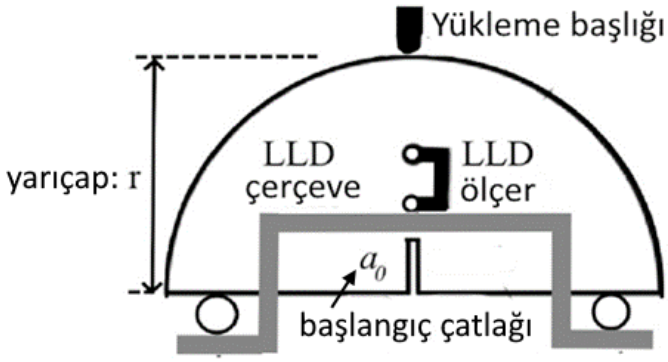
Bu kırılma modelleri, çatlaklı bir taşıyıcı elemanda çatlağın gerisinde artan yüklemelerle birlikte gelişen ve hala gerilme transferini temin eden, kırılma süreci bölgesinin (KSB) adı verilen bölgeyi dikkate almaktadır ve yarı-gevrek malzemeleri simule etmek için en az iki kırılma parametresini kullanırlar. Hem yapı elemanlarının boyutlandırılmasında kullanılan şartnameler ve hem de LEKM tarafından dikkate alınmayan bu yumuşama bölgesi yarı-gevrek malzemelerde KSB uzunluğu 100 mm gibi büyük değerler alabilmektedir [6]. Buna karşın metallerde artan yüklemelerle gelişen akma (plastik) bölgesi (KSB) çentiğin arkasında çok küçük yer işgal etmektedir.

Yarı-gevrek malzemelerin analizinde kullanılan kırılma teorileri, kohezif çatlak yaklaşımları [6] ve eşdeğer elastik çatlak modelleri [7-10] şeklinde iki ayrı kategoride incelenebilir. Birinci kategorideki modeller, KSB'i çatlak ucunda azalan ve çatlağa basınç yapan bir gerilme dağılımı ile modellerken, eşdeğer elastik çatlak modelleri başlangıç çatlak uzunluğundan (a_0) daha büyük olan efektif bir çatlak uzunluğu (a_e) kullanarak modellemektedir.

Nallathambi ve Karihaloo [2] tarafından önerilen EÇM'ne göre yarı-gevrek malzemeli bir yapının göçmesi kırılma tokluğu parametresi K^e_{Ic} ve efektif çatlak uzunluğu a_e gibi iki parametre ile tanımlamaktadır. Bu kırılma modeli, kapalı devre deney ekipmanına ihtiyaç duymaktadır. Bu deney düzeneğinde, mesnet seviyesinde kiriş üzerine yerleştirilen rijit bir çerçeve üzerine bağlanan lineer deplasman ölçer (LVDT) çentik ağzı seviyesindeki çökmeyi ölçmektedir. Bu ölçüm sayesinde yükleme sırasında yerel deformasyona uğramayan iki kısım arasındaki relatif deplasmanı kullanarak kirişin orta noktasındaki çökmeyi belirlemektedir.

Diğer taraftan bitümlü sıcak karışımların kırılma mekaniği testlerinde, yarım daire eğilme (YDE) numuneleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 1'de detaylandırıldığı gibi, bu numunelerin kırılma mekaniği testlerinde rijit bir çerçeve ile numune üzerindeki sabit bir nokta arasına yerleştirilen yükleme hattı deformasyon ölçer (LLD) ile yük-deformasyon ilişkisi tayin edilmektedir [1]. Bu deney düzeneği kompleks ve pahalı olup, Dünyada sadece belirli firmalar tarafından üretilen özel ekipmanlara ihtiyaç duymaktadır.

AASHTO [1]'nun kompleks ve tahribatlı yönteminin zorluğundan dolayı, uygulamada yük altındaki deformasyon ölçümü yapılır. Ancak yükün etkidiği noktalardaki yerel deformasyonlardan dolayı yük-deformasyon eğrisi hata içermektedir. Bu çalışmada, Şekil 1a'da ki kirişler için kullanılan deney düzeneği YDE numunelerine adapte edilmesi amaçlanmıştır. Bu şekilde AASHTO [1] tarafından önerilen test tekniğine alternatif daha ucuz ancak güvenilir bir deney düzeneği geliştirilmesi düşünülmektedir.



Şekil 1. AASHTO [1] YDE deney düzeneği.

Beton, asfalt ve kaya malzemelerden oluşan bir taşıyıcı elemanı kırılma mekaniği tabanlı analiz etmek için, ilk olarak elemanda kullanılan malzemenin kırılma karakteristiklerini tespit etmek gerekir. Bu tip yarı-gevrek malzemelerin kırılma karakteristiklerinin tespit etmek için ise metallerde olduğu gibi çentikli üç noktalı eğilme numunelerinin kullanımı yaygındır. Bununla birlikte kiriş numunesinin asfalt ve kayaçlarda kullanılan alternatif kompakt modeli yarım daire eğilme (YDE) numunesidir [1, 3, 11]. Bu tip kompakt numuneler bazı avantajlara sahiptir [12-19]:

•Bu numuneler, küçük olup hesaplarda numune ağırlığı ihmal edilebildiğinden özellikle boyut etkisi laboratuvar çalışmalarında büyük kolaylık sağlar.
•Bu numunelerin kalıpları, malzemenin dayanımının tespitinde kullanılan kalıplarıyla aynı olduğundan dolayı şantiyede şartlarında büyük kolaylık sağlar.

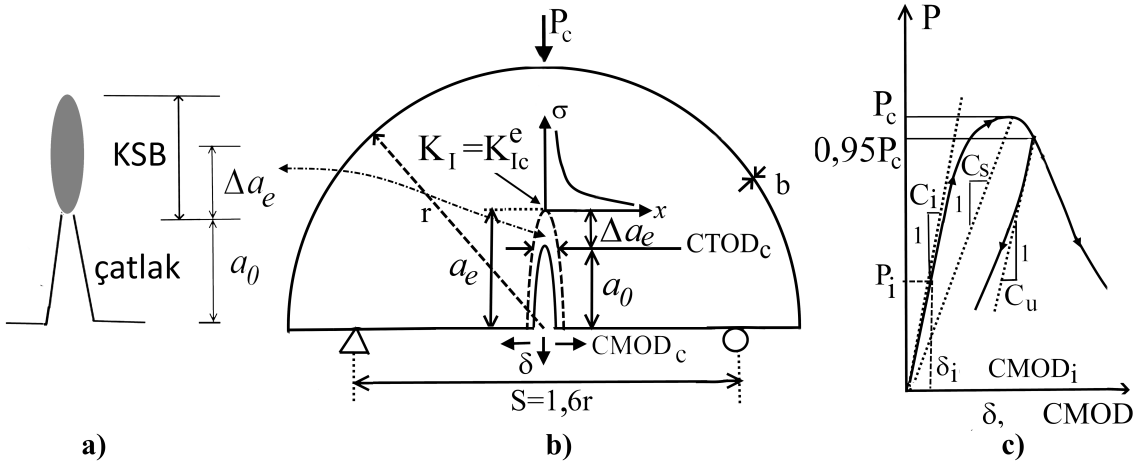
• Eski bir yapıdan alınan karot numuneler ile kompakt numune üretilerek, yapının göçme analizi kırılma mekaniğine göre kolaylıkla yapmak mümkün olabilmektedir.

Şekil 2a'da görüldüğü gibi çatlaklı yarı-gevrek malzemelerde çatlağın arkasında oluşan ve ilerleyen çatlak kesitinde gerilme transferini mümkün kılan, kırılma süreci bölgesinin (KSB) varlığı bu malzemelerin lineer olmayan davranışının temelini oluşturmaktadır. Yarı-gevrek malzemeler için bu bölgeyi karakterize eden birçok lineer olmayan kırılma mekaniği modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller parametreleri tayin etmek için çentikli kiriş numunelerin kullanımını öngörmekle birlikte, Şekil 2b'de görülen çentikli YDE numunesi, prensip olarak çentikli kirişin kompakt modeli olup aşağıda tanımlanan modeller için de bu numuneyi kullanmak mümkündür [3]. Modeller temelde pik yükte çentik arkasında oluşan eşdeğer bir KSB bölgesi uzunluğunu (Δa_e) tayin etmek için LEKM bağıntılarını kullanırlar (Şekil 2b). Sonuç olarak pik yükte a_0 uzunluğundaki başlangıç çatlağı gelişerek efektif çatlak boyuna $a_e = a_0 + \Delta a_e$ erişecektir. Bu efektif çatlak boyuna karşılık gelen kırılma tokluğu değeri ise malzemenin lineer olmayan kırılma tokluğu olarak adlandırılmaktadır.

Lineer olmayan kırılma mekaniği yaklaşımları içerisinde, İki parametreli model [7], kırılma tokluğu K^s_{Ic} ve kritik çatlak ucu açılımı CTODc gibi iki parametre ile betonun kırılmasını tahmin etmektedir. Yaklaşım, bu parametreleri deneysel olarak komplians yaklaşımıyla tayin etmektedir. Burada kırılma parametreleri, kapalı devre deney ekipmanı kullanarak, numunenin Yük-Çatlak Ağzı Açılımı (P-CMOD) ilişkisinden faydalanarak hesaplar. Şekil 2c'de görüldüğü gibi P-CMOD eğrisinde başlangıç ve yük boşaltma komplians değerleri (C_i ve C_u) gerekli LEKM bağıntılarına yerleştirilerek K^s_{Ic} ve $CTOD_c$ değerleri hesaplanır.

Nallathambi ve Karihaloo [2] tarafından önerilen EÇM göre beton bir yapının göçmesini kırılma tokluğu parametresi KeIc ve efektif çatlak uzunluğu ae gibi iki parametre ile tanımlamaktadır. Bu yöntemde parametreler, iki parametreli modelden farklı olarak yine kapalı devre deney ekipmanı ile çentikli kirişin yük-deplasman (P-δ) ilişkisi tabanlı sekant komplians (C_s) yöntemiyle tayin edilmektedir (Şekil 2c). Bazant ve Kazemi [8], yine test elemanlarının pik yüklerini kullanan Boyut Etkisi Modelini geliştirmiştir. Bu modele göre, sonsuz büyüklükteki bir yapıdaki göçme G_f kırılma enerjisi ve c_f kırılma süreci bölgesi uzunluğu ile tanımlamaktadır. Yapılan araştırmalar iki parametreli kırılma modeli ile boyut etkisi modelinin betonun kırılma parametreleri açısından özdeş sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Çift-K Modeli [9], beton yapılarda kırılmayı modellemek için, başlangıç kırılma tokluğu K^{ini}_{Ic} ve kritik kırılma tokluğu K^{un}_{Ic} gibi iki parametre kullanmaktadır. Yöntemin diğer kırılma modellerinden en önemli farkı, diğer kırılma modellerinde sadece çatlağın ani gelişmesini dikkate alan parametreler ile beton yapılar modellenirken, Çift-K yönteminde buna ilave olarak çatlağın yayılmaya başlama kriterini de dikkate almasıdır. Bu model iki parametreli modele benzer olarak P-CMOD tabanlı komplians yaklaşımıyla parametreleri hesaplamaktadır. Ancak burada Şekil 2c'de detaylandırıldığı gibi C_u yük boşaltma komplians değeri yerine C_s sekant komplians değeri kullanılmaktadır ve kapalı devre bir sisteme ihtiyaç duymamaktadır. Yapılan araştırmalar iki parametreli kırılma modeli ile Çift-K modelinin betonun kırılma parametreleri açısından özdeş sonuçlar verdiğini göstermiştir.



Şekil 2. a) Kırılma süreci bölgesi (KSB) b) Çatlaklı YDE numunesi c) P-δ veya P-CMOD eğrileri.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada TÜPRAŞ Batman rafinerisinden temin edilen 1,033 yoğunluğa sahip B70/100 sınıfı bitüm kullanılmıştır. 70/100 iklim şartlarından dolayı Türkiye de en çok kullanılan bağlayıcıdır. Çalışmada kullanılan bitümün genel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Saf bitümün genel özellikleri.

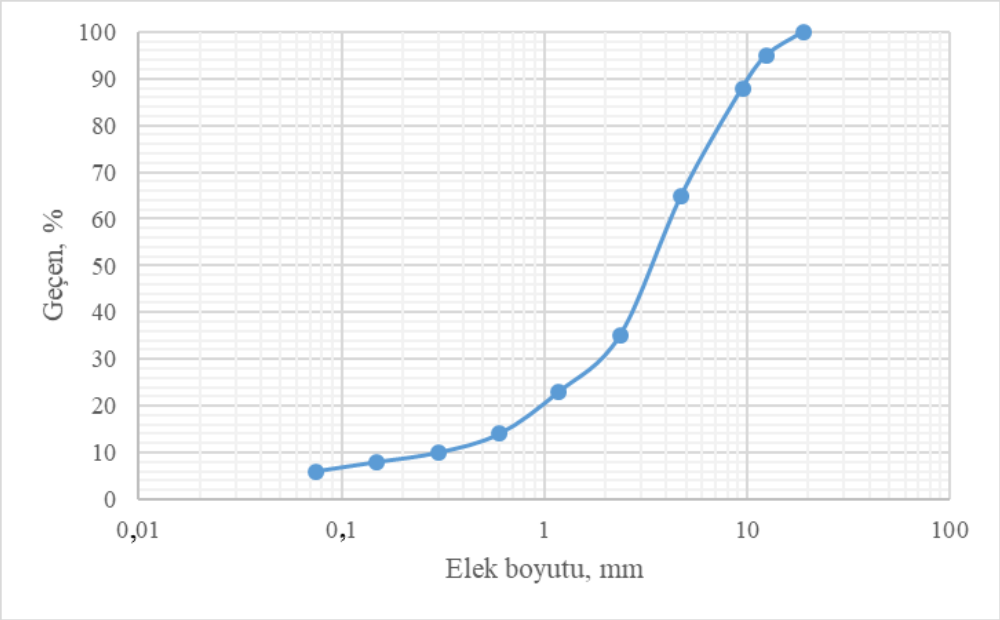
Özellikler	Birim	Standart	Sonuçlar
Penetrasyon	mm^{-1}	EN 1426	87,4
Yumuşama noktası	°C	EN 1427	52,6
Parlama noktası	°C	EN ISO 2719	230
Viskozite 135°C /165°C	cP	ASTM D4402	562,5/162,5

2.2. Bitümlü Sıcak Karışımların Hazırlanması

Karışım numuneleri Tablo 2'de verilen agrega gradasyonu esas alınarak hazırlanmış ve saf karışımın tasarım bitüm içeriği %4,67 olarak belirlenmiştir. Şekil 3'te agrega gradasyon eğrisi verilmiştir. Hazırlanan karışım 15 cm çapında, yaklaşık 6 cm yüksekliğinde silindirik bitümlü sıcak karşım numuneleri olarak 600±18 kPa statik basınç 1,25±0,02°'lik eğim açısına sahip döner bir kompaktör kullanılarak %4 boşluk oranında sıkıştırılmıştır. Daha sonra 15 cm numuneler ortadan ikiye kesilip, çentikler açılarak yarım daire numuneleri hazırlanmıştır. Numunelerin orta noktasından yaklaşık 6 mm derinliğinde çentik açılmıştır. Tablo 3'te çalışmada kullanılan agregaların fiziksel özellikleri detaylandırılmıştır.

Tablo 2. Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan agrega gradasyonu.

Elek Boyutu (mm)	19	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
Geçen (%)	100	95	88	65	35	23	14	10	8	6



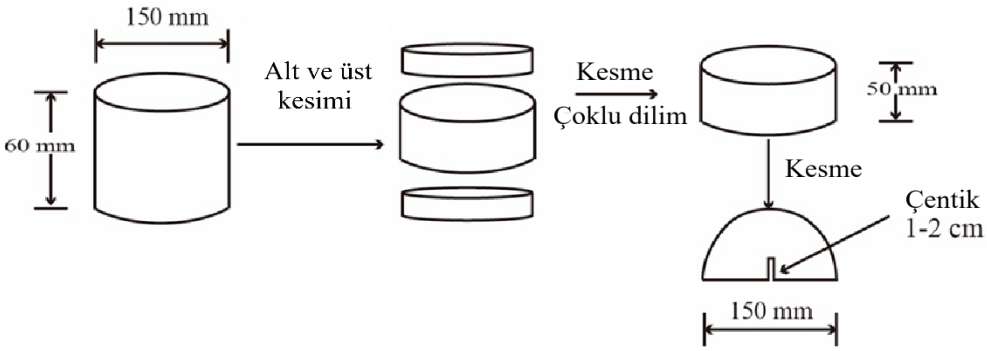
Şekil 3. Karışımda kullanılan agrega yığınının gradasyon eğrisi.

Tablo 3. Agregaların fiziksel özellikleri.

Özellikler	Standart	Şartname Sınırı	İri	İnce	Filler
Los Angeles (%)	ASTM D131	Maks. 30	29,2	-	-
Mikro-Deval (%)	ASTM D6928	Maks. 15	17,4	-	-
Don etkisi	ASTM C88	Maks. 18	16,7	-	-
Metilen mavisi (g/cm^3)	ASTM C837	Maks. 1.5	0,5	-	-
Özgür ağırlık (g/cm^3)	ASTM C127		2,626	-	-
Özgür ağırlık (g/cm^3)	ASTM C128		-	2,661	-
Özgür ağırlık (g/cm^3)	ASTM D8		-	-	2,689

2.3. Yarım Daire Eğilme (YDE) Numunelerin Hazırlanması

YDE test numunelerini hazırlama prosedürleri Şekil 4'te gösterilmektedir. Şekil 5'te ise bu araştırmada kullanılan numunelere çentik aşma işlemi görülmektedir. 60 mm yüksekliğinde ve 150 mm çapında uzun silindirik asfalt numuneleri yoğurmalı pres ile sıkıştırılmıştır. Uzun numunelerin üst ve alt yüzeylerinin, yüzeylerde bulunan üniform olmayan hava boşluğu olasılığını ortadan kaldırmak için her iki uçtan 5 mm kesilerek, 50×150 mm boyutlarında numuneler elde edilmiştir. Daha sonra numuneler iki yarıya bölündü ve YDE test numuneleri oluşturmak için ortalarına çentikler açılmıştır. Numune kalınlığı ve karışım tasarımından bağımsız olarak 150 mm'lik numuneler için 6 mm'lik çentik uzunluğu seçilmiştir. Çentik kalınlığı yaklaşık 2 mm'dir.



Şekil 4. YDE numunelerinin hazırlanma şeması.

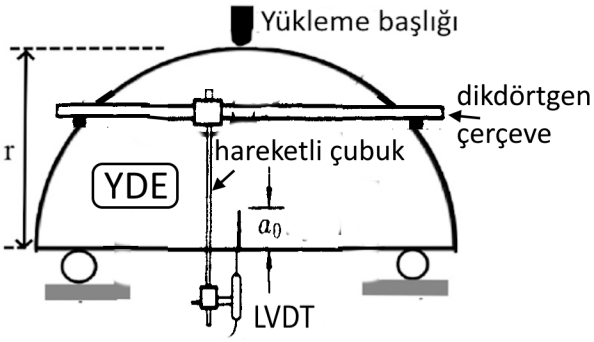


Şekil 5. YDE numunelerinin hazırlanışı.

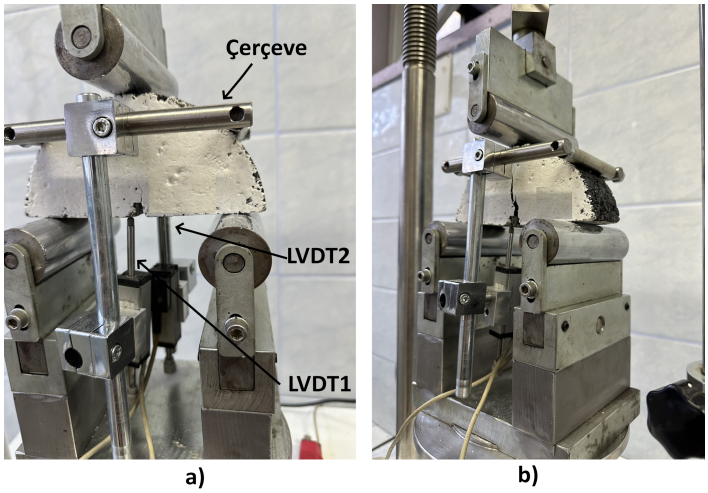
2.4. YDE Numunelerinin Testi

Betonun kırılma mekaniğinde popüler bir metot olan efektif çatlak modelinde kirişler için kullanılan deplasman çerçevesi Şekil 6'da detaylandırıldığı gibi YDE numunesine adapte edilmiştir. Rijit dikdörtgen şeklinde tasarlanan çerçeve üzerinde kayar halde bulunan çubuğun ucuna monte edilecek LVDT sayesinde çentik altı deplasmanı mesnet üzerindeki çerçeve mesnedi baz alınarak belirlenmiştir.

YDE testi oda sıcaklığında yapılmıştır. Bitümlü sıcak karışım numunelerinin lineer olmayan kırılma tokluğu değeri komplians yöntemine göre belirlenmiştir. Numuneler 0,5 mm/dk. hızla yüklenmiştir [3]. Numunelere ait deney detayı Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 6. YDE numunesinin yük-deplasmanının tayini için önerilen çerçeve sistemi.



Şekil 7. YDE numune deneyi **a)** Pik yükteki durum **b)** Göçme durumu.

3. YDE Test Sonuçlarının analizi

Asfalt, beton ve kayaçların kırılma mekaniği uygulamalarında yaygın olarak kullanılan yarım daire eğilme (YDE) numunesi, ilk olarak Lim vd. [20] tarafından kırılma tokluğu değerleri elde edilmiştir. Bununla beraber bitümlü sıcak karışımın kırılma mekaniği üzerine detaylı çalışmalar Marasteanu [21] tarafından yapılmıştır. Bu kapsamdaki çalışmalar, kırılma enerjisi ve kırılma tokluğu üzerinedir. Kırılma enerjisi tabanlı yaklaşım lineer-olmayan kırılma mekaniği kapsamında olmakla birlikte, kırılma tokluğu tabanlı yaklaşım için lineer elastik kırılma mekaniği prensipleri kullanılmaktadır. Bununla beraber, lineer olmayan kırılma mekaniği yaklaşımları asfalt ve beton gibi elasto-plastik (yarı-gevrek) malzemelerin kırılmasını modellemek için en az iki parametrenin kullanılmasını önermektedir.

Yarı-gevrek malzemelerin kırılma mekaniğinde yaygın olarak kullanılan efektif çatlak modeli (EÇM), kırılma tokluğu ve efektif (veya kritik) çatlak boyu olmak üzere çatlaklı yapıları modellemektedir. EÇM'e göre, malzemenin kırılma parametrelerini hesaplamak için çentikli üç noktalı eğilme numunelerinin yük-deplasman ilişkisini kullanmaktadır. Modelde, belirli bir başlangıç çatlak uzunluğuna sahip numunenin maksimum yüküne karşılık gelen sekant modülü, farklı bir başlangıç çatlak uzunluklu kirişin dinamik modülüne eşdeğer olduğu duruma karşılık gelen başlangıç çatlak uzunluğu değeri efektif çatlak uzunluğu olarak kabul etmektedir. Bunun için model bir düzeltme faktörüne ihtiyaç duymaktadır.

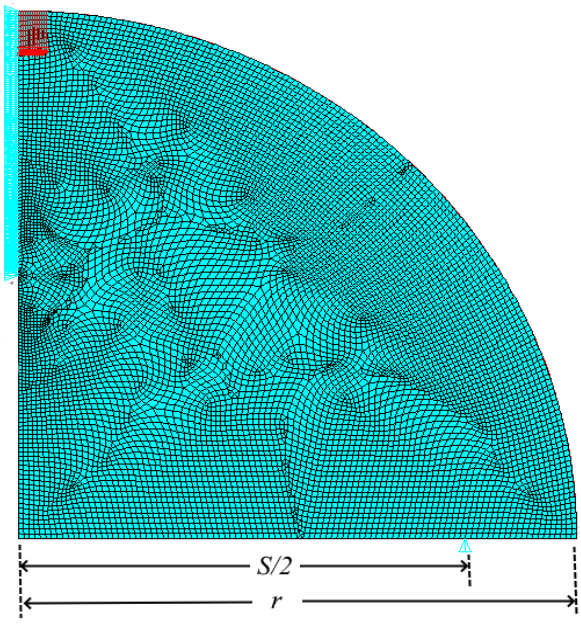
Son zamanlarda İnce vd. [3], YDE numunelerinin lineer olmayan kırılma parametrelerini tayin etmek için, Şekil 8 de görüldüğü gibi ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanarak modellediler. Sonuç olarak yükleme açıklığı/numune çapı oranı 0,8 olan YDE numuneleri için aşağıdaki LEKM bağıntılarını (Denklem 1, 2 ve 3) geliştirdiler:

$$K_{Ic} = \frac{P_c}{2br}\sqrt{\pi a_e}\,\frac{5{,}18 - 13{,}878\alpha + 27{,}145\alpha^2 - 26{,}887\alpha^3 + 10{,}321\alpha^4}{(1-\alpha)^{1.5}} \tag{1}$$

$$\delta = \frac{P\alpha}{2bE} D_1(\alpha) \tag{2}$$

$$D_1(\alpha) = \frac{1}{0{,}1323\alpha - 0{,}153\alpha^2 - 0{,}1169\alpha^3 + 0{,}1591\alpha^4 - 0{,}0212\alpha^5} \tag{3}$$

Burada P_c, pik yük, b numune genişliği, r numunenin yarıçapı, a_e efektif çentik boyu, $\alpha=a/r$ relatif çentik boyu, P yük ve E malzemenin elastisite modülüdür. Ince vd. [3] daha sonra, literatürde YDE numunelerinin kullanıldığı 8 adet çalışmayı komplians prensiplerini kullanarak modellediler. Bu çalışmalarda, YDE numunesinin P-δ ilişkisi, AASHTO [1] yöntemine göre veya makine çene deplasmanı teknikleriyle tayin edilmiştir. Ince vd. EÇM tabanlı komplians yaklaşımıyla malzemenin kırılma tokluğunu hesaplamışlardır.



Şekil 8. YDE numunesinin sonlu eleman modeli.

Geliştirilen komplians yönteminde, ilk olarak malzemenin elastisite modülü hesaplanmıştır. Bunun için YDE numunesinin P-δ ilişkisinin artan kısmında $P_c/3$ ile $2P_c/3$ aralığındaki veri çiftleri (P_i, δ_i) üzerine uygulanan lineer

regresyon denkleminden C_i komplians değeri (regresyon eğrisi denkleminde eğimin çarpmaya göre tersi) hesaplanmıştır. Sonuç olarak elastisite modülü (E) (Denklem 4) ve Denklem (2)'den aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$E = \frac{\alpha_0}{2bC_i} D_1\left(\alpha_0\right), \qquad C_i = \frac{\delta_i}{P_i} \tag{4}$$

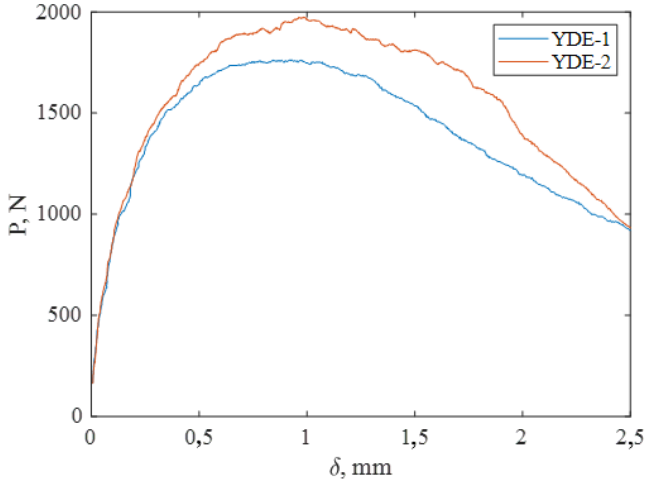
Sekant komplians değeri ise pik yüke karşılık koordinatlardan $C_s=\delta_c/P_c$ (burada δ_c pik yükteki deplasman değeri olmak üzere) şeklinde hesaplanmıştır. Pik yükte KSB ile orantılı olduğu kabul edilen kritik çatlak uzama değeri veya efektif (veya kritik) çatlak boyu (a_e), YDE numunesinin başlangıçtaki elastisite modülü ile pik yükteki elastisite modülünün eşdeğerliliği kullanılarak hesaplanabilir. Bununla beraber uygulamada efektif çatlak boyu yerine relatif efektif çatlak boyu değeri kullanılır ve bu değer Denklem (5)'ten deneme-yanılma yöntemiyle veya Newton yöntemiyle tayin edilebilir:

$$\alpha_e = \alpha_0 \frac{C_s D_1\left(\alpha_0\right)}{C_i D_1\left(\alpha_e\right)} \tag{5}$$

Şekil 9'da bir adet silindirik asfalt karşımdan elde edilen iki YDE numunesine ait yük-deplasman diyagramları görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi numunelerin başlangıç eğimleri (dolayısıyla elastisite modülü) birbirine oldukça yakın olmakla birlikte, asfaltın agregalı kompozit yapısından dolayı (heterojen) pik yük değerlerinde biraz farklılık görülmektedir.

Tablo 4'te numune geometrilerine (sırasıyla başlangıç çatlak boyu a_0, numune genişliği b ve numune karakteristik boyutu r) ve yük-deplasman diyagramlarına ait karakteristikler (sırasıyla pik yük P_c, pik yüke karşılık gelen deplasman değeri δ_c, başlangıç komplians değeri C_i ve sekant komplians değeri C_s) her bir numune için verilmiştir. Tablo 5'te ise MATLAB programı yardımıyla hesaplanmış kırılma karakteristikleri (sırasıyla relatif başlangıç çentik boyu α_0, relatif efektif çentik boyu α_e, elastisite modülü E, LEKM'e göre hesaplanmış kırılma tokluğu değeri K_{Ic}-LEKM, komplians yöntemine göre hesaplanmış lineer olmayan kırılma tokluğu değeri K_{Ic} ve kırılma enerjisi G_f) verilmiştir. Bazant tarafından önerilen boyut etkisi modeli [8] tabanlı kırılma enerjisi (G_f) LEKM'nin temel formülasyonu (Denklem 6) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$G_f = \frac{K_{Ic}^2}{E} \tag{6}$$



Şekil 9. YDE numunelerinin yük-deplasman (P-δ) diyagramları.

Tablo 5'ten açıkça görülmektedir ki, numunelerin E ve K_{Ic} değerleri birbirine oldukça yakın değerler çıkmıştır. Diğer taraftan oda sıcaklığında test edilen numunelerin düşük sıcaklıkta test edilen numunelere nazaran LEKM tabanlı kırılma tokluğu değeri ile lineer olmayan kırılma tokluğu arasındaki farkın oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi oda sıcaklığındaki numune daha sünek olup kritik yükte KSB'nin boyutunun ihmal edilemeyecek mertebede olmasıdır [1, 3]. Daha önceki çalışmanın sonuçlarına paralel olarak buradaki çalışmada vurgulamaktadır ki düşük sıcaklıktaki bitümlü sıcak karışımların lineer ve lineer olmayan kırılma toklukları arasındaki fark %5 değerini geçmezken, oda sıcaklığında bu fark %50'nin üzerinde çıkmaktadır.

Tablo 4. Numune geometrilerine ve yük-deplasman diyagramlarına ait karakteristikler.

Numune	a_0 (mm)	b (mm)	r (mm)	P_c (N)	δ_c (mm)	C_i (mm/N)	C_s (mm/N)
YDE-1	23,1	49,5	72,6	1762	0,843	0,000234	0,000524
YDE-2	23,3	51,0	74,3	1974	0,962	0,000254	0,000529

Tablo 5. Numunelerin kırılma karakteristikleri.

Numune	α_0	α_e	E (MPa)	K_{Ic}-LEKM (MPa√m)	K_{Ic} (MPa√m)	G_f (N/m)
YDE-1	0,132	0,377	228	0,198	0,376	621
YDE-2	0,124	0,351	199	0,207	0,378	716

4. Sonuçlar

Sunulan deneysel ve teorik çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Son yıllarda yarı-gevrek malzemelerin kırılma parametrelerini tayin etmek için, kübik veya silindirik kompakt numunelerin kullanımı artmaktadır. Şimdiye kadar YDE numuneleri malzemenin lineer elastik kırılma tokluğu veya kırılma enerjisini tayin etmek için kullanılmıştır. Kırılma enerjisinin tayininde ise kompleks ve pahalı deney ekipmanı kullanılmakta veya hatalı yükleme başlığı deformasyon ölçümü tekniği kullanılmaktadır. Burada önerilen teknik ile hem düşük sıcaklıkta hem de oda sıcaklığında YDE numuneleri aynı test tertibatı ile test edilebilecektir.
- Sunulan çalışmada, bu tip numunelerin betonun kırılma mekaniğinde popüler lineer olmayan kırılma mekaniği modellerine göre komplians tabanlı analizinin basit ve ucuz deney ekipmanlarıyla yapılması amaçlanmıştır. Bitümlü sıcak karışımın kırılma mekaniği uygulamalarında yaygın olarak kullanılan çentikli yarım daire eğilme (YDE) numunesi üzerine yapılan kırılma mekaniği tabanlı çalışmalar, kırılma enerjisi ve kırılma tokluğunu dikkate almaktadır. Kırılma enerjisi tabanlı yaklaşım lineer-olmayan kırılma mekaniği kapsamında olmakla birlikte, kırılma tokluğu tabanlı yaklaşım için lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) kullanılmaktadır. Bununla beraber, gerçek malzemeler lineer elastik davranmaz ve bu sebeple asfalt ve beton gibi elasto-plastik davranan bir kompozit LEKM ile tam olarak modellenemez.
- Sunulan çalışmanın diğer bir amacı, şimdiye kadar bitümlü sıcak karışımlarda, LEKM tabanlı olarak hesaplanan kırılma tokluğu parametresinin yarı-gevrek malzemelerin kırılma mekaniğinde popüler bir metot olan efektif çatlak modeline göre tayin edilmesidir. Çünkü mevcut deney ekipmanı kompleks olup dünyada sadece belirli firmalar tarafından üretildiğinden pahalıdır. Bu sebeple geliştirilen basit deney ekipmanı ile milli servet yurt dışına çıkmayacaktır.
- Burada önerilen yöntem, bitümlü sıcak karışımlardan imal edilen çentikli YDE numunelerinin normal ve düşük sıcaktaki performansını değerlendirmek için geliştirilmiştir. Bu deneysel ve teorik çalışmanın çıktısı, aynı zamanda Ülkemizde son 5 yılda kış aylarında meydana gelen şiddetli depremler neticesinde, deprem bölgelerinde gözlemlenen karayolu hasarlarının kırılma mekaniği prensipleriyle analizini mümkün kılacağından sadece ulusal değil uluslararası düzeyde güvenirliği yüksek tasarımların gerçekleştirilmesini sağlayacaktır.
- Uygulamada kaya ve bitümlü sıcak karışımların kırılma tokluğunun tespitinde yaygın olarak YDE numuneleri kullanılmakla birlikte, kırılma test sonuçları LEKM tabanlı olarak analiz edilmektedir. Bununla beraber bu çalışma, oda sıcaklığında test edilen YDE numunelerinde lineer ve lineer olmayan kırılma tokluğu arasında %50 civarında farkın olduğunu göstermektedir. Bu fark, oda sıcaklığında test edilen numunede çatlağın gerisinde gelişin KSB bölgesinin büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Oysa

düşük sıcaklıklarda KSB çok küçük olduğundan bu farkın %5'i geçmeyeceği şartnamelerde belirtilmektedir.

- Burada geliştirilen deney düzeneği ile YDE numuneleri sadece yük-deplasman ilişkileri dikkate alınarak lineer olmayan kırılma parametrelerinin tespit edilmesi için oda sıcaklığındaki saf bitümlü sıcak karışımlar kullanılmıştır. Bununla beraber ileriki çalışmalarda düşük, orta ve yüksek sıcaklıklardaki saf ve katkılı bitümlü sıcak karışımların lineer olmayan kırılma parametrelerinin tespit edilmesi hedeflenmektedir.

Rekabetçi Çıkar Beyanı

Yazarlar, bu makalede rapor edilen çalışmayı etkiliyor gibi görünebilecek, birbiriyle rekabet eden herhangi bir finansal çıkar veya kişisel ilişkinin bulunmadığını beyan ederler.

Teşekkür

R.İ. ve B.F.F. fikir sahibi ve deneyleri gerçekleştirdi. R.İ. ve B.F.F. sonuçları yorumladı ve makaleyi yazdı.

Kaynaklar

[1] AASHTO Designation: TP 105-13. 2015. Standard Method of Test for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semicircular Bend Geometry (SCB), American Association of State and Highway Transportation Officials.
[2] Nallathambi P, Karihaloo BL. Determination of the specimen size independent fracture toughness of plain concrete. Mag of Conc Res 1986; 38: 67-76.
[3] Ince R, Yalcin E, Yilmaz M. Quantifying nonlinear fracture parameters in bituminous SCB specimens: A compliance-based approach. Case Stud Const Mater 2024; 21, e03437.
[4] Griffith AA. The phenomena of rupture and flow in solids. Phil Trans Roy Soc.1920; A221: 163-198.
[5] Kaplan MF. Crack propagation and the fracture of concrete. J of ACI 1961; 58: 591-610.
[6] Hillerborg A, Modeer M, Petersson PE. Analysis of crack formation and growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. Cem & Conc Res 1976; 6: 773-782.
[7] Jenq YS. Shah SP. A two-parameter model for concrete. J Eng Mech- ASCE 1985; 111: 1227-1241.
[8] Bazant ZP, Kazemi MT. Determination of fracture energy, process zone length, and brittleness number from size effect with application to rock and concrete. Int J Fract 1990; 44(2): 111-131.
[9] Xu S, Reinhardt HW. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part I: Experimental investigation of crack propagation. Int J of Fract 1999; 98: 111-149.
[10] Hu X, Duan K. Size effect and quasi-brittle fracture: the role of FPZ. Int J Fract 2008; 154: 3-14.
[11] Özdemir AM, Yalçın E, Yılmaz M, Yılmaz B. Farklı çentik derinliklerine sahip asfalt karışımlarının orta sıcaklıklarda kırılma özelliklerinin incelenmesi: Sonlu elemanlar yaklaşımı. Pamukkale Üniv Müh Bil Der 2024; 30(6): 808-818
[12] Brühwiler E, Wittmann FH. The wedge splitting test, a method of performing stable fracture tests. Eng Fract Mech 1990; 35: 117–126.
[13] Ince R. Determination of concrete fracture parameters based on two-parameter and size effect models using split-tension cubes. Eng Fract Mech 2010; 77: 2233-2250.
[14] Ince R. Determination of concrete fracture parameters based on peak-load method with diagonal split-tension cubes. Engineering Eng Fract Mech 2012; 82: 100-114.
[15] Ince R. Determination of the Fracture Parameters of the Double-K Model Using Weight Functions of Split-Tension Specimens. Eng Fract Mech 2012; 96: 416-432.
[16] Ince R. Usage of compact compression specimens to determine non-linear fracture parameters of concrete. Fatig Fract Eng Mater Struct 2021; 44: 410-426.
[17] Ince R. Utilization of Splitting-Strips in Fracture Mechanics Tests of Quasi-Brittle Materials. Arch Appl Mech 2021; 91: 2661–2679.
[18] Ince R, Bildik AT. A preliminary concrete mixture design based on fracture toughness. Mater Struct 2021, 54: 11.
[19] Ince R, Bildik AT. Batch design of cementitious composites for the double-K fracture model. Mater Struct 2023; 56: 145.
[20] Lim IL, Johnston W, Choi SK. Stress intensity factors for semi-circular specimen under three-point bending. Eng Fract Mech 1993; 44: 363 382.
[21] Li XJ. Marasteanu MO. Using Semi Circular Bending Test to Evaluate Low Temperature Fracture Resistance for Asphalt Concrete Exper Mech 2010; 50: 867–876.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 453-466, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1607609

TÜİK Mikro Verileri ile Çocuk İşgücü Tahmini: Makine Öğrenimi Modellerinin Performans Analizleri

Kamil Abdullah EŞİDİR[1*]
[1] Fırat Kalkınma Ajansı, Elazığ, Türkiye
[*1] abdullahesidir@yahoo.com

(Geliş/Received: 26/12/2024; Kabul/Accepted: 03/02/2025)

Öz: Çalışma, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından 2019 yılında gerçekleştirilen Çocuk İşgücü Araştırması mikro veri setini kullanarak, çocuk işçiliği konusunu makine öğrenimi modelleri ile analiz etmektedir. 5-17 yaş grubundaki çocukların çalışma durumu, eğitim faaliyetleri ve ailevi sorumlulukları gibi faktörler incelenerek çocuk işçiliğini etkileyen unsurlar belirlenmiştir. Yaş grubu, çocukların çalışma durumunu en fazla etkileyen bağımsız değişken olup, erkek çocukların çalışma oranı kızlara göre daha yüksektir. Eğitimine devam etmeyen çocukların çalışma olasılığı ise artış göstermektedir. Çocukların çalışma durumu; Random Forest, XGBoost, Gradient Boosting ve SVM makine öğrenimi modelleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Modellerin performansları; doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), duyarlılık (recall) ve F1 Skoru metrikleri ile değerlendirilmiştir. Random Forest ve SVM modelleri, F1 Skoru açısından en yüksek performansı göstermiştir. Elde edilen bulgular, çocuk işçiliğini etkileyen faktörlerin makine öğrenmesi modelleri ile derinlemesine anlaşılmasına katkıda bulunmakta ve uygulanacak politikaların veri temelli şekillendirilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Anahtar kelimeler: Makine Öğrenimi, Çocuk İşgücü Araştırması, Yönetim Bilişim Sistemleri, Mikro Veri, XGBoost.

Child Labor Forecasting with TurkStat Micro Data: Performance Analysis of Machine Learning Models

Abstract: The study analyzes the issue of child labor with machine learning models using the micro dataset of the Child Labor Force Survey conducted by the Turkish Statistical Institute (TurkStat) in 2019. Factors affecting child labor are identified by examining factors such as the working status, educational activities and family responsibilities of children in the 5-17 age group. Age group is the independent variable that affects the working status of children the most, and boys are more likely to work than girls. Children who do not continue their education are more likely to work. The working status of children is estimated using Random Forest, XGBoost, Gradient Boosting and SVM machine learning models. The performance of the models was evaluated with accuracy, precision, recall and F1 Score metrics. Random Forest and SVM models showed the highest performance in terms of F1 Score. The findings contribute to an in-depth understanding of the factors affecting child labor with machine learning models and emphasize the importance of shaping policies based on data.

Key words: Machine Learning, Child Labor Survey, Management Information Systems, Microdata, XGBoost.

1. Giriş

Çocuk işçiliği; küresel çapta ekonomik, sosyal ve kültürel çeşitli faktörlerin etkisiyle ortaya çıkan önemli bir toplumsal sorun olarak tanımlanmaktadır. Uluslararası Çalışma Örgütüne (ILO) göre, 5-17 yaş arasındaki fertleri kapsamaktadır. Çocuk işçiliği; küresel anlamda önemli bir toplumsal sorun olup, ekonomik, sosyal ve kültürel faktörlerin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır [1]. Uluslararası Çalışma Örgütü'nün (ILO) önerileri doğrultusunda, çocuk işçiliğiyle mücadele kapsamında gerçekleştirilen araştırmalar, çocukların çalışma koşullarını, eğitim durumlarını ve sosyal yaşantılarını detaylı bir şekilde analiz etmektedir. Çalışmada kullanılan mikro veri seti, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından 2019 yılında gerçekleştirilen Çocuk İşgücü Araştırmasından (ÇİA) elde edilmiştir [2]. Araştırma 5-17 yaş grubundaki çocukların istihdam durumlarını, eğitim faaliyetlerini ve ailevi durumlarını inceleyerek, çocuk işçiliğinin mevcut durumunu değerlendirme ve çözüm önerileri geliştirme amacı gütmektedir.

Çalışmada, çocuk işgücüne dair cinsiyet, yaş grubu, eğitime devam durumu, en son bitirilen okul, hane halkı sorumlusunun çalışma durumu ve çocukların istihdam durumu değişkenleri ele alınmış ve makine öğrenmesi modelleri kullanılarak analizler ve tahminlemeler yapılmıştır. Aynı zamanda, bağımsız değişkenlerin model performansları üzerindeki etkileri analiz edilerek, çocuk işçiliğinin önlenmesine yönelik politika önerilerinde

* Sorumlu yazar: abdullahesidir@yahoo.com Yazarın ORCID Numarası: [1] 0000-0002-8106-1758

bulunulmuştur. Çalışma, akademik literatüre katkı sağlarken, politika yapıcılar için somut veri tabanlı bulgular sunmaktadır. Ekonomik analizlerde ve yapılan tahminlemelerde, gelişmiş veri analitiği model ve yöntemleri giderek daha önemli hale gelmektedir. Geliştirilen modeller, büyük veri setlerini işlemekte ve karmaşık ilişkiler ile eğilimleri anlayarak, analizcilere kapsamlı, yorumlanabilir ve değerli bilgiler sunmaktadır [3]. Makine öğrenimi modellerinin geleneksel modellere kıyasla daha geniş bir değişken yelpazesi ile çalışabilmesi ve karmaşık etkileşimleri modelleyebilmesi, çalışmada tercih edilmesine neden olmuştur. RandomForest, XGBoost ve Gradient Boosting ve benzeri modeller, özellikle büyük veri setlerinde yüksek doğruluk ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak sağlayarak, analizlerin etkinliğini artırmaktadır.

Geleneksel istatistiksel yöntemler, regresyon analizleri, lojistik regresyon ve ANOVA gibi teknikler, belirli koşullar altında ve sınırlı değişkenler ile etkili olabilmektedir [4]. Büyük veri setleri ve çok boyutlu veri yapıları söz konusu olduğunda, geleneksel yöntemler ve modeller yetersiz kalmakta ve karmaşık ilişkileri açığa çıkaramamaktadır [5]. Buna karşılık, makine öğrenmesi modelleri ise, büyük ve karmaşık veri kümelerinden öğrenme yeteneği sayesinde, geleneksel yöntemler ile aşılamayan birçok zorluğu kolaylıkla aşabilmektedir [6]. Makine öğrenimi modellerinin tercih edilmesinin temel nedeni, verinin karmaşıklığını ve çeşitliliğini daha iyi yönetebilme yeteneğidir [7].

2. Literatür Taraması

Yapılan çalışmalar, geleneksel istatistiksel yöntemlerin kapsamlı veri kümelerindeki karmaşık ilişkileri ve gizli kalıpları ortaya çıkarmada yetersiz olduğunu ve daha gelişmiş teknik ve modellerin kullanılması gerekliliğini göstermiştir [8]. Makine öğrenimi model ve algoritmaları kullanılarak, daha geniş bir değişken yelpazesini dikkate alan daha doğru tahmin modelleri geliştirilebilmektedir. Makine öğrenimi algoritmaları, daha geniş bir değişkenler dizisini ve bunların etkileşimlerini dikkate almakta ve çok daha kapsamlı yaklaşımlar sunmaktadır [9].

Çöpoğlu'nun [10] "Türkiye'de Çocuk İşçiliği" çalışması, çocuk işçiliğinin ekonomik, sosyal ve kültürel nedenlerini kapsamlı bir şekilde ele alarak, bu durumun birey ve toplum üzerindeki olumsuz etkilerini ortaya koymaktadır. Çocuk işçiliği; yoksulluk, eğitime erişim kısıtlılıkları, göç ve kültürel faktörler ile ilişkilendirilmiştir. Çalışmada, özellikle eğitimden yoksun kalan çocukların fiziksel ve psikolojik gelişimlerinin zarar gördüğü vurgulanmıştır. Çalışma; çocuk işçiliğinin azaltılması için eğitim imkanlarının artırılması, yasal düzenlemelerin etkinleştirilmesi ve sosyal politikaların gözden geçirilip güçlendirilmesi gerekliliğini savunmaktadır.

Gül ve Öztürk [11] çalışmalarında; çocuk işçiliğinin ekonomik, sosyal ve kültürel nedenlerini kavramsal çerçevede incelemiş, bu durumun çocukların fiziksel ve zihinsel gelişimlerine zarar verirken toplumsal sorunları da derinleştirdiğini vurgulamıştır. Çalışmada, yoksulluk, eğitimsizlik ve göçün çocuk işçiliğini tetikleyen başlıca faktörler olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, çocukların eğitimden uzaklaşmalarının kısır bir döngü meydana getirdiği; eğitimsizlik, işsizlik ve yoksulluğun birbirini besleyerek toplumun refahını olumsuz etkilediği anlatılmıştır. Çocuk işçiliğiyle mücadelede yoksulluğu azaltıcı politikalar, nitelikli eğitim fırsatları sunulması ve sosyal koruma mekanizmalarının geliştirilmesi önerilmiştir.

Tosunoğlu ve arkadaşları [12], makine öğrenmesi modellerinin eğitim bilimlerindeki uygulamalarını incelemiştir. 2015-2020 yılları arasında yayımlanan 184 makale üzerinde yapılan içerik analizi sonucunda, en sık kullanılan algoritmaların karar ağaçları (%22,5), destek vektör makineleri (%17,8) ve Naive Bayes (%14,2) olduğu belirlenmiştir. Çalışmaların çoğu deneysel veya uygulamalı olup, lisans öğrencileri ile ve veri tabanlarından elde edilen verilerle gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma, eğitimde makine öğrenmesi kullanımına dair eğilimleri ortaya koyarak literatüre önemli katkılar sunmaktadır.

Eriş Dereli [13], TÜİK'in 2019 yılı Çocuk İşgücü Araştırması mikro verilerini kullanarak, Türkiye'deki çocuk istihdamını etkileyen faktörleri analiz etmiştir. Çalışma; kız çocuklarının çalışma olasılığının erkek çocuklara göre daha düşük olduğunu, eğitimine devam eden çocukların istihdam olasılığının azaldığını ve anne-baba eğitim seviyesinin artmasının çocuk işçiliğini azalttığını ortaya koymuştur. Ayrıca, çocuk yaşının artması ve ebeveynlerin işsiz olmasının istihdam olasılığını artırdığı tespit edilmiştir. Çalışma, çocuk işçiliği ile mücadelede kadınların eğitimi ve istihdam politikalarına yönelik öneriler ile literatüre önemli katkılar sunmaktadır.

Kömüryakan ve Çağlayan [14] çalışmalarında, Türkiye'deki çocuk işçiliğini etkileyen sosyal, ekonomik ve demografik faktörleri; simetrik (Logit ve Probit) ve asimetrik (Log-log ve Clog-log) modelleri kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışma; Türkiye'nin çocuk işçiliği oranının dünya ortalamasının altında olmasına rağmen, Avrupa ve Kuzey Amerika ülkelerine kıyasla iki kat daha fazla olduğunu göstermiştir. Çalışmada; çocuk işçiliğinin özellikle 15-17 yaş aralığındaki erkek çocuklar ile küçük kardeşi bulunan ve kalabalık hanelerde yaşayan bireylerde yoğunlaştığı bulunmuştur. Elde edilen bulgulara göre, çocuk işçiliğini önlemeye yönelik politikalarda hedef gruplara odaklanmanın önemi vurgulanmaktadır.

Yardımcıoğlu [15], çocuk işçiliğiyle mücadelede Avrupa Birliği'nin "Kurumsal Sürdürülebilirlik Durum Tespitine Dair Direktif Önerisi"ni detaylı şekilde ele almıştır. Çalışma, çocuk işçiliğinin fiziksel ve zihinsel gelişim üzerindeki olumsuz etkilerini vurgulamaktadır. Şirketlere tedarik zincirleri boyunca insan hakları ihlallerini önleme ve raporlama yükümlülükleri getirilmektedir. Çocuk işçiliğini engellemek adına denetim mekanizmaları oluşturması ve cezai ve idari sorumluluklar üstlenilmesi öngörülmektedir. Yapılan düzenlemenin, çocuk işçiliği ile mücadelede küresel ölçekte önemli bir hukuki adım olduğu ve Türkiye dahil birçok ülkedeki politikalar için yol gösterici olduğu anlatılmaktadır.

Özdemir ve arkadaşları [16], Türkiye'de çocuk işçiliğinin sağlık ve sosyal yaşam koşulları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma; çocuk işçiliğinin fiziksel, zihinsel ve sosyal gelişimi olumsuz yönde etkilediğini ve bu durumun eğitimden kopuş, yoksulluk döngüsünün devamı gibi sonuçlara yol açtığını ortaya koymuştur. Çalışmada, çocukların çalışma koşullarının iyileştirilmesi ve çocuk işçiliğinin önlenmesi adına sosyal politikaların etkin biçimde uygulanmasının önemi vurgulanmıştır. Çocuk refahının artırılmasına yönelik yapılacak çalışmalarda kapsamlı veri temelli yaklaşımların geliştirilmesi gerektiği ifade edilmiştir.

3. Metodoloji

Çalışmada kullanılan metodoloji, sınıflandırma performansını iyileştirmek için farklı makine öğrenimi modellerini göstermeyi amaçlamaktadır. Analizlerde, çeşitli veri ön işleme teknikleri, model eğitim süreçleri, özellik çıkarımı yöntemleri kullanılmıştır. Büyük veri, çeşitlilik, hız ve hacimden ötürü çeşitli zorluklara yol açmaktadır [17]. Makine öğrenmesi veriye dayalı problemlerin çözümünde, uygun algoritmalar ile modelleme yapmayı hedefleyen bir çeşit hesaplama disiplinidir [18].

3.1. Yazılım ve Donanım

Veri analizi ve makine öğrenimi süreçlerinin yüksek verimlilik ile gerçekleştirilebilmesi için çalışmada güçlü bir donanım kullanılmıştır. Windows 11 Pro işletim sistemiyle çalışan 64-bit Intel64 Family 6 Model 142 Stepping 10 işlemciye sahip bir bilgisayar tercih edilmiştir. Cihaz, geniş veri kümelerinin işlenmesi ve modellerin hızlı eğitimi için yeterli olan 16 GB RAM barındırmaktadır. Analiz süreçlerinde Python programlama dili kullanılmıştır. En güncel sürüm olan Python 3.12.7 tercih edilerek, veri analizi ve bilimsel hesaplama süreçlerinde geniş bir kütüphane desteğinden (NumPy, Pandas, Scikit-learn, TensorFlow, Keras vs.) faydalanılmıştır. Çalışmaların daha verimli ve anlaşılır bir şekilde yürütülebilmesi için platform olarak, Jupyter Notebook 7.2.2 sürümü tercih edilmiştir. Bu platform, kodlama, veri görselleştirme ve açıklamaların entegre bir yapıda sunulmasını sağlayarak analiz süreçlerini kolaylaştırmaktadır.

3.2. Veri Seti

Verilerin resmi kaynaklardan elde edilmesi, diğer araştırmacıların benzer analizler yapmasına olanak tanımakta, aynı zamanda güvenilir ve kamuya açık veri kaynaklarının kullanımını da teşvik etmektedir [19]. Çalışmada, orijinal mikro veri setinde yer alan eksik veriler temizlenmiş ve analizlere uygun hale getirilmiştir. 25.190 gözlem içeren veri setinde, biri bağımlı ve 5'i bağımsız olmak üzere toplamda 6 değişken bulunmaktadır. Çocuğun çalışıp çalışmadığı durumunu ifade eden COCUK_CALISAN değişkeni, bağımlı değişken olarak seçilmiş ve diğer değişkenler bağımsız değişkenler olarak analizlerde kullanılmıştır. Veri setinde yer alan değişkenlerin isimleri, açıklamaları ve kodlama seçenekleri Tablo 1'de sunulmuştur. Veri setinde bulunan değişkenler; 5-17 yaş arasındaki çocukların cinsiyet, yaş grubu, eğitim durumu ve istihdam gibi demografik ve sosyal özelliklerini belirtmektedir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan veri seti, değişkenler ve açıklamaları.

Değişken Adı	**Açıklama**	**Kodlama Seçenekleri**
CINSIYET	Cinsiyet	1: Erkek 2: Kadın
YAS_GRUP	Yaş grubu (5-17 yaş arası)	1: 5-11 yaş 2: 12-14 yaş 3: 15-17 yaş
OKUL_BITEN	En son bitirilen okul	0: Bir okul bitirmeyen 1: İlkokul 2.1: Genel ortaokul 3.1: Genel lise 3.2: Mesleki veya teknik lise
EGITIM_DEVAM	Eğitime devam durumu	1: Eğitime devam eden 2: Eğitime devam etmeyen
HHS_DURUM	Hanehalkı sorumlusunun çalışma durumu	1: İstihdamda 2: İşsiz 3: İşgücüne dahil olmayan
COCUK_CALISAN	5-17 yaş grubundaki istihdam durumu	0: İstihdamda 1: İstihdamda değil

3.2. Veri Ön İşleme

Veri ön işleme, veri setinin analiz ve modelleme için hazır hale getirilmesi sürecidir. Bu aşamada gerçekleştirilen işlemler, modellerin doğruluğunu ve genel performansını önemli ölçüde etkilemektedir [20]. Modellerin eğitilmesi esnasında, ihtiyaç duyulmayan ve çok fazla eksik değerler içeren sütunlar, veri setinden çıkarılmıştır. Hedef (bağımlı) değişken, "İstihdamda" değeri için 0 ve "İstihdamda değil" değeri için 1 olacak şekilde ikili formata dönüştürülmüştür. Kategorik değişkenler, makine öğrenmesi algoritmalarıyla uyumlu hale getirilmek için sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Ardından, dönüştürülen veri seti, eğitim (%80) ve test (%20) setlerine ayrılmıştır. Sayısal veriler, Standard Scaler kullanılarak ölçeklendirilmiştir. Bu işlem, özellikler arasındaki ölçek farklılıklarını gidererek modelin daha etkili öğrenmesine yardımcı olmaktadır [21]. Matematiksel olarak bu işlem Denklem 1'de gösterildiği şekilde ifade edilmektedir:

$$z = \frac{(x-\mu)}{\sigma} \tag{1}$$

Burada, x ölçeklendirilecek olan özellik değerini, μ bu özelliğin ortalamasını, σ bu özelliğin standart sapmasını ve z ölçeklendirilmiş sonucu ifade etmektedir.

3.3. Modellerin Performans Değerlendirme Kriterleri

Makine öğrenmesinde analizi gerçekleştirilen modellerin performansını objektif bir şekilde değerlendirmek için çeşitli metrikler ve yöntemler kullanılmaktadır [22]. Çalışmada, makine öğrenmesi modellerinin performansları, Kesinlik (Precision), Duyarlılık (Recall), F1 Skoru ve Doğruluk (Accuracy) metrikleri ile ölçülmüştür. Bu metriklerin, matematiksel formülleri sırasıyla Denklem 2, 3, 4 ve 5'te ifade edilmiştir. Denklemlerde, DP doğru pozitif, YP yanlış pozitif, DN doğru negatif ve YN yanlış negatiftir. Ayrıca, tahminlerin doğruluğunu görsel şekilde değerlendirebilmek için karmaşıklık matrisleri de kullanılmıştır.

$$\text{Kesinlik (Precision)} = \frac{\text{DP}}{\text{DP+YP}} \tag{2}$$

$$\text{Duyarlılık (Recall)} = \frac{\text{DP}}{\text{DP+YN}} \tag{3}$$

$$\text{F1 Skoru} = 2 \times \frac{\text{Kesinlik} \times \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik+Duyarlılık}} \tag{4}$$

$$\text{Doğruluk (Accuracy)} = \frac{\text{DP+DN}}{\text{DP+DN+YP+YN}} \quad (5)$$

Makine öğrenmesi modellerinin performansını değerlendirmek için kullanılan Kesinlik, Duyarlılık, F1 Skoru ve Doğruluk metrikleri, farklı senaryolarda modelin gücünü ve zayıflıklarını belirtmesi açısından önemlidir [22].

4. Makine Öğrenmesi Modelleri

Makine öğrenimi, bilgisayar kullanımı ile verilerin analiz edilerek öğrenilmesi ve tahmin yapma yeteneği kazandırmayı hedefleyen bir bilim dalıdır. Çözüm süreçlerinde farklı matematiksel ve istatistiksel modeller kullanılmakla birlikte, modellerin seçimi veri kümesinin türüne ve özelliklerine göre belirlenmektedir.

4.1. XGBoost (Extreme Gradient Boosting)

XGBoost, Gradient Boosting algoritmalarının geliştirilmiş bir versiyonudur ve yüksek performans gösteren modellerden birisidir. Makine öğrenmesinde sınıflandırma ve regresyon problemlerinde sıkça kullanılmaktadır. Hızlı ve yüksek doğruluk oranları sunması, onu veri bilimi yarışmaları ve büyük ölçekli projelerde popüler hale getirmiştir. XGBoost, son yıllarda makine öğrenmesi alanında en başarılı ve yaygın kullanılan yöntemlerden birisidir. Gereksiz e-postaların sınıflandırılması (Spam), reklam eşleştirme, dolandırıcılık tespiti ve fiziksel olaylardaki anomali tespiti gibi birçok alanda etkili sonuçlar sunmaktadır [23]. XGBoost, doğru tahminler üretmede etkili olduğunu ispatlamıştır ve birçok alternatif makine öğrenimi yaklaşımına göre hesaplama avantajları sunmaktadır [24]. Özellikle büyük veri setlerinde ve karmaşık problemlerde sağladığı etkili performans, XGBoost'u popüler bir tercih haline getirmektedir.

XGBoost, gradyan artırma algoritmasına dayalı olarak çalışan bir topluluk öğrenme yöntemidir. Bu teknik, bir hata fonksiyonunu en aza indirmek için bir dizi zayıf öğreniciyi sırayla birleştirmeyi ve böylece tahmin doğruluğunu artırmayı içerir [23]. XGBoost, ölçeklenebilirliği ve esnekliği nedeniyle popülerlik kazanmış ve gradyan artırma kütüphanesi içinde giderek yükselen bir topluluk öğrenme yöntemi haline gelmiştir. Torbalama ve istifleme gibi yaygın olarak kullanılan diğer topluluk yöntemlerinin yanı sıra, boosting algoritması kategorisine giren bir topluluk öğrenme algoritması olarak kabul edilir [25]. Extreme Gradient Boosting'in kısaltması olan XGBoost, gradient boosting ailesinin bir parçasıdır ve zayıf öğrenenleri güçlü öğrenenlere dönüştürmeyi amaçlar. Bir topluluk öğrenme algoritması olarak XGBoost, boosting yaklaşımını kullanarak birden fazla karar ağacını sağlam bir sınıflandırıcıya entegre etmektedir [26]. Modelin tahmin fonksiyonu Denklem 6'da gösterilmektedir:

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^{K} f_k(x_i),\ f_k \in F \quad (6)$$

XGBoost, her iterasyonda hatayı minimize etmek için gradyan iniş algoritmasını kullanır ve bu sayede modelin doğruluğunu artırır. Modelin genel kayıp fonksiyonu Denklem 7'deki gibidir:

$$L(\phi) = \sum_{i=1}^{n} l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{k=1}^{K} \Omega(f_k) \quad (7)$$

4.2. RandomForest (Rastgele Orman)

RandomForest, farklı alt veri setlerinde birden fazla karar ağacının birleşiminden oluşmaktadır. Random Forest, sınıflandırma ve regresyon görevleri için kullanılan, topluluk öğrenme metoduna dayanan bir makine öğrenimi algoritmasıdır. Bu algoritma, birden fazla karar ağacını bir araya getirerek her bir ağacın zayıflıklarını dengelemekte ve daha güçlü ve dengeli bir model oluşturmaktadır [27]. Random Forest, eğitim veri setinden birçok bootstrap örneği çekmektedir (her örnek, orijinal veri setinin rastgele seçilmiş örneklerini içermektedir). Her bir bootstrap örneği için bağımsız bir karar ağacı kurulur. Her ağaç, veri setinin farklı bir alt kümesi üzerinde eğitilir. Her düğümdeki bölünme işlemi, tüm özellikler yerine rastgele seçilen bir alt küme kullanılarak yapılır. Bu, modelin varyansını azaltmaya yardımcı olur ve ağaçlar arası korelasyonu düşürür. Sınıflandırma için tahmin yapılırken genelde Denklem 8'de gösterildiği gibi bir ifade kullanılmaktadır:

$$y = \text{mod}\{y_1, y_2, \ldots, y_n\} \quad (8)$$

Burada, $y_1, y_2, \ldots, y_n$ her bir karar ağacının tahmin ettiği sınıf etiketleridir ve mod fonksiyonu en sık rastlanan etiketi belirlemektedir.

4.3. CatBoost (Category Boosting)

CatBoost, makine öğreniminde özellikle kategorik verilerle çalışmak için optimize edilmiş, güçlü bir gradyan artırma algoritmasıdır. İsmi "Category Boosting" ifadesinden kısaltılmış olup, diğer gradyan artırma algoritmalarına göre kategorik değişkenleri otomatik olarak işlemektedir. Bu özelliği, kategorik verilerin birden fazla dönüştürme işlemine tabi tutulmasını gerektirmediği için kullanıcı dostu bir deneyim sunar. CatBoost, sınıflandırma ve regresyon problemlerinde yüksek doğruluk oranları ile öne çıkmaktadır. Model, overfitting (aşırı öğrenme) riskini azaltmak için çeşitli düzenleme tekniklerini içerir ve veri dengesizliklerinden kaynaklanabilecek hataları minimize etmeyi amaçlar. Ayrıca, paralel hesaplama kapasitesi sayesinde, büyük veri kümelerinde hızlı eğitim süreçleri sunmaktadır.

CatBoost'un bir diğer avantajı ise, yerleşik GPU desteği sayesinde eğitim süreçlerini hızlandırabilmesi ve daha geniş veri setlerinde etkili performans sağlayabilmesidir. Model hiperparametreleri kolayca optimize edebilmektedir, bu durum da modelin farklı veri setlerine uyarlanabilmesini sağlamaktadır. CatBoost, Yandex firması tarafından geliştirilmiştir ve özellikle kategorik verileri etkili bir şekilde işleyebilmektedir. Geliştirilen model, kategorik özelliklerin doğrudan işlenmesini sağlayarak ön işleme ihtiyacını azaltmakta ve modelin doğruluğunu artırmaktadır [28]. CatBoostun tahmin doğruluğu, özellikle kategorik değişkenlerin yoğun olduğu veri setlerinde belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir.

4.4. Destek Vektör Makineleri (SVM)

Destek Vektör Makineleri (SVM), hem sınıflandırma hem de regresyon görevlerinde kullanılan, güçlü ve esnek bir makine öğrenimi algoritmasıdır. Bu yöntem, sınıfları en iyi şekilde ayıran bir hiper düzlem bulmaya odaklanır ve doğrusal olarak ayrılabilir verilerde oldukça etkili sonuçlar verir. Doğrusal olarak ayrılamayan veri setlerinde ise kernel fonksiyonları kullanılarak yüksek boyutlu uzaylara geçiş sağlanır ve sınıflandırma doğruluğu artırılır. SVM, metin ve görüntü tanıma, biyometrik tanımlama, finansal tahminler ve biyoinformatik gibi çeşitli alanlarda başarıyla uygulanmaktadır. Özellikle, sınıflandırma problemlerinin çözümünde etkinliği kanıtlanmıştır [29].

Destek Vektör Regresyonu (DVR), Destek Vektör Makineleri (DVM) prensiplerini regresyon problemlerine genişleten bir makine öğrenme tekniğidir. DVR, tüm örnek noktalarının hiper düzlemden toplam sapmasını en aza indiren optimal bir hiper düzlem bulmayı amaçlamaktadır [30]. DVR'de algoritma, eğitim örneklerine dayalı olarak optimum bir regresyon hiper düzlemi oluşturur ve noktaları hiper düzleme yakın tutarak ayrımı en aza indirmeye çalışır [31]. SVR modeli, hiper düzlem ile eğitim verileri arasındaki marjı en üst düzeye çıkarmak için ikinci dereceden bir optimizasyon problemini çözer ve noktaları belirli bir hata toleransı dahilinde etkili bir şekilde kapsar. DVR, giriş verilerini doğrusal olmayan işlevler aracılığıyla düşük boyutlu bir uzaydan yüksek boyutlu bir özellik uzayına eşleyerek ve ardından örnek noktaların bu hiper düzleme mümkün olduğunca yakın düşmesini sağlamak için yüksek boyutlu özellik uzayında optimum bir hiper düzlem arayarak çalışır [32]. Bu süreç, eğitilmiş veri kümesine minimum mesafeyi sağlayan hiper düzlemi bulmayı ve veri örneklerine iyi uyması için hiper düzlemi optimize etmeyi içerir. DVR'nin prensibi, hiper düzlemden en uzaktaki örneklerin geometrik mesafesini en aza indiren ve veri dağılımını etkili bir şekilde yakalayan optimum hiper düzlemi aramaktır. Modelin matematiksel ifadesi Denklem 9'da gösterilmiştir.

$$y = \sum_{i=1}^{n}(a_i - a_i^*)K(x_i, x) + b \quad (9)$$

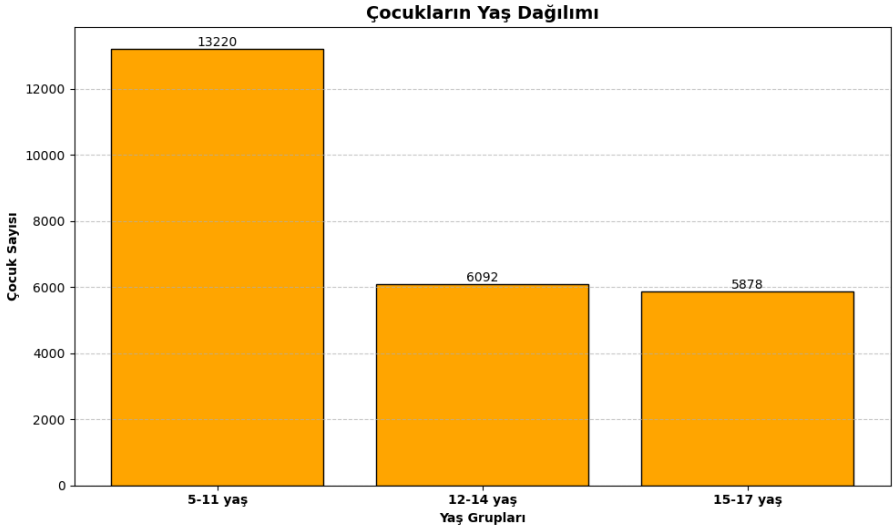
Burada, y tahmin edilen değeri, a_i ve a_i^* Lagrange çarpanlarını, K(x_i,x) çekirdek fonksiyonunu, b bias terimini ve x_i eğitim verisini temsil etmektedir. SVR, doğrusal olmayan ilişkileri modellemek için çekirdek fonksiyonları (lineer, polinomial, radyal bazlı fonksiyonlar gibi) kullanır. Çekirdek fonksiyonu K(x_i,x), yüksek boyutlu uzayda veri noktaları arasındaki benzerlikleri ölçmektedir.

5. Bulgular

Çalışmada, TÜİK tarafından 2019 yılında gerçekleştirilen Çocuk İşgücü Araştırması verileri kullanılarak, 5-17 yaş grubundaki çocukların istihdam durumları, eğitim süreçleri ve ailevi sorumluluklarına dair kapsamlı analizler yapılmıştır. Çalışmanın temel amacı, çocuk işçiliğini etkileyen faktörleri tespit ederek bu alanda etkin

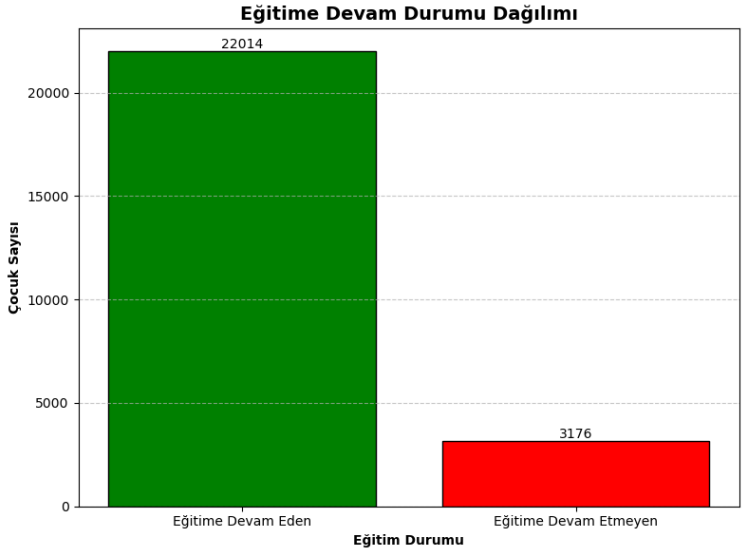
sosyal politika önerileri sunmaktır. Çocukların yaş, cinsiyet, eğitim durumu ve ailevi koşullar gibi demografik özellikleri, makine öğrenimi modelleri ile analiz edilerek çocuk işçiliğinin dinamiklerini daha iyi anlamak hedeflenmiştir.

Makine öğrenimi modellerinin kullanımı, geleneksel modellere kıyasla daha geniş değişken yelpazesini analiz etme ve karmaşık ilişkileri modelleme imkânı sunmaktadır [33]. Kullanılan Random Forest, SVM, XGBoost ve CatBoost modelleri; doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1 skoru metrikleri ile değerlendirilmiştir. Analizler sonucu elde edilen bulgular, çocuk işçiliği ile mücadelede veri temelli politika önerilerinin önemini ortaya çıkartmıştır.



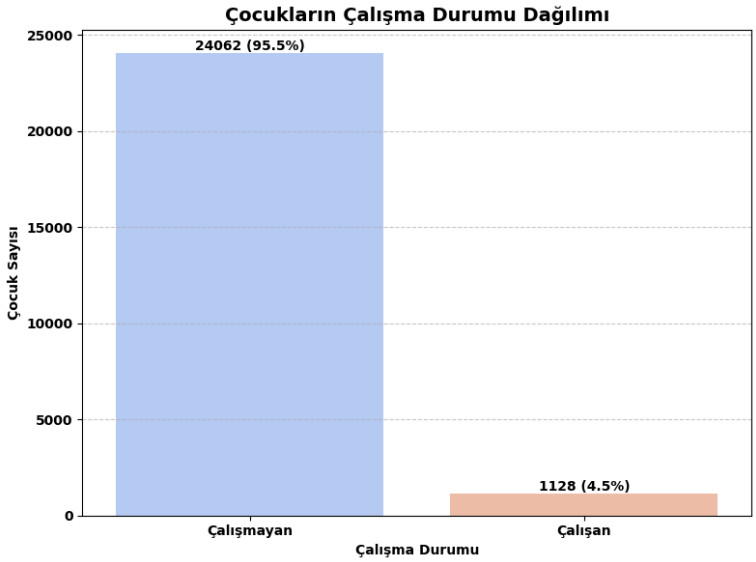
Şekil 1. 0-17 Yaş grubundaki çocukların yaş dağılımı.

Şekil 1'de 0-17 yaş grubundaki çocukların yaş dağılımı yer almaktadır. Grafikte çocukların yaş dağılımı incelendiğinde, 5-11 yaş grubu 13.220 çocuk ile en kalabalık grup olarak öne çıkmaktadır. Yaş ilerledikçe çocuk sayısında azalma gözlenirken, 12-14 yaş grubu 6.092, 15-17 yaş grubu ise 5.878 çocuk ile en küçük nüfusa sahip grubu oluşturmaktadır.



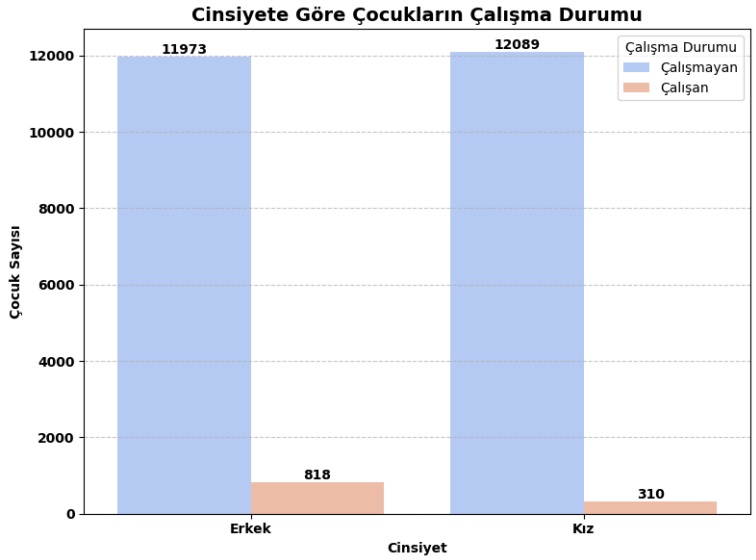
Şekil 2. Eğitime devam durumu.

Şekil 2'de görüldüğü üzere, 22.014 çocuk eğitimine devam ederken, 3.176 çocuk ise eğitimine devam etmemektedir. Eğitime devam etmeyen veya edemeyen çocuklar, ekonomik ya da ailevi nedenlerden ötürü risk altında olup, bunlara yönelik destek politikaları büyük önem taşımaktadır. Eğitime devam durumu dağılımı analiz edildiğinde, çocukların büyük bir kısmının (%87,4) eğitime devam ettiği, ancak %12,6'lık bir kesimin eğitimden kopmuş olduğu görülmektedir. Bu durum, genel olarak eğitim sisteminin kapsayıcı olduğunu göstermekle birlikte, 3.176 çocuğun eğitime devam etmemesi, dikkate alınması gereken önemli bir sorundur. Eğitime devam etmeyen çocukların, çocuk işçiliği riski altında olduğu değerlendirilmektedir. Soruna çözüm için; burs programları, çeşitli ekonomik destekler ve okula yeniden geri dönüş projeleri benzeri çözüm önerileri geliştirilebilir.



Şekil 3. Çocukların çalışma durum dağılımı.

Şekil 3'te, çocukların çalışma durumu dağılımı gösterilmektedir. Grafikte, çocukların çoğunlukla çalışmadığı ancak %4,5'lik bir kesimin çalışmak zorunda kaldığı görülmektedir. Ekonomik yetersizlikler, ailevi sorumluluklar veya sosyal faktörler bu duruma sebep olabilir. Çocuk işçiliğinin önlenmesi için çeşitli önlemlerin alınması önem arz etmektedir. Çeşitli eğitim teşvikleri, aile destek programları ve denetim mekanizmalarının güçlendirilmesi benzeri alınacak önlemler kritik önemdedir.



Şekil 4. Cinsiyete göre çocukların çalışma durumu.

Şekil 4'te, çalışan çocukların çoğunluğunu erkekler (818 kişi) oluştururken, kızlar ise 310 kişi ile daha düşük bir orana sahiptir. Bu durum, erkek çocukların ekonomik faaliyetlere daha fazla katıldığını, kız çocuklarının ise ev içi sorumluluklara yönelebileceğini göstermektedir. Mikro verilerden elde edilen analiz sonuçları, cinsiyete dayalı farklılıkların çocuk işçiliğinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 2, dört farklı makine öğrenmesi modelinin sınıflandırma performansını gösteren metrikleri ifade etmektedir. Random Forest ve SVM, F1-Skoru açısından en yüksek performansı sergilerken, XGBoost ve CatBoost modelleri birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Metriklerin her biri model performanslarını farklı açılardan değerlendirmektedir.

Tablo 2. Makine öğrenmesi modelleri ve metrikleri.

Modeller	Doğruluk (Accuracy)	Kesinlik (Precision)	Duyarlılık (Recall)	F1-Skoru (F1-Score)
Random Forest	0,761	0,953	0,761	0,830
XGBoost	0,757	0,954	0,757	0,828
SVM	0,760	0,953	0,760	0,830
CatBoost	0,759	0,954	0,759	0,829

Doğruluk, tüm tahminlerin doğru olma oranını ifade etmektedir. Yani, modelin toplam doğru tahminlerinin, toplam tahminlere oranı gösterilmektedir. Tablo 2'deki doğruluk değerleri %75,7 ile %76,1 arasında değişmektedir. Random Forest modeli, %76,1 ile en yüksek doğruluğa sahiptir. Ancak doğruluk, dengesiz veri kümelerinde yanıltıcı olabileceğinden, tek başına model performansını ölçmede yeterli bir metrik değildir.

Kesinlik, pozitif olarak tahmin edilenlerin ne kadarının gerçekten pozitif olduğunu gösterir. Yani, yanlış pozitifleri azaltma yeteneğini ölçer. Kesinlik, özellikle yanlış pozitiflerin maliyeti yüksek olduğunda önemli bir metriktir. Tabloya göre, tüm modellerin kesinlik değeri oldukça yüksektir (yaklaşık %95,3-95,4). Bu da modellerin doğru pozitif tahmin yapma konusunda başarılı olduklarını göstermektedir.

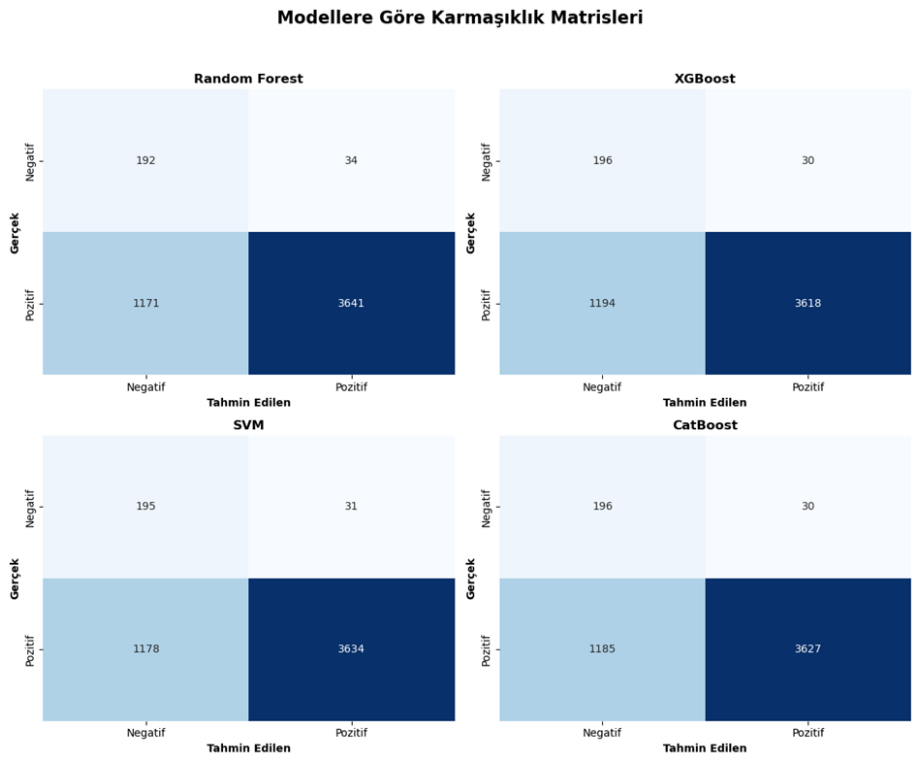
Duyarlılık, gerçek pozitiflerin ne kadarını doğru tahmin edebildiğimizi ifade eder. Yanlış negatifleri azaltmada önemli bir metriktir. Örneğin, bir hastalık teşhisi senaryosunda, duyarlılık düşükse birçok hasta yanlış şekilde sağlıklı olarak sınıflandırılabilir. Tabloda Random Forest ve SVM modelleri %76,1 ile en yüksek duyarlılığa sahiptir.

F1-Skoru, kesinlik ve duyarlılığın harmonik ortalamasıdır ve dengesiz veri kümelerinde genel başarıyı daha iyi temsil eder. Kesinlik ve duyarlılık arasında bir denge sağlamayı hedefler. Tabloya göre, Random Forest ve SVM modelleri %83 F1-Skoru ile en iyi performansı sergilemektedir. Bu, bu modellerin kesinlik ve duyarlılığı dengeli bir şekilde optimize ettiğini göstermektedir.

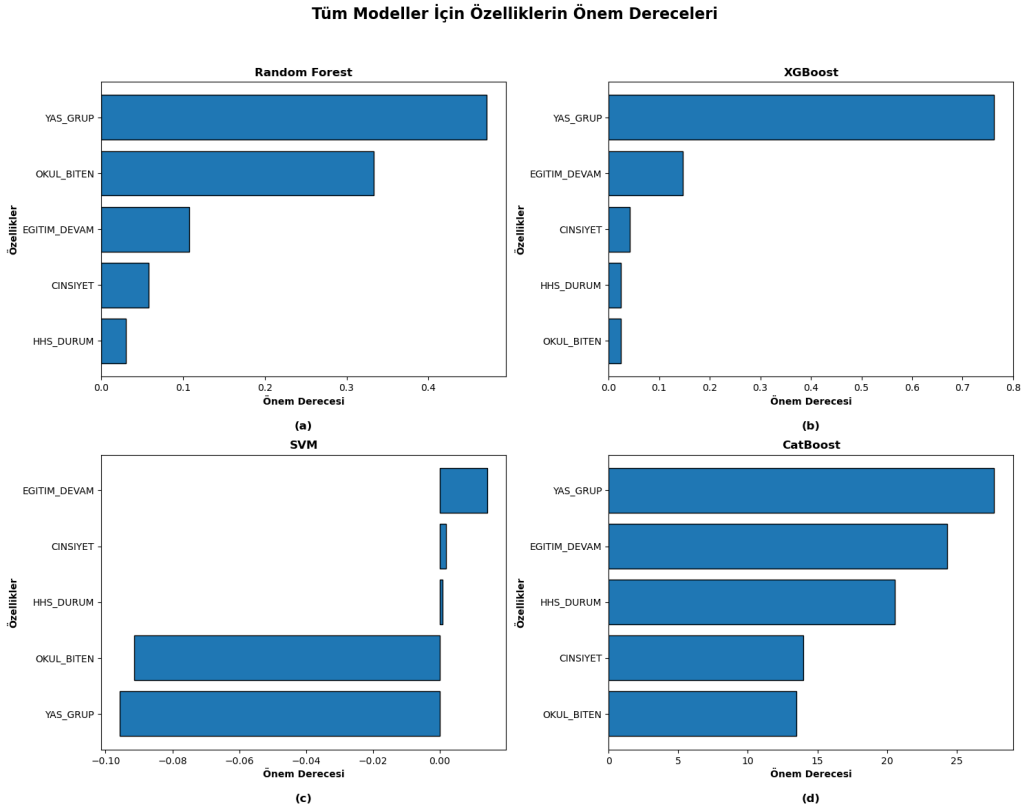
Şekil 5'te dört farklı makine öğrenmesi (a)Random Forest b)XGBoost c)SVM d)CastBoost) modelinin karmaşıklık matrislerini göstermektedir. Matrislerde, gerçek ve tahmin edilen sınıflar gösterilmektedir. Tüm modellerde Gerçek Pozitif sınıflarda yüksek başarı gözlenirken, yanlış negatifler (pozitif olan ancak negatif tahmin edilen) daha dikkat çekici bir farklılık oluşturmaktadır. Örneğin, Random Forest modeli 1171 yanlış negatif tahmin yaparken, XGBoost ve CatBoost modellerinde bu sayı 1194 ve 1185 olarak görülmektedir.

Öte yandan, Negatif Sınıfta yanlış pozitif tahminler oldukça düşük seviyelerdedir. XGBoost ve CatBoost modelleri, yanlış pozitif sayısını 30 ile minimize ederek diğer modellere kıyasla bu alanda daha iyi performans sergilemektedir. Genel olarak, tüm modeller dengeli sonuçlar üretmiş olsa da CatBoost ve XGBoost modelleri negatif sınıfta biraz daha iyi performans göstermektedir.

XGBoost, özellikle daha hızlı bir eğitim süreci sunması ve çok daha karmaşık veri yapılarında öne çıkması ile dikkat çekerken, CatBoost'un kategorik verileri otomatik olarak işlemesi, hiperparametre optimizasyonuna duyarlı olması ve GPU desteği sunması, özellikle kategorik değişkenlerin yoğun olduğu veri setlerinde daha başarılı olmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte, CatBoost modeli, negatif sınıftaki tespitlerde daha az hata yaparak bu alanda öne çıkmıştır. XGBoost ise genelde daha düşük doğruluk oranlarına karşın, büyük veri setlerinde daha iyi genelleme yapma kapasitesine sahiptir.

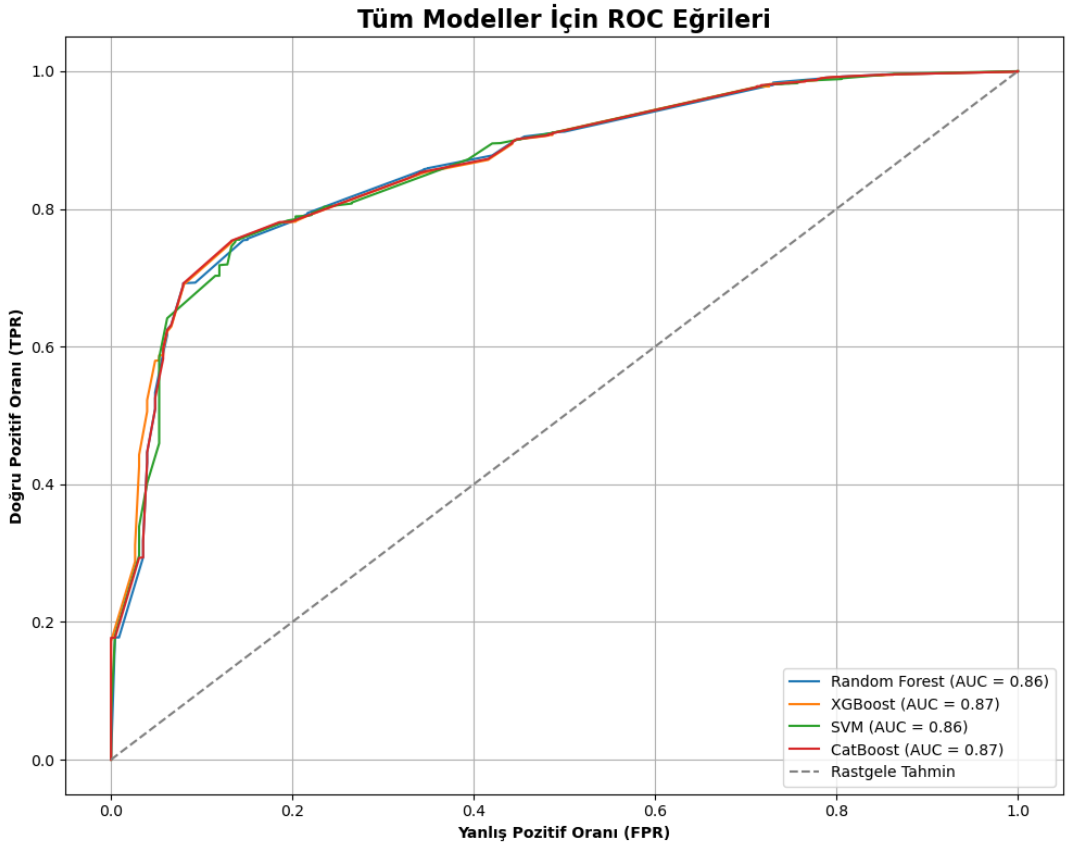


Şekil 5. Modellerin a)Random Forest b)XGBoost c)SVM d)CastBoost karmaşıklık matrisleri.



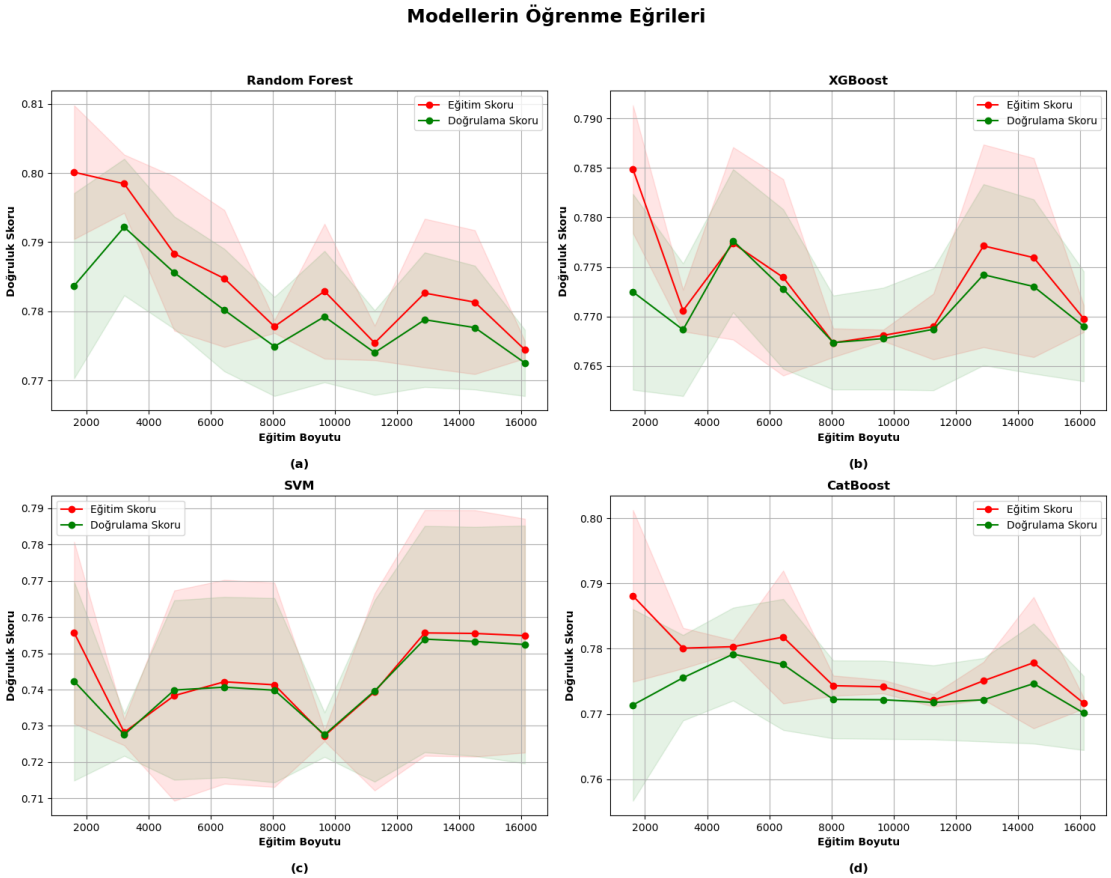
Şekil 6. Modellerin a)Random Forest b)XGBoost c)SVM d)CastBoost özellik önem dereceleri.

Şekil 6'da bütün modellerin özellik önem dereceleri gösterilmiştir. Şekil 6a'da yer alan Random Forest modelinde, YAS_GRUP değişkeni en kritik etkiye sahip değişkendir; onu EGITIM_DEVAM ve OKUL_BITEN değişkenleri takip etmektedir. Şekil 6b'deki XGBoost modelinde de YAS_GRUP açık ara en yüksek önem derecesinde olup; EGITIM_DEVAM ve OKUL_BITEN değişkenleri ise daha düşük oranlarda etkili olmuştur. Şekil 6c'deki SVM modelinde, EGITIM_DEVAM başlıca belirleyici etken olurken, OKUL_BITEN ve YAS_GRUP görece düşük fakat ters yönde bir etki ortaya koymuştur. Son olarak, Şekil 6d'de yer alan CatBoost modelinde YAS_GRUP değişkeni yine en yüksek önem dereceli değişken olarak ön plana çıkarken, EGITIM_DEVAM ise ikinci sırada yer almıştır. Elde edilen sonuçlar, yaş grubunun çocuk işgücü istihdamında kilit bir rol oynadığını ve eğitime devam etme durumunun da büyük ölçüde belirleyici bir faktör olduğunu göstermektedir. Modellerin farklı öğrenme stratejilerine bağlı olarak özelliklerin önem dereceleri de farklılık göstermektedir. Özellik önem analizlerinin dikkate alınması, tahmin performansını arttıran kritik bir unsurdur.



Şekil 7. Modellerin ROC eğrileri.

Şekil 7, bütün modeller için ROC eğrilerini ve AUC (Eğri Altındaki Alan) değerlerini göstermektedir. ROC eğrisi, modellerin sınıflandırma performansını Doğru Pozitif Oranı (TPR) ve Yanlış Pozitif Oranı (FPR) üzerinden değerlendirmektedir. XGBoost ve CatBoost modellerinin AUC değerlerinin 0.87 olduğu, Random Forest ve SVM modellerinin ise 0.86 değerinde olduğu görülmektedir. Tüm modellerin eğrileri birbirine oldukça yakın olup, sınıflandırma performansları tutarlı ve başarılıdır. Rastgele tahmin çizgisinin üzerinde konumlanan bu eğriler, modellerin rastgele sınıflandırmadan anlamlı ölçüde daha iyi performans sergilediğini ifade etmektedir.



Şekil 8. Modellerin a)Random Forest b)XGBoost c)SVM d)CastBoost öğrenme eğrileri.

Şekil 8, modellerin öğrenme eğrilerini eğitim boyutuna bağlı olarak göstermektedir. Öğrenme eğrileri; modellerin eğitim ve doğruluk skoru arasındaki ilişkiyi incelemekte ve modelin aşırı öğrenme (overfitting) veya yetersiz öğrenme (underfitting) durumlarını analiz etmeye olanak tanımaktadır. Şekil 8a'da Random Forest modeline ait öğrenme eğrisinde, eğitim skoru (kırmızı çizgi) ile doğrulama skorunun (yeşil çizgi) genel olarak birbiriyle yakın seyrettiği görülmektedir. Eğitim veri seti boyutu arttıkça skorlar arasında ciddi bir farklılık oluşmaması, modelin aşırı öğrenme eğiliminin düşük olduğunu belirtmektedir. Şekil 8b'de XGBoost modelinde de benzer biçimde eğitim ve doğrulama skorlarının birbirlerine yakın seyrettikleri görülmektedir. Ancak özellikle küçük veri boyutlarında, eğitim skoru ve doğrulama skoru arasında kısmen daha belirgin dalgalanmalar gözlemlenebilmektedir. Veri seti boyutu arttıkça bu dalgalanmalar azalmakta ve daha istikrarlı bir düzeye oturmaktadır. Şekil 8c'de SVM modelinin öğrenme eğrisinde, düşük veri boyutlarında eğitim skoru ile doğrulama skoru arasında zaman zaman daha keskin farklılıklar oluştuğu izlenmektedir. Bu durum, modelin başlangıç aşamasında veriye uyum sağlarken dalgalanma yaşadığını göstermektedir. Ancak veri miktarı arttıkça, eğitim ve doğrulama skorları daha dengeli bir hâle gelmekte ve skorlar arasındaki makas daralmaktadır. Şekil 8d'de CatBoost modelinde hem eğitim hem de doğrulama skorlarının görece stabil bir şekilde artış gösterdiği görülmektedir. Modellerin eğitim skorları ve doğrulama skorları arasında küçük farklılıklar görünmektedir. Bu durum da modellerin aşırı uyum (overfitting) sorunu yaşamadığını göstermektedir. Kesişen eğriler, modellerin eğitim verisi ve doğrulama verisi üzerinde benzer performanslar sergileyerek, genel anlamda doğru genellemeler yaptıklarına işaret etmektedir.

6. Sonuç

Makine öğrenimi modellerinin, karmaşık ilişkileri ve etkileşimleri anlamlandırma yetenekleri, politika yapıcılar ve akademisyenler için büyük fırsatlar barındırmaktadır. Yapılan çalışma, Türkiye'de çocuk işçiliğinin nedenlerini ve etkilerini analiz etmek üzerine, makine öğrenimi modellerinin öngörü potansiyelini değerlendiren

bir araştırma niteliği taşımaktadır. Analizlerde kullanılan veri seti, TÜİK 2019 Çocuk İşgücü Araştırması mikro verilerinden oluşmakta olup, 5-17 yaş arası çocukların istihdam, eğitim durumu, demografik özellikleri ve ailevi koşulları gibi çok boyutlu özelliklerini kapsamaktadır.

Resmi bir veri kaynağının kullanılması, elde edilen sonuçların doğruluğunu ve geçerliliğini artırırken, Random Forest, SVM, XGBoost ve Gradient Boosting modelleri ile yapılan analizler, veri odaklı stratejik politika geliştirme süreçlerine önemli katkılar sağlamaktadır. F1 Skoru gibi metriklerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi, modellerin performansını dengesiz veri kümelerinde bile etkili bir şekilde ölçebilmiştir. Çalışma bulguları hem akademik literatüre hem de politika yapıcıların veri temelli kararlar almasına yönelik kaynak sağlamaktadır.

Analiz sonucunda, çocukların yaş grubunun çalışma durumunu belirlemede en etkili değişken olduğu saptanmıştır. 5-11 yaş grubundaki çocuklar genellikle eğitimde kalırken, 15-17 yaş grubundaki çocukların istihdam oranları ise daha yüksektir. Cinsiyet bazında yapılan incelemede, erkek çocukların çalışma oranlarının kız çocuklara göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Eğitime devam eden çocukların istihdama katılma olasılığının önemli ölçüte azaldığı saptanmıştır. Elde edilen bulgular, eğitim politikalarının çocuk işçiliği ile mücadelede kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Çocuk işgücü ile mücadelede bölgesel farklılıkları dikkate alan etkin ve yöreye özgü stratejiler geliştirilebilir ve eğitim destekli sosyal yardım projelerine odaklanılabilir. Çocuk işgücü kullanımının yaygın olduğu tarım, tekstil ve hizmet gibi sektörlerde etkin denetim mekanizmaları kurulması önemlidir.

Makine öğrenimi modellerinin performans karşılaştırmasında, Random Forest ve SVM modelleri, F1 skoru açısından en başarılı algoritmalar olarak ön plana çıkmaktadır. XGBoost ve CatBoost modelleri ise doğruluk oranlarında tutarlı performanslar sergilemiş, fakat daha düşük F1 skorları ile nispeten daha başarısız olmuştur. Yapılan analizlerde yaş grubu ve eğitim durumu değişkenlerinin tahmin modelleri üzerindeki etkisi vurgulanmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma, makine öğrenimi modellerinin sosyal bilimler alanındaki potansiyelini vurgulayarak, akademik literatüre ve politika yapıcılara veri odaklı stratejiler geliştirme konusunda değerli katkılar sağlamaktadır. Gelecekte yapılacak benzer çalışmalar, daha geniş veri setleri ve hibrit modeller kullanılarak yapılabilir. Yapılan çalışma hem mevcut sorunların tespitinde hem de gelecekteki iyileştirme çabalarına yönelik veri odaklı yaklaşımların geliştirilmesi açısından rehber niteliğindedir.

Kaynaklar

[1] T.C. Aile Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı. Çocuk İşçiliği ve Eğitim Öğretmen El Kitabı. Ankara: Genel Yayın No: 72, 2018. ISBN: 978-605-7888-00-6.

[2] Türkiye İstatistik Kurumu. Türkiye Çocuk İşgücü Mikro Veri Seti. Ankara, 2019.

[3] Eşidir KA, Gür YE. Yapay sinir ağları ile Türkiye plastik sektörü ithalat tahmini: 2023 yılı Nisan-Aralık ayları. Akad Hassasiyetler. 2023;10(23):91-114.

[4] Zhu X, Sawhney R, Upreti G. Determinates of employee voluntary turnover and forecasting in departments: A case study. Stud Eng Technol. 2016;3(1):64-73.

[5] Ji H. Robustness analysis on stock market prediction method. Highl Bus Econ Manag 2023;21:791-801.

[6] Bae CY, Im Y, Lee J, Park C, Kim M, Kwon HU, Kim J. Comparison of biological age prediction models using clinical biomarkers commonly measured in clinical practice settings: AI techniques vs. traditional statistical methods. Front Anal Sci. 2021;1.

[7] Pakarinen O, Karsikas M, Reito A, Lainiala O, Neuvonen P, Eskelinen A. Prediction model for an early revision for dislocation after primary total hip arthroplasty. PLOS ONE. 2022;17(9):e0274384.

[8] Speer AB. Empirical attrition modelling and discrimination: Balancing validity and group differences. Hum Resour Manag J. 2021;34(1):1-19.

[9] Wu Y. Job embeddedness review: Presentation, measurement and development. Adv Econ Manag Pol Sci 2023;47(1):169-174.

[10] Çöpoğlu M. Türkiye'de Çocuk İşçiliği. Iğd Üniv Sosyal Bilim Derg. 2018;(14):357-398.

[11] Gül T, Öztürk M. Çocuk İşçiliğinin Nedenleri Üzerine Kavramsal Bir Çalışma. Süleyman Demirel Üniv Sosyal Bilim Enst Derg. 2020;(37):130-148.

[12] Tosunoğlu E, Yılmaz R, Özeren E, Sağlam Z. Eğitimde Makine Öğrenmesi: Araştırmalardaki Güncel Eğilimler Üzerine İnceleme. Ahmet Keleşoğlu Eğ Fak Derg. 2021;3(2):178-199.

[13] Eriş Dereli B. Çocuk istihdamını etkileyen faktörler. İstanbul Tic Üniv Sosyal Bilim Derg. 2021;20(42):1505-1519.

[14] Kömüryakan F, Çağlayan E. Türkiye'de Çocuk İşçiliğinin Simetrik ve Asimetrik Modeller İle Analizi: Logit, Probit, Log-Log ve Clog-Log. Hacettepe Üniv İktis İdari Bilim Fak Derg. 2022;40(4):776-798.

[15] Yardımcıoğlu D. Çocuk İşçiliğini Önlemeye Yönelik Yeni Bir Adım: Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin Kurumsal Sürdürülebilirlik Durum Tespitine Dair Direktif Önerisi. Dicle Üniv Hukuk Fak Derg. 2023;28(48):225-276.

[16] Özdemir NE, Akyiğit Albayrak E, Korkutan M. Türkiye'de çocuk işçiliği: sağlık ve sosyal yaşam koşulları bağlamında bir değerlendirme. Sosyal Bilim Akademi Derg. 2024;7(1):44-66.
[17] Suthaharan S. Big data classification: Problems and challenges in network intrusion prediction with machine learning. ACM SIGMETRICS Perform Eval Rev. 2014;41(4):70-73.
[18] El Naqa I, Murphy MJ. What is machine learning? In: Machine Learning in Radiation Oncology. Springer; 2015:3-11.
[19] Eşidir KA, Gür YE. Multilayer Perceptron (MLP) ile Türkiye İşlenmemiş Alüminyum Sektörü İthalat Tahmini: 2023 Yılı Nisan-Aralık Ayları Dönemi Üzerine Bir İnceleme. Erciyes Üniv İktis ve İdari Bilim Fak Derg. 2024;(68):57-64.
[20] Gür YE. Development and application of machine learning models in US consumer price index forecasting: Analysis of a hybrid approach. Data Sci Finance Econ. 2024;4(4):469-513.
[21] Zeiler MD, Fergus R. Visualizing and understanding convolutional networks. In: Computer Vision – ECCV 2014. Springer; 2014:818-833.
[22] Gür YE. Stock price forecasting using machine learning and deep learning algorithms: A case study for the aviation industry. Fırat Üniv Müh Bilim Derg. 2024; 36(1): 25-34.
[23] Chen T, Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining 2016.
[24] Gür YE. Forecasting the euro exchange rate using deep learning algorithms and machine learning algorithms. İstanbul Tic Üniv Sosyal Bilim Derg. 2024; 23(49): 1435-1456.
[25] Wang L, Wang X, Chen A, Jin X, Che H. Prediction of Type 2 Diabetes Risk and its effect evaluation based on the XGBoost model. Healthcare. 2020; 8(3): 247.
[26] Liang W, Luo S, Zhao G, Wu H. Predicting hard rock pillar stability using GBDT, XGBoost, and LightGBM algorithms. Mathematics. 2020; 8(5): 765.
[27] Oguine OC, Oguine MB. Comparative analysis and forecasting on the death rate of COVID-19 patients in Nigeria using random forest and multinomial Bayesian epidemiological models. J Clin Case Stud Rev Rep. 2021; 1-7.
[28] Thi Mai H. Van, Hoang Trinh S, Ly H. B. Enhancing compressive strength prediction of roller compacted concrete using machine learning techniques. Meas J Int Meas Confed. 2023; 218(February): 113196.
[29] Ayhan S, Erdoğmuş Ş. Destek vektör makineleriyle sınıflandırma problemlerinin çözümü için çekirdek fonksiyonu seçimi. Eskişehir Osmangazi Üniv İktis ve İdari Bilim Derg. 2014; 9(1): 175-201.
[30] Cao T, She D, Zhang X, Yang Z. Understanding the influencing factors and mechanisms (land use changes and check dams) controlling changes in the soil organic carbon of typical loess watersheds in China. Land Degrad Dev. 2022; 33(16): 3150-3162.
[31] Wen J, Zhang Y, Yang G, He Z, Zhang W. Path loss prediction based on machine learning methods for aircraft cabin environments. IEEE Access. 2019; 7: 159251-159261.
[32] Zhang Z, Xin Q, Li W. Machine learning-based modeling of vegetation leaf area index and gross primary productivity across North America and comparison with a process-based model. J Adv Model Earth Syst. 2021; 13(10).
[33] Eşidir KA. Türkiye'nin kimyasal madde ithalatının gelecek tahmini: Makine öğrenmesi ve topluluk öğrenme yöntemleri performans analizi. Fırat Üniv Sosyal Bilim Derg. 2025; 35(1): 261-278.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 467-474, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1607863

Turba Ortamında Titanyumun Korozyonunun Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi ile İncelenmesi

Ayhan ORHAN[1], Nurettin ÇEK[2,3,*]
[1] Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
[2] Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
[3] OSTİM Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye
[1] ayorhan@firat.edu.tr, [*2] nurettincek001@gmail.com, [3] nurettin.cek@ostimteknik.edu.tr

(Geliş/Received: 26/12/2024; Kabul/Accepted: 21/01/2025)

Öz: Elektrokimyasal korozyonun oluşumunda önemli rol oynayan toprak türlerinden biri olan turba, dünya kara yüzeyinin yaklaşık %8'ini kaplamaktadır. Ancak literatür, turbaların metalik malzemeler üzerindeki korozyon davranışını incelemede oldukça yetersizdir. Özellikle boru hatlarının metalik malzemelerden imal edildiği düşünüldüğünde, turbanın metalik malzemeler üzerindeki korozyon etkisinin araştırılması ve buna göre stratejiler geliştirilmesi önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu çalışmada, yeraltı boru hattı imalatında yaygın olarak kullanılan metal malzemelerden biri olan titanyumun turba ortamındaki korozyon davranışı açık devre potansiyeli ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi ile incelenmiştir. 24 saatlik açık devre potansiyel gözleminin başlangıcında -0,845 mV olan potansiyel, deneylerin sonunda -0,532 mV olarak ölçülmüş ve böylece daha pozitif bir yöne kaymıştır. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi testlerinden elde edilen Nyquist eğrisi yarım daireseldi ve bu da titanyum metalinin yüzeyinde bir bariyer tabakasının oluştuğunu göstermiştir. Her iki test de titanyum metalinin turbanın korozyon saldırısına karşı direnç gösterdiğini ortaya koymuştur.

Anahtar kelimeler: Titanyum, korozyon, turba, elektrokimyasal empedans spektroskopisi.

Investigation of Corrosion of Titanium in Peat Environment by Electrochemical Impedance Spectroscopy

Abstract: The peat that one of the soil types that plays an important role in the formation of electrochemical corrosion, covers almost 8% of the world's land surface. However, the literature is rather insufficient in studying the corrosion behavior of peats on metallic materials. Especially considering that pipelines are manufactured from metallic materials, investigating the corrosion effect of peat on metallic materials, and developing strategies accordingly has become an important research topic. In this study, the corrosion behavior of titanium, one of the metal materials widely used in underground pipeline manufacturing, in peat environment was investigated by open circuit potential and electrochemical impedance spectroscopy. The potential, which was -0.845 mV at the beginning of the 24-hour open circuit potential observation, was measured as -0.532 mV at the end of the experiments, thus shifting to a more positive direction. The Nyquist curve obtained from the electrochemical impedance spectroscopy tests was semicircular, indicating that a barrier layer was formed on the surface of the titanium metal. Both tests revealed that the titanium metal resisted the corrosion attack of the peat.

Key words: Titanium, corrosion, peat, electrochemical impedance spectroscopy.

1. Giriş

Turba, zengin organik madde içeriği ile anaerobik koşullar sunan bir toprak türü olup doğal ve asidik bir ortamdır [1,2]. Dünya kara yüzeyinin yaklaşık %8'i turba ile kaplıdır ve tropikal iklimlerin hâkim olduğu bölgelerde önemli bir varlığa sahiptir [2]. Ayrıca, turba deniz ortamlarında da mevcuttur [3]. İlaveten, göl ve bataklık ortamları da turbanın mevcut olduğu alanlardır [4]. Örneğin, Dünya Enerji Konseyi'nden alınan bilgilere göre Rusya Federasyonu'ndaki turba yataklarının alanı 1.390.000 km^2'ye ulaşırken, turba kalıntı rezervlerinin 30,8 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir ve bu (uzman değerlendirmelerine göre) dünya çapındaki yatakların %40'ını içermektedir [5]. Turba ortamları son yıllarda yeraltı boru hatları için aşındırıcı ortamlardan biri olarak dikkat çekmektedir. Geniş bir alanı kaplayan turba ortamlarından geçen petrol ve doğal gaz boru hatlarının en çok etkilendiği sorunlardan biri de bu ortamların neden olduğu korozyondur. Yeraltı boru hatlarında turba korozyon özelliklerini inceleyen bir çalışmada, X70 boru hattı çeliği turba içine yerleştirilmiş ve 60 güne kadar bu ortama maruz bırakılmıştır. Deneyler sonunda, X70 çeliğinin dış yüzeyi çeşitli analitik yöntemlerle (Taramalı Elektron Mikroskobu-Enerji Dağıtıcı X-ışını analizi, X-ışını Kırınımı analizi ve Lazer Raman spektroskopisi) karakterize

[*] Sorumlu yazar: nurettincek001@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-7648-2566, [2] 0000-0001-6120-9228

edilmiştir. Analiz sonuçları, X70 çeliğinin turba ortamında korozyona uğrayabileceğini göstermiştir [2]. Ancak potansiyostat/galvanostat cihazı kullanılarak korozyon davranış testleri yapılmadığından X70 çeliğinin turba ortamındaki korozyon davranışı veya mekanizması hakkında bilgi verilmemiştir. Başka bir çalışmada, X70 boru hattı çeliğinin turba ortamındaki durumu incelenmiş ve korozyon morfolojisi hakkında bilgi bulunurken, korozyon davranışı veya mekanizması hakkında bilgi bulunmamıştır [6]. Başka bir çalışmada, turba ortamındaki çelik borunun korozyon özelliği, sadece çelik boruda oluşan çukurların derinliği ölçülerek anlaşılmaya çalışılmıştır [7]. Ancak potansiyostat/galvanostat cihazı kullanılarak korozyon davranışı veya mekanizması hakkında hiçbir çalışma yapılmamıştır. Önceki çalışmalardan da görülebileceği gibi [2, 6, 7], turba ortamında yeraltı boru hattı çeliğinin korozyon davranışı ve mekanizması hakkında yapılan çalışmalar oldukça yetersizdir. Özellikle, potansiyostat/galvanostat cihazı kullanılarak korozyon davranışını mekanizmalarıyla birlikte açıklama ihtiyacı hala devam etmektedir. Ayrıca, turba yataklarının işletilmesinde kullanılan çelik esaslı kesici takım malzemesinin korozyonu hala büyük bir endişe kaynağı ve çözüm bekleyen bir sorun olmaya devam etmektedir. Bu nedenle, kesici takım malzemesinin seçimi için ek gereksinimler ortaya çıkmaktadır [5].

Hem ekonomik hem de doğal kaynakların endişe verici bir israfı olarak sunulan korozyon, metal veya metal esaslı malzemelerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinde bir değişikliktir [8]. Korozyondan en çok etkilenen uygulamalardan biri olan yeraltı boru hatları, 50 ila 100 yıllık bir hizmet ömrü sağlamak üzere tasarlanmıştır, ancak gerçek hayatta çok fazla arızalanır ve daha kısa bir hizmet ömrü sağlarlar. Bilimsel çalışmalarda bu arızaların en büyük nedeninin toprak kaynaklı korozyon olduğu bildirilmiştir. Üstelik, bu arızaların herhangi bir uyarı olmaksızın aniden meydana geldiği vurgulanmıştır. Dahası, arızaların tekrarlaması sorunu daha da artırmaktadır. Buradan da anlaşılacağı üzere yeraltı boru hattı arızaları ile ilgili güncel bilgiler maalesef yetersizdir [9]. Yeraltı boru hatlarında korozyonun zararları genel olarak; borunun kendisine doğrudan zarar vermesi, borunun uzunlamasına gerilmeye maruz kalması, metal kaybı, boru duvarının delinmesi, servis ömrünün azalması, varsa kaplamanın parçalanması ve hidrojen gevrekleşmesi olarak sunulmaktadır. Tüm bunlar servis kalitesini düşürmekte ve rehabilitasyon giderleri, onarım ve değiştirme ücretleri, bakım maliyetleri ve işçilik maliyetleri ortaya çıkarmaktadır [10]. Yeraltı boru hatlarında korozyona neden olan faktörlerin ana omurgasını %67 oranında doğrudan toprak, %12 oranında farklı metaller/toprak, %10 oranında kaplama hasarları/bozulmaları, %10 oranında diğer faktörler ve %4 oranında kaçak akımlar oluşturmaktadır. Öte yandan, gelişmiş korozyon koruma teknolojileri kullanılsa bile yeraltı boru hatlarındaki korozyonun tam olarak kontrol altına alınamadığı, bu nedenle de boru hattı ortamında metalik boru hatlarının korozyon nedenlerinin anlaşılması ve belirlenmesinin, uygun koruma ve kontrol tekniğinin seçilmesinde ilk adım olduğu bildirilmiştir. Yeraltı boru hatlarının imalatında kullanılan malzemeler çoğunlukla çelik esaslı metal malzemeler olup, toprak korozyonuna karşı dirençlerinin gerçek dünya koşullarında istenilen seviyeye ulaşmadığı açıktır. Boru malzemesinin en doğru şekilde seçilmesinin sadece korozyonu önlemede değil, aynı zamanda boru hattında taşınan ürünün kalitesini korumada da etkili olduğu düşünüldüğünde, çelik malzemelere yeni alternatifler bulunması gerekliliği ortaya çıkmaktadır [11].

Ayrıca, yeraltı boru hattı korozyonu ve kesici takım malzemesi konuları göz önüne alındığında, turba ve korozyona dayanıklı metalik malzemelerin neden olduğu korozyon davranışı konusunda hala araştırmaya ihtiyaç olduğu açıktır. Korozyona dayanıklı metal malzemeler arasında yer alan titanyum (Ti) ve alaşımları, çoğunlukla yüksek korozif ortamlarda kullanıma uygundur ve ince, kompakt, iyi yapışmış bir oksit tabakası oluşturma eğilimleri nedeniyle çoğu ortamda mükemmel korozyon direnci sunmaktadırlar [12]. Diğer taraftan, yeraltı boru hatlarında kullanılan çelik malzemeler gibi titanyum ve alaşımları da kaynaklanabilirlik özelliklerine sahiptir [13]. Tüm bu bilgilerden yola çıkarak yapılan bir çalışmada, X80 boru hattı çeliği olarak tanıtılan malzemeye Ti eklendiğinde elde edilen malzemenin mekanik özelliklerinin %8 oranında iyileştirildiği ve korozyon ağırlık kaybı oranının %28 oranında azaltıldığı belirlenmiştir [14]. Yeraltı metal boru hatlarının toprak korozyon ortamlarında giderek daha fazla kullanılan titanyum esaslı malzemeler üzerinde yapılan bir çalışmada, toprak çözeltilerinin Ti-3Mo alaşımı üzerindeki korozyon etkisi incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, Ti-3Mo alaşımının toprak çözeltilerine karşı dirençli olduğunu göstermiş, ancak sonunda kaçınılmaz olarak korozyonun meydana geldiğini de açıkça göstermiştir [15]. Titanyum malzeme, iyi korozyon direnci sağladığı ve korozyona karşı koruma açısından olumlu sonuçlar ürettiği için, yer altındaki depolama tankı için kullanılan etkili akım katodik koruma sisteminde iletken çubuk ve metal ızgara olarak tercih edilmiştir [16].

Olumlu özelliklerine rağmen, turba içindeki titanyumun korozyon davranışı hakkında herhangi bir çalışmaya rastlamadık. Özellikle, titanyum ve alaşımlarının yeraltı boru hatlarında turbanın neden olduğu korozyona karşı etkili bir metal bazlı malzeme olarak başarılı bir şekilde kullanılması oldukça ümit vericidir. İlaveten, turba içindeki titanyumun korozyon davranışı merak konusu olmaya devam etmektedir.

Korozyon çalışmalarında kullanılan test yöntemlerinden birisi olan elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EES), metalik malzemelerin farklı ortamlardaki elektrokimyasal davranışlarını değerlendirmek için kullanılan bir

tekniktir. Bu teknik tahribatsız test tekniği olup korozyon tepkime mekanizmalarını araştırmak ve korozyon performansını tahmin etmek için kısa bir test süresi içinde güvenilir veriler sağlamaktadır [17].

Bu çalışma esas olarak turba içindeki yüksek saflıktaki titanyumun korozyonuna odaklanmakta ve turbaya maruz kalan titanyum malzemelerin korozyon davranışını, bir tahribatsız test yöntemi olan EES testi ile açıklamaktadır. Dolayısıyla, turba içindeki titanyum malzemelerin korozyon davranışı hakkında bilgiler ortaya çıkarmak önemli bir bilimsel adım olup gelecekteki çalışmalar için büyük bir vizyon kapısı açma potansiyeline sahiptir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, turbanın titanyum üzerindeki korozyon mekanizmasının anlaşılmasında ve turba korozyonunun genel prensiplerinin ortaya çıkarılmasında faydalı olma potansiyeline sahiptir.

2. Malzemeler ve Yöntem

Piyasada orkide toprağı olarak satılan bir turba türü turba materyali olarak kullanıldı. Turba materyalinin özellikleri hakkında üretici tarafından sağlanan bazı katalog değerleri kullanıldı ve Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Turba malzemesinin kimi özellikleri.

Parametre	Değer
PH değeri	5,4-5,9
Organik madde oranı	%99
Elektrik iletkenliği	~270 µS/cm
Azot	100-180 mg/L
Fosfor	120-200 mg/L
Potasyum	140-220 mg/L

Turba malzemesi 50 gram olarak tartıldı ve 50 mL saf suya konuldu. Daha sonra, turba ve suyun homojen bir karışımını sağlamak için yaklaşık 10 dakika elle mekanik olarak karıştırıldı ve karışım küp şeklindeki bir cam kutuya aktarıldı. Daha sonra, bir platin elektrot, bir gümüş/gümüş klorür (Ag/AgCl) referans elektrot ve çalışma elektrodu olarak saf titanyum, üç elektrotlu bir elektrokimyasal hücre oluşturmak için cam (5 x 5 x 5 cm) kutuya yerleştirildi. Çalışma elektrodu olarak adlandırılan titanyum malzeme, Çin'de faaliyet gösteren bir şirket olan Shanghaimetal'den satın alındı. Şirketin sağladığı katalog verilerine göre, yüksek saflık değerlerine (%99,9) sahiptir. Titanyum malzeme, 0,956 gram ağırlığında, 68,2 mm uzunluğunda ve 2 mm çapında bir tel formundadır. Titanyumun turba ortamındaki korozyon davranışını anlamak için gerekli testler, bir potansiyostat/galvanostat (Ivium, Vertex.1A (Hollanda)) cihazı kullanılarak üç elektrotlu bir elektrokimyasal hücrede gerçekleştirildi. Bu elektrokimyasal hücre platin yardımcı elektrot, gümüş/gümüş klorür referans elektrot ve titanyum çalışma elektrotundan oluşmaktadır [18,19]. Buradaki korozyon davranışını anlamak için ilk adım olan açık devre potansiyeli (ADP) ölçümü, 24 saat boyunca her saniyeye karşılık gelen ADP değerinin kaydedilmesiyle gerçekleştirildi [20]. Kararlı bir ADP elde edildikten sonra, tahribatsız bir test yöntemi olan EES testi yapılarak Nyquist eğrisi elde edildi. EES testleri 100 kHz ila 0,01 Hz frekans aralığında ve 10 mV alternatif akım genliğinde gerçekleştirildi [17, 21, 22].

3. Bulgular ve Tartışma

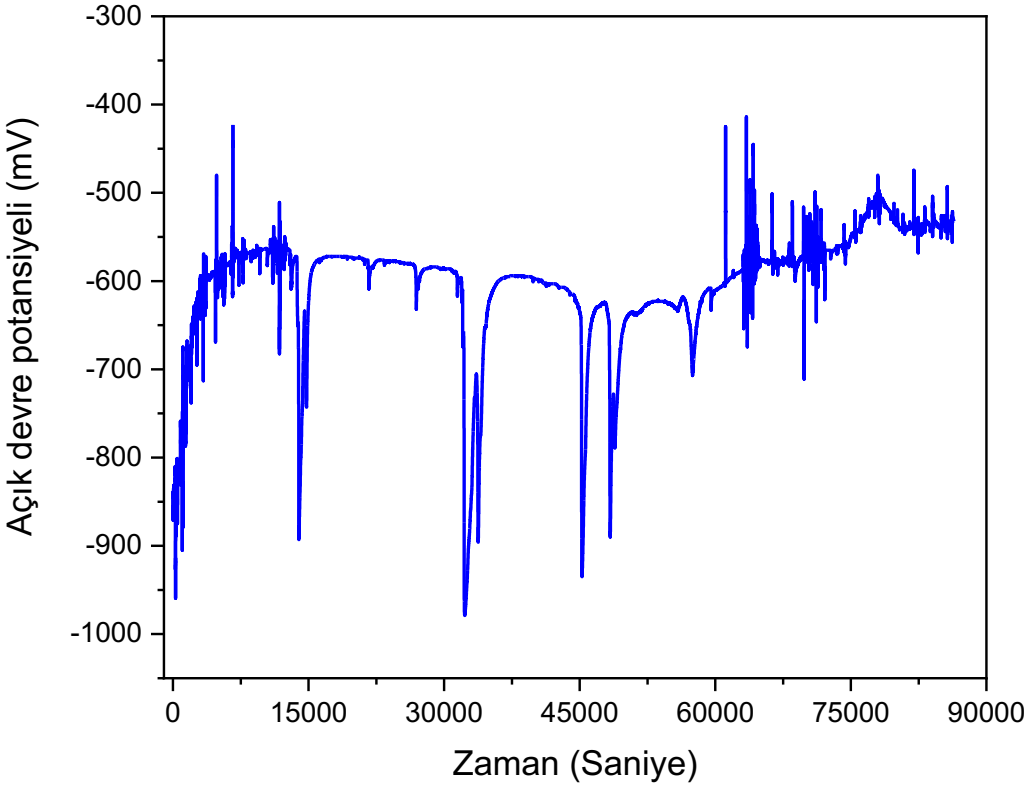
Üç hücreli elektrokimyasal hücre, titanyum metal malzemenin turba çözeltisi ortamındaki elektrokimyasal performansını değerlendirmek için başarıyla kullanıldı. Elektrolit (çözelti) içerisine daldırılan metal malzemede ölçülen elektrot potansiyelinin değerinin esasen çözelti ortamına daldırılan metalin yüzey durumunu yansıttığı bilinmektedir. ADP, metal korozyon eğilimini tahmin etmede önemli parametrelerden biri olarak kabul edildiğinden elektrokimyasal ölçümlerin ilk aşaması olarak ADP ölçümü gerçekleştirildi. Bir başka deyişle, ADP bir malzemenin korozyon direncini değerlendirmek için yapılan testlerden birisidir. Titanyum malzemenin turba ortamında istikrarlı bir ADP göstermesi amacıyla 24 saat boyunca ADP gözlemlenmiştir [23].

Metal malzemelerin korozyon eğilimini tahmin etmede önemli parametrelerden biri olduğu düşünülen ADP ölçümleri Şekil 1'de verilmiştir. En düşük ADP değeri -0,979 mV, en yüksek ADP değeri ise -0,394 mV olarak ölçülmüştür. Deneyin başında ADP değeri -0,845 mV olarak ölçülürken, deneyin sonunda -0,532 mV olarak ölçülmüştür. Şekil 1'de görüleceği üzere, turba ortamına titanyum malzemenin daldırma süresi arttıkça ADP hafifçe pozitif değerlere kaymıştır. Bu da anodik sürecin güçlü bir şekilde engellendiğini ve koruyucu oksit

filminin oluşmaya başladığını göstermektedir. Bu nedenle, titanyum malzemenin turba ortamındaki elektrot süreci anot prosesi tarafından kontrol edilir ve bu da ADP değerinin pozitif yönde kaymasına yol açmıştır [23]. ADP değeri ne kadar yüksek olursa malzemenin korozyon direncinin de o kadar iyi olduğu bilgisi göz önünde bulundurulduğunda [24], deneylerin sonunda ADP değerindeki artışa bağlı olarak korozyon direncinin deneylerin başlangıcına göre iyileştiği açıkça anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, ADP ölçümleri sırasında potansiyel değerinin dalgalanması, titanyum yüzeyinde oksit filminin oluşumu ile bu filmin çözünmesi arasındaki anlık rekabet ile açıklanabilir. Özellikle, ilk 15000 saniyeye kadar çok dalgalı bir ADP değerinin görülmesi bu süreye kadar titanyum yüzeyinde oksit filminin oluşumu ve çözünmesi arasındaki anlık rekabetin çok ciddi bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Titanyum malzemeyi turba çözeltisine daldırma sırasında, titanyum yüzeyinde yeni oluşan oksit filmi çözülebilir ve daha sonra yerel olarak yeniden oluşabilir. Film oluşumu ve çözünme arasındaki bu eş zamanlı rekabet, titanyum malzeme yüzeyinde kararsız bir elektrokimyasal işlemle sonuçlanır ve dalgalanan ADP değerlerine yol açmıştır [24, 25]. Yaklaşık 15000 saniye ila yaklaşık 32000 saniye arasında daha kararlı bir ADP değeri görülmüştür. Burada, turba çözeltisinde bekleyen titanyum malzeme yüzeyinde oksit filminin daha dayanıklı bir şekilde oluştuğu ve oksit filmi oluşumu ila çözünmesi arasındaki anlık rekabetin oldukça az olduğu söylenebilir. Dolayısıyla, bu süre zarfında titanyum malzeme yüzeyinde kararsız bir elektrokimyasal işlemle sonuçlanmayıp daha kararlı bir elektrokimyasal süreç gözlemlenmiş ve daha az dalgalanan istikrarlı ADP değerlerine yol açmıştır. Yaklaşık 32000 ila 45000 saniye aralığında kararlı ADP değerleri görülmüştür. Bu da, titanyum malzeme yüzeyinde oksit filminin dayanıklılığı koruyarak varlığını sürdürdüğünü ve oksit filmi oluşumu ila çözünmesi arasındaki anlık rekabetin oldukça az bir şekilde devam ettiğini göstermektedir. Bunun sonunda bu süreye dek daha az dalgalanan istikrarlı ADP değerleri ile ölçülmüştür. Yaklaşık 45000 ila 60000 saniye arasında, negatif yönde en düşük değere düşen dikkat çeken keskin 3 adet ADP bandı görülmektedir, bu kısımlarda turba çözeltisindeki titanyum malzeme yüzeyinde oksit tabakası bozulmuş olup hemen tekrar oluşmuştur. Ardından özellikle de yaklaşık 52000 ila 60000 saniye arasında tekrar istikrarlı bir ADP sergilemiştir. Bu da titanyum yüzeyinde oksit tabakasının tekrar oluşarak koruyucu bir bariyer görevi üstlendiğinin bir göstergesi olabilir. Yaklaşık 60000 saniye ila 75000 saniye arasında çok değişken dalgalı bir ADP görülmüştür. ADP en pozitif değerine bu aralıkta ulaşmış olup yaklaşık -412 mV değerine zirve yapmıştır. Lakin, bu değeri koruyamayarak tekrar daha negatif değerlere kaymıştır. ADP değişiminin bu zaman aralığında çok değişken olması titanyumun turba çözeltisine daldırılması sırasında zamanla oluşan oksit filminin çözüldüğüne ve daha sonra yerel olarak yeniden oluştuğuna atfedilmektedir [23, 25]. Bu süre aralığında titanyum yüzeyinde film oluşumu ve çözünme arasındaki eş zamanlı rekabet, titanyum malzeme yüzeyinde kararsız bir elektrokimyasal işlemle sonuçlanmıştır. Bunun sonucunda ADP değerlerinde çok hızlı dalgalanmalar görülmüştür. Yaklaşık 75000 saniye ila 86400 saniye aralığında ADP dalgalanmaları bir önceki zaman aralığına göre daha dar bir potansiyel aralığında gerçekleşmiştir. Özellikle de 7500 ila 82500 saniye aralığında görülen geniş tepe dikkat çekmiştir. Bu tepe, titanyumun turba ortamında ADP değerinin yavaş yavaş pozitif yöne kaydığını ve zirveye ulaştıktan sonra yavaş yavaş tekrar negatif yöne kaydığını göstermiştir. Ardından daha kararlı bir ADP değişimi olmuş ve ölçümün sonuna doğru neredeyse sabit bir durum sergilemiştir. Burada titanyum yüzeyinde film oluşumu ve çözünme arasındaki eş zamanlı rekabetin artık daha kararlı bir şekilde gerçekleştiği söylenebilir. Nihayetinde deneylerin başlangıcına kıyasla deneylerin sonunda ADP değerinin daha pozitif yönde kaydığı görülmüştür. Bu da titanyumun yüzeyinde koruyucu bir oksit tabakası oluştuğuna işaret etmektedir. ADP değerinin pozitif önde kayması sonucunda daha asil bir korozyon potansiyeli sergilediği söylenebilir. Bu nedenle deneylerin sonunda, başlangıca kıyasla daha pasif ve kararlı korozyon davranışı sergilediği anlaşılmaktadır [25].

ADP, metallerin elektrokimyasal korozyonunun termodinamik eğilimini temsil ederek katodik ve anodik reaksiyonların kuplaj potansiyeli olarak işlev görür. Daha pozitif bir ADP, malzemenin daha iyi termodinamik kararlılığını ve korozyon oluşma eğiliminin daha düşük olduğunu gösterirken daha negatif bir ADP malzemenin daha kötü termodinamik kararlılığını ve korozyon oluşma eğiliminin daha yüksek olduğunu gösterir. Bu bilgi dikkate alınarak turba çözeltisinde titanyumun ADP değerinin zamanla pozitif yöne kayması, termomekanik kararlılığın artmasına ve korozyona karşı daha düşük bir duyarlılığa yol açar. Titanyum malzemesinin deneylerin sonundaki ADP değeri deneylerin başına göre daha pozitif ve daha yüksektir. Bu da turba çözeltisinde titanyum malzemesinin artan termodinamik kararlılığına işaret eder. Bu, deneylerin başlangıcına kıyasla deneylerin sonunda turba çözeltisindeki titanyum malzemesinin korozyon direncinde bir artma olduğunun göstergesi olarak ifade edilebilir. Nihayetinde deneylerin sonunda elektrokimyasal aktivitenin azaldığı ve korozyon direncinin arttığı çıkarımı yapılabilir [26].

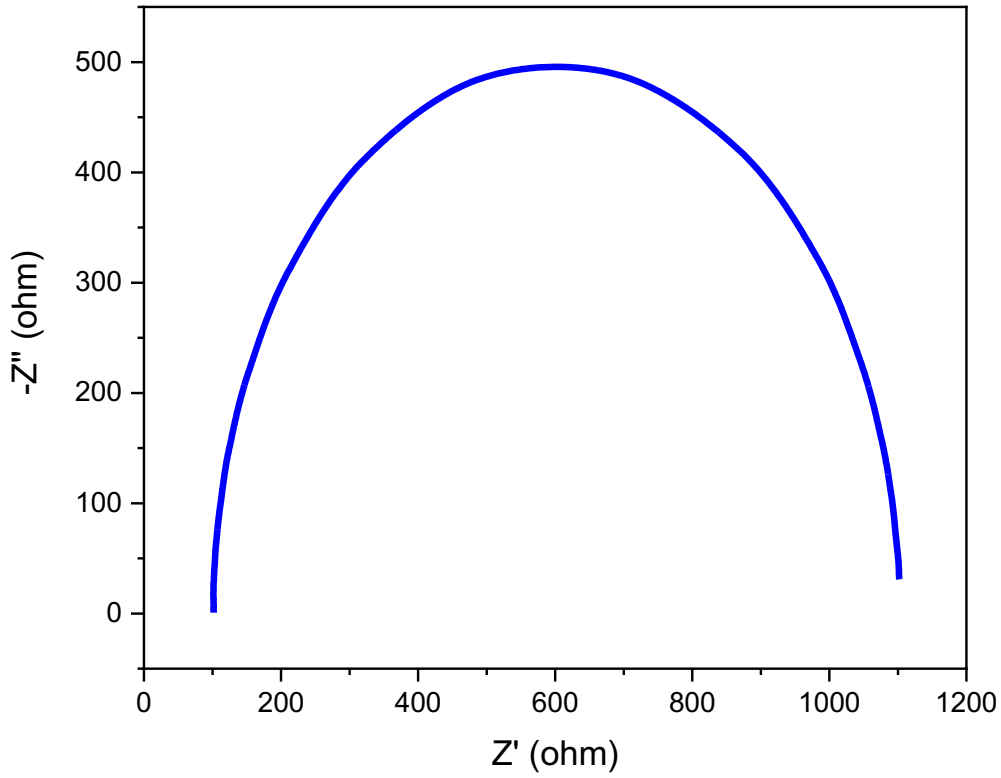
Deneylerin başından sonuna doğru genel bir değerlendirme yapıldığında, turbadaki titanyumun başlangıçtakine kıyasla zamanla daha fazla katodik işlem sergilediği açıktır. Bu, anodik işlemin zamanla güçlü bir şekilde engellendiğini ve koruyucu bir oksit filminin oluşmaya başladığını gösterir. Bu nedenle, ADP değerinde pozitif yönde bir kaymaya yol açmıştır. Bu da korozyona karşı direnç sergilediğinin bir göstergesidir.



Şekil 1. Turba ortamında titanyumun ADP'sinin gözlemlenmesi.

ADP izleme işlemi sonrasında EES testi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Elektrokimya uygulamaları başta olmak üzere çeşitli bilimsel alanlarda etkin bir şekilde kullanılan elektrokimyasal bir teknik olan EES, diğer korozyon analizi yöntemlerine kıyasla geniş frekans aralığında çalışılma olanağı sunar. Bu sayede titanyum çalışma elektrotunda ortaya çıkan tepkimeler analiz edilerek bahse konu tepkimeler hakkında daha çok ve doğru veri elde edilebilmesini mümkün kılar [27]. EES testleri küçük polarizasyondan etkilenen yüzey empedansı hakkında neredeyse anında bilgi sağlar. Bu empedans, korozyon oranıyla ters orantılıdır ve çözünmenin bir göstergesi olarak kullanılabilir. EES testlerinden elde edilen Nyquist grafiği veya eğrisi, malzemenin korozyon direnci hakkında bilgi sağlamaktadır. Bu grafikte malzemenin korozyonuna karşılık gelen elektrokimyasal tepkimeler mevcuttur. Bu tepkimeler nedeniyle yük (elektron) transferi hakkında bilgiler elde edilebilmektedir. Bu kapsamda Nyquist eğrisinde genellikle bir yarıçap ortaya çıkması beklenir ve ortaya çıkan yarıçap, malzemenin korozyon direnciyle ilişkilidir. Sonuç olarak Nyquist grafiklerine göre ortaya çıkan yarıçap ne kadar büyükse, mikro düzeyde elektron transferinin o kadar az mümkün olduğu ifade edilmektedir [28].

Titanyum malzemenin turba çözeltisindeki korozyon davranışının analiz edilmesi sırasında tahribatsız bir analiz imkânı sunmuştur. EIS testlerinden elde edilen Nyquist eğrileri Şekil 2'de verilmiştir. Bu eğriler, görülen gerçek (Z') ve sanal (-Z'') bileşenler arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Bu ilişki sırasında oluşan eğri, malzemelerin korozyon özelliklerini değerlendirmenin kolay bir yoludur. Nyquist grafiğinde ortaya çıkan yarım dairelerin çapları çok önemli bir parametredir. Dairenin çapı ne kadar büyükse, malzemenin o kadar iyi korozyon direncine sahip olması beklenir [29, 30]. Burada, bu deneysel koşullar altında çift katmana karşılık gelen tek bir kapasitif direnç arkını görülmektedir. Nyquist diyagramı, ölçülen kapasitif direnç arkının tam bir yarım daireye benzediğini göstermektedir. Burada, yalnızca bir kapasitif döngü görülmesi korozyon tepkimesinin yük transfer süreci tarafından kontrol edildiğini göstermektedir [31]. Bu da yük transferinin titanyum ile turba arasında gerçekleştiği anlamına gelir. İlaveten, Şekil 2'de görülen yarım daire şekli, titanyum metali yüzeyinde bariyer tabakası oluştuğunu göstermektedir. Oluşan bu bariyer tabakası, turbanın sebep olduğu korozyona karşı titanyum metalinin direnç göstermesine olanak tanımıştır [32, 33]. Bu sonuçlar, ADP gözlemi sonuçlarıyla tutarlıdır.



Şekil 2. Turba ortamında titanyumun EES testlerinden elde edilen Nyquist eğrileri.

ADP ve EES testlerinden elde edilen önemli bulgular, turba çözeltisinde titanyumun korozyon davranışı hakkında bilgiler sunmuştur. Bu çalışma, doğal bir malzeme olan turbanın korozyon tepkime ortamı olarak görev yaptığını açıkça göstermiştir. Bu nedenle bu çalışmada, korozyon tepkimesinin turba doğal ortamında bir elektrokimyasal işlem olarak gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Buradan yola çıkarak yapılan EES çalışması, turba çözeltisi ortamında titanyum metali yüzeyinde oksitli film tabakası oluştuğunu açıkça ortaya koyarak bu oksitli film tabakasının metal-çözelti arayüzünde yük transfer tepkimelerine karşı bir bariyer oluşturduğunu doğrulamıştır. Bir başka deyişle, EES testi sayesinde turba çözeltisi ortamındaki titanyum malzemenin yüzeyinde oksitli yapı adsorpsiyonunun oluşumu gösterilmiştir. Bu, titanyum metal malzeme ile çözelti arayüzünde tepkimeleri engellemektedir [34]. Bu sayede, turba çözeltisi ortamında titanyum malzeme korozyona karşı direnç göstermiştir.

Turba çözeltisi ortamında titanyum metal malzeme yüzeyinde oluşan oksitli film tabakası, pasif film olarak da adlandırılmaktadır. Söz konusu pasif film nokta kusurlarına sahiptir. Bu nedenle oksijen (O^{2-}), metal/film arayüzüne doğru göç edebilir. Buna bağlı olarak da pasif film kalınlığı zamanla artabilir ve yeni bir pasif film oluşturabilir. Dikkat çekici bir şekilde, titanyum metal malzeme yüzeyinde pasif davranışın bir çözünme ve bir oluşum süreci olduğu yönünde yaygın bir görüş vardır. Yani, pasif filmin, Denklem 1'deki tepkimeyle pasifleştirme sürecinde çözünmesiyle birlikte üretilmesi olayının söz konusu olduğu bildirilmiştir [35].

$$TiO_2 + H_2O \rightarrow Ti(OH)_4 + 4H^+ + 4e^- \quad (1)$$

Gerek ADP gerek EES testlerinin birbirleriyle tutarlı olması turba çözeltisinde titanyumun korozyon davranışının açıklanması konusunda önemli bir temel sağlamıştır. Titanyumun turba çözeltisi ortamında korozyon sürecinin araştırılmasının, malzemelerin uygulamaya girmesinden önce kritik derecede hayati bir iş olduğu ortaya konulmuştur. Çünkü korozyon, malzemelerin arızalanmasına neden olarak malzemelerin mekanik özelliklerini tehdit edebilir. Bu nedenle, malzemelerin korozyon davranışı üzerine yapılan bu araştırma büyük önem taşımaktadır.

4. Sonuçlar

Yeraltı boru hatlarında meydana gelen korozyon sorununun %67 oranı ile büyük çoğunluğu doğrudan toprak, %12 oranı ile farklı metaller/toprak tarafından oluştuğu bilinmektedir. Bu konudaki korozyon, büyük maliyetlerin ortaya çıkmasına ve yaşam kalitesinin düşmesine sebep olarak ayrı bir sorun olarak varlığını sürdürmekte olup büyük endişeleri beraberinde getirmektedir. Bu bilgiler dikkate alındığında değişik toprak türlerinin korozyon davranışı hakkında araştırmalar yapılması ve korozyon davranışının daha net bir şekilde anlaşılarak ona göre malzeme ve tasarım yapılması gerektiği apaçık ortadadır. Yeraltı boru hatlarının imalatında büyük çoğunlukla çelik esaslı malzemeler kullanılsa da toprağın sebep olduğu korozyona karşı tahmin edildiği kadar ömür sunamadıkları gerçeği çeliğe alternatif malzemelerin kullanılması gerektiğini apaçık göstermektedir. Titanyum malzemenin turba ortamındaki korozyon davranışı üç elektrotlu elektrokimyasal hücrede bir potansiyostat/galvanostat cihazı kullanılarak araştırıldı. İlk aşama olan ADP gözlemi 24 saat boyunca sürdürüldü ve ölçümün başlangıcında -0,845 mV olan ADP, ölçümün bitiminde -0,532 mV olarak ölçülmüştür ve daha pozitif yöne doğru kaymıştır. Bunun nedeninin, turbanın korozif etkisine karşı titanyum yüzeyinde koruyucu bir oksit filminin oluşması olduğu sonucuna varılmıştır. Nihayetinde, ADP testi titanyumun turba ortamında korozyona karşı direnç sergilediğini göstermiştir. 24 saatin sonuna doğru ADP değerlerinin -0,532 mV civarında kararlı bir durum sergilemesi nedeniyle EES spektroskopisi testleri gerçekleştirilmiş ve bu testin tercih edilme sebebi olarak tahribatsız test yöntemi olması belirtilmiştir. EES testinden elde edilen Nyquist eğrisi, titanyumun turba ortamındaki korozyon özelliklerini değerlendirmenin kolay bir yolu olarak tanıtılmıştır. Nyquist eğrilerine göre turba ortamında titanyum malzeme yarım daire şeklinde bir eğri sergilemiştir. Bu durum, yük transferinin titanyum ile turba arasında gerçekleşmesi olarak açıklanmıştır ve görülen yarım daire şekli, titanyum metalinin yüzeyinde bir bariyer tabakası oluştuğunu ortaya koymuştur. Ek olarak, bu bariyer tabakasının oluşumu titanyum metalinin turbanın korozyon etkisine karşı direnç göstermesini sağlamıştır. ADP gözlemi ve EES sonuçları birbirleriyle tutarlıdır.

Teşekkür

Bu çalışma, 24-26 Ekim 2024 tarihlerinde Ankara'da düzenlenen "International Conference on Advanced Materials Science & Engineering and High Tech Device Applications" etkinliğinde genişletilmiş özet olarak sunulmuştur.

Korozyon testleri konusundaki destekleri için Karabük Demir ve Çelik Fabrikaları A.Ş. (KARDEMİR) İleri Teknolojiler Araştırma ve Mühendislik Merkezi'ne teşekkür ederiz.

N.Ç., fikir sahibi ve deneyleri gerçekleştirdi, A.O. ve N.Ç., sonuçları yorumladı, A.O ve N.Ç., makaleyi yazdı.

Kaynaklar

[1] Erensoy A, Mulayim S, Orhan A, Çek N, Tuna A. Ak N. The system design of the peat-based microbial fuel cell as a new renewable energy source: The potential and limitations. Alexandria Eng J 2022; 61(11): 8743-8750.

[2] Jafery KM, Embong Z, Othman NK, Yaakob N, Shah M, Hashim NZN. Initial stage of corrosion formation for X70 pipeline external surface in acidic soil (peat) environment. Mater Today: Proc 2022; 51(2): 1381-1387.

[3] Kreuzburg M, Ibenthal M, Janssen M, Rehder G, Voss M, Naumann M, Feldens P. Sub-marine Continuation of Peat Deposits From a Coastal Peatland in the Southern Baltic Sea and its Holocene Development. Front Earth Sci 2018; 6: 103.

[4] Graham SA, Craft CB, McCormick PV, Aldous A. Forms and accumulation of soil P in natural and recently restored peatlands—Upper Klamath Lake, Oregon, USA. Wetlands 2005; 25: 594-606.

[5] Mikhailov AV, Korolyov IA, Lopatiuk AO. Corrosion Stability of Cutting Tool's Material for Exploitation of Peat Deposits. Procedia Eng 2017; 206: 668-675.

[6] NorDin NIM, Embong Z. Corrosion Effect of X70 Pipeline External Surface Under Sedentary and Peat Soil Environment. EKST 2022; 2(2): 365-372.

[7] Velikotskij MA, Marakhtanov VP. Corrosion of the Gas Pipelines of The Field Medvezhiye in The Different Landscape Types. Geography, Environment, Sustainability 2020; 13(3): 6-12.

[8] Çek N. Galvanic Corrosion of Zinc Anode and Copper Cathode Cell. Turkish Journal of Engineering 2018; 2(1): 22-26.

[9] Wasim M, Shoaib S, Mubarak NM, Inamuddin, Asiri AM. Factors influencing corrosion of metal pipes in soils. Environ Chem Lett 2018; 16: 861-879.

[10] Hussein Farh HM, Ben Seghier MEA, Taiwo R, et al. Analysis and ranking of corrosion causes for water pipelines: a critical review. npj Clean Water 2023; 6: 65.

[11] Hussein Farh, HM, Ben Seghier MEA, Zayed T. A comprehensive review of corrosion protection and control techniques for metallic pipelines. Eng Fail Anal 2023; 143(A): 106885.

[12] Casanova L, Gruarin M, Pedeferri M, Ormellese M. A comparison between corrosion performances of titanium grade 2 and 7 in strong reducing acids. Mater Corros 2021; 72(9): 1506-1517.
[13] Giri SR, Khamari RK, Moharana BK. Joining of titanium and stainless steel by using different welding processes: A review. Mater Today: Proc 2022; 66(2): 505-508.
[14] Gu Y, Li Z, Li J, Wang Q, Zhao Y, Wu C, Su X, Peng H. Effect of Ti addition on mechanical properties and corrosion resistance of X80 pipeline steel. Int J Press Vessels Pip 2023; 206: 105003.
[15] Huang Y, Zheng Z, Fu Z, Zhang Y, Xu J, Chen S, Zhang H. Electrochemical corrosion behavior of Ti-3Mo alloy under different accelerated corrosion tests. Mater Corros 2022; 73(11): 1888-1899.
[16] Dargahi M, Mahidashti Z, Rezaei M. Corrosion prevention of storage tank bottom using impressed current cathodic protection – Experimental and simulation study. Eng Fail Anal 2024; 158: 107982.
[17] Freire L, Ezpeleta I, Sánchez J, Castro R. Advanced EIS-Based Sensor for Online Corrosion and Scaling Monitoring in Pipelines of Geothermal Power Plants Metals 2024; 14(3): 279.
[18] Irving P, Cecil R, Yates M.Z. MYSTAT: A compact potentiostat/galvanostat for general electrochemistry measurements. HardwareX 2021; 9: e00163.
[19] Ansarian I, Taghiabadi R, Amini S, Saboori A. Enhancing the corrosion behavior of Laser Powder Bed Fusion processed CP-Ti via Ultrasonic Peening. Mater Lett 2024; 354: 135410.
[20] Marín-Sánchez M, Gracia-Escosa E, Conde A, Palacio C, García I. Deposition of Zinc–Cerium Coatings from Deep Eutectic Ionic Liquids. Materials 2018; 11(10): 2035.
[21] Pal A, Krishna NG, Shankar AR, Philip J. High contrast corrosion mapping of dissimilar metal weld joints using alternating current scanning electrochemical microscopy: A case study with Zr-4–Ti–304L SS weld. Corros Sci 2023; 221: 111345.
[22] Zhang F, Qin J, Cai K, Myers JJ, Ma H. Anti-Corrosion Performance of Magnesium Potassium Phosphate Cement Coating on Steel Reinforcement: The Effect of Boric Acid. Materials 2024; 17(21): 5310.
[23] Jin J, Zhou S, Zhang W, Li K, Liu Y, Chen D, Zhang LC. Effect of ceramic types on the microstructure and corrosion behavior of titanium matrix composites produced by selective laser melting. J. Alloys Compd. 2022; 918: 165704.
[24] Meng Z, Shi Y, Qiao Z, Yang J, Wang L. Study on microstructure and corrosion resistance of Ti-doped nickel-based alloy coatings. J Solid State Electrochem 2022; 26: 1677-1686.
[25] Aljohani TA, Albeladi MI, Alshammari BA. Improving pitting corrosion resistance of the commercial titanium through graphene oxide-titanium oxide composite. Heliyon 2021; 7 (6): e07289.
[26] Liu L, Shan X., Bi F., Sun C, Wang M, Tan X., Ren G, Xue Y. Effect of temperature on the electrochemical corrosion behavior of X52 pipeline steel in NS4 simulated solution. Int J Electrochem Sci 2025; 20(1): 100883.
[27] Ünal E, Yaşar A, Karahan İH. Ni-B/TiC Nanokompozit Kaplamaların Korozyon Dayanımlarının Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EES) Yöntemi ile Analizi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 2023; 38(1): 115-129.
[28] Gao X, Sun Y, Jia Q, Lee E-S., Jiang HB. Cross-Disciplinary Application for Qualitative Magnesium Corrosion Assays. Bioinorg Chem Appl 2022; 2022: 289447.
[29] Lin CH, Duh CG. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) study on corrosion performance of CrAlSiN coated steels in 3.5 wt.% NaCl solution. Surf Coat Technol 2009; 204(6–7): 784-787.
[30] Gupta AK, Mandal N, Nayak S, Moirangthem RS, Reddy SRM, Bhagat AN, Rout TK. Efficient and Cost-Effective Single-Step Thin Overlay Zinc Oxide Nanostructure for Enhanced Corrosion Protection of Galvanized Steel. Met Mater Int 2024; 30: 3045-3055.
[31] El Hamdouni, Y., Bouhlal, F., Kouri, Chellouli M., Benmessaoud M, Dahrouch A, Labjar N, El Hajjaji S. Use of Omeprazole as Inhibitor for C38 Steel Corrosion in 1.0 M H_3PO_4 Medium. J Fail Anal and Preven 2020; 20: 563-571.
[32] Haruna K, Saleh TA. Dopamine functionalized graphene oxide (DGO) as a corrosion inhibitor against X60 carbon steel corrosion in a simulated acidizing environment; An electrochemical, weight loss, SERS, and computational study. Surf Interfaces 2024; 44: 103688.
[33] El-Aouni N, Dagdag O, Amri AE, Kim H, Dkhireche N, Elbachiri A, Berdimurodov E, Berisha A, Rafik M. Hybrid epoxy/Br inhibitor in corrosion protection of steel: experimental and theoretical investigations. Environ Sci Pollut Res 2024; 31: 1033-1049.
[34] Marinescu M. Recent advances in the use of benzimidazoles as corrosion inhibitors. BMC Chemistry 2019; 13: 136.
[35] Lu YJ, Liu XC, Liu YJ, Wu X, Jiang Y, Liu Z, Lin JX, Zhang LC. Corrosion behavior of novel titanium-based composite with engineering 3D artificial nacre-like structures. Composites, Part A 2023; 164: 107278.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 475-486, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1612985

Üstyapı Sayısı Değişmeyen AASHTO-93 Kesitlerinin Mekanistik-Ampirik Yöntemler ile Yol Ömrü Analizi

Betül KÖSE[1], Murat BOSTANCIOĞLU[2*]
[1] İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye
[2] İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye
[1] betulkose5800@gmail.com, [*2] bostancioglu@cumhuriyet.edu.tr

(Geliş/Received: 03/01/2025; Kabul/Accepted: 12/03/2025)

Öz: Türkiye karayollarının esnek üstyapı tasarımında regresyon tabanlı ampirik bir yöntem olan AASHTO-93 yöntemi kullanılmaktadır. Üstyapıyı oluşturan tabakaların mukavemet ve kalınlıklarına bağlı olarak hesaplanan üstyapı sayısı (SN) AASHTO yönteminde yol ömrünün hesaplanmasında kullanılan temel parametrelerden bir tanesidir. Yol sınıfı ve taban zemini taşıma gücü değişmeyen bir tasarımda SN değeri değişmedikçe yolun bozulana kadar taşıyabileceği standart dingil yükü sayısı değişmemektedir. Bu çalışmada geleneksel bir üstyapıyı oluşturan tabakaların kalınlıkları, SN değeri değişmeyecek şekilde 0,5-1,0-1,5 ve 2,0 cm olmak üzere 4 farklı değerde artırılmış veya azaltılmıştır. Oluşan SN artış veya azalışı diğer tabakalardan bir tanesinin kalınlığı değiştirilerek dengelenmiştir. Yeni oluşan ve AASHTO yöntemine göre yol ömrü değişmeyen kesitlerin mekanistik-ampirik yöntemler ile analizleri yapılarak yol ömrü değerlerindeki değişim oranları incelenmiştir. Çalışılan farklı kesitler arasında, yorulmaya bağlı kaplama ömründe (N_f) artış sağlayan kritik değişimler; bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakaların kalınlıklarının artması ve plent-miks temel (PMT) tabakasının kalınlığının azalması ile elde edilmiştir. Bitümlü tabakaların kendi içlerindeki kalınlık değişimleri yol ömrü değerlerini anlamlı bir oranda değiştirmemiştir. Tekerlek izinde oturmaya bağlı kaplama ömrü (N_r) hesabında ise BSK tabaka kalınlıklarının azaldığı ve oluşan SN farkının PMT kalınlığı artırımı ile dengelendiği kesitlerde N_r değerleri artmıştır.

Anahtar kelimeler: AASHTO-93 yöntemi, üstyapı sayısı, mekanistik-ampirik yöntem, tekerlek izinde oturma, yorulma.

Road Life Analysis of AASHTO-93 Sections with Fixed Structural Number Using Mechanistic-Empirical Methods

Abstract: AASHTO-93 method, which is a regression-based empirical method, is used in the flexible pavement design of Turkish highways. The structural number (SN), calculated depending on the strength and thickness of the layers forming the pavement, is one of the basic parameters used in the calculation of road life in the AASHTO method. In a design where the road class and subgrade bearing capacity do not change, the standard axle load number that the road can carry until it deteriorates does not change unless the SN value changes. In this study, the thicknesses of the layers forming a traditional flexible pavement were changed in 4 different values as 0.5-1.0-1.5 and 2.0 cm, so that the SN value does not change. The new sections, which did not change the road life according to the AASHTO method, were analyzed with mechanistic-empirical methods and the change rates in road life values were investigated. Among the different sections studied, the critical changes that provide an increase in the fatigue-related pavement life (N_f) were obtained by increasing the thickness of the bituminous hot mix asphalt (HMA) layers and decreasing the thickness of the plant-mix base (PMB) layer. The thickness changes within the bituminous layers did not change the road life values significantly. In the calculation of the pavement life (N_r) due to the rutting, N_r values increased in the sections where the HMA layer thicknesses decreased and the resulting SN difference was balanced with the increase in PMB thickness.

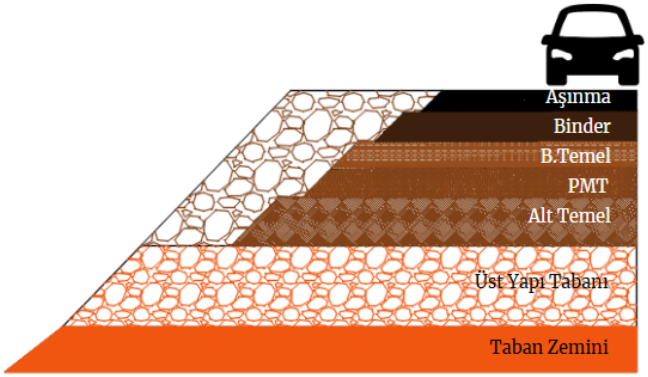
Key words: AASHTO-93 method, structural number, mechanistic-empirical method, rutting, fatigue.

1. Giriş

Ülkemizde yük taşımacılığının %76,1'i, yolcu taşımacılığının ise %95,2'si karayolu ile gerçekleştirilmektedir. Ulaşım türleri arasında yük ve yolcu taşımacılığında ilk sırada yer alan karayolu ulaşımı; aynı zamanda yatırım, bakım ve işletme maliyetleri açısından da ilk sırada yer almaktadır. Karayolu, yapım tekniği ve kullanılan malzeme özellikleri bakımından altyapı ve üstyapı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Karayollarının stabilite, konfor ve emniyetinden önemli ölçüde sorumlu olan üstyapılar yol yapım maliyetlerinin de büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Karayolu üstyapısı, yolun trafik yüklerini taşımak ve bu yükü taban zemininin taşıma

* Sorumlu yazar: bostancioglu@cumhuriyet.edu.tr, Yazarların ORCID Numarası: [1]0009-0000-3748-5484, [2]0000-0001-6820-2213

gücünü aşmayacak şekilde dağıtmak amacıyla altyapı üzerine alt temel, temel ve kaplama sıralamasıyla inşa edilen çok tabakalı bir yapıdır (Şekil 1) [1,2].



Şekil 1. Karayolu BSK kaplamalı esnek üstyapı yapı enkesiti.

Karayolu üstyapı tasarımı, trafik ve çevresel etkilere maruz kalan bir yolun, yeterli stabilite ve performans koşullarını sağlayabilmesi için gerekli tabaka kalınlıklarının hesaplanması ve bu tabakaları oluşturan malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesidir [3].

Üstyapı tasarımında kullanılan yöntemler; tabaka kalınlığı için Kaliforniya taşıma gücü oranı (CBR) değerinin kullanıldığı ampirik yöntem, Terzaghi taşıma gücü formülünün kullanıldığı kayma göçmesi sınır yöntemi, Burmister'ın iki tabaka teorisinin kullanıldığı deplasman sınır yöntemi, arazi deneylerinden elde edilen regresyon denklemlerinin kullanıldığı American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) yöntemi ve Mekanistik-Ampirik (M-A) yöntem olarak beş ayrı kategoride incelenebilir [4-7].

AASHTO tasarım yöntemi 1950'li yılların sonunda ABD'nin Illinois eyaletinin Ottawa şehrinde farklı şekil ve kalınlıklarda inşa edilen kaplamalar üzerinde yapılan çalışmalar sonucu elde edilen gözlem ve ölçümlere dayanarak geliştirilmiştir. Dizayn prosedürü ve elde edilen sonuçlar 1961 yılında geçici rehber şeklinde yayınlanmış ve 1972, 1986, 1993 ve 2002 yıllarında yayınlanan rehberler ile revize edilmiştir [8,9].

AASHTO yöntemine göre, bir yolun ekonomik ömrü boyunca geçirebileceği maksimum standart dingil yükü sayısı ($T_{8,2}$); taban zemini esneklik modülü (M_R), toplam standart sapma (S_0), standart normal sapma (Z_R), servis kabiliyeti indeksi kaybı (ΔPSI) ve üstyapı sayısına (SN) bağlı olarak hesaplanmaktadır (Eşitlik 1). Eşitlik 1'de görüldüğü gibi proje şartları belirlenmiş bir yolda sabit bir taban zemini üzerinde SN (Eşitlik 2) değişmediği sürece yol ömründe ($T_{8,2}$) herhangi bir değişiklik olmamaktadır.

$$\log(T_{8,2}) = Z_R * S_0 + 9{,}36 * \log(SN+1) - 0{,}20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4{,}2-1{,}5}\right)}{0{,}40+\frac{1094}{(SN+1)^{5{,}19}}} + 2{,}32 * \log(M_R) - 8{,}07 \quad (1)$$

$$SN = \sum_{i=1}^{k} a_i D_i + \sum_{j=1}^{n} a_j D_j m_j \quad (2)$$

Eşitlik 2'de k, bitümlü sıcak karışım tabaka sayısını, n, granüler tabaka sayısını, D_i ve D_j tabaka kalınlıklarını, a_i ve a_j tabakaların izafi mukavemet katsayılarını ve m_j granüler tabakaların drenaj katsayılarını belirtmektedir.

Son yıllarda literatürde üstyapı tasarımında sıklıkla kullanılan M-A tasarım yönteminde trafik yükü, çevresel etkiler ve malzeme özellikleri gibi girdiler, temel mekanik denklemleri ile gerilme, birim şekil değiştirme ve deformasyonların hesabında kullanılmaktadır. Elde edilen mekanik tepki değerleriyle yolun bozulma ömrü hesaplanmaktadır. M-A tasarım yöntemlerinde kaplama tepki değerlerinin belirlenmesi (gerilme, birim şekil değiştirme, deplasman) yöntemin mekanik bölümünü oluştururken, bu tepki değerlerinden yol ömrünün elde edilmesi yöntemin ampirik bölümünü oluşturmaktadır [4,10,11].

Üstyapı tasarımında dikkate alınan temel iki bozulma tipi; tekerlek izinde oturma ve yorulma çatlağıdır. M-A tasarım yöntemlerinde tekerlek izinde oturma, taban zemini üzerindeki düşey birim şekil değiştirmeleriyle, yorulma bozulması ise kaplama altındaki yatay birim şekil değiştirme değerleri ile ifade edilmektedir. Bu sebeple yapılan mekanik analizlerde ilgili noktalardaki tepki değerleri dikkate alınmaktadır [7,10,12].

Yorulma ve tekerlek izinde oturmaya bağlı yol ömrü hesabında kullanılan ampirik transfer denklemlerinin genel formülasyonları sırasıyla Eşitlik 3 ve 4'te, eşitliklerde kullanılan katsayılar ise Tablo 1'de verilmiştir.

$$N_f = f_1 \varepsilon_r^{-f2} E_{yüzey}^{-f3} \quad (3)$$

$$N_r = f_4 (\varepsilon_v)^{-f5} \quad (4)$$

Eşitlik 3 ve 4'te,
N_f : Yorulmaya bağlı bozulma için gerekli yük tekrar sayısını,
N_r : Tekerlek izinde oturmaya bağlı bozulma için gerekli yük tekrar sayısını,
$E_{yüzey}$: Yüzey tabakasının elastisite modülünü (psi),
ε_r : Yatay çekme birim şekil değiştirmelerini,
ε_v : Düşey basınç birim şekil değiştirmelerini belirtmektedir.

Tablo 1. Farklı kuruluşlar için bozulma modeli katsayıları.

	AI*	Shell	USACE	BRRC	TRRL	FHWA	ILLINOIS	ARE
f_1	0,0795	0,0685	497,156	4,92E-14	1,66E-10	0,1001	5,00E-06	4,88E-01
f_2	3,291	5,671	5	4,76	4,32	3,565	3	30,312
f_3	0,854	2,363	2,66	0	0	1,474	0	0,6529
f_4	1,37E-09	6,15E-07	1,81E-15	3,05E-09	1,13E-06	-	-	-
f_5	4,477	4	6,527	4,35	3,75	-	-	-

AI: Asfalt Institute, **Shell**: Shell Research, **USACE**: US Army Corps of Engineers, **BRRC**: Belgian Road Research Center, **TRRL**: Transport and Road Research Laboratory, **FHWA**: Federal Highway Administration, **ILLINOIS**: Illinois Department of Transportation **ARE**: Austin Research Engineers

*Çalışmada yol ömrü analizlerinde AI yöntemi katsayıları kullanılmıştır

M-A yöntemler, yol ömrü hesabında tekerlek izinde oturma, yorulma ve pürüzlülük gibi farklı bozulma türlerini dikkate alması, tek bir coğrafi bölgede yapılan sınırlı test verisi yerine farklı yük, yükleme tipi, dingil yapısı ve tabaka malzemesi gibi tasarım parametrelerine kolay uyum sağlayabilmesi ve malzemelerin lineer elastik, non-lineer elastik ve viskoelastik gibi çeşitli mekanik hallerde tanımlanabilmesi sebepleriyle Türkiye'de karayolu üstyapı tasarımında kullanılmakta olan AASHTO yöntemine kıyasla önemli avantajlar sağlamaktadır [11,13].

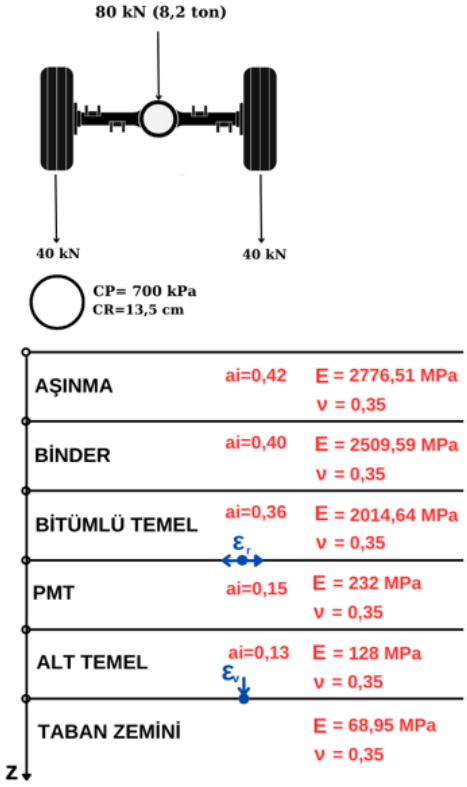
Bu çalışmada geleneksel bir üstyapı kesiti seçilerek kesitin SN değeri değişmeksizin tabaka kalınlıkları değiştirilmiştir. AASHTO yöntemine göre tasarım ömrü değişmeyen kesitlerin mekanik analizleri yapılarak kritik noktalardaki tepki değerleri belirlenmiştir. Ampirik transfer denklemleri ile hesaplanan yol ömrü değerleri AASHTO yöntemi ile karşılaştırılarak AASHTO denkleminin yeterliliği araştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada farklı güvenilirlik seviyeleri (R) ve $T_{8,2}$ değerleri için AASHTO kesitleri belirlenmiş ve kesitlerin tabaka kalınlıkları AASHTO tasarım denklemine uygun olarak hesaplanmıştır. Alt temel kalınlığı 15 cm altında hesaplanan kesitler için alt temel kalınlığı 15 cm seçilerek analizler sürdürülmüştür. Oluşturulan geleneksel üstyapı kesitine ait bir gösterim Şekil 2'de, farklı R ve $T_{8,2}$ değerleri için hesaplanan tabaka kalınlıkları Tablo 2'de verilmiştir.

Çalışmada aynı SN sayısına sahip farklı kesitler oluşturmak amacıyla AASHTO kesitleri, Tablo 2'de hesaplanan tabaka kalınlıkları değiştirilerek yeniden düzenlenmiştir. Tabaka kalınlıkları 0,5-1,0-1,5-2,0 cm kalınlık değişimleri (h) ile artırılmış veya azaltılmıştır. Bu işlem gerçekleştirilirken esnek üstyapıyı oluşturan tabakalardan bir tanesinin kalınlığı yukarıda belirtilen miktarda artırılarak veya azaltılarak kesitler elde edilmiştir. Buna bağlı oluşan SN fazlalığı veya eksikliği diğer tabakalardan bir tanesinin kalınlığı artırılarak veya azaltılarak orijinal kesit SN değerine eşitlenmiştir. Kısaca, bu aşamada üstyapıyı oluşturan 5 tabakadan 2 tanesinin kalınlığı değişirken diğer 3 tabaka kalınlığı sabit bırakılmıştır. Bu işlem, yapılan analizlerde 20 farklı varyasyon ile çalışılmıştır (Tablo 3). Tablo 3'te + ve – sembolleri, ilgili tabakanın kalınlığının arttırıldığını veya eksiltildiğini ifade etmektedir. A sütununda gösterilen tabakanın kalınlığı 0,5-2,0 cm aralığında değişirken B sütununda

gösterilen tabakanın kalınlığı aynı SN değerini verecek şekilde hesapla bulunmuştur. Yapılan bu işleme ait bir örnek 3 numaralı varyasyon için Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 2. Üstyapı kesiti.

Tablo 2. Tabaka kalınlıkları.

			Trafik Kategorileri (Milyon)		
R %70	**10-30**	**45-60**	**80-110**	**145-185**	**>250**
Aşınma	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm
Binder	6 cm	7 cm	8 cm	8 cm	10 cm
Bitümlü Temel	8 cm	9 cm	10 cm	12 cm	12 cm
PMT	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm
Alt Temel	6,12 cm*	8,87 cm*	11,03 cm*	12,73 cm*	10,87 cm*
			Trafik Kategorileri (Milyon)		
R %85	**3-15**	**25-35**	**60-75**	**125-150**	**>250**
Aşınma	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm
Binder	6 cm	7 cm	8 cm	10 cm	12 cm
Bitümlü Temel	8 cm	10 cm	12 cm	13 cm	14 cm
PMT	15 cm	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm
Alt Temel	16 cm	12,943 cm*	16 cm	18 cm	17 cm
			Trafik Kategorileri (Milyon)		
R %95	**3-10**	**25-30**	**50-65**	**100-130**	**200-250**
Aşınma	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm
Binder	6 cm	8 cm	10 cm	11 cm	13 cm
Bitümlü Temel	8 cm	11 cm	12 cm	14 cm	15 cm
PMT	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm
ATemel	12,96 cm*	14,13 cm*	17 cm	20 cm	22 cm

* 15 cm olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 3. Tabaka kalınlık değişimleri.

	A	B		A	B
1. varyasyon	Aşınma +	Binder -	11. varyasyon	Aşınma -	Binder +
2. varyasyon	Aşınma +	B. Temel -	12. varyasyon	Aşınma -	B. Temel +
3. varyasyon	Aşınma +	PMT -	13. varyasyon	Aşınma -	PMT +
4. varyasyon	Binder +	Aşınma -	14. varyasyon	Binder -	Aşınma +
5. varyasyon	Binder +	B.temel -	15. varyasyon	Binder -	B. Temel +
6. varyasyon	Binder +	PMT -	16. varyasyon	Binder -	PMT +
7. varyasyon	B. Temel +	Aşınma -	17. varyasyon	B.temel -	Aşınma +
8. varyasyon	B. Temel +	Binder -	18. varyasyon	B.temel -	Binder +
9. varyasyon	B. Temel +	PMT -	19. varyasyon	B.temel -	PMT +
10. varyasyon	PMT +	A. Temel -	20. varyasyon	PMT -	A. Temel +

Tablo 4. SN hesabı örneği (R=%95, $T_{8,2}$=3-10m).

	Orijinal kesit		3. Varyasyon (0,5 cm değişim ile)	
	Tabaka kalınlıkları (cm)	SN orijinal	Tabaka kalınlıkları (cm)	SN
Aşınma	**5**	2,1	**5,5**	2,31
Binder	6	2,4	6	2,4
B. Temel	8	2,88	8	2,88
PMT	**20**	3,0	**18,6**	2,79
A. Temel	15	1,95	15	1,95
TOPLAM	**54**	**12,33**	**53,1**	**12,33**

Tablo 4'te R=%95 güvenilirlik değeri için 3 numaralı varyasyon, orijinal kesite 0,5 cm kalınlık değişimi ile uygulanmıştır. Buna göre aşınma tabakası kalınlığı 0,5 cm artırılırken oluşan SN fazlalığı PMT kalınlığının 1,4 cm düşürülmesi ile dengelenmiştir. Diğer tabakaların kalınlıklarında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Toplam üstyapı kalınlığı orijinal kesit için 54 cm iken 3 numaralı varyasyonun uygulandığı kesitte toplam üstyapı kalınlığı 0,9 cm azalmıştır.

Orijinal kesitin ve oluşturulan yeni kesitlerin mekanik analizleri KENLAYER programı ile yapılmıştır. KENLAYER, tekil, dual, dual tandem ve dual tridem yüklemeler altındaki lineer elastik, non-lineer elastik ve viskoelastik tanımlanmış çok tabakalı sistemlerin deplasman, gerilme ve birim şekil değiştirme değerlerinin bulunmasında kullanılan bir yazılımdır [11,14,15].

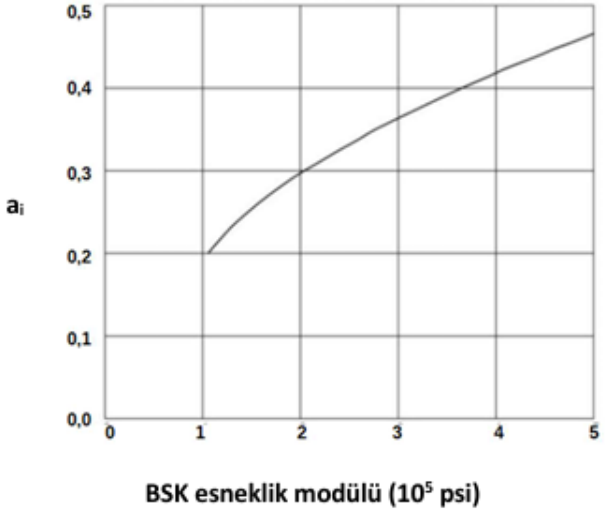
KENLAYER programında kesit analizleri için tabaka sayısı 6, kritik Z koordinat sayısı ise kaplama tabakası altı ve taban zemini üzeri olmak üzere 2 olarak belirlenmiştir. Tabaka tanımlamasında tabakalara ait kalınlıklar, elastisite modülleri ve Poisson oranı değerleri kullanılmıştır. Yükleme tekil aks üzerindeki tekil tekerlek olarak tanımlanmış ve mekanik tepki değerleri yük ekseninden okunmuştur.

Bu çalışmada tabaka malzemeleri lineer elastik olarak tanımlanmış olup Elastisite modülü (E) ve poisson oranı (υ) değerleri ile karakterize edilmiştir. Tabakaların elastisite modülleri, AASHTO yöntemine uyumlu biçimde seçilen izafi mukavemet katsayılarına (Şekil 2) [16] bağlı olarak

Şekil ***3*** ve Eşitlik 5-6 kullanılarak hesaplanmıştır. Eşitlik 5 ve 6'da a_{temel} ve $a_{alttemel}$ sırasıyla temel ve alttemel tabakalarının izafi mukavemet katsayılarını, E_{temel} ve $E_{alttemel}$ ise sırasıyla temel ve alttemel tabakalarının elastisite modülü değerlerini (psi) belirtmektedir. Poisson oranı değerleri tüm tabakalar için 0,35 alınmıştır [17,18].

$$a_{temel} = 0{,}249 * \log(E_{temel}) - 0{,}977 \quad (5)$$

$$a_{alttemel} = 0{,}277 * \log(E_{alttemel}) - 0{,}839 \quad (6)$$



Şekil 3. BSK için a_i-M_R dönüşüm grafiği.

Kesitlerin mekanik çözümlenmesinde aks yükü AASHTO yöntemi ile uyumlu şekilde ve 80 kN olarak dikkate alınmış ve bu yük akstaki tekil tekerleklere eşit olarak dağıtılmıştır (F=40 kN). Tekerlek temas basıncı (CP) 700 kPa olarak belirlenmiş ve bu basıncı sağlayan tekerlek temas yarıçapı (CR), Eşitlik 7 ile hesaplanmıştır.

$$CP = \frac{F}{\pi(CR)^2} \tag{7}$$

Taban zemini elastisite modülü, tüm kesitler için sabit ve literatür ile uyumlu şekilde 10000 psi (68,95 MPa) olarak analizlerde dikkate alınmıştır [6,17,19,20]. KENLAYER analizlerinde üstyapı tabakalarının temas durumu, yapışık (bonded) olarak belirlenmiştir [14,15,21].

Çalışmada 3 farklı R, 5 farklı $T_{8,2}$, 20 farklı varyasyon ve her varyasyonda 4 farklı kalınlık değişim değeri olmak üzere toplam 1200 yeni kesit üretilmiş ve analizler bu kesitler üzerinde sürdürülmüştür. Yapılan mekanik analizler sonucunda oluşan tüm kesitlerin tepki değerleri kaplama tabakası altından (ε_r) ve taban zemini üzerinden (ε_v) (Şekil 2) okunmuş ve yol ömrü değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler, orijinal kesitin yol ömrü değerleri ile kıyaslanmıştır (Eşitlik 8).

$$(\%)\text{Yol Ömrü Değişimi} = \left[\frac{y_{(M-A)} - y_{Orijinal}}{y_{Orijinal}}\right] * 100 \tag{8}$$

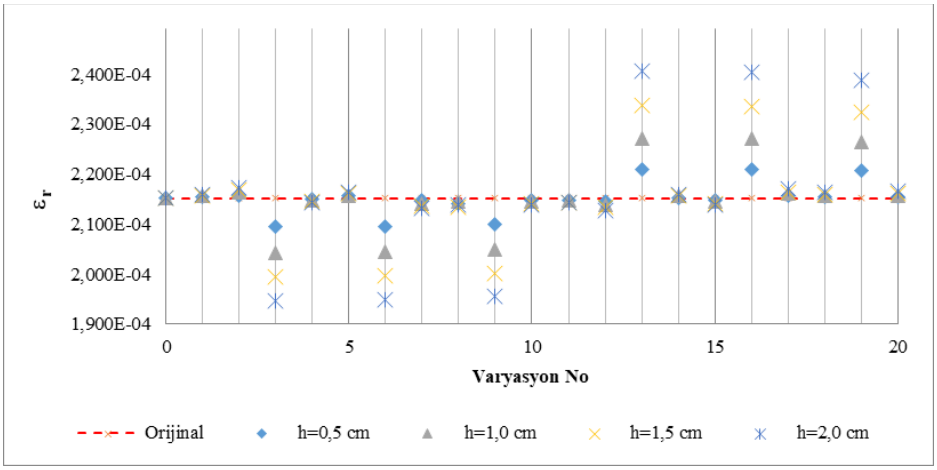
Eşitlik 8'de $y_{Orijinal}$, orijinal kesitin yol ömrü değerini, $y_{M\text{-}A,}$ kalınlık değişimi ile elde edilen kesitin yol ömrü değerini ifade etmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

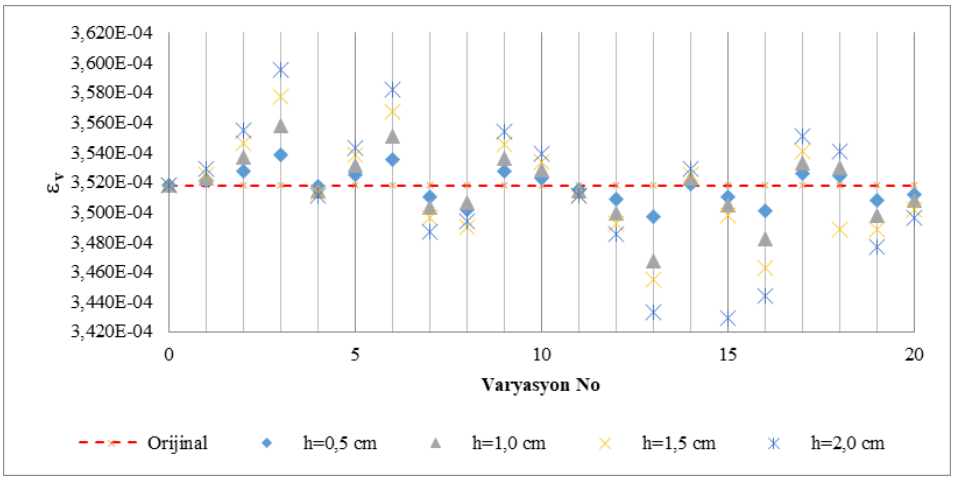
AASHTO yönteminin önerdiği farklı R ve $T_{8,2}$ değerlerine sahip kesitler için Tablo 3'te verilen varyasyonlar 0,5-1,0-1,5 ve 2,0 cm kalınlık değişimleri ile ayrı ayrı uygulanarak oluşan tüm yeni kesitlere ait mekanik tepki değerleri belirlenmiş ve bu tepkilere bağlı olarak yol ömrü değerleri hesaplanmıştır.

R=%95 ve $T_{8,2}$=3-10m alınarak farklı h değerlerine bağlı elde edilen kesitlerin ε_r ve ε_v değerleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir.

Şekil ***4*** incelendiğinde; 3-6-9 ve 13-16-19 numaralı varyasyonlar dışındaki kesitlerin ε_r değerlerinin orijinal kesite kıyasla çok önemli değişiklikler göstermediği belirlenmiştir. Ancak 3-6-9 ve 13-16-19 kesitlerinde özellikle h=2,0 cm olan varyasyonlarda ε_r değerlerinin orijinal kesite kıyasla -%9,53 ile %11,80 oranında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir (Tablo5).



Şekil 4. ε_r değerleri (R=%95, $T_{8,2}$=3-10m).



Şekil 5. ε_v değerleri (R=%95, $T_{8,2}$=3-10m).

Tablo 5. R=%95 ve $T_{8,2}$=3-10m için ε_r ve ε_v değişim oranları (%).

VN	ε_r	% Değişim	VN	ε_v	% Değişim
Orijinal	2,152E-04		**Orijinal**	3,518E-04	
3	1,947E-04	-9,53	**3**	3,595E-04	2,19
6	1,949E-04	-9,43	**6**	3,582E-04	1,82
9	1,956E-04	-9,11	**9**	3,554E-04	1,02
13	2,406E-04	11,80	**13**	3,433E-04	-2,42
16	2,403E-04	11,66	**16**	3,444E-04	-2,10
19	2,388E-04	10,97	**19**	3,477E-04	-1,17

3-6-9 ve 13-16-19 numaralı kesitler incelendiğinde bu altı kesitin tamamında BSK olarak üretilen tabakalardaki SN artış veya azalışının, granüler PMT tabakası ile dengelendiği görülmektedir. BSK ve PMT tabakalarının malzeme kaliteleri ve buna bağlı olarak değişen izafi mukavemet katsayıları arasındaki farklılığın bu sonucu ortaya çıkardığı düşünülmektedir.

3,6 ve 9 numaralı kesitlerde BSK tabakaların kalınlıkları artarken ortaya çıkan SN fazlalığı PMT tabakasının kalınlığını azaltarak dengelenmiştir. Bu durumda kesit, her ne kadar üstyapı sayısı olarak değişikliğe uğramasa da, mekanik olarak güçlenmiş ve ε_r değerleri azalmıştır.

13,16 ve 19 numaralı kesitlerde ise 3,6 ve 9 numaralı kesitlerin aksine BSK tabakaların kalınlıkları azalmış ve ortaya çıkan SN azalışı, PMT kalınlığı artırılarak dengelenmiştir. Mekanik olarak güçlü tabakalarının kalınlığının azalması üstyapı kesitlerinde ε_r değerlerini artırmıştır.

Tekerlek izinde oturmaya bağlı yol ömrü hesabında temel tasarım parametresi olarak dikkate alınan ε_v değerlerinin kesit tipine bağlı değişimini gösteren

Şekil ***5*** incelendiğinde, ε_r değerlerinde olduğu gibi 3-6-9 ve 13-16-19 numaralı kesitlerde ε_v değişimin orijinal kesite kıyasla daha belirgin olduğu görülmektedir. Değişim oranları -%2,42 ile %2,19 arasında elde edilmiştir (Tablo 5). ε_r değişim oranları ile ε_v değişim oranları kıyaslandığında ε_v değerlerindeki değişimin daha az olduğu görülmektedir. Bu durum, aynı SN sayısına sahip kesitlerde, BSK tabakaları ile granüler tabakaların SN dengesini sağlayacak şekilde kalınlık değişimlerinin, yorulmaya bağlı yol ömründe daha etkili bir parametre olduğunu açıkça göstermektedir.

3-6-9 ve 13-16-19 numaralı kesitler kendi aralarında incelendiğinde 9 ve 19 numaralı kesitlerin diğerlerine kıyasla ε_r ve ε_v değişim oranlarının daha düşük olduğu gözlenmektedir. ε_r ve ε_v değişim oranlarında tespit edilen bu azalma, ilgili kesitlerde izafi mukavemet katsayıları birbirlerine daha yakın olan Bitümlü temel ve PMT tabakalarının değişiminden kaynaklanmaktadır.

Şekil ***5*** incelendiğinde BSK-Granüler tabaka değişimine yakın bir değişim durumu, aşınma-bitümlü temel değişimi için de tespit edilmiştir (2-7-12-17 numaralı varyasyonlar). BSK olarak üretilen tabakaların en üst ve en altında yer alan bu iki tabakanın aynı SN sayısını sağlayacak şekilde kalınlık değişimleri, tekerlek izinde oturma bozulmasında 2. derece öneme sahip bir unsur olarak dikkate alınmalıdır.

Çalışmada analiz edilen farklı kesitlerdeki mekanik tepkilerin trafik yüküne bağlı duyarlılıklarını belirlemek amacıyla aynı R ve h değerlerine sahip kesitlerin değişen trafik yüklerine bağlı olarak hesaplanan ε_r ve ε_v değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6 incelendiğinde tüm kesitler için artan trafik yüküne bağlı olarak ε_r ve ε_v değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum artan trafik yüküne bağlı olarak AASHTO yönteminin önerdiği kesitlerin daha rijit olması ile açıklanabilir.

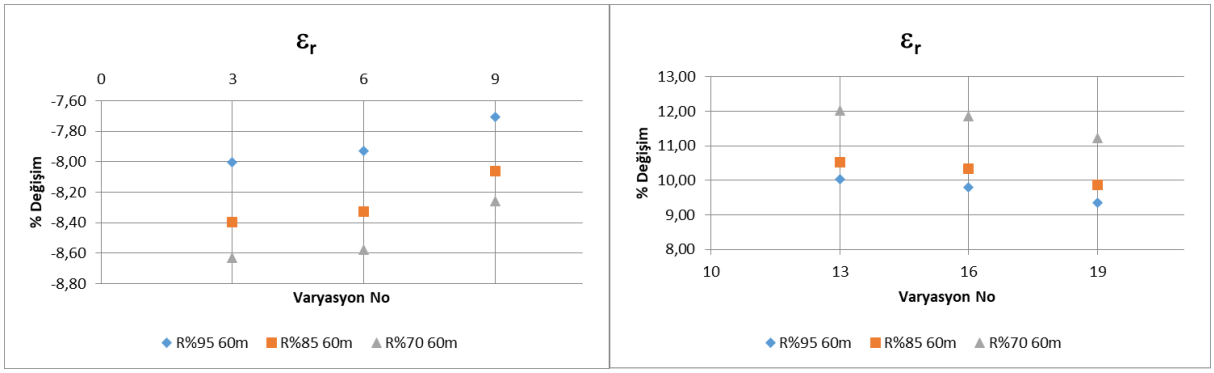
Tablo 6. Farklı $T_{8,2}$ değerine göre ε_r ve ε_v değerleri (R=%95, h=2,0cm)

	$T_{8,2}$=25-30m		**$T_{8,2}$=50-65m**		**$T_{8,2}$=100-130m**		**$T_{8,2}$=200-250m**	
VN	**ε_r**	**ε_v**	**ε_r**	**ε_v**	**ε_r**	**ε_v**	**ε_r**	**ε_v**
0	1,590E-04	2,720E-04	1,337E-04	2,269E-04	1,138E-04	1,890E-04	9,764E-05	1,622E-04
1	1,596E-04	2,726E-04	1,341E-04	2,273E-04	1,141E-04	1,892E-04	9,790E-05	1,624E-04
2	1,606E-04	2,743E-04	1,350E-04	2,285E-04	1,148E-04	1,902E-04	9,848E-05	1,631E-04
3	1,454E-04	**2,772E-04**	1,230E-04	**2,308E-04**	1,052E-04	**1,918E-04**	9,075E-05	**1,644E-04**
4	1,585E-04	2,716E-04	1,333E-04	2,267E-04	1,134E-04	1,888E-04	9,737E-05	1,621E-04
5	1,600E-04	2,736E-04	1,345E-04	2,281E-04	1,145E-04	1,899E-04	9,819E-05	1,629E-04
6	1,455E-04	2,764E-04	1,231E-04	2,302E-04	1,053E-04	1,914E-04	9,082E-05	1,641E-04
7	1,576E-04	2,702E-04	1,326E-04	2,256E-04	1,129E-04	1,880E-04	9,689E-05	1,615E-04
8	1,581E-04	2,705E-04	1,330E-04	2,258E-04	1,132E-04	1,881E-04	9,713E-05	1,615E-04
9	1,459E-04	2,746E-04	1,234E-04	2,289E-04	1,055E-04	1,904E-04	9,098E-05	1,633E-04
10	1,582E-04	2,737E-04	1,330E-04	2,283E-04	1,132E-04	1,901E-04	9,714E-05	1,631E-04
11	1,585E-04	2,717E-04	1,333E-04	2,267E-04	1,135E-04	1,889E-04	9,738E-05	1,621E-04
12	1,574E-04	2,700E-04	1,325E-04	2,255E-04	1,128E-04	1,879E-04	9,681E-05	1,614E-04
13	**1,760E-04**	2,666E-04	**1,471E-04**	2,229E-04	**1,244E-04**	1,860E-04	**1,061E-04**	1,599E-04
14	1,596E-04	2,726E-04	1,342E-04	2,273E-04	1,141E-04	1,893E-04	9,791E-05	1,624E-04
15	1,580E-04	2,704E-04	1,329E-04	2,257E-04	1,131E-04	1,881E-04	9,708E-05	1,615E-04
16	1,757E-04	2,672E-04	1,468E-04	2,233E-04	1,242E-04	1,863E-04	1,059E-04	1,601E-04
17	1,604E-04	2,740E-04	1,349E-04	2,284E-04	1,147E-04	1,901E-04	9,840E-05	1,630E-04
18	1,599E-04	2,735E-04	1,345E-04	2,280E-04	1,144E-04	1,898E-04	9,815E-05	1,628E-04
19	1,749E-04	2,692E-04	1,462E-04	2,248E-04	1,238E-04	1,874E-04	1,056E-04	1,610E-04
20	1,600E-04	2,703E-04	1,345E-04	2,255E-04	1,144E-04	1,879E-04	9,819E-05	1,613E-04

Tablo 6'da ε_r ve ε_v için maksimum değerler her sütunda koyu vurgu ile gösterilmiştir. En yüksek ε_r değerleri tüm trafik yükleri için 13 numaralı varyasyonda (Aşınma-PMT+) gözlenirken, en yüksek ε_v değerleri 3 numaralı varyasyonda (Aşınma+PMT-) gözlenmiştir.

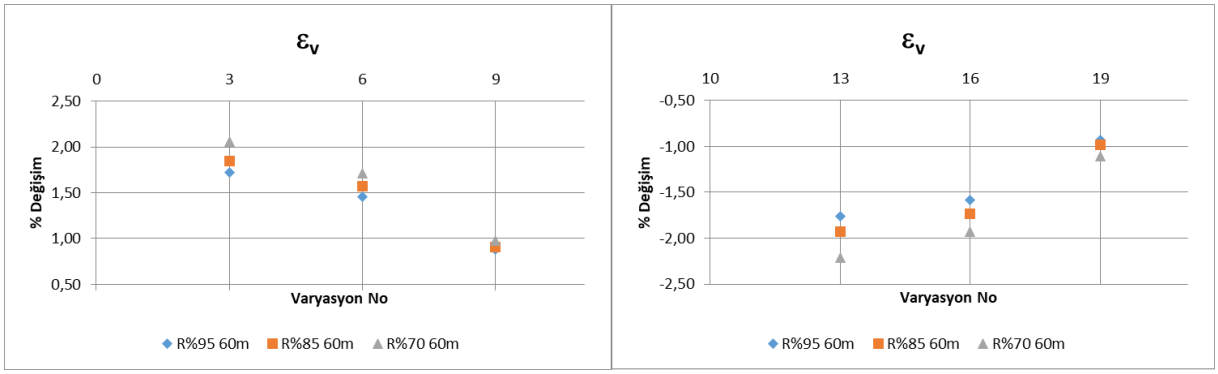
AASHTO yönteminde farklı yol sınıfları için bir tasarım parametresi olarak dikkate alınan güvenilirlik değerinin etkilerini incelemek amacıyla Tablo 2'de verilen farklı $T_{8,2}$ değerlerinden 3 güvenilirlik değerinin tamamında ortak olarak yer alan $T_{8,2}$=60m değeri için ε_r değişim oranları 3-6-9 numaralı kesitler için Şekil 6 (a)'da, 13-16-19 numaralı kesitler için Şekil 6 (b)'de ve ε_v değişim oranları 3-6-9 numaralı kesitler için Şekil 7 (a)'da, 13-16-19 numaralı kesitler için Şekil 7 (b)'de verilmiştir.

Bu analizde yalnızca, ε_r ve ε_v tepkileri üzerinde en etkin değişimi sağlayan 3-6-9 ve 13-16-19 numaralı varyasyonlar kullanılmıştır. Şekil 6 ve Şekil 7 birlikte değerlendirildiğinde ε_v değerlerinin güvenilirlik değişimine karşı duyarlılıklarının az olduğu, ε_r değerlerinde ise güvenilirlik seviyesi arttıkça ε_r değişim oranının azaldığı gözlenmiştir. Bu durum, yol sınıfının iyileşmesine bağlı olarak, önerilen üstyapı kesitinin daha kararlı olduğunu göstermektedir.



(a) **(b)**

Şekil 6. $T_{8,2}$=60 Milyon değeri için ε_r % değişim a) 3-6-9 numaralı kesitler b) 13-16-19 numaralı kesitler.



(a) **(b)**

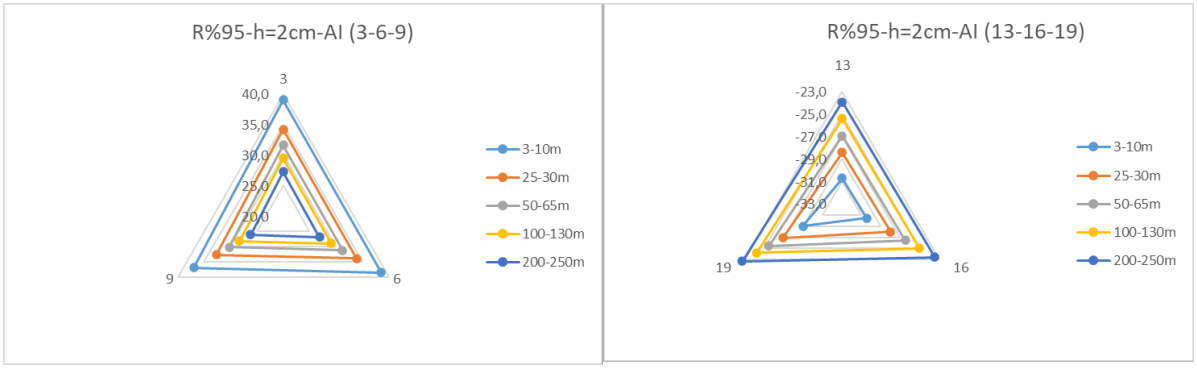
Şekil 7. $T_{8,2}$=60 Milyon değeri için ε_v % değişim a) 3-6-9 numaralı kesitler b) 13-16-19 numaralı kesitler.

R=%95 güvenilirlik seviyesinde farklı $T_{8,2}$ değerleri için önerilen kesitlerin ε_r tepkilerine bağlı olarak AI yöntemi katsayıları ile (Tablo 1) hesaplanan Nf değerlerinin orijinal kesitin yol ömrüne kıyasla değişim oranları 3-6-9 ve 13-16-19 numaralı kesitler için sırasıyla Şekil 8 (a) ve Şekil 8 (b)'de; ε_v tepkilerine bağlı olarak hesaplanan Nr değerlerinin orijinal kesitin yol ömrüne kıyasla değişim oranları 3-6-9 ve 13-16-19 numaralı kesitler için sırasıyla Şekil 9 (a) ve Şekil 9 (b)'de verilmiştir.

Şekil 8 incelendiğinde SN değeri aynı kalmasına rağmen tabaka kalınlıklarında yapılan değişikliklerin, yolun yorulmaya bağlı ömründe -%31 ile %40 arasında değişikliğe sebep olduğu görülmektedir. Bu durum oldukça dikkat çekicidir. $T_{8,2}$ değerinin artmasına bağlı olarak yorulmaya bağlı yol ömrü değerlerindeki değişimin azaldığı

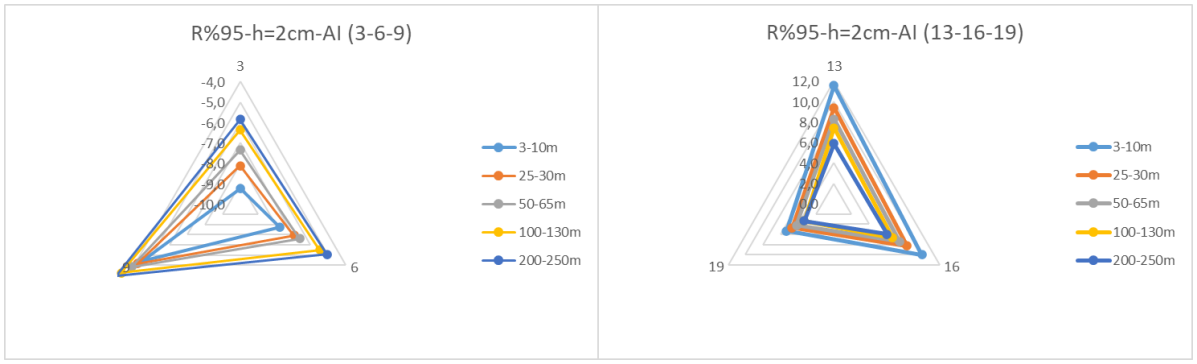
görülmektedir. Bu durum, daha öncede belirtildiği gibi artan trafiğe bağlı olarak önerilen kesitlerin daha kararlı yapıda olması ile ilişkilendirilebilir.

Tekerlek izinde oturmaya bağlı yol ömrü değişimini gösteren Şekil 9 incelendiğinde ise aynı SN değerine sahip kesitlerdeki kalınlık değişiminin -%9 ile %12 aralığında yol ömrünü etkilediği görülmektedir.



(a) **(b)**

Şekil 8. AI yöntemi için N_f değişim oranları (%) (R%95, h=2,0 cm) a) 3-6-9 numaralı kesitler b) 13-16-19 numaralı kesitler.



(a) **(b)**

Şekil 9. AI yöntemi için N_r değişim oranları (%) (R%95, h=2,0 cm) a) 3-6-9 numaralı kesitler b) 13-16-19 numaralı kesitler.

Yol ömrü değerlerinde ortaya çıkan bu değişimler, çalışmanın amacı ile örtüşmektedir. AASHTO yönteminde aynı SN değerine sahip kesitlerinin yol ömrü değerleri değişmezken, M-A yöntem ile elde edilen bu büyük değişim oldukça kayda değerdir.

Mevcut çalışmada yapılan analizlerden elde edilen bulgular birlikte değerlendirildiğinde; aynı SN değerine sahip olsalar dahi, mevcut bir üst yapı kesitinde asfalt kaplama tabakası kalınlığının, bağlayıcısız granüler tabaka kalınlıklarının, tabakaların mekanik tanımlamalarının ve mekanik tepki okuma noktalarının yüke uzaklık değerlerindeki değişmelerin mekanik tepkiler üzerinde oldukça etkili parametreler olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca yol ömrü hesabında kullanılan bozulma tipinin bir diğer önemli parametre olduğu net bir şekilde ortaya koyulmuştur. Çalışma bulguları, literatürde AASHTO yöntemi ile ilgili ortaya konulan; yalnızca lokal test şartlarına bağlı bir denklem olması, kaplama içerisinde farklı derinliklerde ortaya çıkan mekanik tepkileri ve buna bağlı farklı bozulma türlerini dikkate almıyor olması, yalnızca eşdeğer standart dingil yüküne odaklanırken farklı yükleme tipleri ve yükleme hızlarına adaptasyonunun olmaması, iklimsel değişiklikler ve buna bağlı ortaya çıkan tabaka elastisite modülü azalmalarının göz ardı ediliyor olması, dinamik yük etkisinin analiz edilmeyişi şeklindeki eleştirileri destekleyici bir konumdadır [22-30].

4. Sonuçlar ve Öneriler

Aynı SN sayısına sahip ancak tabaka kalınlıklarının değiştiği kesitlerde yapılan mekanik analizlerin incelendiği bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Türkiye Karayollarının esnek üstyapı tasarımında kullanılan AASHTO-93 yöntemi, yol ömrü hesabında taban zemini üzerindeki üstyapı sayısına odaklanmaktadır. Aynı SN değerinin farklı kombinasyonlar ile elde edildiği kesitlerde AASHTO yöntemine göre yolun bozulma ömrü değişmezken yapılan mekanik analizlerde kesit içerisindeki kritik noktalarda mekanik tepki değerlerinin (gerilme, birim şekil değiştirme ve deformasyonlar) değiştiği görülmektedir.
- BSK olarak üretilen tabakaların ve bağlayıcısız granüler tabakaların aynı SN değerini sağlayacak şekilde kendi aralarında kalınlık değişimleri, mekanik tepki ve yol ömrü değerlerini belirgin bir şekilde etkilememektedir. Bu koşullarda AASHTO yöntemi kararlı bir üstyapı kesiti öngörmektedir. Ancak BSK olarak üretilen tabakaların granüler tabakalar ile aynı SN değerini sağlayacak şekilde kalınlık değişimleri durumunda mekanik tepki değerleri ve yol ömürleri önemli ölçüde değişmektedir. Bu durum yol ömrü hesabında dikkate alınan kritik tepki değerlerinin elde edildiği noktaların z koordinatlarının ve aynı zamanda ilgili noktaya etki eden gerilmenin değişmesi ile ilgilidir. Kısacası M-A yöntemlerin tasarımda dikkate aldığı en önemli parametre olan mekanik tepki değişimi AASHTO yönteminde dikkate alınmamaktadır.
- Yüksek trafik hacmine ve dingil yüküne maruz kalan yollarda herhangi bir malzeme modifikasyonu yapılmadan ve AASHTO yöntemi ile yapılan tasarımdaki SN değeri değişmeden tabaka kalınlıklarında yapılacak düzenlemeler yolun bozulma ömrünü önemli ölçüde artırabilir.
- Bu çalışmada yapılan analizlerde tabaka malzemeleri lineer elastik olarak tanımlanmış ve sonuçlar bu karakterizasyona bağlı olarak elde edilmiştir. BSK tabakaların viskoelastik, granüler tabakaların non-lineer elastik olarak tanımlanması sonuçları etkileyebilecek potansiyele sahip parametrelerdir. Malzeme karakterizasyonundaki değişimi dikkate alacak analizler ilerdeki çalışma önerisi olarak sunulabilir.
- Türkiye karayollarında son yıllarda sürekli artma eğiliminde olan trafik ve yük değerlerinin, ayrıca geniş bir coğrafyaya yayılan ülkemizde doğu-batı, kuzey-güney akslarında görülen iklimsel değişimlerin dikkate alınması amacıyla mekanistik-ampirik yöntemin üst yapı tasarımında önemle değerlendirilmesi gereken bir tasarım yöntemi olduğu, kaplama tasarımında iklim, trafik ve malzeme özelliklerine bağlı lokal kalibrasyonların yapılmasının gerekliliği bu çalışmanın diğer önemli önerileri olarak sıralanabilir.

Yazar Katkısı

Konunun önerilmesi M.B., Analizlerin yapılması ve grafiklerin oluşturulması B.K., Sonuçların yorumlanması ve değerlendirilmesi M.B., B.K., Makalenin yazılması B.K.

Kaynaklar

[1] Hacıoğlu S. Esnek üstyapılı yollarda çatlak tamir yöntemi uygulanarak asfalt ömrünün uzatılması. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, 2013.
[2] İnanlı B. Mekanistik ampirik üstyapı tasarımının mevcut bir yolda kullanılması ve bakım/onarımın performansına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, 2016.
[3] Kök E. Karayolu ve havaalanı üstyapı tasarım yöntemleri, karşılaştırması ve Türkiye uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2008.
[4] Huang YH. Pavement Analysis and Design (2nd ed.). New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004.
[5] Tunç A. Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları. Ankara: Asil Yayın Dağıtım, 2004
[6] Mashayekhi M, Amini AA, Behbahani H, Nobakht S. Comparison of mechanistic-empirical and empirical flexible pavement design procedures of AASHTO: a case study. International Conference Bituminous Mixtures and Pavements; 2011; Thessaloniki, Greece. 319–28.
[7] Bostancıoğlu M. AASHTO-93 yönteminin mekanistik ampirik tasarım yöntemleri ile uyumunun belirlenmesi. Türk Doğa ve Fen Dergisi 2020; 9(2): 64–75.
[8] Tunç A. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları. Ankara: Nobel Akademi Yayıncılık; 2001.
[9] İncegül M. Bilgisayar destekli üstyapı tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2004.
[10] Mousa MR, Abo-Hashema MA, Gadallah AA, Mousa RM. Evaluation of pavement performance prediction models under different traffic and climatic conditions. 14th International Conference on Asphalt, Pavement Engineering, and Infrastructure; 2015; 1–19.

[11] Bostancıoğlu M. Mekanistik ampirik esnek üstyapı tasarım modellerinin tabaka kalınlık ve rijitlik oranlarına bağlı olarak karşılaştırılması. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2021; 11(1): 91-102.
[12] Behiry AEAEM. Fatigue and rutting lives in flexible pavement. Ain Shams Eng J 2012; 3(4): 367–374.
[13] Carvalho RL, Schwartz CW. Comparisons of flexible pavement designs: AASHTO empirical versus NCHRP project 1-37a mechanistic-empirical. Transp Res Rec 2006; 1947(1): 167–174.
[14] Muniandy R, Aburkaba E, Thamer N. Comparison of flexible pavement performance using Kenlayer and Chev pc software program. Aust J Basic Appl Sci 2013; 7 :112–9.
[15] Chegenizadeh A, Keramatikerman M, Nikraz H. Flexible pavement modelling using Kenlayer. Electron J Geotech Eng 2016; 21(7): 2467–2479.
[16] Sağlık A, Güngör AG. Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü, 2008.
[17] Hadi MNS, Bodhinayake BC. Non-linear finite element analysis of flexible pavements. Adv Eng Software 2003; 34(11–12): 657–662.
[18] Sarkar A. Numerical comparison of flexible pavement dynamic response under different axles. Int J Pavement Eng 2016; 17(5): 377–387.
[19] Ekwulo E, Eme D. Fatigue and rutting strain analysis of flexible pavements designed using CBR methods. Afr J Environ Sci Techno 2009; 3(12): 412-421.
[20] Samad E. Sensitivity analysis in flexible pavement performance using mechanistic empirical method (Case study: Cirebon–Losari road segment, West Java). Civ Engineering Forum 2011; 20: 1163-1174.
[21] Ghanizadeh A, Ziaie A. Nonpas: a program for nonlinear analysis of flexible pavements. Int J Integr Eng 2015; 7(1): 21-28
[22] Zhao J, Wang H. Mechanistic-empirical analysis of asphalt pavement fatigue cracking under vehicular dynamic loads. Constr Build Mater 2021; 284: 122877.
[23] Ahmet F, Thompson J, Kim D, Huynh N, Carrol E. Evaluation of pavement service life using AASHTO 1972 and mechanistic-empirical pavement design guides. Int J Transp Sci Technol 2023; 12: 46-61.
[24] Çelik ON, Eyada SO. Assessment of flexible pavement fatigue life of turkish typical sections using mechanistic empirical pavement design approach for coastal region. Ain Shams Eng J 2019; 10: 33-43.
[25] Shakhan MR, Topal A, Şengöz B. Data collection for implementation of the mechanistic empirical pavement design guide (MEPDG) in Izmir, Turkey. Turk J Civ Eng 2021; 32: 11361-11380.
[26] Le AT, Lee HJ, Park HM, Kim TW. Development of Korean pavement design guide for asphalt pavements based on the mechanistic-empirical design principle. Balt J Road Bridge Eng 2011; 6: 169-176.
[27] Toth C, Primusz P. New Hungarian mechanistic-empirical design procedure for asphalt pavements. Balt. J. Road Bridge Eng. 2020; 15: 161-186.
[28] Fuhaid AFA, Arifuzzaman M, Gul MA. Application of mechanistic empirical pavement design guide software in Saudi Arabia. Appl Sci-Basel 2022; 12: 8165.
[29] Diaz MM, Perez I. Mechanistic-empirical pavement design guide: features and distinctive elements. Rev Constr 2015; 14: 32-40.
[30] Kaimo LT, Sargado JM, Jr DP. Flexible Pavement Design Using Mechanistic Empirical Pavement Design Guide in the Philippines. International Journal of Geomate 2019; 17: 9-17.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 487-508, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1619881

Medicinal Vascular Plants Traditionally Used for Treating Respiratory Ailments in Dereboğazı Village (Erzurum, Türkiye)

Arzu ERGÜL BOZKURT [1*]
[1] Department of Botany, Faculty of Forestry, Artvin Çoruh University, Artvin, Türkiye
[*1] arzu.ergulbozkurt@artvin.edu.tr

(Geliş/Received: 14/01/2025; Kabul/Accepted: 14/03/2025)

Abstract: This study was conducted to investigate the traditional medicinal plants used by local people in order to treat various types of respiratory disorders in Dereboğazı village (Erzurum). The present ethnomedical study was conducted in Dereboğazı (Palandöken, Erzurum - East Anatolia), between 2019-2020 years. Information on the ethnobotanical use of plant taxa were gathered through in-person interviews with Dereboğazı people and recorded using a questionnaire form. In order to gather ethnomedical data, 63 informants—16 men and 47 women—participated in the study. Samples of plants were prepared and placed in the Herbarium of Karadeniz Technical University Faculty of Forestry (KATO). This study reported 32 native and exotic vascular plant taxa from 13 families and 24 genera from Dereboğazı being ethnomedicinally used for treating various types of respiratory problems such as asthma, bronchitis, common cold, cough, flu and sore throat. The most common traditional method of using plants for therapeutic purposes is decoction (23 plant taxa). As a result of the study, the families with the highest number of plant taxa were Lamiaceae (9 taxa), Rosaceae (6), Asteraceae and Moraceae (3). The most commonly used plant parts by the local people were identified as aerial parts (13 taxa), fruits (8 taxa), leaves and dried fruits (7 taxa) and flowers (6 taxa). The present and similar studies, which include ethnomedical information on biological resources, will contribute to the field of pharmacy and medical science.

Key words: Türkiye, medicinal plants, ethnomedicine, respiratory ailments.

Dereboğazı Köyünde (Erzurum, Türkiye) Solunum Rahatsızlıklarının Tedavisinde Geleneksel Olarak Kullanılan Damarlı Tıbbi Bitkiler

Öz: Bu çalışma, Dereboğazı köyünde (Erzurum) çeşitli solunum yolu rahatsızlıklarını tedavi etmek için yerel halk tarafından kullanılan geleneksel tıbbi bitkileri araştırmak amacıyla yapılmıştır. Bu etnomedikal çalışma 2019-2020 yılları arasında Dereboğazı'nda (Palandöken, Erzurum - Doğu Anadolu) gerçekleştirilmiştir. Bitki taksonlarının etnobotanik kullanımına ilişkin bilgiler Dereboğazı halkı ile yüz yüze görüşmeler yoluyla toplanmış ve bir anket formu kullanılarak kaydedilmiştir. Etnomedikal veri toplamak amacıyla çalışmaya 16 erkek ve 47 kadın olmak üzere 63 kişi katılmıştır. Bitki örnekleri hazırlanarak, Karadeniz Teknik Üniversitesi Orman Fakültesi (KATO) Herbaryumuna yerleştirilmiştir. Bu çalışmada, Dereboğazı'nda etnomedikal olarak astım, bronşit, soğuk algınlığı, öksürük, grip ve boğaz ağrısı gibi çeşitli solunum problemlerinin tedavisinde kullanılan 13 familya ve 24 cinse ait 32 yerli ve egzotik vasküler bitki taksonu tespit edilmiştir. Bitkilerin tedavi amaçlı kullanımında en yaygın geleneksel yöntem kaynatmadır (23 bitki taksonu). Çalışma sonucunda en fazla bitki taksonuna sahip familyalar Lamiaceae (9 takson), Rosaceae (6), Asteraceae ve Moraceae (3) olmuştur. Yerel halk tarafından en yaygın olarak kullanılan bitki kısımları toprak üstü kısımları (13 takson), meyveler (8 takson), yapraklar ve kurutulmuş meyveler (7 takson) ve çiçekler (6 takson) olarak tespit edilmiştir. Biyolojik kaynaklar hakkında etnomedikal bilgiler içeren bu ve benzeri çalışmalar eczacılık ve tıp bilimi alanına katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Türkiye, şifalı bitkiler, etnomedikal, solunum rahatsızlıkları.

1. Introduction

Botany is the genesis of the present idea of ethnobotany; in fact, medicine and botany have always been closely related, and many contemporary medications have plant roots [1, 2]. Although medicinal plants have been used to treat illnesses since ancient times, the usage of phyto-therapeutic substances has significantly expanded in the past ten years. According to the WHO (World Health Organization), 11% of critical medications are derived from plants, and 80% of people worldwide use phyto-therapeutic substances to meet their basic health-related needs [3, 4]. In many regions of the world, using herbal treatments to treat respiratory conditions is standard practice. Approximately 53,000 plant species are utilized medicinally worldwide [5, 6]. Worldwide, respiratory ailments are a prevalent and significant cause of illness and mortality [7]. The respiratory system is most frequently

* Corresponding author: arzu.ergulbozkurt@artvin.edu.tr. ORCID Information: [1] 0000-0003-0612-8120

affected by bronchitis, asthma, the common cold, coughing, flu, and sore throats. Respiratory problems are common in Erzurum due to its harsh climate and cold temperatures.

When it comes to medication design and development, ethnobotany and ethnopharmacology have proven to be effective methods for establishing folk medicinal knowledge in various regions or ethnic groups. Effective treatments for mild to moderate health issues, as well as occasionally for severe and acute conditions, have long been offered by phytotherapy. In medicine, the term "respiratory tract diseases" refers to any pathological problems that impact the lungs, bronchi, or nasal passages. These health issues include vague symptoms like dyspnea and range from acute infections like pneumonia and bronchitis to long-term illnesses like asthma and chronic obstructive pulmonary disease (COPD). Only minor respiratory infectious ailments are treated with alternative medicine these days; more serious conditions are handled in hospitals [8-11].

Türkiye is the richest country in Europe in terms of plant species diversity and richness with approximately 12,000 plant taxa. In addition, since about 4000 of these plant taxa are endemic, it has a very rich flora in terms of endemism rate. Due to this diversity and richness, people in Türkiye have widely used plants for various purposes (for making, fuel, food, clothing and treatment) for centuries. In recent years, due to the increasing dependence on synthetic drugs and the high number of side effects of these drugs, people's orientation towards nature has come back to the spotlight. Erzurum is a city with an extreme weather conditions (of -37 °C in winter and 36 °C in summer). Therefore, the inhabitants (humans, plants and animals) of Erzurum must be able to tolerate a temperature range of up to 73°C. Cold weather conditions cause widespread cold-related illnesses in the region. Many medicinally significant plants have been utilized for millennia to treat respiratory conditions in the region, particularly by the rural populace [12, 13]. This study aims to evaluate the effectiveness of plant taxa in treating respiratory ailments and to document the traditional medicinal uses of plants in Dereboğazı (Palandöken, Erzurum). Respiratory ailments are common in the study area due to extreme climatic conditions. It is thought that this research will contribute the future studies in the region.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

Erzurum is a city at an elevation of 1850 meters and Palandöken is located in the 2200-3176 meter altitude zone. The Palandöken Mountains span an area approximately 70 km in length and 25 km in width. The Eastern Anatolia Region, where Palandöken is situated, has a continental climate. Erzurum experiences a long-term average annual temperature of 5.7°C, with harsh winters and extreme seasonal variations ranging from -37°C in winter to 36°C in summer. Snow remains on the ground for 113 days in a year, and there is an average of 429 mm of precipitation per year [13, 14]. In the Eastern Anatolia Region of Türkiye, Palandöken is one of the major districts that make up the city center of Erzurum. Among the three villages of the Palandöken district (Dereboğazı, Güzelyurt, Yukarıyenice), Dereboğazı is the largest in terms of population and residential area. In Erzurum, which became a metropolitan city in 1993, Dereboğazı gained the status of a rural neighborhood in Palandöken district of Erzurum province when villages became neighborhoods due to the metropolitan law. Dereboğazı is situated between 39° 49′ 12″ North and 41° 01′ 30″ Easth GPS (Global Positioning System) coordinates [15] (Figure 1).

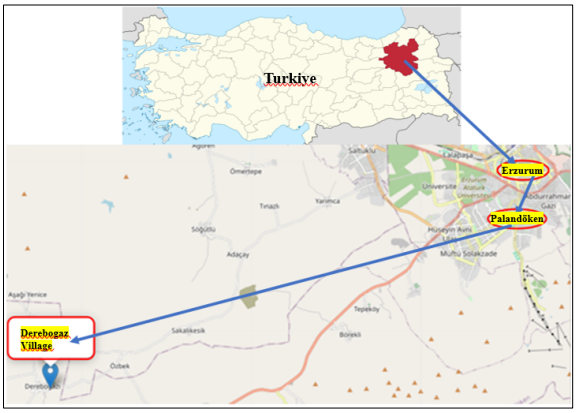


Figure 1. The map showing the location of Dereboğazı in Türkiye (Adapted from [16, 17]).

Photographs of the research area taken from the field are shown in Figure 2 in winter days.



Figure 2. Photographs of the research area during cold winter days.

The harsh climatic conditions and significant altitude variations in Palandöken contribute to the unique floristic composition of the region, which has historically supported the local use of medicinal plants.

2.2. Gathering And Analyzing Data

This study was carried out between 2019-2020 years. Snowball method was applied to determine which plants people living in the research area use for the treatment of respiratory ailments.The Snowball approach's primary objective is to identify subject-matter experts, and this study was conducted with rural residents of Dereboğazı, Erzurum, to achieve this goal. Locals were interviewed in-person to gather information on the applications of these plants, and a survey form was used to document the information. In addition to giving knowledge on plants, the locals offered to show samples of plants in their natural habitat. Before each interview began, an oral Prior Informed Consent (PIC) was obtained. Information including the respondents'age, gender, degree of education, and occupation were all included in the survey form. "Flora of Turkey and the East Aegean Islands" [18] was used to identify plant taxa. Samples of plants were prepared and placed in the Herbarium of Karadeniz Technical University Faculty of Forestry (KATO). The demographic data of the informants is showed in Table 1.

Table 1. The demographic data of the informants.

Characteristics		The quantity of informants	Percentage (%)
Gender	Male	16	25.40
	Female	47	74.60
Education level	Illiterate	11	17.46
	Primary school	17	26.98
	Secondary school	10	15.87
	High school	15	23.81
	University	10	15.87
Age ranges	20-30	5	7.94
	31-41	9	14.29
	42-32	6	9.52
	33-43	13	20.63
	44-54	16	25.40
	>55	14	22.22
Employment	Housewife	32	50.79
	Artisan	3	4.76
	Worker	4	6.35
	Farmer	4	6.35
	Student	5	7.94
	Self-employment	3	4.76
	Retired	7	11.11
	Teacher	3	4.76
	Engineer	2	3.17

Use-value (UV) was calculated for the plants in the research region. The frequency with which people use plants in their daily lives can be measured using UV (UV = U / N, U: the quantity of reports about plant utilization, V: the quantity of informants) [19-21]. Use-Value (UV) is a quantitative measure of the relative importance of plant species based on their frequency of use by the informants. It helps identify the most culturally and medicinally significant plants in the study area.

While preparing the questionnaire applied in the field, specifically it was soughted to answer the following questions:

1. Which types of plants are most frequently used to treat respiratory ailments?
2. What are the local names of the plants you use for medicinal purposes?
3. In ethno-preparations, which plant parts are most frequently used?
4. Which methods of preparation are frequently employed for creating medical recipes?
5. Which utilization method you use?
6. Which respiratory ailments (asthma, bronchitis, common cold, cough, flu and sore throat) is this herb good for?
7. Which mixture types of medicinal plants are most frequently used to treat respiratory ailments?

It may providing answers to these questions would aid in determining the plant taxa might be investigated further in the domains of medicine and pharmacy.

3. Results And Discussion

In-person surveys of 63 residents in the study area revealed that 75% of respondents identified as female and 25% as male. As a result of the study, it was concluded that women were generally more knowledgeable about medicinal plants and more willing to share this information. It is thought that this situation is due to the various responsibilities (childcare, cooking responsibilities, efforts to cure diseases, etc.) that women have assumed in societies from past to present. In this study, the vascular plant taxa and their traditional uses for treating respiratory conditions by local people were documented (Table 2).

Table 2. Traditional medicinal plants used in Dereboğazı, Palandöken (Erzurum) to treat respiratory ailments.

Family	Botanical name	Local name	Plant parts	Uses/ailments treated	Preparations	Utilization method	UV	Herbarium No (KATO)
Aceraceae	**Acer negundo* L.	Akçaağaç	Seed	Cough	Decoction	Drinking	0.07	22474
Asparagaceae	*Asparagus persicus* Baker	Meroji, Zazık	Aerial parts	Respiratory ailments, Asthma	Infusion	Drinking	0.17	22478
Asteracea	*Anthemis cretica* L.	Papatya	Flowers	Cold, Sore throat	Decoction	Drinking	0.80	22489
	Tanacetum coccineum (Willd.) Grierson	Sendel otu	Aerial parts, Flowers	Respiratory ailments	Infusion	Drinking	0.71	22460
	Taraxacum bessarabicum (Hornem.) Hand.-Mazz.	Karahindiba	Flowers	Cold	Decoction	Drinking	0.50	22468
Boraginaceae	*Alkanna orientalis* (L.) Boiss.	Hevaju	Leaves	Sore throat	Decoction	Drinking	0.33	22490
Fumariaceae	*Fumaria asepala* Boiss.	Şahtere	Aerial parts	Respiratory ailments	Fresh	Eating	0.14	22487
Juglandaceae	*Juglans regia* L.	Ceviz	Fruits, Seeds	Respiratory ailments	Fruit and seeds soaked in water overnight	Drinking	0.07	22493
Lamiaceae	*Mentha aquatica* L.	Pungi, Pune, Su nanesi	Aerial parts, Flowers	Cough, Sore throat, Asthma	Decoction, Dried	Drinking, Adds to soups as a spice	0.58	22494
	M. longifolia (L.) L.	Yarpuz, pungi	Aerial parts, Flowers	Cough, Sore throat, Asthma	Decoction, Dried	Drinking, Adds to soups as a spice	0.61	22491
	Micromeria fruticosa (L.) Druce	Taş nanesi, Daş anığı	Aerial parts	Cold, Flu	Decoction	Drinking	0.36	22485
	Origanum acutidens (Hand.-Mazz.) Ietsw.	Anıh	Aerial parts	Cold, Bronchitis	Infusion	Drinking	0.77	22467

Continuation of **Table 2.**

Family	Botanical name	Local name	Plant parts	Uses/ailments treated	Preparations	Utilization method	UV	Herbarium No (KATO)
	O. rotundifolium Boiss.	Anıh	Aerial parts	Cold, Bronchitis	Infusion	Drinking	0.71	22475
	Salvia nemorosa L.	Adaçayı	Aerial parts	Respiratory ailments	Decoction	Drinking	0.87	22486
	Satureja hortensis L.	Kara anuk	Aerial parts	Cold, Sore throat, Asthma	Decoction, Cooked	Drinking, Eating	0.82	22465
	Thymus fallax Fisch. & C.A.Mey.	Kekik	Aerial part	Cough, Sore throat, Flu	Decoction	Adds to soups as a spice	0.82	22481
	T. sipyleus Boiss.	Catri, Kekik	Aerial part	Cough, Cold, Flu	Decoction, Dried	Drinking, Adds to soups as a spice	0.88	22461
Malvacea	*Alcea apterocarpa* (Fenzl) Boiss.	Dolik	Flowers	Cold, Bronchitis	Decoction	Drinking	0.25	22477
	Malva sylvestris L.	Dolik, Tollik, Ebegümeci	Leaves	Respiratory ailments	Infusion	Drinking	0.31	22472
Moraceae	*Ficus carica* L.	İncir	Dried fruits, Fruits	Sore throat	Decoction with milk, Fresh	Drinking, Eating	0.30	22495
	**Morus alba* L.	Tui, Dut	[a]Dried fruit, [b]Leaves, [c]Fruit	Sore throat, Respiratory ailments, Flu	[a,b] Decoction, [c]Fresh	[a,b]Drinking, [c]Eating,	0.84	22479
	**M. nigra* L.	Tui, Dut	[a]Dried fruit, [b]Leaves, [c]Fruit	Sore throat, Respiratory ailments, Flu	[a,b] Decoction, [c]Fresh	[a,b]Drinking, [c]Eating,	0.84	22464
Plantaginaceae	*Plantago lanceolata* L.	Bağa yaprağı, Bağa otu	Leaves	Respiratory ailments, Bronchitis	Decoction	Drinking	0.57	22480
	P. major L.	Bağa yaprağı, Bağa otu	Leaves	Respiratory ailments	Decoction	Drinking	0.57	22484
Polygonaceae	*Rumex crispus* L.	Evelik	Leaves	Cold, Bronchitis	Cooked	Eating	0.80	22463

Continuation of **Table 2.**

Family	Botanical name	Local name	Plant parts	Uses/ailments treated	Preparations	Utilization method	UV	Herbarium No (KATO)
Rosaceae	*Crataegus orientalis* Pall.ex M.Bieb.	Aluç, Alıç	[a]Fruit, [b]Dried Fruit	Cough	[a]Marmalade, [a]Fresh, [b]Decoction	[a]Eating, [b]Drinking	0.61	22476
	Rosa canina L.	Kuşburnu	Fruit	Cold, Cough, Flu	Decoction, Marmalade	Drinking, Eating	0.93	22470
	R. dumalis Bechst.	Kuşburnu	Fruit	Cold, Cough, Flu	Decoction, Marmalade	Drinking, Eating	0.90	22466
	R. spinossisima L.	Kuşburnu	Fruit	Cold, Cough, Flu	Decoction, Marmalade	Drinking, Eating	0.90	22482
	Rubus caesius L.	Böğürtlen	Fruit	Cold, Cough	Fresh, Marmalade	Eating	0.82	22492
	R. idaeus L.	Böğürtlen	Fruit	Cold, Cough	Decoction, Marmalade,	Drinking, Eating	0.82	22483
Urticaceae	*Urtica dioica* L.	Isırgan	Aerial parts	Respiratory ailments	Decoction Cooked	Drinking, Eating	0.41	22469

**Exotic and/or cultivated species.*

The plants that had the highest UV values were *Rosa canina* L. (0.93), *R. dumalis* Bechst. and *R. spinossisima* L. (0.90), *Thymus sipyleus* Boiss. (0.88), *Salvia nemorosa* L. (0.87), *Morus alba* L., and *M. nigra* L. (0.84). The plants with the lowest UV values were *Acer negundo* L. and *Juglans regia* L. (0.07), *Fumaria asepala* Boiss. (0.14) and *Asparagus persicus* Baker (0.17) (Table 2). The most commonly used utilization method is drinking (28 plant taxa) (Table 2).

Photographs of the plant taxa, which were identified in the research area, taken from the field are shown in Figure 3, Figure 4 and Figure 5.



***Acer negundo* L.**



***Urtica dioica* L.**



***Plantago lanceolata* L.**

Figure 3. Field photographs of medicinal plant taxa in this study.

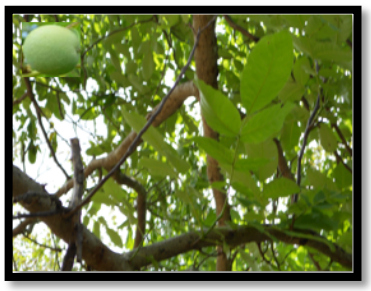
		
***Taraxacum bessarabicum* (Hornem.) Hand.-Mazz.**	***Mentha longifolia* (L.) L.**	***Juglans regia* L.**
		
***Salvia nemorosa* L.**	***Rumex crispus* L.**	***Thymus sipyleus* Boiss.**
		
***Ficus carica* L.**	***Morus nigra* L.**	***Plantago major* L.**
		
***Tanacetum coccineum* (Willd.) Grierson**	***Thymus fallax* Fisch. & C.A.Mey.**	***Rubus idaeus* L.**

Figure 4. Field photographs of medicinal plant taxa in this study, continiued.



***Rosa canina* L.**



***R. dumalis* Bechst.**



***Anthemis cretica* L.**

Figure 5. Field photographs of medicinal plant taxa in this study, continiued.

The Lamiaceae (9 plant taxa), Rosaceae (6 plant taxa), Asteraceae, and Moraceae (3 plant taxa) were the most frequently used families among the 32 plant taxa documented (Figure 6). The plant taxa with medicinal importance in the families identified in the research area are thought to have a widespread use depending on the density of their presence in the region. Aerial parts (13 plant taxa) were most frequently used in the preparations and applications, followed by fruits (8 plant taxa), leaves (7 plant taxa), and flowers (6 plant taxa) (Figure 7). Decocsion was found to be the most commonly used traditional medicine making method (23 plant taxa) (Figure 8).

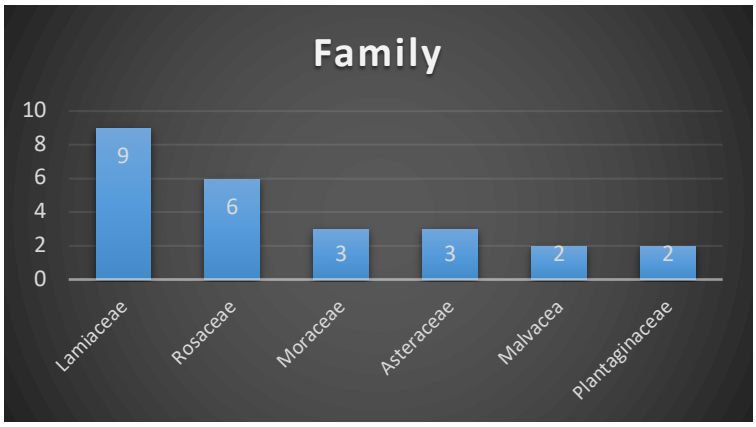


Figure 6. The most numerous plant taxonomic families.

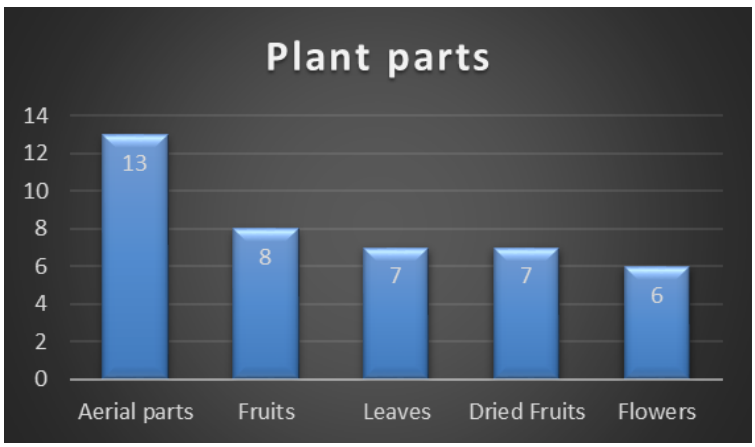


Figure 7. The plant sections that are most commonly utilized.

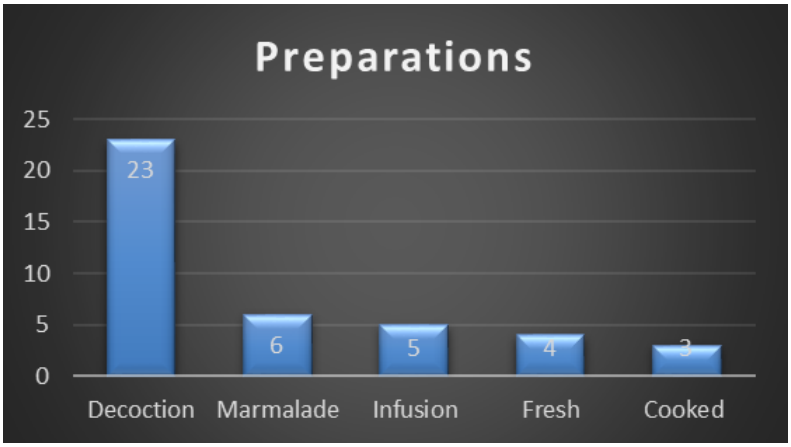


Figure 8. Methods for making traditional medications.

When it came to the treatment of illnesses, local people most commonly used medicinal plants for cold There are fourteen plants: eleven for coughing and respiratory conditions, nine for sore throats, eight for the flu, five for bronchitis, and four for asthma (Figure 9). Plants used for the treatment of Cough are, **Acer negundo* L., *Mentha aquatica* L., *M. longifolia* (L.) L., *Thymus fallax* Fisch. & C.A.Mey., *T. sipyleus* Boiss., *Crataegus orientalis* Pall.ex M.Bieb., *Rosa canina* L., *R. dumalis* Bechst., *R. spinossisima* L., *Rubus caesius* L. and *R. idaeus* L. The following plants are used to treat Respiratory conditions: *Asparagus persicus* Baker, *Tanacetum coccineum* (Willd.) Grierson, *Fumaria asepala* Boiss., *Juglans regia* L., *Salvia nemorosa* L., *Malva sylvestris* L., **Morus alba* L., **M. nigra* L., *Plantago lanceolata* L., *P. major* L. and *Urtica dioica* L. Plants that are used to cure Asthma include *Asparagus persicus* Baker, *Mentha aquatica* L., *M. longifolia* (L.) L. and *Satureja hortensis* L. Among the plants used to treat colds are *Anthemis cretica* L., *Taraxacum bessarabicum* (Hornem.) Hand.-Mazz., *Micromeria fruticosa* (L.) Druce, *Origanum acutidens* (Hand.-Mazz.) Ietsw., *O. rotundifolium* Boiss., *Satureja hortensis* L., *Thymus sipyleus* Boiss., *Alcea apterocarpa* (Fenzl) Boiss., *Rumex crispus* L., *Rosa canina* L., *R. dumalis* Bechst., *R. spinossisima* L., *Rubus caesius* L. and *R. idaeus* L. Plants that are used to heal sore throats include *Anthemis cretica* L., *Alkanna orientalis* (L.) Boiss., *Mentha aquatica* L., *M. longifolia* (L.) L., *Satureja hortensis* L., *Thymus fallax* Fisch. & C.A.Mey., *Ficus carica* L., **Morus alba* L.and **M. nigra* L. The following plants are used to treat flu: *Micromeria fruticosa* (L.) Druce, *Thymus fallax* Fisch. & C.A.Mey., *T. sipyleus* Boiss., **Morus alba* L., **M. nigra* L., *Rosa canina* L., *R. dumalis* Bechst. and *R. spinossisima* L. Among the plants used to cure bronchitis are *Origanum acutidens* (Hand.-Mazz.) Ietsw., *O. rotundifolium* Boiss., *Alcea apterocarpa* (Fenzl) Boiss., *Plantago lanceolata* L. and *Rumex crispus* L.

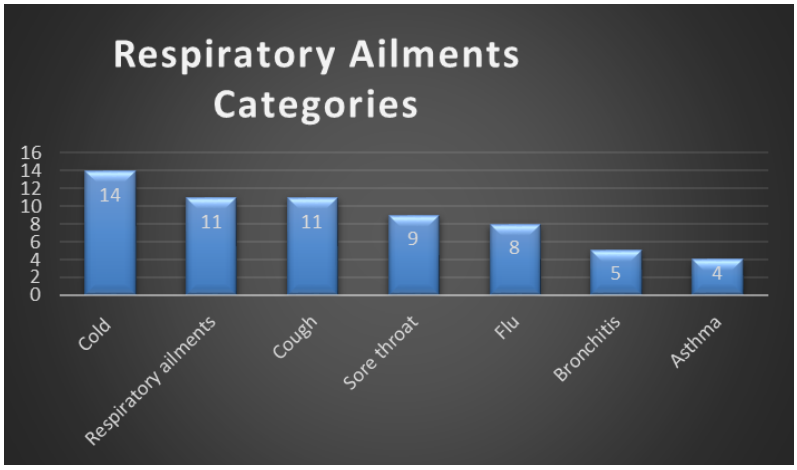


Figure 9. The number of respiratory ailments categories.

There are no existing studies specifically on respiratory diseases in Erzurum region. However, taking into account the ethnobotanical studies conducted in the region, a comparison was made between the data obtained from the current study and previous studies (Table 3). Ergül Bozkurt [22] reported 63 plant taxa from Aziziye district, Erzurum, Türkiye. It has been quoted nine plant taxa with the same uses viz. *Acer negundo* L., *Taraxacum bessarabicum* (Hornem.) Hand.-Mazz., *Fumaria asepala* Boiss., *Micromeria fruticosa* (L.) Druce, *Satureja hortensis* L., *Thymus fallax* Fisch. & C.A.Mey. *T. sipyleus* Boiss., *Alcea apterocarpa* (Fenzl) Boiss., *Crataegus orientalis* Pall.ex M.Bieb. and twelve plant taxa with different use viz. *Juglans regia* L., *Mentha longifolia* (L.) L., *Salvia nemorosa* L., *Plantago lanceolata* L., *P. major* L., *Rumex crispus* L., *Rosa canina* L., R. *dumalis* Bechst., *R. pimpinellifolia* L., *Rubus caesius* L., *R. idaeus* L., *Urtica dioica* L. with 19.05% of new uses reported in present study. Karakaya et al. [23] reported 77 plant taxa from Aziziye district, Erzurum. They have quoted nine plant taxa with the same uses viz. *Anthemis cretica* L., *Mentha aquatica* L., *Origanum rotundifolium* Boiss., *Malva sylvestris* L., *Morus alba* L., *Rumex crispus* L., *Plantago major* L., *Rosa canina* L., *Urtica dioica* L. and seven plant taxa with different use viz. *Alkanna orientalis* (L.) Boiss., *Mentha longifolia* (L.) L., *Juglans regia* L., *Morus nigra* L., *Plantago lanceolata* L., *Crataegus orientalis* Pall.ex M.Bieb., *Rosa pimpinellifolia* L. with 9.09% of new uses reported in present study. Karakaya et al. [24] reported 94 plant taxa from South of Erzurum, Türkiye. They have quoted eight plant taxa with the same uses viz. *Tanacetum coccineum* (Willd.) Grierson, *Mentha aquatica* L., *M. longifolia* (L.) L., *Origanum acutidens* (Hand.-Mazz.) Ietsw., *O. rotundifolium* Boiss., *Malva sylvestris* L., *Morus alba* L., *Rosa canina* L. and nine plant taxa with different use viz. *Anthemis cretica* L., *Alkanna orientalis* (L.) Boiss., *Alcea apterocarpa* (Fenzl) Boiss., *Ficus carica* L., *Morus nigra* L., *Plantago lanceolata* L., *P. major* L., *Rumex crispus* L., *Rosa pimpinellifolia* L. with 9.58% of new uses reported in present study. Özgen et al. [25] reported 70 plant taxa from Ilıca District of Erzurum, Türkiye. They have quoted three plant taxa with the same uses viz. *Acer negundo* L., *Mentha longifolia* (L.) L., *Urtica dioica* L. and nine plant taxa with different use viz. *Fumaria asepala* Boiss., *Thymus fallax* Fisch. & C.A.Mey., *T. sipyleus* Boiss., *Plantago major* L., *Rumex crispus* L., *Rosa canina* L., *R. dumalis* Bechst., *R. pimpinellifolia* L., *R. idaeus* L. with 12.86% of new uses reported in present study.

Table 3. Similarity and differences between study area and Erzurum province.

Reference	Study Area	Reported species number	Number of partner species	Similarly used species	Differently used species	Percentage of new uses reported in the current study
Ergul Bozkurt, 2024	Yakutiye district, Erzurum	63	21	9	12	19.05
Karakaya et al., 2020	Aziziye district, Erzurum	77	16	9	7	9.09
Karakaya et al., 2019	South of Erzurum, Türkiye	94	17	8	9	9.58
Özgen et al., 2012	Ilıca District, Erzurum	70	12	3	9	12.86

It was attempted to identify the plant taxa with common usage by contrasting the current study with research on respiratory tract conditions carried out globally. Kayani et al. [26], in their study (Gallies- Abbottabad, Northern Pakistan), found that 120 plant taxa were used for the treatment of respiratory tract disorders. *Juglans regia* L. and *Plantago lanceolata* L. taxa were used for the same purpose in the present study and the study by Kayani et al. [26]. Although the species are different, when the studies are compared in terms of genera, *Salvia lanata* Roxb., *Salvia moorcroftiana* Wall. ex Benth, *Thymus serphyllum* L., *Ficus benghalensis* L., *F. palmata* Forssk., *F. religiosa* L., *Plantago ovata* Forssk., *Rumex dentatus* L. species are used in the publications of Kayani et al. [26], while *Salvia nemorosa* L., *Thymus fallax* Fisch. & C.A.Mey., *T. sipyleus* Boiss., *Ficus carica* L., *Plantago major* L., *Rumex crispus* L. species are used in current study. In their study of the eastern Catalan Pyrenees (Iberian Peninsula), Rigat et al. [11] discovered that 99 plant taxa were used to treat respiratory tract conditions. Both this study and the one by Rigat et al. [11] used the same taxa: *Malva sylvestris* L., *Ficus carica* L., *Plantago lanceolata* L., *P. major* L., and *Urtica dioica* L. Even though the species are different, the publications of Rigat et al. [11] use species of *Anthemis arvensis* L., *Mentha pulegium* L., *Origanum majorana* L., *Origanum vulgare* L., *Satureja calamintha* (L.) Scheele subsp. *ascendens* (Jord.) Briq., *Thymus serpyllum* L. subsp. *chamaedrys* (Fries) Celak.,

T. *serpyllum* L. subsp. *nervosus* (GayexWillk.) Nyman., *T. vulgaris* L., *Rosa tomentosa* Sm., *Rubus ulmifolius* Schott, *Urtica urens* L., whereas the current study uses species of *Anthemis cretica* L., *Mentha aquatica* L., *M. longifolia* (L.) L., *Origanum acutidens* (Hand.-Mazz.) Ietsw., *O. rotundifolium* Boiss., *Satureja hortensis* L., *Thymus fallax* Fisch. & C.A.Mey., *T. sipyleus* Boiss., *Rosa canina* L., *R. dumalis* Bechst., *R. pimpinellifolia* L., *Rubus caesius* L. and *R. idaeus* L. In his study of the Saudi Arabia (A review), Dailah, [27] discovered that 41 plant taxa were used to treat respiratory tract conditions. Both this study and the one by Dailah, [27] used the same taxon: Mentha longifolia (L.)L. Even though the species are different, the publications of Dailah, [27] use species of *Origanum majorana* L., *Thymus vulgaris* L., *Malva parviflora* L., *Rumex nervosus* Vahl, *Rosa abyssinica* R.Br. On the other hand the current study uses species of *Mentha aquatica* L., *Origanum acutidens* (Hand.-Mazz.) Ietsw., *O. rotundifolium* Boiss., *Thymus fallax* Fisch. & C.A.Mey., *T. sipyleus* Boiss., *Malva sylvestris* L., *Rumex crispus* L., *Rosa canina* L., *R. dumalis* Bechst. and *R. pimpinellifolia* L. Bussmann and Glenn [28] found that 91 plant species were used to treat respiratory conditions in Peru. The identical taxon, *Plantago major* L., was employed in this study as the one conducted by Bussmann and Glenn [28]. Other taxa from the same genus were compared with the plant taxa in the current study and the study by Bussmann and Glenn [28]. While the current study employs species of *Juglans regia* L., *Salvia nemorosa* L., *Satureja hortensis* L., *Thymus fallax* Fisch. & C.A.Mey. *T. sipyleus* Boiss., *Alcea apterocarpa* (Fenzl) Boiss., *Malva sylvestris* L., *Plantago lanceolata* L., *Rubus caesius* L. and *R. idaeus* L., Bussmann and Glenn (2010) used species of *Juglans neotropica* Diels, *Salvia discolor* H.B.K., *S. officinalis* L., *S. sagitatta* R. & P., *Satureja pulchella* (H.B.K.) Briquet, *Thymus vulgaris* L., *Alcea rosea* (L.) Cavanilles, *Malva parviflora* L., *Plantago linearis* H.B.K. and *Rubus robustus* C. Presl. In Mauritius, 55 plant species were utilized to cure respiratory ailments, according to Suroowan and Mahomoodally [29]. In this study, the same taxon, Morus alba L., was used as in the one by Suroowan and Mahomoodally [29]. The plant taxa in the current study and the work of Suroowan and Mahomoodally [29] were compared with other taxa from the same genus. Suroowan and Mahomoodally [29] employed species of *Mentha piperita* L. and *Thymus vulgaris* L., while the current study uses species of *Mentha aquatica* L., *M. longifolia* (L.) L., *Thymus fallax* Fisch. & C.A. Mey., *T. sipyleus* Boiss., and *Morus nigra* L. According to Haile et al. [30], 96 plant species were utilized in Ethiopia to treat respiratory ailments. There were no shared plant taxa between the current study and Haile et al. (2022). The plant taxa in the present study and the work by Haile et al. [30] were compared with other taxa from the same genus. Haile et al. [30] employed species of *Asparagus africanus* Lam, *Mentha spicata* L., and *Rumex nepalensis* Spreng, while the current study uses species of *Asparagus persicus* Baker, *Mentha aquatica* L., *M. longifolia* (L.) L. and *Rumex crispus* L. In the Moroccan Rif region, 41 plant species were used to cure respiratory conditions, according to Chaachouay et al. [31]. The present study and Chaachouay et al. [31] did not share any plant taxa. Other taxa from the same genus were compared with the plant taxa in this study and the research done by Chaachouay et al. [31]. While the current study employs species of *Mentha aquatica* L. and *M. longifolia* (L.) L., Chaachouay et al. [31] used species of *Mentha suaveolens* Ehrh., *M. saturejoides* R.Br., *M.* × *citrata* Ehrh, and *M.* × *rotundifolia* (L.) Huds. According to Fatiha et al. (2017), 66 plant species were used to treat respiratory ailments in the Oum Rbai region. In the current study and Fatiha et al. (2017), the plant taxa *Malva sylvestris* L., *Ficus carica* L., and *Plantago major* L. are prevalent. The plant taxa in this study and the research conducted by Fatiha et al. [32] were compared with other taxa from the same genus. Fatiha et al. [32] employed species of *Mentha pulegium* L. and *Origanum majorana* Moench., while the current study used species of *Mentha aquatica* L., *M. longifolia* (L.) L., *Origanum acutidens* (Hand.-Mazz.) Ietsw., *O. rotundifolium* Boiss., *Plantago lanceolata* L., and *Plantago psyllium* L. In the Oum Rbai region, 82 plant species were used to cure respiratory conditions, according to Kala [33]. There are no species in common between Kala's [33] study and this one. Other taxa from the same genus were compared with the plant taxa in this study and Kala's [33] research. While the current study used species of *Origanum acutidens* (Hand.-Mazz.) Ietsw., *O. rotundifolium* Boiss., *Malva sylvestris* L., and *Ficus carica* L., Kala (2020) used species of *Origanum vulgare* L., *Malva verticillata* L., *Ficus benghalensis* L., *F. racemosa* L., and *F. religiosa* L.

Sbai-Jouilil et al. [34] reported that 98 plant species were used to treat respiratory disorders in the Seksaoua Region (Western High Moroccan Atlas). This study and the one by Sbai-Jouilil et al. [34] do not share any species. The plant taxa in this study and the research of Sbai-Jouilil et al. [34] were compared with other taxa from the same genus. Sbai-Jouilil et al. [34] used species of *Mentha pulegium* L., *Mentha suaveolens* Ehh., *Origanum compactum* Benth., *Thymus broussonnetii* Boiss, and *Thymus satureioides* Coss., whereas the current study used species of *Mentha aquatica* L., *M. longifolia* (L.) L., *Origanum acutidens* (Hand.-Mazz.) Ietsw., *O. rotundifolium* Boiss., and *Thymus fallax* Fisch. & C.A. Mey.

The present investigation was contrasted with earlier research from a medical and pharmacological perspective. At the end of the study came to the conclusion that traditional plant applications are consistent with pharmacological and medical research (Table 4).

Table 4. Pharmacological and Medical importance of the plant taxa in the region.

Botanical name	Medicinal İmpartance	Pharmacological Properties
**Acer negundo* L.	Treatment of eye illness, rheumatism, bruising, hepatic diseases, discomfort and detoxification [35]	Antioxidant, hepatoprotective, anti-inflammatory, anti-tumor, antidiabetic and anti-obesity properties [35].
Asparagus persicus Baker	Treating rheumatic pain and inflammation [36]	Antinociceptive, anti-inflammatory and acute toxicity effects [36]
Anthemis cretica L.	Treatment of gastrointestinal diseases, hemorrhoids, coughs, stomachache and kidney stones [37-41]	Their antioxidant qualities are responsible for numerous biological actions, including antibacterial, anticarcinogenic and antiproliferation effects [41, 42]
Tanacetum coccineum (Willd.) Grierson	Treatment for a variety of conditions, including ringworm, diabetes, migraine, cholecystitis, dyspepsia, nausea, diarrhea, hypertension, bloating and stomach discomfort and sexually transmitted infections [43-47]	Immunomodulatory, cytotoxic, antidiabetic, antibacterial, and antioxidant properties [47-53]
Taraxacum bessarabicum (Hornem.) Hand.-Mazz.	Treatment for hepatitis, anorexia, spleen and liver issues, heartburn, dyspepsia and boost immunity against upper respiratory tract infections, bronchitis or pneumonia [54-56]	Diuretics, choleretics, analgesics, anti-inflammatory, anti-oxidative, anti-carcinogenic, anti-hyperglycemic, anti-coagulatory and prebiotic components [56]
Alkanna orientalis (L.) Boiss.	Utilized to treat a range of infectious illnesses [57-62]	Antimicrobial and antiviral activity [57-61]. Having cytotoxic and antioxidant properties and deactivating the poisons produced by microbes [62-67]
Fumaria asepala Boiss.	Utilized as a raw ingredient to cure skin conditions and is also recognized for its ability to repel insects [68-70]	Antimicrobial, Antioxidant, Antifungal, antibacterial and anti-inflammatory activities [70-73]
Juglans regia L.	Preparations have numerous applications in the treatment of cardiovascular conditions, type II diabetes mellitus, lipid-lowering drugs, anti-inflammatory, anti-microbial, anti-fungal, anti-hypertensive, hepatoprotective, anticoagulation and anticancer [74]	Antihypertensive, anticancer, antibacterial, antipyretic and analgesic/anti-inflammatory activities [74]
Mentha aquatica L.	Natural cure for lung conditions, gastrointestinal issues, and even mental illnesses like depression and epilepsy. And used for diabetes management, prevention of chronic diseases like cardiovascular conditions, neurodegenerative disorders and inflammatory diseases [75]	Antioxidant, antimicrobial, and anti-inflammatory effects [75,76]
M. longifolia (L.) L.	Used for respiratory and digestive benefits [77]. Remedy for menstruation issues, respiratory issues, inflammatory issues, infectious infections and gastrointestinal issues [78]	Keratoprotective, hepatoprotective, anti-inflammatory, anti-parasitic, antimicrobial, anti-insect, antimutagenic, antinociceptive, antioxidant, anti-diarrhea and spasmolytic properties [78]
Micromeria fruticosa (L.) Druce	Used for various inflammatory conditions and in wound healing [79, 80]	Anti-inflammatory, antioxidant, anti-diabetic, cytotoxic and antitumor activity [80-84]
Origanum acutidens (Hand.-Mazz.) Ietsw.	Utilized in traditional medicine to treat conditions like headaches, lightheadedness, coughing, flu, gastrointestinal disorders, bronchitis, high blood sugar, diabetes, stomach discomfort, high blood pressure and toothaches [85, 86]	Antimicrobial, antibacterial, natural antiseptic and antioxidant properties [86-89]
O. rotundifolium Boiss.	Utilized as an antiseptic, stimulant, stomachic, expectorant, sudofiric, and emmenagogic to treat a variety of illnesses [90,91]	Antioxidant and antimicrobial activities [91-96]
Salvia nemorosa L.	Used for the treatment of Alzheimer's disease, diabetes mellitus and oxidative damages [97], [98]	Antioxidant, anti-Alzheimer and anti-inflammatory activity [98], [99]
Satureja hortensis L.	utilized to treat cholesterol, diabetes, heart disease, cancer, infections, and Alzheimer's disease [100]. Treatment of respiratory diseases, such as coughs and asthma [101]	Antioxidant, cytotoxic, anti-inflammatory, antiallergic, antifungal, antiseptic, anti-diabetic, antimicrobial and antibacterial activity [100-109]

Continuation of **Table 4.**

Botanical name	Medicinal İmpartance	Pharmacological Properties
Thymus fallax Fisch. & C.A.Mey.	Utilized for menstrual issues, digestive disorders, and whooping and convulsive coughs [110-116]	Antioxidant, antispasmodic, anti-flatulence, digestion, anti-spasm, anti-inflammatory, antimicrobial, antiseptic, antibacterial, antifungal, antitussive, expectorant and analgesic properties [117-124]
T. sipyleus Boiss.	Used for the treatment of wound healing, cough, bronchitis, pertussis and gastrointestinal disorders [125, 126]	Antioxidant, carminative, expectorant, antitussive antibacterial and anti-inflammatory activities [126-128]
Alcea apterocarpa (Fenzl) Boiss.	Utilized to treat kidney stones, skin disorders, wound, urinary system and pulmonary disorders [129, 130]	Antioxidant activity [130]
Malva sylvestris L.	Utilized in traditional medicine to cure a number of conditions, including constipation, diarrhea, coughs, colds, dysentery, hypertension and skin diseases [131, 132]	Antioxidant, antimicrobial, hepatoprotective, laxative, anti-inflammatory, antinociceptive, anti-carrageenan, antibacterial and antiproliferative properties [132-135]
Ficus carica L.	Utilized to treat a number of illnesses, including skin conditions, ulcers, cancer, anemia, diabetes, leprosy, liver disease, paralysis, digestive, endocrine, reproductive and respiratory systems disorders, gastrointestinal tract and urinary tract infection [136]	Antipyretic, anti-inflammatory, antispasmodic and antiplatelet, antihelmintic, hepatoprotective, anticonstipation effect, hypoglycemic, hypocholesterolemic activity, hypolipidimic activity, anticancer effect, cytotoxic, antiviral, antimutagenic, anti-angiogenic activity, erythropoietic effect, haemostatic effect, antimicrobial activities, antioxidant activity, free radical scavenging activity, ımmunostimulant, antiwarts activity and Irritant potential [136]
**Morus alba* L.	utilized to reduce blood pressure, strengthen joints, prevent liver damage, treat fever and diabetes, enhance vision and ease urine discharge [137-139]	Anxiolytic, anti-inflammatory, anti-hyperlipidemic, anti-platelet, antimicrobial, skin-whitening, cytotoxic, anti-inflammatory, antidepressant, cardioprotective and immunomodulatory properties [139]
**M. nigra* L.	Demonstrated therapeutic and protective effects on the female reproductive system, gastrointestinal tract, liver, kidney and central nervous system (140)	Skin-whitening, antidiabetic, anti-hyperlipidemic, anti-atherosclerotic, anti-obesity, cardioprotective, cognitively enhancing, hepatoprotective, anti-platelet, anxiolytic, anti-asthmatic, anti-inflammatory, anticancer, antimicrobial, antifungal, immunomodulatory, antidepressant and anthelmintic properties (139-142]
Plantago lanceolata L.	Cures a range of conditions affecting the skin, reproductive system, digestive system, circulation, cancer, pain management and infections [143]	Anti-inflammatory, antibacterial, wound-healing, cytotoxic and antiulcerogenic properties [143]
P. major L.	Used for the treatment of colds, wounds, diabetes, Kidney pain, Urinary tract infection, Stomatitis, Asthma, bronchitis, Ear ache, influenza and hepatitis [144-151]	Antiinflammatory, antimicrobial, antioxidant and antitumor properties [151-153]
Rumex crispus L.	Utilized to treat vascular disorders, wounds, internal bleeding and helminths [154, 155]	Anticancer, anthelmintic, analgesic, antibacterial, anti-inflammatory and antiviral properties [155-157]
Crataegus orientalis Pall.ex M.Bieb.	Used to treat heart conditions such as congestive heart failure, angina, hypertension, and arrhythmias [158-160]	Antinociceptive, antiinflammatory and antioxidant activities [160]
Rosa canina L.	Used for the treatment of osteoarthritis, rheumatism and common cold [161]	Anti-bacterial, antioxidant, anti-cancer, anti-diabetic, anti-obesity, antimutagenic and anticarcinogenic activities [161], [162]
R. dumalis Bechst.	Used to treat diarrhea, stomach problems dry cough, abdominal pain, immunity, arthritis, gout, pharyngitis, chills, cardiac insufficiency, blood vessels and urinary issues [163-165]	Antimicrobial, antioxidant and cytotoxic activities [165, 166]
R. spinossisima L.	Used to treat digestive system disorders, the blood, spleen, stomach ailments, abdominal fullness and irregular menstruation [167]	Antioxidant activity [167]
Rubus caesius L.	Used to treat diabetes [168]	Hypoglycemic effect and antidiabetic activity [168]
R. idaeus L.	utilized to stop polyuria, strengthen the kidney, feed the liver and enhance vision [169]	Hypoglycemic and hypolipidemic, anti-Alzheimer, anti-osteoporosis, hepatoprotective, anti-cancer, skin care, neuroprotective and anti-bacteria properties [169]
Urtica dioica L.	used in the treatment of prostatic disease, arthritis, rheumatism, cardiovascular disease and allergic rhinitis [170, 171]	Antiviral, antiproliferative, anti-infectious, hypotensive, antiulcer, anti-inflammatory, antibacterial, analgesic, antioxidant, anti-cancer and anti-Alzheimer properties [170,171]

Humans have relied on nature for their basic necessities throughout history, including the production of food, shelter, clothes, transportation, fertilizers, scents, and, last but not least, medications. The foundation of complex traditional medical systems that have existed for thousands of years and continue to offer humanity new treatments is plants [172]. The global, cross-cultural spread of plant medicine is evidence of its long history. Since its beginnings in prehistory, the use of medicinal plants has progressively expanded throughout the world due to both independent discovery and cultural diffusion. Anthropologists and ethnobotanists from every nation and ethnic group investigated to date have described systematic, organized collections of traditional herbal treatments [173-177]. For this reason, each study supports previous studies and sheds light and opens new horizons for future studies. Possible reasons for overlap or differentiation in plant uses include cultural, climatic or ecological factors. However, this is not an obstacle to the spread of plant use from generation to generation. Due to improved transportation conditions, people are born and raised in different conditions, but continue their lives in different conditions and regions. This provides the opportunity to disseminate ethnobotanical knowledge and to establish links between different geographies and cultures.

4. Conclusion

In addition to offering baseline data for preliminary screening of prospective plants used in respiratory ailments, this work will be useful for phytochemical research using ethnobotanical indices. Given both the positive and negative impacts of these plants, use of herbal therapies could be very important in the healthcare industry. The likelihood of commercializing these plant products is further could be increased by the availability of scientific proof.

Acknowledgement

I am appreciative of the residents of Dereboğazı Village in Erzurum for their involvement in the research and sharing of their knowledge of the customary use of plants. I would also like to express my gratitude to Dr. Salih Terzioglu for his critically reading the manuscript.

References

[1] Aumeeruddy Y. Ethnobotany, linkages with conservation and development. In Proceeding of first training workshop on Ethnobotany and its applications to conservation NARC, Islamabad, 1996; 152-157.
[2] Rahman IU, Afzal A, Iqbal Z, Ijaz F, Ali N, Shah MS, Ullah MS, Bussmann RW. Historical perspectives of ethnobotany. Clin Dermatol 2019; 37(4): 382-388.
[3] Haq I. Safety of medicinal plants. Pak J Med Res 2004; 43(4): 203–210.
[4] Alamgeer Younis W, Asif H, Sharif A, Riaz H, Bukhari IA, Assiri AM. Traditional medicinal plants used for respiratory disorders in Pakistan: a review of the ethno-medicinal and pharmacological evidence. Chin Med J 2018: 13; 1-29.
[5] Hamilton AC. Medicinal plants, conservation and livelihoods. Biodivers Conserv 2004; 13: 1477–1577.
[6] Malik ZA, Bhat JA, Ballabha R, Bussmann RW, Bhatt AB. Ethnomedicinal plants traditionally used in health care practices by inhabitants of Western Himalaya. J Ethnopharmacol 2015; 172: 133-144.
[7] Soriano JB, Kendrick PJ, Paulson KR, Gupta V, Abrams EM, Adedoyin RA, Adhikari TB, Advani SM and et al. Prevalence and attributable health burden of chronic respiratory diseases, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. Lancet Respir Med 2020; 8(6): 585-596.
[8] Rigat M, Garnatje T, Vallès J. Plantes i gent. Estudi etnobotànic de l'Alta Vall del Ter, Centre d'Estudis Comarcals del Ripollès, 2006; Ripoll.
[9] Rigat M, Bonet MÀ, Garcia S, Garnatje T, Vallès J. Studies on pharmaceutical ethnobotany in the high river Ter valley (Pyrenees, Catalonia, Iberian Peninsula). J Ethnopharmacol 2007; 113: 267–277.
[10] Parada M, Bonet MÀ, Carrió E, Vallès J. Ethnobotany of the Alt Empordà region (Catalonia, Iberian Peninsula) Plants used in human traditional medicine. J Ethnopharmacol 2009; 124: 609–618.
[11] Rigat M, Vallès J, Iglésias J, Garnatje T. Traditional and alternative natural therapeutic products used in the treatment of respiratory tract infectious diseases in the eastern Catalan Pyrenees (Iberian Peninsula). J Ethnopharmacol 2013; 148(2): 411-422.
[12] Reddy J, Rahul A, Gowda C, Suresh R. Medicinal plants used in the treatment of respiratory disorders-A review. J Technol 2024; 12(5): 1206-1216.
[13] Irmak MA, Bilge C. Soğuk İklim Kenti Erzurum'da Arboretum Oluşturulması Üzerine Örnek Bir Uygulama. Turk Tarim Doga Bilim Derg 2023; 10(3): 571-582.

[14] Yenice Z, Ercoşkun ÖY. Türkiye'de kış turizmi merkezlerinin iklim değişikliğine dirençliliğinin değerlendirilmesi, Bolu Köroğlu Dağı ve Erzurum Palandöken örnekleri. Resil 2019; 3(2): 269-285.
[15] https://tr.wikipedia.org/wiki/Palandöken;https://tr.wikipedia.org/wiki/Dereboğazı,_Palandöken, Access Date: 23.09.2024.
[16] https://www.haritamap.com/yer/derebogaz-koyu-palandoken, Access Date: 25.09.2024.
[17] https://tr.m.wikipedia.org/wiki/Dosya:Erzurum_in_Turkey.svg, Access Date: 25.09.2024.
[18] Davis PH. (ed) Flora of Turkey and the East Aegean Islands. Edinburgh: Edinburgh University Press, 1965–1985; Vols. 1–9.
[19] Trotter RT, Logan MH. Informant census: a new approach for identifying potentially effective medicinal plants. In: Etkin, L.N. (Ed.), Plants in indigenous medicine and diet. Routledge, Bedford Hill, NY, 1986; 91–112.
[20] Heinrich M, Ankli A, Frei B, Weimann C, Sticher O. Medicinal plants in Mexico: healers'consensus and cultural importance. Soc Sci Med 1998; 47: 1859–1871.
[21] Giday M, Asfaw Z, Woldu Z. Medicinal plants of the Meinit ethnic group of Ethiopia: an ethnobotanical study. J Ethnopharmacol 2009; 124(3): 513-521.
[22] Ergül Bozkurt A. Therapeutic uses of the medicinal plants growing in the villages of Yakutiye district, Erzurum, Türkiye. J Herb Med 2024; 44: 100853.
[23] Karakaya S, Polat A, Aksakal Ö, Sümbüllü YZ, İncekara Ü. Ethnobotanical study of medicinal plants in Aziziye district (Erzurum, Turkey). Turk J Pharm Sci 2020; 17(2): 211.
[24] Karakaya S, Polat A, Aksakal Ö, Sümbüllü YZ, İncekara Ü. Plants used in traditional medicine and other uses in South of Erzurum (Turkey): An ethnobotanical study. Ethnobot Res Appl 2019; 18: 1-18.
[25] Özgen U, Kaya Y, Houghton P. Folk medicines in the villages of Ilıca District (Erzurum, Turkey). Turk J Biol 2012; 36 (1): 93-106.
[26] Kayani S, Ahmad M, Zafar M, Sultana S, Khan MPZ, Ashraf MA... and Yaseen G. Ethnobotanical uses of medicinal plants for respiratory disorders among the inhabitants of Gallies–Abbottabad, Northern Pakistan. J Ethnopharmacol 2014; 156: 47-60.
[27] Dailah HG. The ethnomedicinal evidences pertaining to traditional medicinal herbs used in the treatment of respiratory illnesses and disorders in Saudi Arabia: A review. Saudi J Biol Sci 2022; 29(9): 103386.
[28] Bussmann R, Glenn A. Medicinal plants used in Peru for the treatment of respiratory disorders. Rev Peru Biol 2010; 17(3): 331-346.
[29] Suroowan S, Mahomoodally MF. A comparative ethnopharmacological analysis of traditional medicine used against respiratory tract diseases in Mauritius. J Ethnopharmacol 2016; 177: 61-80.
[30] Haile AA, Tsegay BA, Seid A, Adnew W, Moges A. A Review on Medicinal Plants Used in the Management of Respiratory Problems in Ethiopia over a Twenty-Year Period (2000–2021). J Evid Based Complementary Altern Med 2022; 2022(1): 2935015.
[31] Chaachouay N, Benkhnigue O, Fadli M, El Ibaoui H, El Ayadi R, Zidane L. Ethnobotanical and ethnopharmacological study of medicinal and aromatic plants used in the treatment of respiratory system disorders in the Moroccan Rif. Ethnobot Res Appl 2019; 18: 1-16.
[32] Fatiha BA, Ouafae B, Souad S, Fatima EH, Jamila D, Allal D, Lahcen Z. Ethnobotany study of medicinal plants used in the treatment of respiratory diseases in the middle region of Oum Rbai. Int J Environ Agric Biotechnol 2017; 2(4): 238815.
[33] Kala CP. Medicinal plants used for the treatment of respiratory diseases in Uttarakhand state of India. Stud Ethno-Med 2020; 14(1-2): 1-8.
[34] Sbai-Jouilil H, Fadli A, Hafian ME, Ayad RE, Benharbit O, Zidane L. Floristic and ethnobotanical study of medicinal plants used in the treatment of respiratory diseases in Seksaoua region (western high Moroccan atlas). Annu Res Rev Biol 2017; 17(6): 1-10.
[35] Bi W, Gao Y, Shen J, He C, Liu H, Peng Y, Zhang C, Xiao P. Traditional uses, phytochemistry, and pharmacology of the genus Acer (maple): A review. J Ethnopharmacol 2016; 189: 31-60.
[36] Fallahzadeh AR, Mohammadi S. Antinociceptive and anti-inflammatory, and acute toxicity effects of *Asparagus persicus* essential oil in male mice. Koomesh 2021; 23(4): 474-481.
[37] Baytop T. Türkiye'de Bitkiler ile Tedavi, Geçmişte ve Bugün (Therapy with Medicinal Plants in Turkey, Past and Present). 2nd Ed., Nobel Tıp Kitabevleri, 1999; Istanbul.
[38] Kultur S. Medicinal plants used in Kırklareli Province (Turkey). J Ethnopharmacol 2007; 111: 341–364.
[39] Ugurlu E, Secmen O. Medicinal plants popularly used in the villages of Yunt Mountain (Manisa-Turkey). Fitoterapia 2008; 79: 126–131.
[40] Gonenc T, Argyropoulou C, Erdogan T, Gousıadou C, Juergenlıemk G, Kıvçak B, Skaltsa H. Chemical constituents from *Anthemis wiedemanniana* Fisch. & Mey. Biochem Syst Ecol 2011; 39: 51–55.

[41] Albayrak S, Aksoy A. Evaluation of antioxidant and antimicrobial activities of two endemic Anthemis species in Turkey. J Food Biochem 2013; 37(6): 639-645.
[42] Thıtılertdecha N, Teerawutgulrag A, Rakarıyatham N. Antioxidant and antibacterial activities of *Nephelium lappaceum* L. extracts. LWT. Food Sci Technol 2008; 41: 2029–2035.
[43] Molares S, Ladio A. Chemosensory perception and medicinal plants for digestive ailments in a Mapuche community in NW Patagonia, Argentina. J Ethnopharmacol 2009; 123: 397–406.
[44] Bouhlal T, Loukili K, Zidane L, Fadli M. Plants used in traditional medicines by the human population of the Gharb plain (Morocco). J Med Plants Stud 2017; 5: 170–174.
[45] Khatib C, Nattouf A, Agha MIH. Ethnobotanical survey of medicinal herbs in the Western region in Syria (Latakia and Tartus), in Review. Res Sq 2021; 1-75.
[46] Ullah M, Mehmood S, Ali M, Bussmann RW, Aldosari A, Khan RA. et al. An ethnopharmacological study of plants used for treatment of diabetes in the Southern and Tribal regions of Khyber Pakhtunkhwa province, Pakistan. Ethnobot Res Appl 2019; 18: 1–20.
[47] Khatib S, Sobeh M, Faraloni C, Bouissane L. Tanacetum species: Bridging empirical knowledge, phytochemistry, nutritional value, health benefits and clinical evidence. Front pharmacol 2023; 14: 01-46.
[48] Khan MF, Rawat AK, Khatoon S, Hussain MK, Mishra A, Negi DS. In vitro and in vivo antidiabetic effect of extracts of *Melia azedarach*, *Zanthoxylum alatum*, and *Tanacetum nubigenum*. Integr Med Res 2018; 7: 176–183.
[49] Kameri A, Koçani F, Hashani Z, Kurteshi K, Kamberi B, Kurti A. et al. Antifungal and synergistic effects of the ethyl acetate extract of *Tanacetum vulgare* (L.) against Candida albicans, Med. Sci. Monit. Basic Res., 2019; 25: pp. 179–186.
[50] Coté H, Boucher, MA, Pichette A, Legault J. Anti-inflammatory, antioxidant, Antibiotic, and cytotoxic activities of *Tanacetum vulgare* L. Essential oil and its constituents. J Med 2017; 4: 34.
[51] Godinho LS, Aleixo de Carvalho LS, Barbosa de Castro CC, Dias MM, Pinto P de F, Crotti AEM. et al. Anthelmintic activity of crude extract and essential oil of *Tanacetum vulgare* (Asteraceae) against adult worms of *Schistosoma mansoni*. Sci World J 2014; e460342.
[52] Bączek KB, Kosakowska O, Przybył JL, Pióro-Jabrucka E, Costa R, Mondello L. et al. Antibacterial and antioxidant activity of essential oils and extracts from costmary (*Tanacetum balsamita* L.) and tansy (*Tanacetum vulgare* L.). Ind Crops Prod 2017; 102: 154–163.
[53] Jannesar M, Majd A, Sharif Shoushtari M, Oraei M. Effect of Total flavonoid extract of *Tanacetum parthenium* L. (Feverfew) pollen grains on immune system responses in Balb/C mice. Int J Biosci IJB 2014; 5: 72–78.
[54] Leu YL, Wang YL, Huang SC, Shi LS. Chemical constituents from roots of *Taraxacum formosanum*. Chem Pharm Bull 2005; 53: 853–855.
[55] Sweeney B, Vora M, Ulbricht C, Basch E. Evidence-basedsystematic review of dandelion (*Taraxacum officinale*) by natural standard research collaboration. J Herb Pharmacother 2005; 5: 79–93.
[56] Schütz K, Carle R, Schieber A. Taraxacum—a review on its phytochemical and pharmacological profile. J Ethnopharmacol 2006; 107(3): 313-323.
[57] Schempp C, Pelz K, Wittmer A. Antibacterial activity of hyperforin from St. John's wort, against multiresistant *Staphylococcus aureus* and Gram-positive bacteria. Lancet, 1999; 353: 2129.
[58] Darbinian-Sarkissian N, Darbinyan A, Otte J, Radhakrishnan S, Sawaya BE, Arzumanyan A, Chipitsyna G, Popov Y, Rappaport J, Amini S, Khalili K. A novel protein in St John's Wort, that suppresses expression of HIV-1 genome. Gene Ther 2006; 13(4): 288–295.
[59] Dadi P, Ahmad M, Ahmad Z. Inhibition of ATPase activity of Escherichia coli ATP synthase by polyphenols. Int J Biol Macromol 2009; 45(1): 72–79.
[60] Zare K, Nazemiyeh H, Movafeghi A, Khosrowshahli M, MotallebiAzar A, Dadpour M, Omidi Y. Bioprocess engineering of *Echium italicum* L.: induction of shikonin and alkannin derivatives by two-liquid-phase suspension cultures. J Plant Biotechnol 2010; 100(2): 157–164.
[61] Abdallah EM. Plants: an alternative source for antimicrobials. J Appl Pharm Sci 2011; 1(1): 16–20.
[62] Petrosyan M, Shcherbakova Y, Sahakyan N, Vardanyan Z, Poladyan A, Popov Y, Trchounian A. *Alkanna orientalis* (L.) Boiss. plant isolated cultures and antimicrobial activity of their extracts: phenomenon, dependence on different factors and effects on some membrane-associated properties of bacteria. Plant Cell Tiss Org Cult 2015; 122: 727-738.
[63] Baronetz NG, Adlova GP, Melnikova VA. Influence of extracts of medicinal plants on the growth of microorganisms. J Microbiol Epidemiol Immunol 2001; 5: 71–72 (in Russian).
[64] Oktyabrsky O, Vysochina G, Muzyka N, Samoilova Z, Kukushkina T, Smirnova G. Assessment of anti-oxidant activity of plant extracts using microbial test systems. J Appl Microbiol 1 2009; 06(4): 1175–1183.
[65] Gharehmatrossian S, Popov Y, Ghorbanli M, Safaeian SH. Antioxidant activities and cytotoxic effects of whole plant and isolated culture of *Artemisia aucheri* Boiss. Asian J Pharmaceut Clin Res 2012; 5(4): 95–98.

[66] Sykłowska-Baranek K, Pietrosiuk A, Gawron A, Kawiak A, Łojkowska E, Jeziorek M, Chinou I. Enhanced production of antitumour naphthoquinones in transgenic hairy root lines of *Lithospermum canescens*. J Plant Biotechnol 2012; 108(2): 213–219

[67] Bame JR, Graf TN, Junio HA, Bussey RO 3rd, Jarmusch SA, ElElimat T, Falkinham JO 3rd, Oberlies NH, Cech RA, Cech NB. Sarothrin from *Alkanna orientalis* is an antimicrobial agent and efflux pump inhibitör. Planta Med 2013; 79(5): 327–329.

[68] Knowles CO. 22.4.2 Benzyl Benzoate. In Hayes, Wayland J.; Laws, Edward R. (eds.). Handbook of Pesticide Toxicology, Classes of Pesticides. Academic Press 1991; 3: 1505–1508.

[69] Stuart MC, Kouimtzi M, Hill SR (eds.). World Health Organization, WHO Model Formulary, 2009; 311.

[70] Sancar PY. Analysis of the Essential Oil Composition, Antimicrobial Activity and Antioxidant Capacity of *Fumaria asepala* Boiss. and *Fumaria schleicheri* Soy. Will. subsp. microcarpa Hausskn. from Turkey. Int J Pure Appl Sci, 2023; 9(1): 29-37.

[71] Moghtader M. In vitro antifungal effects of *Fumaria vaillantii* Loisel. essential oil on *Aspergillus flavus*. J Yeast Fungal Res 2013; 4: 2125.

[72] Khamtache-Abderrahim S, Lequart-Pillon M, Gontier E, Gaillard I, Pilard S, Mathiron D, MaizaBenabdesselam F. Isoquinoline alkaloid fractions of *Fumaria officinalis*: Characterization and evaluation of their antioxidant and antibacterial activities. Ind Crops Prod 2016; 94: 10011008.

[73] Bribi N, Algieri F, Rodriguez-Nogales A, Vezza T, Garrido-Mesa J, Utrilla MU, Contreras M, Maiza F, Segura-Carretero A, Rodriguez-Cabezas ME, Galvez J. Intestinal antiinflammatory effects of total alkaloid extract from *Fumaria capreolata* in the DNBS model of mice colitis and intestinal epithelial CMT93 cells. Phytomed 2016; 23: pp. 901–913.

[74] Bhardwaj A, Singh A, Patnaik RS, Bhardwaj S. *Juglans regia* L: A review of its traditional uses phytochemistry and therapeutic applications. J Pharm Negat Results 2023; 14(1): 11-16.

[75] Lahlou RA, Gonçalves AC, Bounechada M, Nunes AR, Soeiro P, Alves G, et al. Antioxidant, Phytochemical, and Pharmacological Properties of Algerian *Mentha aquatica* Extracts. Antioxidants 2024; 13(12): 1512.

[76] Tafrihi M, Imran M, Tufail T, Gondal TA, Caruso G, Sharma S, Sharma R, Atanassova M, Atanassov L, Fokou PVT, et al. The Wonderful Activities of the Genus Mentha: Not Only Antioxidant Properties. Molecules 2021; 26: 1118.

[77] Kecis H, Abdelouahab Y, Bagues M, Gali L, Mekircha F, Alloun W, Nagaz K. Phenolic Profile and Bioactivity of the Aerial Part and Roots of *Mentha rotundifolia* L. Grown in Two Different Localities in Northeastern Algeria: A Comparative Study. Biocatal Agric Biotechnol 2023; 47: 102581.

[78] Farzaei MH, Bahramsoltani R, Ghobadi A, Farzaei F, Najafi F. Pharmacological activity of *Mentha longifolia* and its phytoconstituents. J Tradit Chin Med 2017; 37(5): 710-720.

[79] Abu-Gharbieh E, Shehab NG, Khan SA. Antiinflammatory and gastroprotective activities of the aqueous extract of *Micromeria fruticosa* (L.) Druce ssp Serpyllifolia in mice. Pak J Pharm Sci 2013; 26: 799- 803.

[80] Abu-Gharbieh E, Ahmed NG. Bioactive content, hepatoprotective and antioxidant activities of whole plant extract of *Micromeria fruticosa* (L) Druce ssp Serpyllifolia F Lamiaceae against Carbon tetrachloride-induced hepatotoxicity in mice. Trop J Pharm Res 2016; 15(10): 2099-2106.

[81] Lee S, Son K, Chang H, Do J, Jung K, Kang S, Kim H. Antiinflammatory activity of naturally occurring flavone and flavonol glycosides. Arch Pharm Res 1993; 16: 25- 28.

[82] Vessal M, Hemmati M, Vasei M. Antidiabetic effects of quercetin in streptozocin-induced diabetic rats. Comp Biochem Physiol C Toxicol Pharmacol 2003; 135C: 357- 364.

[83] Vivian Cody, Elliott Middleton, Jeffrey B Harborne. Plant flavonoids in biology and medicine. Biochemical, pharmacological, and structure-activity relationships, Proceedings of a symposium. Buffalo, New York, July 22-26, 1985.

[84] Shaikh R, Pund M, Dawane A, Iliyas S. Evaluation of Anticancer, Antioxidant, and Possible Anti-inflammatory Properties of Selected Medicinal Plants Used in Indian Traditional Medication. J Tradit Complement Med 2014; 4: 253-257.

[85] Fidan M, Teğin İ, Erez ME, Pınar SM, Eroğlu H. Etnobotanik amaçlı kullanılan *Origanum acutidens* bitkisinin toplam fenolik-flovonoid içeriği, fenolik bileşikleri ve element analizi. Acad Plat- J Eng Sci 2020; 8(1): 4955.

[86] Çoban F, Özer H, Cakmakcı R. Altitude-Dependent Variation in Chemical Composition of Essential Oil of *Origanum acutidens* (Hand-Mazz.) Ietswaart. J Agric Prod 2024; 5(4): 265-271.

[87] Burt S. Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods—a review. Int J Food Microbiol 2004; 94(3): 223-253.

[88] Cosge B, Turker A, Ipek A, Gurbuz B. Chemical compositions and antibacterial activities of the essential oils from aerial parts and corollas of *Origanum acutidens* (Hand.-Mazz.) Ietswaart, an endemic species to Turkey. Molecules 2009; 14(5): 1702-1712.

[89] Köse, YB, Saltan N, Kürkçüoğlu M. SPME/GCMS analysis of volatile organic compounds from *Origanum acutidens* (Hand.-Mazz.) Ietsw.—An endemic species in Turkey. Nat Vol Essent Oil 2021; 8(2): 18-26.

[90] Ryman D. Aromatherapy, The encyclopaedia of plants and oils and how they help you. PIATKUS, UK, 1992; 163-165.
[91] Goze I, Alim A, Tepe AS, Sokmen M, Sevgi K, Tepe B. Screening of the antioxidant activity of essential oil and various extracts of *Origanum rotundifolium* Boiss. from Turkey. J Med Plants Res 2009; 3(4): 246-254.
[92] Ruberto G, Barata MT, Sari M, Kaabexhe M. Chemical composition and antioxidant activity of essential oils from Algerian *Origanum glandulosum* Desf. Flavour Frag J 2002; 17: 251-254.
[93] Puertas-Mejia M, Hillebrand S, Stashenko E, Winterhalter P. In vitro radical scavenging activity of essential oils of Columbian plants and fractions from oregano (*Origanum vulgare* L) essential oil. Flavour Frag J 2002; 17: 380-384.
[94] Tabanca N, Demirci F, Ozek T, Tumen G, Baser KHC. Composition and antimicrobial activity of the essential oil of *Origanum x dolichosiphon* P. H. Davis. Chem Nat Prod 2001; 37: 238-241.
[95] Sokovic M, Tzakou O, Pitarokili D, Couladis M. Antifungal activities of selected aromatic plants growing wild in Greece. Nahrung, 2002; 46: 317-320.
[96] Daferera DJ, Basil N, Ziogas N, Polissiou MG. The effectiveness of plant essential oils on *Botrytis cinerea*, Fusarium sp. and *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*. Crop Prot 2003; 22: 3944.
[97] Zengin G, Sarikurkcu C, Aktumsek A, Ceylan R. Sideritis galatica Bornm.: A source of multifunctional agents for the management of oxidative damage, Alzheimer's's and diabetes mellitus. J Funct Foods 2014; 11: 538-547.
[98] Bahadori MB, Asghari B, Dinparast L, Zengin G, Sarikurkcu C, Abbas-Mohammadi M, Bahadori S. *Salvia nemorosa* L.: A novel source of bioactive agents with functional connections. LWT 2017; 75: 42-50.
[99] Topcu G. Bioactive triterpenoids from Salvia species. J Nat Prod 2006; 69(3): 482-487.
[100] Ejaz A, Waliat S, Arshad MS, Khalid W, Khalid MZ, Rasul Suleria HA, Luca MI, Mironeasa AB and et al. A comprehensive review of summer savory (*Satureja hortensis* L.): Promising ingredient for production of functional foods. Front pharmacol 2023; 14: 1198970.
[101] Vagionas K, Graikou K, Ngassapa O, Runyoro D, Chinou I. Composition and antimicrobial activity of the essential oils of three Satureja species growing in Tanzania. Food Chem 2007; 103: 319–324.
[102] Gelovani N, Tsintsadze T, Tzikarishvili Kh, Targamadze LL. Savory (*Saturea hortensis* L.) in the Georgian historical chronicles Trans. Georgian Tech Univ 2012; 483: 59–63.
[103] Rodov V, Vinokur Y, Gogia N, Chkhikvishvili I. Hydrophilic and lipophilic antioxidant capacities of Georgian spices for meat and their possible health implications. Georgian Med News 2010; 179: 61–66.
[104] Hajhashemi V, Ghannadi A, Pezeshkian SK. Antinociceptive and anti-inflammatory effects of *Satureja hortensis* L. extracts and essential oil. J Ethnopharmacol 2002; 82: 83–87.
[105] Uslu C, Karasen RM, Sahin F, Taysi S, Akcay F. Effects of aqueous extracts of *Satureja hortensis* L. on rhinosinusitis treatment in rabbit. J Ethnopharmacol 2003; 88: 225–228.
[106] Osakabe N, Takano H, Sanbongi C, Yasuda A, Yanagisawa R, Inoue K, Yoshikawa T. Anti-inflammatory and anti-allergic effect of rosmarinic acid (RA); inhibition of seasonal allergic rhinoconjunctivitis (SAR) and its mechanism. Biofactors 2004; 21: 127–131.
[107] Boyraz N, Özcan M. Inhibition of phytopathogenic fungi by essential oil, hydrosol, ground material and extract of summer savory (*Satureja hortensis* L.) growing wild in Turkey. Int J food Microbiol 2006; 107: 238–242.
[108] Omidbeygi M, Barzegar M, Hamidi Z, Naghdibadi H. Antifungal activity of thyme, summer savory and clove essential oils against *Aspergillus flavus* in liquid medium and tomato paste. Food control 2007; 18: 1518–1523.
[109] Ahmadvand H, Tavafi M, Khalatbary AR. Hepatoprotective and hypolipidemic effects of *Satureja khuzestanica* essential oil in alloxan-induced type 1 diabetic rats. Iran J Pharm Res 2012; 11: 1219–1226.
[110] Önen H, Özer Z, Telci I. Bioherbicidal effects of some plant essential oils on different weed species. J Plant Dis Prot 2002; 18: 597-606.
[111] Demirci B, Tabanca N, Baser KHC. Enantiomeric distribution of some monoterpenes in the essential oils of some Salvia species. Flavour Fragr J 2002; 17(1): 54-58.
[112] Haznedaroglu MZ, Oztürk T, Konyalioglu S. *Salvia smyrnaea* Boiss. uçucu yag inin antioksidan ve antimikrobiyal aktivitesi, 14. Bitkisel İlaç Hammaddeleri Toplantisi, Bildiriler, 29-31 May 2002, Eskisehir, Turkey.
[113] Longaray Delamare AP, Moschen-Pistorello IT. Artico L. Atti-Serafini and S. Echeverrigaray. Food Chem 2007; 100: 603.
[114] Dulger B, Hacioglu N. Antifungal activity of endemic *Salvia tigrina* in Turkey. Trop J Pharm Res 2008; 7(3):1051-1054.
[115] Kordali S, Cakir A, Ozer H, Cakmakci R, Kesdek M, Mete E. Antifungal, phytotoxic and insecticidal properties of essential oil isolated from Turkish *Origanum acutidens* and its three components, carvacrol, thymol and p-cymene. Bioresour Technol 2008; 99(18): 8788-8795.
[116] Kotan R, Kordali S, Cakir A, Kesdek M, Kaya Y, Kilic H. Antimicrobial and insecticidal activities of essential oil isolated from Turkish *Salvia hydrangea* DC. ex Benth. Biochem Syst Ecol 2008; 36(5-6): 360-368.

[117] Goze I, Alim A, Cetinus SA, Durmus N, Vural N, Goze HM. Chemical composition and antioxidant, antimicrobial, antispasmodic activities of the essential oil of *Thymus fallax* Fisch, Mey. J Med Plants Res 2009; 3(3): 174-178.
[118] Jamzad Z. Thymus and Satureja species of Iran. Research Institute of Forests and rangelands; 2009; 171.
[119] Rezapour Renia K, Naghdi Badi H, Amini Dehaghi M, Kordenaeej A. Evaluation of essential oil diversity of different populations of *Thymus fallax* Fisch. & CA Mey. collected from some of its habitats in Iran. J Med Plants 2023; 22(85): 59-75.
[120] Cosentino SCIG, Tuberoso CIG, Pisano B, Satta ML, Mascia V, Arzedi E, Palmas F. In-vitro antimicrobial activity and chemical composition of Sardinian Thymus essential oils. Lett Appl Microbiol 1999; 29(2): 130-135.
[121] Hedhili L, Romdhane M, Abderrabba A, Planche H, Cherif I. Variability in essential oil composition of Tunisian *Thymus capitatus* (L.) Hoffmanns. et Link. Flavour Fragr J 2002; 17(1): 26-28.
[122] Kabouche A, Kabouche Z, Bruneau C. Analysis of the essential oil of *Thymus numidicus* (Poiret) from Algeria. Flavour Fragr J 2005; 20(2): 235-236.
[123] Rasooli I, Rezaei MB, Allameh A. Growth inhibition and morphological alterations of *Aspergillus niger* by essential oils from *Thymus eriocalyx* and *Thymus x-porlock*. Food Cont 2006; 17(5): 359-364.
[124] Bozhüyük AU, Kordalı Ş. Chemical Composition, Antioxidant, Antifungal and Herbicidal Activities of Essential Oils from Three Thymus Species. BSJ Agri 2022; 5(4): 424-433.
[125] Özgen U, Mavi A, Terzi Z, Kazaz C, Asçı A, Kaya Y, Seçen H. Relationship between chemical structure and antioxidant activity of luteolin and its glycosides isolated from *Thymus sipyleus* subsp. *sipyleus* var. *sipyleus*. Rec Nat Prod 2011; 5: 12–21.
[126] Ustuner O, Anlas C, Bakirel T, Ustun-Alkan F, Diren Sigirci B, Ak S, Akpulat HA, Donmez C and et al. In vitro evaluation of antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial and wound healing potential of *Thymus sipyleus* Boiss. subsp. *rosulans* (borbas), jalas. Molecules 2019; 24(18): 3353.
[127] Özcan S, Toprak G, Torun C, Vural C. *Thymus sipyleus* Boiss subsp. *rosulans* (Borbas) J. Jalas'ın organik ekstrakt ve uçucu yağlarının antimikrobiyal aktivitesi. Bibad 2008; 1: 17–22.
[128] Gökbulut A. Validated RP-HPLC Method for Quantification of Phenolic Compounds in Methanol Extracts of Aerial Parts and Roots of *Thymus sipyleus* and Evaluation of Antioxidant Potential. Trop J Pharm Res 2015; 14: 1871.
[129] Öztürk M, Altundağ E, Gücel S. Medicinal and aromatic plants (Turkey). In, Ethnopharmacology section, Biological, Physiological and Health Sciences, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, EOLSS Publishers, Oxford, UK, 2011.
[130] Anlas C, Ustuner O, Alkan FU, Bakirel T, Aydogan MN, Erel SB. Comparative study on the antioxidant activities and phenolic contents of different extracts of *Achillea nobilis* subsp. *sipylea* and *Alcea apterocarpa* (Fenzl) Boiss, endemic plants in Turkey. Fresenius Environ Bull 2017; 26(2): 1423-1430.
[131] Razavi SM, Zarrini G, Molavi G et al. Bioactivity of *Malva sylvestris* L., a medicinal plant from Iran. Iran J Basic Med Sci 2011; 14: 574–579
[132] Batiha, GES, Tene ST, Teibo JO, Shaheen HM, Oluwatoba OS, Teibo TKA, et al. The phytochemical profiling, pharmacological activities, and safety of *Malva sylvestris*: a review. Naunyn Schmiedebergs Arch Pharmacol 2023; 396(3): 421-440.
[133] Billeter M, Meier B, Sticher O. 8-Hydroxyflavonoid glucuronides from *Malva sylvestris*. Phytochem 1991; 30: 987–990.
[134] Pirbalouti AG, Azizi S, Koohpayeh A, et al. Wound healing activity of *Malva sylvestris* and *Punica granatum* in alloxan-induced diabetic rats. Acta Pol Pharm 2010; 67: 511–516.
[135] Gasparetto JC, Martins CA, Hayashi SS, et al. Ethnobotanical and scientific aspects of *Malva sylvestris* L.: a millennial herbal medicine. J Pharm Pharmacol 2012; 64: 172–189.
[136] Badgujar SB, Patel VV, Bandivdekar AH, Mahajan RT. Traditional uses, phytochemistry and pharmacology of *Ficus carica*: A review. Pharm Biol 2014; 52(11): 1487-1503.
[137] Bae SH, Suh HJ. Antioxidant activities of five different mulberry cultivars in Korea. LWT Food Sci Technol 2007; 40(6): 955-962.
[138] Machii H, Koyama A, Yamanouchi H. Mulberry for Animal Production. Mulberry breeding, cultivation and utilization in Japan. FAO Anim Prod Health Paper, 2002.
[139] Chan EWC, Phui-Yan LYE, Siu-Kuin WONG. Phytochemistry, pharmacology, and clinical trials of *Morus alba*. Chin J Nat Med 2016; 14(1): 17-30.
[140] Lim SH, Choi CI. Pharmacological properties of *Morus nigra* L.(black mulberry) as a promising nutraceutical resource. Nutrients 2019; 11(2): 437.
[141] Yang Y, Tan YX, Chen RY, Kang J. The latest review on the polyphenols and their bioactivities of Chinese Morus plants. J Asian Nat Prod Res 2014; 16: 690–702.
[142] Gryn-Rynko A, Bazylak G, Olszewska-Slonina D. New potential phytotherapeutics obtained from white mulberry (*Morus alba* L.) leaves. Biomed Pharmacother 2016; 84: 628–636.

[143] Abate L, Bachheti RK, Tadesse MG, Bachheti A. Ethnobotanical uses, chemical constituents, and application of *Plantago lanceolata* L. J Chem 2022; 2022(1): 1532031.
[144] Chiang LC, Chiang W, Chang MY, Ng LT, Lin CC. Antiviral activity of *Plantago major* extracts and related compounds in vitro. Antiviral Res 2002; 55: 53-62.
[145] Watkins F,Pendry B,Corcoran O, Sanchez-Medina A. Drug Discovery Today. 2011; Volume16: Numbers 23/24.
[146] Jarald E, Joshi SB, Jain DC. Diabetes and Herbal Medicines. Iran J Pharm Ther 2008; 7: 97-106.
[147] Idolo M, Motti R, Mazzoleni S. Ethnobotanical and phytomedicinal knowledge in a long-history protected area the Abruzzo, Lazio and Molise National Park (Italian Apennines). J Ethnopharmacol 2010; 127: 379-395.
[148] Boulogne I, Germosén-Robineau L, Ozier-Lafontaine H, Fleury M, Loranger- Merciris G. TRAMIL ethnopharmalogical survey in Les Saintes (Guadeloupe, French West Indies): A comparative study. J Ethnopharmacol 2011; 133(3): 1039-1050.
[149] Mir-heidari H. Herbal encyclopedia. Office of Islamic publication Iran 1994; 1(6): 336-339.
[150] Zagari A. Medicinal Plants. Iran Book Tehran Univ Public 1992; 1819/4: 969.
[151] Nazarizadeh A, Mikaili P, Moloudizargari M, Aghajanshakeri S, Javaherypour S. Therapeutic uses and pharmacological properties of *Plantago major* L. and its active constituents. J Basic Appl Sci Res 2013; 3(9): 212-221.
[152] Valentão P, Fernandes E, Carvalho F, Andrade PB, Seabra RM, Bastos ML. Antioxidant activity of *Centaurium erythraea* in fusion evidenced by its superoxide radical scavenging and xanthine oxidase inhibitory activity. J Agric Food Chem 2001; 49(7): 3476–3479.
[153] Pierre G, McKinnon Carole M. Effect of wheat variety, farming site, and bread-baking on total phenolics. Int J Food Sci Technol 2006; 41 (3): 329.
[154] Wintola OA, Afolayan AJ. An inventory of indigenous plants used as anthelmintics in Amathole District Municipality of the Eastern Cape Province, South Africa. Afr J Tradit Complement Alt Med, 2015; 12(4): 112-21.
[155] Idris OA, Wintola OA, Afolayan AJ. Phytochemical and antioxidant activities of *Rumex crispus* L. in treatment of gastrointestinal helminths in Eastern Cape Province, South Africa. Asian Pac J Trop Biomed 2017; 7(12): 1071-1078.
[156] Cai Y, Luo Q, Sun M, Corke H. Antioxidant activity and phenolic compounds of 112 traditional Chinese medicinal plants associated with anticancer. Life Sci 2004; 74(17): 2157-84.
[157] Miliauskas G, Venskutonis PR, Van Beek TA. Screening of radical scavenging activity of some medicinal and aromatic plant extracts. Food Chem 2004; 85(2): 231-237.
[158] Edwards JE, Brown PN, Talent N, Dickinson TA, Shipley PR. A review of the chemistry of the genus Crataegus. Phytochem 2012; 79: 5-26.
[159] Chang Q, Zuo Z, Harrison F, Chow MS. Hawthorn. J Clin Pharmacol 2002; 42: 605–612.
[160] Šavikin KP, Krstić-Milošević DB, Menković NR, Beara IN, Mrkonjić ZO, Pljevljakušić DS. *Crataegus orientalis* leaves and berries: Phenolic profiles, antioxidant and anti-inflammatory activity. Nat Prod Commun 2017; 12(2): 159-162.
[161] Selahvarzian A, Alizadeh A, Baharvand PA, Eldahshan OA, Rasoulian B. Medicinal properties of *Rosa canina* L. Herb Med J 2018; 77-84.
[162] Nojavan S, Khalilian F, Kiaie FM, Rahimi A, Arabanian A, Chalavi S. Extraction and quantitative determination of ascorbic acid during different maturity stages of *Rosa canina* L. fruit. J Food Compos Anal 2008; 21(4): 300-305.
[163] Matejić JS, Stefanović N, Ivković M, Živanović N, Marin PD, Džamić AM. Traditional uses of autochthonous medicinal and ritual plants and other remedies for health in Eastern and South-Eastern Serbia. J Ethnopharmacol 2020; 261: 113186.
[164] Janaćković P, Gavrilović M, Savić J, Marin PD, Stevanović ZD. Traditional knowledge on plant use from Negotin Krajina (Eastern Serbia): An ethnobotanical study. Indian J Tradit Know 2019; 18(1): 25–33.
[165] Matejić JS, Jovanović MS, Žarković LD, Stojanović-Radić ZZ, Gašić UM, Stanojković T, Đuri´c A, Džamić, AM. Ethnopharmacological survey of Rosa L. species from the Vlasina plateau (southeastern Serbia): Comparative phytochemical and pharmacological screening of *R. canina, R. corymbifera*, and *R. dumalis.* Food Biosci 2024; 62: 105158.
[166] Mosmann T. Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: Application to proliferation and cytotoxicity assays. J Immunol Methods 1983; 65: 55–63.
[167] Boyd PD. Past, Present and potential Value of *Rosa spinosissima* in the Rose Industry. In Proceedings of the 14th WFRS Regional Convention, International Heritage Rose Conference, Copenhagen, 2016, May, Denmark, 18-23.
[168] Schädler V, Dergatschewa S. *Rubus caesius* L. Leaves: Pharmacognostic analysis and the study of hypoglycemic activity. Natl J Physiol Pharm Pharmacol 2017; 7(5): 501.
[169] Tao Y, Bao J, Zhu F, Pan M, Liu Q, Wang P. Ethnopharmacology of *Rubus idaeus* Linnaeus: A critical review on ethnobotany, processing methods, phytochemicals, pharmacology and quality control. J Ethnopharmacol 2023; 302: 115870.

[170] Asgarpanah J, Mohajerani R. Phytochemistry and pharmacologic properties of *Urtica dioica* L. J Med Plant Res 2012; 6(46): 5714-5719.
[171] Bhusal KK, Magar SK, Thapa R, Lamsal A, Bhandari S, Maharjan R, Shrestha S, Shrestha J. Nutritional and pharmacological importance of stinging nettle (*Urtica dioica* L.): A review. Heliyon 2022; 8(6): 1-8.
[172] Gurib-Fakim A. Medicinal plants: traditions of yesterday and drugs of tomorrow. Mol Asp Med 2006; 27(1): 1-93.
[173] Grossinger R. Planet Medicine: From Stone Age Shamanism to Postindustrial Healing. Boulder, CO: Shambhala Publications, 1983.
[174] Tierra M. Planetary Herbology. Twin Lakes, WI: Lotus Press, 1988.
[175] Wheelwright EG. Medicinal Plants and Their History. New York, Dover Press, 1974.
[176] Halberstein RA. Medicinal plants: historical and cross-cultural usage patterns. Ann Epidemiol 2005; 15(9): 686-699.
[177] Anderson FJ. An Illustrated History of the Herbals. New York, Columbia University Press, 1977.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 509-522, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1632540

Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Performansını Artırmak için Metasezgisel Algoritma Tabanlı Öznitelik Seçimi

Sinan BALIBEY[1], Feyza ALTUNBEY ÖZBAY[2*], Erkan TANYILDIZI[3]
[1,3] Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Yazılım Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye
[2] Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yazılım Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye
[1] sinan.balibeyy@gmail.com, [*2] faltunbey@firat.edu.tr, [3] etanyildizi@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 04/02/2025; Kabul/Accepted: 10/03/2025)

Öz: Artan veri dünyasında, makine öğrenmesi (ML) algoritmalarının başarısı büyük ölçüde öznitelik seçimi süreçlerine bağlıdır. Öznitelik seçimi, gereksiz, etiketsiz veya gürültülü öznitelikleri eleyerek daha küçük ve anlamlı bir öznitelik kümesi oluşturmayı hedefler. Bu çalışmanın amacı, metasezgisel algoritmalar sayesinde veri kümelerinden en anlamlı öznitelikleri elde ederek ML algoritmalarının farklı kıyaslama ölçütlerine göre daha iyi performans elde etmesini sağlamaktır. Bu kapsamda, öznitelik seçimi için metasezgisel algoritmalardan İkili Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Genetik Algoritma kullanılarak iki farklı veri seti üzerinde deneysel araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Sonar ve Meme Kanseri veri setlerinde, K-En Yakın Komşu, Destek Vektör Makinesi ve Karar Ağaçları sınıflandırma algoritmaları amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Her iki algoritma için de farklı popülasyon büyüklüğünde yüksek iterasyonlarda öznitelik seçimi yapılmış, ardından seçilen en iyi öznitelikler farklı ML modeli (Lojistik Regresyon, Naive Bayes, Aşırı Gradyan Arttırma, Yapay Sinir Ağları, Evrişimsel Sinir Ağları ve Uzun Kısa Süreli Bellek) ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, İkili Parçacık Sürü Optimizasyon ve Genetik Algoritma yöntemlerinin öznitelik seçimi sonrası model doğruluklarında anlamlı artışlara yol açtığını göstermiştir. Elde edilen sonuçların metasezgisel algoritmalar kullanarak özellik seçim sürecini geliştiren araştırmacılara katkı sağlaması amaçlanmaktadır. Bu bulgular, metasezgisel algoritmaların öznitelik seçimi sürecinde etkinliğini ve çeşitli ML modelleri ile birleşmesinin performans iyileştirmedeki potansiyelini desteklemektedir.

Anahtar kelimeler: Metasezgisel algoritmalar, Öznitelik seçimi, Makine öğrenmesi algoritmaları.

Metaheuristic Algorithm Based Feature Selection for Improving the Performance of Machine Learning Algorithms

Abstract: In a world of increasing data, the success of machine learning (ML) algorithms depends heavily on the process of feature selection. Feature selection aims to create a smaller and more meaningful feature set by eliminating redundant, unlabeled, or noisy features. The aim of this study is to obtain the most meaningful features from data sets with metaheuristic algorithms and to ensure that ML algorithms achieve better performance according to different evaluation metrics. In this context, metaheuristic algorithms for feature selection, Binary Particle Swarm Optimization, and Genetic Algorithms are used for experimental research on two different datasets. In the Sonar and Breast Cancer datasets, K-Nearest Neighbor, Support Vector Machine, and Decision Tree classification algorithms were used as the objective function. For both algorithms, feature selection was performed at high iterations with different population sizes, and then the best-selected features were evaluated with different ML models (Logistic Regression, Naive Bayes, Extreme Gradient Boosting, Artificial Neural Networks, Convolutional Neural Networks, and Long Short Term Memory). The results show that Binary Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm methods lead to significant increases in model accuracy after feature selection. The results obtained are aimed at contributing to researchers using metaheuristic algorithms to improve the feature selection process. These findings support the effectiveness of metaheuristics in the feature selection process and the potential for performance improvement when combined with various ML models.

Key words: Metaheuristic algorithms, Feature selection, Machine learning algorithms.

1. Giriş

Günümüzde dijital veri üretimi her gün hızla artmakta olup, bu veriler metin, görüntü, sayılar, ses, video ve grafikler gibi çeşitli biçimlerde ortaya çıkmaktadır. Mühendislik, sağlık hizmetleri, bilim, endüstri, eğitim ve diğer insan faaliyetlerinin birçok alanında üretilen bu büyük veri setleri, bilgi ilerlemesine önemli katkılar sağlamaktadır [1]. Ancak, bu verilerin önemli bir kısmı ham, alakasız, kullanılabilir olmayan veya tekrarlayıcı nitelikte olup, modelleme için uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Özellikle yüksek boyutlu veri setlerinde, gereksiz

[*] Sorumlu yazar: faltunbey@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0009-0006-0083-6301, [2] 0000-0003-0629-6888, [3] 0000-0003-2973-9389

özniteliklerin varlığı hem model performansını düşürmekte hem de hesaplama maliyetlerini artırmaktadır [2]. Bu bağlamda, öznitelik seçimi problemleri, büyük veri setlerinin boyutunu azaltırken doğruluk oranını korumak açısından kritik bir önem taşımaktadır [3].

Öznitelik seçimi, ML ve veri madenciliği alanlarında önemli bir araştırma konusu olmuştur. Özellikle, yüksek boyutlulukta özniteliklerin etkili bir şekilde seçilmesi hem modelin genel performansını artırmakta hem de hesaplama kaynaklarının verimli kullanılmasını sağlamaktadır [4]. Geleneksel öznitelik seçimi yöntemleri, yüksek boyutlulukta yerel optimumlara takılma, aşırı karmaşıklık ve yüksek hesaplama maliyeti gibi çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır [5]. Bu sorunların üstesinden gelmek için, metasezgisel algoritmalar giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Metasezgisel algoritmalar, evrimsel hesaplama, sürü zekâsı, fizik tabanlı ve insan davranışına dayalı yaklaşımlar gibi çeşitli kategorilere ayrılmakta olup, büyük ve karmaşık arama uzaylarında etkili çözümler sunma kapasitesine sahiptir [2].

Metasezgisel algoritmalar, özelliği seçme sürecinde en uygun öznitelik alt kümesini bulmada oldukça verimli ve etkilidir. Genetik Algoritma, İkili Parçacık Sürü Optimizasyonu gibi doğadan esinlenen yöntemler, yüksek boyutlu veri setlerinde en iyi öznitelik kombinasyonlarını etkili bir şekilde seçme kapasitesine sahiptir [6]. Bu çalışmada, ikili öznitelik seçimi problemlerini çözmek amacıyla İkili Parçacık Sürü Optimizasyon ve Genetik algoritmalarının etkinliği incelenmiştir. Sonar ve Meme Kanseri veri setleri üzerinde gerçekleştirilen deneyler aracılığıyla, bu algoritmaların farklı amaç fonksiyonları kullanılarak öznitelik sayısını azaltırken model doğruluğunu artırmadaki başarıları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, çeşitli ML algoritmalarında da test edilerek, öznitelik seçiminin model performansını iyileştirme potansiyeli ortaya konmuştur.

Makalenin geri kalanı dört ana bölümden oluşacak şekilde tasarlanmıştır: İkinci bölümde ilgili literatür taraması sunulmakta, üçüncü bölümde kullanılan yöntemler ayrıntılı biçimde açıklanmakta, dördüncü bölümde deneysel çalışmalar ele alınmakta ve beşinci bölümde elde edilen sonuçlar değerlendirilmektedir.

2. İlgili Çalışmalar

Öznitelik seçimi, yüksek boyutlu veri setlerinden gereksiz ve gürültülü özellikleri eleyerek sınıflandırma doğruluğunu ve işlem verimliliğini artıran önemli bir adım olarak kabul edilmektedir. Bu bağlamda, çeşitli metasezgisel algoritmalar ile yapılan öznitelik seçimi ile ilgili yayınlar özetlenmiştir.

Yılmaz vd. yaptığı çalışmada, ilaç tasarımında kullanılan mutajenitenin tahmin edilmesi amacıyla bir sınıflandırma problemine odaklanılmıştır. Bu bağlamda, öznitelik seçimi için Kelebek Optimizasyon Algoritması (BOA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) kullanılmıştır. Çalışmada iki farklı veri seti değerlendirilmiştir: biri öznitelik seçimi ve modelleme için, diğeri ise doğrulama ve kıyaslama içindir. BOA ile öznitelik sayısı %68 oranında azaltılırken PSO ile %46 oranında bir azalma sağlanmıştır. Azaltılan öznitelikler, 6 farklı ML algoritması ile test edilmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Bu sonuçlar, metasezgisel algoritmaların hem öznitelik sayısını azaltmada hem de sınıflandırma başarımını artırmada etkili olduğunu göstermektedir [7].

Efeoğlu'nun yaptığı çalışmada, gömülü nesnelerin türünün belirlenmesi için yapay zekâ tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir. Deneysel bir sistem oluşturularak farklı türlerde metalik ve metalik olmayan nesneler, çeşitli derinlik ve şekillerde bir kum havuzuna gömülmüştür. Ölçüm verilerinden elde edilen 2 boyutlu görüntüler, görüntü işleme teknikleri ile işlenmiştir. Öznitelik seçimi için temel bileşen analizi (PCA) ve korelasyona dayalı öznitelik seçimi (CFS) yöntemleri kullanılmış; CFS için Genetik Algoritma, PSO, Harmony Arama ve Evrimsel Arama gibi metasezgisel algoritmalar tercih edilmiştir. En yüksek doğruluk oranı (%95,8), PCA sonrası Rastgele Ağaç algoritmasıyla elde edilmiştir. Çalışma, gömülü nesnelerin tür tespitinde hibrit yapay zekâ yaklaşımlarının başarısını göstermektedir [8].

Gedikli ve Yurdusever'in yaptığı çalışmada epilepsi hastalığının teşhisi için sınıflandırma problemine öznitelik seçimi için metasezgisel algoritmalar kullanılmıştır. Veri seti EEG sinyallerinde oluşmakta ve 667 öznitelik bulunmaktadır. Tüm veri setini 1/3 oranında test geriye kalanları ise eğitim seti olacak şekilde k-en yakın komşu algoritmasıyla sınıflandırmış ve başarımını %60,05 olarak ulaşmıştır. Öznitelik seçimi için metasezgisel algoritmaların her birini 30 kez 50 popülasyonda 50 iterasyon ile çalıştırmıştır. Gri Kurt Optimizasyonu, Balina Optimizasyonu ve Harris Şahinler Optimizasyon algoritmaları ile öznitelik seçimi yapmıştır. Bu algoritmaların sınıflandırmalarının en yüksek başarımı sırasıyla %80,16, %79,20 ve %79,34 olacak şekilde görülmüş, doğrulukları yükselttiği ve öznitelik sayısını azalttığı tespit edilmiştir [9].

Açar ve Aydilek'in yaptığı çalışmada, 3 farklı veri setini 5 farklı ML algoritmasıyla 10 kat çapraz doğrulamadan geçirerek çalıştırmış doğruluklarını ve çalışma sürelerini hesaplamıştır. Öznitelik seçimi için Kolerasyon Analiz Yöntemi, Lasso Yöntemi, Hipotez Testi, PSO ve Genetik Algoritma kullanmıştır. Kullanılan öznitelik seçme yöntemlerini tekrar 5 farklı ML algoritmasıyla 10 kat çapraz doğrulamadan geçirerek

kıyaslamıştır. Elde edilen kıyaslamalar sonucunda metasezgisel algoritmalar öznitelik seçiminde daha az öznitelik ile daha yüksek doğruluğa ulaşmıştır [10].

Ciran ve Özbay'ın yaptığı çalışmada, dört farklı göz hastalığını sınıflandırmak için yeni bir derin öğrenme metodolojisi geliştirilmiştir. Bu metodolojide, ResNet101, DenseNet201 ve DarkNet53 gibi önceden eğitilmiş derin öğrenme mimarilerinden elde edilen özellikler birleştirilerek hibrit bir özellik havuzu oluşturulmuş ve görüntülerin daha etkili temsil edilmesi sağlanmıştır. Önemli özniteliklerin seçimi için PSO algoritması kullanılmış, sınıflandırma işlemi ise Destek Vektör Makineleri ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca destek vektör makinelerinin hiperparametreleri, Bayesian optimizasyon yöntemi ile optimize edilerek %93,8 doğruluk oranına ulaşılmıştır [11].

Gümüş vd. yaptığı çalışmada, güç kalitesi olaylarının sınıflandırılmasında özellik seçimi için Denge Optimizasyon Algoritması (EO) ve Salp Sürü Optimizasyon Algoritması (SSA) kullanılmıştır. Güç kalitesi olaylarını içeren sentetik veri setleri, Ayrık Dalgacık Dönüşümü kullanılarak işlenmiş ve öznitelikler çıkarılmıştır. Normalize edilmiş ve logaritmik olarak iki farklı veri seti oluşturulmuştur. EO ile %96,05, SSA ile %90,62 doğruluk oranlarına ulaşılmıştır. Ayrıca, en sık seçilen özelliklerin analizi histogram grafikleri ile gerçekleştirilmiş ve bu özellikler kullanılarak sınıflandırma başarımı artırılmıştır. Bu çalışma, metasezgisel algoritmaların özellik seçimi ve sınıflandırma performansı üzerindeki olumlu etkisini ortaya koymaktadır [12].

Mishra vd. yaptığı çalışmada, meme kanserinin erken teşhisi için bir öznitelik seçimi yaklaşımı geliştirilmiştir. Çalışmada ikili parçacık sürü optimizasyon algoritması, özellik seçimi için ikili bir optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır. Breast Cancer Coimbra Dataset (BCCD) ve Breast Cancer Wisconsin Diagnostic Dataset (BCWDD) üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, öznitelik seçimi sonrası BCCD için %80,83, BCWDD için %98,24 doğruluk oranlarına ulaşılmıştır. BCCD'de seçilen öznitelikler arasında Yaş, BMI, Glukoz, Resistin ve Leptin bulunurken, BCWDD için 9 önemli özellik seçilmiştir. Öznitelik seçimi, her iki veri setinde de sınıflandırma performansında %4-8 oranında iyileşme sağlamış ve bu yöntemin tanı sistemlerinde etkili olduğunu göstermiştir [13].

Abualigah ve Dulaimi'nin yaptığı çalışmada, öznitelik seçimi problemlerini çözmek için Sinüs Kosinüs Algoritması ve Genetik Algoritmayı birleştiren hibrit bir yöntem geliştirilmiştir. SCAGA adlı bu yöntem, veri setlerindeki gereksiz ve gürültülü öznitelikleri eleyerek sınıflandırma doğruluğunu artırmayı hedeflemiştir. Önerilen yöntem, UCI makine öğrenimi deposundaki veri setlerinde test edilmiş ve diğer algoritmalarla karşılaştırıldığında daha yüksek doğruluk oranlarına ve daha az seçilen özniteliğe ulaşmıştır. Krvskp veri setinde doğruluk %97,97'ye, öznitelik sayısı ise %50,13 oranında azalmıştır [14].

Ewees vd. yaptığı çalışmada, Aritmetik Optimizasyon Algoritması (AOA) ve Genetik Algoritma operatörleri birleştirilerek yüksek boyutlu veri setleri için AOAGA adlı bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntem, AOA'nın arama stratejilerindeki zayıflıkları gidermek ve yerel optimumlardan kaçınmak için geliştirilmiştir. AOAGA, 20 UCI makine öğrenmesi deposundaki veri setleri ve iki gerçek dünya gen veri seti üzerinde test edilmiştir. Sonuçlar, AOAGA'nın diğer algoritmalara kıyasla daha yüksek doğruluk, daha az öznitelik ve daha iyi uygunluk değerleri sağladığını göstermiştir [15].

Maleki vd. yaptığı çalışmada, akciğer kanseri teşhisini geliştirmek amacıyla k-en yakın komşu algoritması, Genetik Algoritma ile birleştirilmiştir. Genetik Algoritma, veri setindeki gereksiz özellikleri eleyerek en iyi öznitelik kombinasyonunu seçmiş ve k-en yakın komşu algoritmasının doğruluk oranını artırmıştır. Ayrıca, k parametresinin optimal değeri deneysel olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, bu hibrit yöntemin sınıflandırma doğruluğunu %100'e kadar çıkardığını ve işlem süresini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Bu, akciğer kanseri teşhisinde etkili bir çözüm sunmaktadır [16].

Donuk vd. yaptığı çalışmada, yüz ifadelerinden duygu tanıma işlemi için İkili Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Destek Vektör Makineleri yöntemlerini kullanarak derin özellik seçimi tabanlı bir sistem geliştirmiştir. İlk aşamada, FER+ veri seti ile eğitilen bir Evrişimsel Sinir Ağı kullanılarak görüntülerden öznitelikler çıkarılmıştır. Daha sonra, evrişimsel sinir ağından elde edilen öznitelikler arasından en anlamlı olanları seçmek için ikili parçacık sürü optimizasyon algoritması uygulanmıştır. Son olarak, seçilen öznitelikler destek vektör makineleri ile sınıflandırılmıştır. Önerilen sistem, doğruluk oranını %85,74'e çıkarmış ve işlem hızını artırarak, duygu tanıma performansına katkı sağladığını göstermiştir [17].

Luo vd. yaptığı çalışmada, büyük ölçekli veri setlerinde öznitelik seçimi için Hibrit Kaba Hiperküp Yaklaşımı ve İkili Parçacık Sürü Optimizasyonu birleştirilerek yeni bir yöntem geliştirilmiştir. RH-BPSO olarak adlandırılan bu yöntem, özelliklerin anlamlılığını, bağımlılığını ve önemini dikkate alarak yüksek doğruluk oranları ve daha kompakt öznitelik alt kümeleri elde etmeyi hedeflemiştir. Ayrıca, Apache Spark çerçevesinde paralel bir strateji uygulanarak DiRH-BPSO adı verilen dağıtılmış bir versiyon geliştirilmiş ve büyük veri kümeleri üzerinde ölçeklenebilirliği artırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar, önerilen yöntemin sınıflandırma doğruluğu, öznitelik alt küme boyutu ve hesaplama verimliliği açısından mevcut yaklaşımlardan daha üstün olduğunu göstermiştir [18].

3. Yöntem

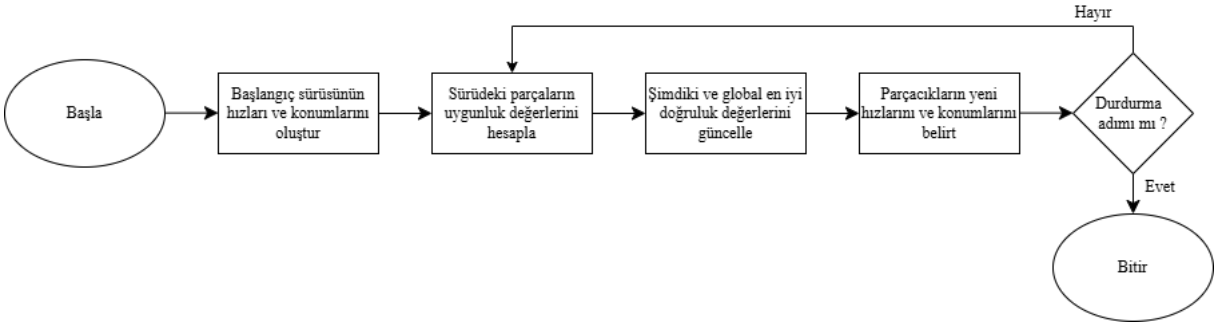
Bu bölümde, öncelikle öznitelik seçimi için kullanılan iki farklı metasezgisel algoritma olan İkili Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması ve Genetik Algoritmanın temel prensipleri tanıtılmaktadır. Ardından, sınıflandırma problemlerinin çözümünde yararlanılan dokuz farklı makine öğrenmesi algoritması kısaca açıklanmıştır. Son olarak, deneysel çalışmada kullanılan değerlendirici ölçütler ve çapraz doğrulama tekniğinin uygulama yöntemleri ele alınarak, model performansının nasıl kıyaslandığı ortaya konmuştur.

3.1 Metasezgisel algoritmalar

3.1.1 İkili parçacık sürü optimizasyon algoritması (BPSO)

PSO, Eberhart ve Kennedy [19] tarafından geliştirilen ve doğadaki sürü davranışlarını taklit eden popülasyon tabanlı bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu yöntem, kuşların, balıkların veya böceklerin ortak hareket ederek en uygun çözümü bulma prensibine dayanır. PSO'da her bir birey, yani parçacık, arama uzayında rastgele başlatılır ve zamanla daha iyi çözümlere ulaşmak için kendi en iyi konumunu (*pbest*) ve tüm sürünün en iyi konumunu (*gbest*) referans alarak hareket eder. BPSO, özellikle özellik seçimi gibi ikili karar gerektiren problemlerde tercih edilir. Bu yöntemde parçacıkların konumları 0 veya 1 şeklinde güncellenerek belirli bir veri kümesinde hangi özelliklerin daha önemli olduğu tespit edilir [20].

BPSO'nun çalışma mekanizması, belirli adımlardan oluşan iteratif bir süreçtir. Bu adımlar Şekil 1'deki akış şeması ile görselleştirilmiştir.



Şekil 1. BPSO akış diyagramı.

BPSO'nun temel avantajı, yüksek boyutlu veri kümelerinde gereksiz özellikleri elemeye yardımcı olması ve hesaplama maliyetlerini azaltarak daha etkili bir model oluşturmasıdır. Çalışmamızda, BPSO farklı amaç fonksiyonlarıyla test edilerek çeşitli ML algoritmaları ile birlikte kullanılmış ve belirli bir problem için en uygun özellik alt kümesi belirlenmiştir.

3.1.2 Genetik algoritma (GA)

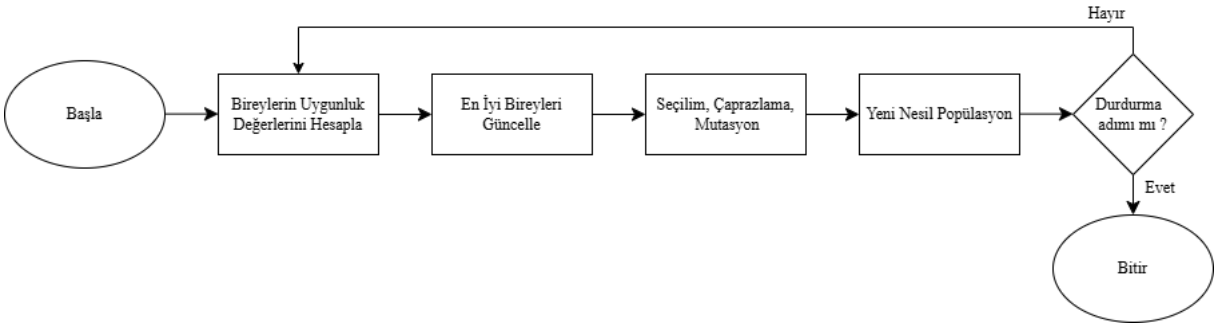
GA, evrimsel biyolojiden ilham alarak geliştirilmiş bir optimizasyon tekniğidir. Seçim, çaprazlama, mutasyon ve kalıtım gibi mekanizmaları kullanarak en iyi çözümü bulmayı hedefler. GA, özellikle yüksek boyutlu veri setlerinde en iyi öznitelik alt kümesini seçmek için kullanılan güçlü bir yöntemdir.

GA'nın temel yapısı, bireyler (kromozomlar) ve popülasyondan oluşur. Her birey, ikili kodlarla temsil edilen bir dizi özellikten oluşur, burada "1" ilgili özelliğin seçildiğini, "0" ise elendiğini gösterir. Genetik algoritma, popülasyondaki bireylerin uygunluklarını değerlendirerek en iyi olanları seçer ve nesilden nesile geliştirir.

İlk adımda, rastgele oluşturulan bireyler bir popülasyon halinde başlatılır ve her bireyin uygunluk değeri hesaplanır. Daha başarılı bireylerin yeni nesilde yer alma olasılığı artırılır. Seçim aşamasında, iyi bireylerin ebeveyn olarak seçilmesi için rulet tekerleği yöntemi gibi teknikler kullanılır.

Daha sonra, çaprazlama işlemi gerçekleştirilir, burada ebeveyn bireylerden alınan genetik bilgiler yeni bireylere aktarılır. Yeni bireyler oluşturulduktan sonra, mutasyon süreci uygulanır, yani rastgele genlerde küçük değişiklikler yapılarak çözüm çeşitliliği artırılır. Bu süreç belirlenen durdurma kriterine kadar devam eder [21].

GA'nın çalışma adımları Şekil 2'de verilen akış diyagramında gösterildiği gibi ilerlemektedir. Bu yapısı sayesinde, özellik seçimi ve optimizasyon problemlerinde etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 2. GA akış diyagramı.

3.2 Makine öğrenmesi algoritmaları

3.2.1 K-en yakın komşu algoritması (KNN)

KNN algoritması, bir veri noktasının sınıfını belirlemek için en yakın komşularının sınıflarına bakar. Bu algoritma genellikle öklid mesafesini kullanarak komşuların yakınlığını hesaplar. Basitliği ve yüksek doğruluk potansiyeli nedeniyle sınıflandırma problemlerinde sıklıkla kullanılır [22].

3.2.2 Karar ağaçları (DT)

Karar Ağaçları, verileri dallar ve yapraklar şeklinde yapılandırarak sıralı kararlarla sınıflandırma yapar. Kolay yorumlanabilir olması nedeniyle yaygın olarak tercih edilir. Her bir düğüm, veri özelliklerine göre bölünmüş bir alt küme temsil eder ve algoritma bu şekilde homojen gruplar oluşturmayı hedefler [22].

3.2.3 Destek vektör makinesi (SVM)

SVM, veri noktalarını sınıflar arasında ayırmak için en iyi hiper düzlemi bulan güçlü bir algoritmadır. Marjinal boşluğu maksimize ederek sınıflandırma yapar. Özellikle doğrusal olmayan problemlerde çekirdek fonksiyonları ile etkili sonuçlar sağlar [22].

3.2.4 Lojistik regresyon (LR)

Lojistik Regresyon, sınıflandırma problemlerinde kullanılan, kategorik bağımlı değişkenler ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi modellemek için geliştirilmiş parametrik bir yöntemdir. Bu algoritma, veriyi Sigmoid fonksiyonu üzerinden sınıflandırır ve çıktı olasılığını 0 ile 1 arasında bir değerde ifade eder. LR, özellikle çoklu doğrusal bağlantı durumunda etkilenebilir, bu nedenle veri setindeki bağımsız değişkenlerin ilişki durumu kontrol edilmelidir [23].

3.2.5 Naive bayes (NB)

Naive Bayes algoritması, Bayes teoremi üzerine kurulu olup, sınıflandırma problemlerinde genellikle veri setindeki özellikler arasında bağımsızlık varsayımı yaparak çalışır. Bu algoritma, koşullu olasılıklara dayanarak yeni bir verinin ait olduğu sınıfı belirler. Naive Bayes, hızlı ve hafif bir yöntem olup genellikle metin sınıflandırma ve duygu analizi gibi uygulamalarda kullanılır. Ancak, bu algoritmanın performansı, özellikle yüksek boyutlu veri setlerinde doğrusal bağlantı veya aşırı veri dengesizliği durumunda düşebilir [23].

3.2.6 Aşırı gradyan arttırma (XGBoost)

XGBoost, karar ağaçları ve gradyan artırma yöntemine dayanan, performans odaklı bir sınıflandırma algoritmasıdır. Yüksek doğruluk ve hız sağlamak için düzenlileştirme yöntemlerini entegre eden bu algoritma, büyük ölçekli veri setlerinde etkili sonuçlar verir. XGBoost, özellikle kayıp fonksiyonunu optimize etmek için Taylor serisinin ikinci derecesini kullanarak öğrenme sürecini hızlandırır. Bu algoritma, doğruluk ve F1-ölçütü gibi metriklerde diğer algoritmalardan genellikle üstün performans göstermektedir [23].

3.2.7 Yapay sinir ağları (ANN)

Yapay Sinir Ağları (ANN), insan beynindeki öğrenme ve karar verme süreçlerini modelleyen matematiksel bir algoritmadır. ANN'ler genellikle üç temel katmandan oluşur: giriş katmanı, gizli katmanlar ve çıkış katmanı. Giriş katmanı, modelin işlediği ham veriyi alır, gizli katmanlar bu veriyi işleyerek örüntüleri tanımlar ve çıkış katmanı nihai sonucu üretir. Her bir nöron, kendisine bağlı diğer nöronlardan gelen bilgileri alır ve aktivasyon fonksiyonları kullanarak işleme tabi tutar. Bu işlem, sistemin doğrusal olmayan ilişkileri öğrenmesini ve karmaşık veri örüntülerini tanımasını sağlar [24].

3.2.8 Evrişimsel sinir ağları (CNN)

CNN, görüntü tabanlı verilerle çalışan bir derin öğrenme modelidir. Ancak, bu çalışmada bir boyutlu veri ile çalışıldığından, 1D-CNN mimarisi tercih edilmiştir. CNN, temel olarak evrişim katmanları, havuzlama katmanları ve tamamen bağlı katmanlardan oluşur. Evrişim katmanları, giriş verisindeki önemli özellikleri filtrelemek ve çıkartmak için evrişimsel filtreler kullanır. Havuzlama katmanları ise veri boyutunu azaltarak modelin hesaplama yükünü hafifletir ve öğrenmeyi hızlandırır. Modelin sonunda, sınıflandırma için bir veya daha fazla tamamen bağlı katman yer alır [25].

3.2.9 Uzun kısa süreli bellek ağları (LSTM)

LSTM, tekrarlayan sinir ağlarının (RNN) bir türevidir ve uzun vadeli bağımlılıkları öğrenmede etkili bir yaklaşımdır. LSTM, giriş verileri arasındaki zaman bağımlılıklarını işlemek için "unutma kapısı", "giriş kapısı" ve "çıkış kapısı" gibi özel mekanizmalara sahiptir. Bu mekanizmalar, geçmiş bilgilerin hücre durumunda tutulmasını ve gerekli bilgilerle güncellenmesini sağlar. LSTM'ler özellikle sıralı verilerin analizinde güçlü bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır [25,26].

3.3 Değerlendirme metrikleri

ML algoritmalarının performansını değerlendirmek için bu çalışmada doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-ölçütü gibi temel metrikler kullanılmıştır. Ayrıca modelin genelleştirilebilirliğini ölçmek için k-kat çapraz doğrulama yöntemi uygulanmıştır. Bu metriklerin hesaplanmasında, sınıflandırma sonuçlarını görselleştirmek ve yorumlamak için karmaşıklık matrisinden yararlanılmıştır.

Karmaşıklık matrisi, bir sınıflandırma modelinin tahmin sonuçlarını görselleştiren bir tablodur. Bu matris, doğru pozitif (TP), doğru negatif (TN), yanlış pozitif (FP) ve yanlış negatif (FN) olmak üzere dört temel bileşeni içerir. Bu bileşenler, sınıflandırma performansını değerlendirmek için kullanılan metriklerin temelini oluşturur:

- TP: Modelin doğru şekilde pozitif sınıfa atadığı örnekler.
- TN: Modelin doğru şekilde negatif sınıfa atadığı örnekler.
- FP: Modelin yanlış şekilde pozitif sınıfa atadığı örnekler.
- FN: Modelin yanlış şekilde negatif sınıfa atadığı örnekler.

Karmaşıklık matrisi, sınıflandırma sonuçlarının detaylı bir analizi için vazgeçilmez bir araçtır ve özellikle sınıf dengesizliklerinin olduğu veri setlerinde metriklerin yorumlanmasını kolaylaştırır [27].

3.3.1 Doğruluk

Doğruluk, modelin toplam doğru tahmin oranını ölçen bir metriktir. Özellikle sınıf dengesi sağlanmış veri setlerinde etkili bir ölçüm olarak kullanılır ve Denklem 1 ile hesaplanır.

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

Bu oran, modelin genel başarısını değerlendirirken temel bir referans noktası sağlar.

3.3.2 Kesinlik

Kesinlik, modelin pozitif tahminlerinin ne kadarının doğru olduğunu ölçen Denklem 2 ile hesaplanan bir metriktir. Yanlış pozitiflerin (FP) az olduğu durumlarda yüksek kesinlik değerine ulaşılır.

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

3.3.3 Duyarlılık

Duyarlılık, Denklem 3'te verildiği gibi modelin pozitif sınıfı doğru bir şekilde tanıma oranını ifade eder. Yanlış negatiflerin (FN) etkisini ölçerek, modelin hassasiyetini ortaya koyar:

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

3.3.4 F1-ölçütü

F1-ölçütü, Denklem 4 ile hesaplanan ve kesinlik ile hassasiyet arasındaki dengeyi ölçmek için kullanılan harmonik bir ortalamadır. Özellikle sınıf dengesizliğinin olduğu veri setlerinde kullanışlıdır:

$$F1 - ölçütü = 2 \times \frac{Kesinlik \times Hassasiyet}{Kesinlik + Hassasiyet} \quad (4)$$

3.3.5 Çapraz doğrulama

Çapraz doğrulama veri setini k eşit parçaya ayırır ve her bir parça sırasıyla test verisi olarak kullanılırken diğer parçalar eğitim için kullanılır. Bu süreç k kez tekrarlanır ve sonuçlar ortalaması alınarak modelin performansı değerlendirilir. Çapraz doğrulama, veri setinin küçük olduğu durumlarda ezberleme (aşırı öğrenme) riskini azaltmada etkili bir yöntemdir [28].

4. Deneysel Çalışma

Bu çalışmada gerçekleştirilen tüm deneyler, Python programlama dili kullanılarak Jupyter Notebook ortamında geliştirilmiş ve iki farklı bilgisayar sistemi üzerinde yürütülmüştür. Kullanılan veri setleri, sınıflandırma modellerinin başarısını değerlendirmek amacıyla 0,1 ile 0,9 aralığında normalize edilmiştir. Bu normalizasyon işlemi MinMaxScaler yöntemi ile gerçekleştirilirken, çıkış sınıfları 0 ile 1 arasında normalize edilmiş ve LabelEncoder kullanılmıştır. Meme Kanseri veri setinde, anlamlı bilgi taşımayan ve model performansına katkı sağlamayan iki sütun veri setinden kaldırılmıştır. Bu işlem, veri setinin daha odaklı hale getirilmesi ve gereksiz özniteliklerin etkisinin minimize edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Her iki veri seti için öznitelik seçimi ve model değerlendirme süreçleri aşağıdaki adımlar çerçevesinde yürütülmüştür:

- Öznitelik Seçimi: Metasezgisel algoritmalar olan BPSO ve GA, 1000 iterasyon boyunca 10 kez çalıştırılarak öznitelik seçimi yapılmıştır. Her iki algoritma, 20 ve 30 popülasyon büyüklükleri ile üç farklı amaç fonksiyonu (SVM, KNN, DT) kullanılarak optimize edilmiştir.
- Çapraz Doğrulama: Seçilen öznitelikler ve tüm veri seti, 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi ile değerlendirilmiştir. Bu yöntem, modelin genelleştirilebilirliğini ve doğruluğunu ölçmek için veri setini farklı alt kümelere ayırarak kullanılmıştır. Her çapraz doğrulama döngüsü 10 kez tekrarlanmış ve sonuçlar ortalama alınarak raporlanmıştır.

- Makine Öğrenmesi Modelleri: Öznitelik seçimi sonrası elde edilen alt kümeler, hem kendi amaç fonksiyonları (KNN, SVM, DT) ile hem de farklı makine öğrenmesi algoritmalarına (LR, NB, XGBoost, ANN, CNN ve LSTM) uygulanmış ve her algoritmanın doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-ölçütü metrikleri hesaplanmıştır.

ML modelleri ve derin öğrenme mimarileri, Python programlama dili ve ilgili kütüphaneler kullanılarak uygulanmıştır. KNN, SVM, DT, LR ve NB algoritmaları için Scikit-learn kütüphanesi tercih edilmiş ve varsayılan hiperparametre değerleri kullanılmıştır. XGBoost modeli için XGBoost kütüphanesi, derin öğrenme modelleri olan ANN, CNN ve LSTM için ise TensorFlow ve Keras kütüphaneleri kullanılmıştır. Derin öğrenme modellerinde gizli katmanlarda sırasıyla 32-64-64-32 nöronlar ve ReLU aktivasyon fonksiyonu, çıkış katmanında ise 1 nöron ve Sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Eğitim süreci 32 batch boyutu ve 50 epoch ile gerçekleştirilmiş olup, tüm modellerin performansları doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-ölçütü metrikleri ile değerlendirilmiştir.

4.1 Sonar veri seti

Sonar veri seti [29], deniz tabanına gönderilen sonar sinyallerini kullanarak mineral ve kaya türlerinin sınıflandırılmasını amaçlayan 208 örnekten oluşmaktadır. Veri seti 60 özniteliğe sahip olup, iki sınıfa (%54 kaya, %46 maden) ayrılmıştır. Sonar veri setine ait özellikler Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1. Sonar veri setinin özellikleri.

Veri Seti	Öznitelik Sayısı	Sınıf Sayısı	Sınıf Dağılımı	Örnek Sayısı
Sonar	60	2	%54, %46	208

Sonar veri seti üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, tüm özniteliklerin kullanıldığı durumlarda SVM algoritması en yüksek doğruluk oranını (0,8500) sergilemiştir (Tablo 2). BPSO ve GA algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilen öznitelik seçimi sonuçları ise Tablo 3 ve Tablo 4'te detaylandırılmıştır.

Tablo 2. Sonar veri setinin farklı algoritmalar ile doğrulukları.

Algoritma	Öznitelik Sayısı	Doğruluk
KNN	60	0,8310
SVM	60	0,8500
DT	60	0,7043

Veri seti üzerinde farklı popülasyon ve farklı amaç fonksiyonlarıyla yapılan 10 tekrar 1000 iterasyon sonuçlarının ortalamaları Tablo 3'te gösterildiği gibidir. Tablodaki SS standart sapmayı göstermektedir.

Tablo 3. Sonar veri seti için öznitelik seçim ortalamaları.

Algoritma	Amaç Fonksiyonu	Popülasyon	En iyi	En Kötü	Ortalama	SS	Ortalama Öznitelik Sayısı
BPSO	SVM	20	0,9273	0,8980	0,9066	0,0084	28,3
BPSO	SVM	30	0,9226	0,8983	0,9105	0,0069	30,8
BPSO	KNN	20	0,9130	0,8985	0,9048	0,0053	29,1
BPSO	KNN	30	0,9085	0,8942	0,9029	0,0053	30,5
BPSO	DT	20	0,8459	0,8307	0,8392	0,0046	25,9
BPSO	DT	30	0,8645	0,8300	0,8414	0,0103	26,4
GA	SVM	20	0,8890	0,8690	0,8810	0,0058	29,6
GA	SVM	30	0,8983	0,8792	0,8888	0,0058	30,3
GA	KNN	20	0,8983	0,8695	0,8847	0,0097	27,2
GA	KNN	30	0,9033	0,8745	0,8869	0,0096	32,2
GA	DT	20	0,8640	0,8066	0,8280	0,0172	29,3
GA	DT	30	0,8461	0,8166	0,8330	0,0103	30,0

Sonar veri seti için gerçekleştirilen deneylerde, Tablo 4'te yer alan sonuçlar, Tablo 3'teki öznitelik seçim ortalamalarına göre en yüksek doğruluk oranlarına sahip kombinasyonlar seçilerek belirlenmiştir. Bu sonuçlar, BPSO algoritması ile SVM amaç fonksiyonu kullanıldığında 0,9273 doğruluk oranına ve 30 öznitelik sayısına,

GA algoritması ile KNN amaç fonksiyonu kullanıldığında ise 0,9033 doğruluk oranına ve 30 öznitelik sayısına ulaşıldığını göstermektedir. Tablo 4'te elde edilen yeni öznitelikler ile Tablo 5 ve Şekil 3'teki algoritmalar denenmiştir. Bu bulgular, her iki metasezgisel algoritmanın öznitelik sayısını azaltırken model doğruluğunu artırmada etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

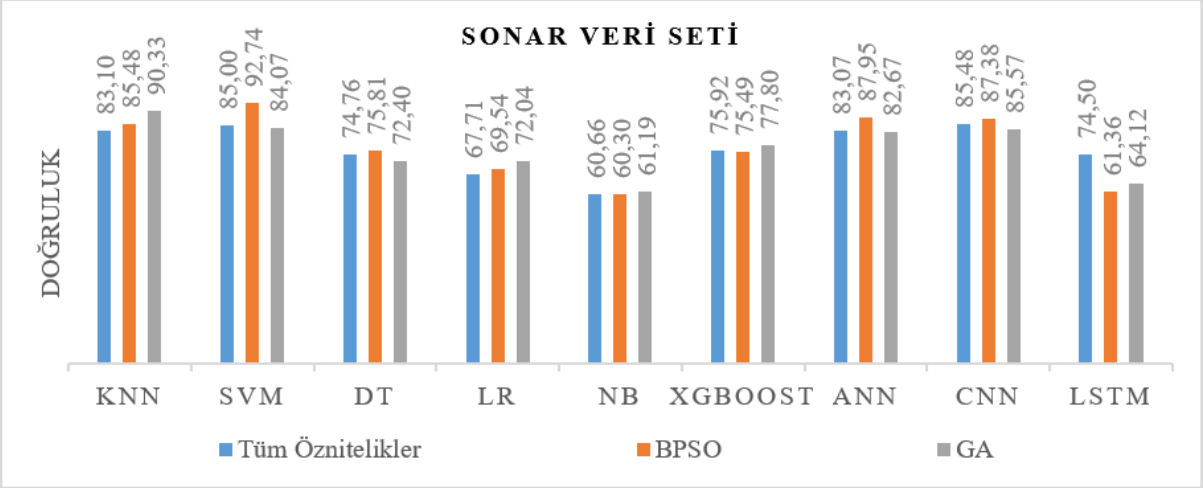
Tablo 4. Sonar veri seti için en iyi öznitelikler ve doğrulukları.

Algoritma	Popülasyon Sayısı	Amaç Fonksiyonu	Doğruluk	Öznitelik Sayısı
BPSO	20	SVM	0,9273	30
BPSO	30	SVM	0,9226	31
GA	20	KNN	0,8983	25
GA	30	KNN	0,9033	30

Tablo 5. Sonar veri seti için makine öğrenmesi algoritmalarının performansları.

Algoritma	Öznitelik	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1-Ölçütü
LR	Normal(60)	0,6771	0,6934	0,6771	0,6571
	BPSO(30)	0,6954	0,7052	0,6954	0,6820
	GA(30)	0,7204	0,7415	0,7204	0,7052
NB	Normal(60)	0,6066	0,6470	0,6066	0,5857
	BPSO(30)	0,6030	0,6272	0,6030	0,5840
	GA(30)	0,6119	0,6422	0,6119	0,5979
XGBoost	Normal(60)	0,7592	0,7904	0,7592	0,7497
	BPSO(30)	0,7549	0,7742	0,7549	0,7494
	GA(30)	0,7780	0,8082	0,7780	0,7650
ANN	Normal(60)	0,8307	0,8691	0,7589	0,7971
	BPSO(30)	0,8795	0,8900	0,8544	0,8698
	GA(30)	0,8267	0,8349	0,8022	0,8108
CNN	Normal(60)	0,8548	0,8530	0,8422	0,8445
	BPSO(30)	0,8738	0,8878	0,8422	0,8607
	GA(30)	0,8357	0,8545	0,7989	0,8189
LSTM	Normal(60)	0,7450	0,7905	0,6467	0,6870
	BPSO(30)	0,6136	0,6537	0,2167	0,2967
	GA(30)	0,6412	0,5189	0,4033	0,4253

Tablo 5'te Sonar veri seti üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, farklı makine öğrenmesi algoritmalarının 60 öznitelik ve BPSO ve GA tarafından seçilen 30 öznitelik üzerinden elde edilen doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-ölçütü değerleri karşılaştırılmıştır. LR modelinde, normal durumda 0,6771 doğruluk oranı elde edilirken, BPSO ile 0,6954 ve GA ile 0,7204 oranına ulaşılması, öznitelik sayısının azaltılmasıyla gereksiz bilgi ve gürültünün elenmesinin modele olumlu yansıdığını göstermektedir. Buna karşın, NB modelinde normal durumda 0,6066 doğruluk oranı elde edilirken, BPSO ile 0,6030 ve GA ile gerçekleştirilen öznitelik seçimi sonrası 0,6119 doğruluk oranı elde edilmiştir. XGBoost modelinde ise normal durumda 0,7592 doğruluk elde edilirken, GA ile öznitelik seçimi sonrasında 0,7780 doğruluk oranına ulaşılması, gereksiz özniteliklerin temizlenmesinin model performansına pozitif katkı sağladığını göstermektedir. ANN modeli, normal öznitelik setiyle 0,8307 doğruluk oranına ulaşırken, BPSO ile seçilen öznitelik setinde 0,8795 ile en yüksek doğruluk oranına çıkmış ve GA ile elde edilen öznitelik setinde 0,8267 doğruluk değeri gözlemlenmiştir. CNN modelinde, normal durumda 0,8548 doğruluk oranı elde edilirken, BPSO uygulaması ile 0,8738 oranına ulaşılmıştır. Buna karşın, LSTM modelinde normal öznitelik kullanımı 0,7450 doğruluk verirken, öznitelik seçimi sonrası BPSO ile 0,6136 ve GA ile 0,6412 doğruluk değeri kaydedilmiştir.



Şekil 3. Sonar veri setinin tüm algoritmalar ile kıyaslanması.

4.2 Meme Kanseri veri seti

Meme Kanseri veri seti [30], hastaların tıbbi görüntüleme sonuçlarını içeren ve meme kanseri teşhisi için kullanılan 569 örnekten oluşmaktadır. Veri seti, 30 öznitelikle iki sınıfa (%63 kanserli, %37 kanser olmayan) ayrılmıştır. Meme Kanseri veri setine ait özellikler Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Meme kanseri veri setinin açıklanması.

Veri Seti	Öznitelik Sayısı	Sınıf Sayısı	Sınıf Dağılımı	Örnek Sayısı
Meme Kanseri	30	2	%63, %37	569

Meme Kanseri veri seti üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, tüm özniteliklerin kullanıldığı durumlarda SVM algoritması en yüksek doğruluk oranını (0,9754) sergilemiştir (Tablo 7). Öznitelik seçimi sonuçları Tablo 8 ve Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo 7. Meme kanseri ver setinin farklı algoritmalar ile doğrulukları.

Algoritma	Öznitelik Sayısı	Doğruluk
KNN	30	0,9666
SVM	30	0,9754
DT	30	0,9209

Veri seti üzerinde farklı popülasyon ve farklı amaç fonksiyonlarıyla yapılan 10 tekrar 1000 iterasyon sonuçlarının ortalamaları Tablo 8'de gösterildiği gibidir. Tablodaki SS standart sapmayı göstermektedir.

Meme Kanseri veri seti için yapılan öznitelik seçimi sonuçlarında, Tablo 9'da yer alan değerler, Tablo 8'deki öznitelik seçim ortalamalarına göre en yüksek doğruluk oranlarına sahip kombinasyonlar seçilerek belirlenmiştir. BPSO algoritması ile SVM amaç fonksiyonu kullanıldığında 0,9842 doğruluk oranına ve 14 öznitelik sayısına, GA algoritması ile SVM amaç fonksiyonu kullanıldığında ise 0,9824 doğruluk oranına ve 13 öznitelik sayısına ulaşılmıştır. Tablo 9'de elde edilen yeni öznitelikler ile Tablo 10 ve Şekil 4'teki algoritmalar denenmiştir. Bu sonuçlar, BPSO ve GA algoritmalarının öznitelik sayısını azaltırken model doğruluğunu artırmada etkili olduğunu göstermektedir.

Tablo 8. Meme kanseri veri seti için öznitelik seçim sonuçları.

Algoritma	Amaç Fonksiyonu	Popülasyon	En iyi	En Kötü	Ortalama	SS	Ortalama Öznitelik Sayısı
BPSO	SVM	20	0,9842	0,9807	0,9821	0,0011	16,0
BPSO	SVM	30	0,9842	0,9807	0,9824	0,0014	16,0
BPSO	KNN	20	0,9789	0,9771	0,9778	0,0009	16,7
BPSO	KNN	30	0,9806	0,9771	0,9787	0,0009	16,9
BPSO	DT	20	0,9630	0,9560	0,9594	0,0023	12,9
BPSO	DT	30	0,9631	0,9561	0,9603	0,0024	13,1
GA	SVM	20	0,9824	0,9771	0,9796	0,0014	15,9
GA	SVM	30	0,9824	0,9789	0,9803	0,0011	16,1
GA	KNN	20	0,9789	0,9754	0,9771	0,0008	15,6
GA	KNN	30	0,9789	0,9754	0,9771	0,0011	14,7
GA	DT	20	0,9613	0,9543	0,9578	0,0024	12,9
GA	DT	30	0,9648	0,9543	0,9587	0,0035	14,0

Tablo 9. Meme kanseri veri seti için en iyi öznitelikler ve doğrulukları.

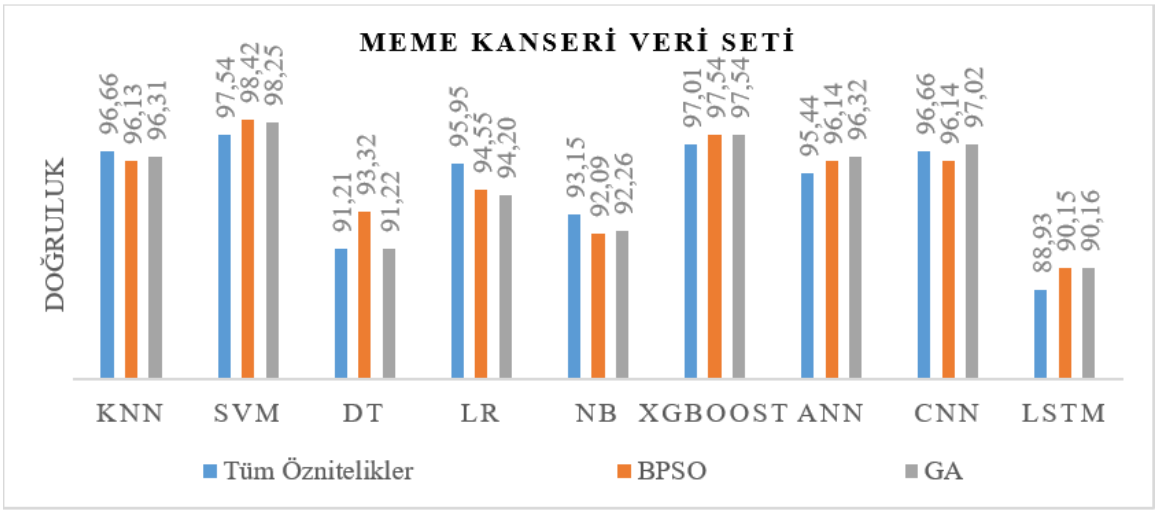
Algoritma	Popülasyon Sayısı	Amaç Fonksiyonu	Doğruluk	Öznitelik Sayısı
BPSO	20	SVM	0,9842	17
BPSO	30	SVM	0,9842	14
GA	20	SVM	0,9824	13
GA	30	SVM	0,9824	18

Tablo 10. Meme kanseri veri seti için makine öğrenmesi algoritmalarının performansları.

Algoritma	Öznitelik	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1-Ölçütü
LR	Normal(30)	0,9595	0,9614	0,9595	0,9590
	BPSO(14)	0,9455	0,9491	0,9455	0,9444
	GA(13)	0,9420	0,9454	0,9420	0,9408
NB	Normal(30)	0,9315	0,9343	0,9315	0,9312
	BPSO(14)	0,9209	0,9223	0,9209	0,9204
	GA(13)	0,9226	0,9235	0,9226	0,9222
XGBoost	Normal(30)	0,9701	0,9706	0,9701	0,9701
	BPSO(14)	0,9754	0,9759	0,9754	0,9752
	GA(13)	0,9754	0,9759	0,9754	0,9752
ANN	Normal(30)	0,9544	0,9598	0,9245	0,9375
	BPSO(14)	0,9614	0,9520	0,9481	0,9484
	GA(13)	0,9632	0,9688	0,9340	0,9488
CNN	Normal(30)	0,9666	0,9705	0,9433	0,9547
	BPSO(14)	0,9614	0,9631	0,9383	0,9473
	GA(13)	0,9702	0,9735	0,9478	0,9588
LSTM	Normal(30)	0,8893	0,8433	0,8955	0,8564
	BPSO(14)	0,9015	0,8936	0,8433	0,8613
	GA(13)	0,9016	0,8948	0,8392	0,8637

Meme Kanseri veri seti üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda ise, 30 öznitelik, BPSO ile seçilen 14 öznitelik ve GA ile seçilen 13 öznitelik kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-ölçütü değerleri karşılaştırılmıştır. LR modelinde normal öznitelik kullanıldığında 0,9595 doğruluk elde edilirken, öznitelik seçimi sonrasında BPSO ve GA ile sırasıyla 0,9455 ve 0,9420 doğruluk değerleri gözlemlenmiştir. NB modelinde ise normal durumda 0,9315 doğruluk oranı kaydedilirken, BPSO ve GA uygulamaları sonrası doğruluk değerleri sırasıyla 0,9209 ve 0,9226'dır. XGBoost modelinde normal öznitelik setiyle elde edilen 0,9701 doğruluk oranının, öznitelik seçimi sonrasında 0,9754'e yükselmesi en yüksek doğruluğa ulaşmıştır, gereksiz veya gürültülü özniteliklerin elenmesinin modelin karar verme mekanizmasını güçlendirdiğini ortaya koymaktadır. ANN modelinde normal öznitelik kullanımı 0,9544 doğruluk oranı verirken, BPSO ve GA ile

seçilen öznitelik setlerinde sırasıyla 0,9614 ve 0,9632 doğruluk oranlarına ulaşılmıştır. CNN modelinde ise normal durumda 0,9666 doğruluk oranı elde edilirken, GA uygulaması sonrası 0,9702 oranı gözlemlenmiştir. LSTM modelinde normal öznitelik setiyle 0,8893 doğruluk oranı ile en düşük doğruluk elde edilirken, öznitelik seçimi uygulamalarında BPSO ile 0,9015 doğruluk oranı elde edilmiştir.



Şekil 4. Meme kanseri veri setinin tüm algoritmalar ile kıyaslanması.

Şekil 4, Meme Kanseri veri setinde öznitelik seçimi öncesi ve sonrası farklı ML algoritmalarının doğruluk oranlarını görsel olarak karşılaştırmaktadır. BPSO ve GA ile öznitelik seçimi yapıldıktan sonra, özellikle LR, XGBoost, ANN ve CNN modellerinde doğruluk oranlarında belirgin artışlar gözlemlenmektedir. Bu bulgular, öznitelik seçiminin ML algoritmalarının performansını iyileştirmede etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

5. Sonuç

Bu çalışmada, öznitelik seçimi için metasezgisel algoritmalar olan BPSO ve GA yöntemleri kullanılarak Sonar ve Meme Kanseri veri setlerinde gerçekleştirilen deneyler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, öznitelik seçiminin model performansı üzerindeki olumlu etkilerini açıkça ortaya koymaktadır.

Sonar veri seti üzerinde yapılan deneylerde, BPSO ve GA algoritmaları ile gerçekleştirilen öznitelik seçimi süreçleri, temel sınıflandırma algoritmalarının doğruluk oranlarında anlamlı artışlar sağlamıştır. Özellikle BPSO algoritması ile SVM amaç fonksiyonu kullanılarak seçilen 30 öznitelik, doğruluk oranını %85,00'den %92,73'e yükseltmiştir. GA algoritması ile KNN amaç fonksiyonu kullanılarak seçilen 30 öznitelik ise %90,33 doğruluk oranına ulaşmıştır. Bu iyileşmeler, metasezgisel algoritmaların öznitelik sayısını azaltırken model doğruluğunu artırmada ne kadar etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca, oluşturulan doğrulama grafiklerinde, öznitelik seçiminin ML algoritmalarının performansını nasıl iyileştirdiği görsel olarak desteklenmiştir.

Meme Kanseri veri seti üzerinde gerçekleştirilen deneylerde ise, BPSO ve GA algoritmaları ile yapılan öznitelik seçimi süreçleri, sınıflandırma modellerinin doğruluk oranlarında da artışlar sağlamıştır. BPSO algoritması ile SVM amaç fonksiyonu kullanılarak seçilen 14 öznitelik, doğruluk oranını %97,54'ten %98,42'ye artırmıştır. GA algoritması ile SVM amaç fonksiyonu kullanılarak seçilen 13 öznitelik ise %98,24 doğruluk oranına ulaşmıştır. Bu sonuçlar, öznitelik seçiminin model performansını iyileştirebileceğini göstermektedir. Meme Kanseri veri seti için oluşturulan doğrulama grafikleri, öznitelik seçiminin ML algoritmalarının doğruluk oranları üzerindeki etkisini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Genel olarak, BPSO ve GA algoritmaları her iki veri setinde de öznitelik sayısını azaltırken model doğruluğunu artırmada başarılı olmuştur. Popülasyon büyüklüğünün (20 ve 30) performans üzerindeki etkisini göstermiştir. Her iki büyüklükte de farklı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, farklı ML algoritmalarının performans değerlendirmeleri, öznitelik seçiminin bazı modeller üzerinde daha olumlu etkiler yarattığını, bazı modellerde ise negatif etkiler gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Bu durum, öznitelik seçiminin modelinin amaç fonksiyonuna ve veri setinin özelliklerine bağlı olarak farklı sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma metasezgisel öznitelik seçimi yöntemlerinin ML modellerinin performansını iyileştirmede etkin olduğunu doğrulamış olup, özellikle BPSO ve GA algoritmalarının öznitelik sayısını azaltırken doğruluk oranlarını artırmada başarılı olduğunu göstermektedir. Gelecek çalışmalarda, gerçek hayattaki problemlere yönelik büyük ve karmaşık veri setleri kullanılarak bu yöntemlerin uygulanması hedeflenmektedir. Sağlık, finans ve pazarlama gibi alanlarda karşılaşılan gerçek dünya verileri üzerinde öznitelik seçimi süreçlerinin optimize edilmesi, bu alanlarda daha doğru ve güvenilir tahmin modellerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Ek olarak, optimizasyon algoritmalarının paralel, çok amaçlı, ikili versiyonları önerilebilir, diğer algoritmalar ile hibrit versiyonları geliştirilerek özellik seçimi problemlerine uygulanabilir. Ayrıca, öznitelik seçimi sonrası modellerin hiperparametre optimizasyonu ile birleşik yaklaşımlar incelenerek daha yüksek performans elde edilmesi hedeflenebilir. Bu tür entegrasyonlar, gerçek hayat problemlerine yönelik çözümlerin etkinliğini artırarak, pratik uygulamalarda ML modellerinin kullanılabilirliğini ve başarısını artıracaktır.

Kaynaklar

[1] Akinola OO, Ezugwu AE, Agushaka JO, Zitar RA, Abualigah L. Multiclass feature selection with metaheuristic optimization algorithms: a review. Neural Comput Appl 2022; 34(22): 19751-19790.

[2] Kaur S, Kumar Y, Koul A, Kamboj SK. A systematic review on metaheuristic optimization techniques for feature selections in disease diagnosis: open issues and challenges. Arch Comput Methods Eng 2023; 30(3): 1863-1895.

[3] El-Kenawy EM, Mirjalili S, Alassery F, Zhang Y, Eid MM, El-Mashad SY, Aloyaydı BA, Ibrahim A ve diğerleri. Novel meta-heuristic algorithm for feature selection, unconstrained functions and engineering problems. IEEE Access 2022; 10: 40536-40555.

[4] Nssibi M, Manita G, Korbaa O. Advances in nature-inspired metaheuristic optimization for feature selection problem: A comprehensive survey. Comput Sci Rev. 2023; 49: 100559.

[5] Sharma M, Kaur P. A comprehensive analysis of nature-inspired meta-heuristic techniques for feature selection problem. Arch Comput Methods Eng 2021; 28: 1103-1127.

[6] Kumar L, Bharti KK. A novel hybrid BPSO–SCA approach for feature selection. Natural Computing 2021; 20(1): 39-61.

[7] Yılmaz Ö, Gumustas E, Pehlivanlı AÇ. A Hybrid Metaheuristic based Feature Selection Framework for In-silico Mutagenicity Prediction. Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications 2024; 7(2); 116-128.

[8] Efeoğlu E. An Artificial Intelligence-Based Hybrid Approach to Detect the Type of Buried Objects with Broad Frequency Band Antenna Systems. Firat University Journal of Experimental and Computational Engineering 2024: 3(3); 362-378.

[9] Gedikli E, Yurdusever T. EEG Sinyallerinden Meta-Sezgisel Optimizasyon Algoritmalarına Dayalı Özellik Seçimi. Black Sea Journal of Engineering and Science 2024; 7(4): 717-723.

[10] Açar İ, Aydilek İB. Geleneksel Makine Öğrenmesi Yöntemleri e Metasezgisel Yöntemlerle Öznitelik Seçim Yöntemlerinin Karşılaştırılması. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi 2024; 15(2): 397-409.

[11] Ciran A, Özbay E. Derin Öğrenme ve Özellik Seçimi Yaklaşımları Kullanılarak Göz Hastalıkları Tespiti. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi 2024; 15(2): 421-433.

[12] Gümüş B, Çoban M, Tezcan SS. Metasezgisel Tabanlı Özellik Seçim Algoritmalarının Güç Kalitesi Olaylarının Sınıflandırılmasına Etkisinin İncelenmesi. IJERD 2024; 16(2): 646-658.

[13] Mishra AK, Roy P, Bandyopadhyay S. Binary particle swarm optimization based feature selection (bpso-fs) for improving breast cancer prediction. In Proceedings of International Conference on Artificial Intelligence and Applications 2021; 2020: 373-384.

[14] Abualigah L, Dulaimi AJ. A novel feature selection method for data mining tasks using hybrid sine cosine algorithm and genetic algorithm. Clust Comput 2021; 24 2161-2176.

[15] Ewees AA, Al-qaness MAA, Abualigah L, Oliva D, Algamal ZY, Anter AM, Ibrahim RA, Ghoniem RM ve diğerleri. Boosting arithmetic optimization algorithm with genetic algorithm operators for feature selection: case study on cox proportional hazards model. Mathematics 2021; 9(18): 2321.

[16] Maleki N, Zeinali Y, Niaki STA. A k-NN method for lung cancer prognosis with the use of a genetic algorithm for feature selection. Expert Syst Appl 2021; 164: 113981.

[17] Donuk K, Arı A, Özdemir MF, Hanbay D. Deep feature selection for facial emotion recognition based on BPSO and SVM. Politeknik Dergisi 2023; 26(1): 131-142.

[18] Luo C, Wang S, Li T, Chen H, Lv J, Yi Z. Large-scale meta-heuristic feature selection based on BPSO assisted rough hypercuboid approach. IEEE Trans Neural Netw Learn 2022; 34(12): 10889-10903.

[19] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization. In: Proceedings of IEEE international conference on neural networks 1995; 4: 1942-1948.

[20] Salman OKM, Aksoy B. Rasgele orman ve ikili parçacık sürü zekâsı yöntemiyle kalp yetmezliği hastalığındaki ölüm riskinin tahminlenmesi. International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry 2022; 6(3): 416-428.

[21] Molajou A, Nourani V, Afshar A, Khosravi M, Brysiewicz A. Optimal design and feature selection by genetic algorithm for emotional artificial neural network (EANN) in rainfall-runoff modeling. Water Resour Manag 2021; 35(8): 2369-2384.

[22] Bülbül MA. A New Artificial Intelligence Supported Approach to Diagnosis and Prediction of Psoriasis. Gazi Journal of Engineering Sciences 2024; 10(2): 405-418.
[23] Diler S, Demir Y. Çoklu Doğrusal Bağlantı Olması Durumunda Veri Madenciliği Algoritmaları Performanslarının Karşılaştırılması. Nicel Bilimler Dergisi 2024; 6(1): 40-67.
[24] Çiftci F. Türkiye'de Buğday Üretim Miktarının Geleceğini Tahmin Etmede Veri Madenciliği Yöntemlerinin Etkinliğinin Karşılaştırılması. Wheat Studies 2024; 13(1): 1-11.
[25] Berus Y, Yakut YB. Derin Öğrenme (1D-CNN, RNN, LSTM, BiLSTM) ile Enerji Tüketim Tahmini: Diyarbakır AVM Örneği. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi 2024; 15(2): 311-322.
[26] Özbay E, Çinar A, Özbay FA. 3D Human Activity Classification with 3D Zernike Moment Based Convolutional, LSTM-Deep Neural Networks. Traitement du Signal 2021; 38(2): 269-280.
[27] Özbay E, Özbay FA. Derin Öğrenme ve Sınıflandırma Yaklaşımları ile BT görüntülerinden Covid-19 Tespiti. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi 2021; 12(2); 211-219.
[28] Abbasoğulları EG, Gunay FB. Talasemi Hastalığı Tahmini İçin Farklı Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin Kullanılması ve Karşılaştırılması. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi 2024; 14(4): 1990-2007.
[29] Sonar 2022. https://www.kaggle.com/datasets/rupakroy/sonarcsv .
[30] Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) Data Set 2017. https://www.kaggle.com/datasets/uciml/breast-cancer-wisconsin-data.

Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
37(1), 523-532, 2025

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1642238

Comparative Analysis of GAN-based Segmentation Models on Dental Panoramic Radiography Dataset

Hakan ÖCAL[1*], Gürdal ALTUNDAĞ[2]
[1] Computer Engineering, Faculty of Engineering Architecture and Design, Bartın University, Bartın, Türkiye
[2] Intelligent Systems Engineering, Graduate School, Bartın University, Bartın, Türkiye
[*1] hocal@bartin.edu.tr, [2] 23015248009@ogrenci.bartin.edu.tr

(Geliş/Received: 18/02/2025; Kabul/Accepted: 15/03/2025)

Abstract: Especially in criminal investigations, the identification of the victim is essential. The branch of forensic medicine that uses the method of identification from the teeth of the victims is called forensic odontology. In forensic odontology, physical information about the individual can be obtained from the bone and enamel structure of the teeth. Panoramic, periapical, and cephalometric imaging techniques are the most commonly used in the odontological identification of the individual. Forensic odontology is increasingly recognized for its essential role in personal identification during mass disasters, sexual assault cases, and child abuse investigations. Deep learning algorithms have recently successfully detected dental disorders such as caries, periodontal bone loss, and apical lesions. Generative adversarial networks (GAN) models have mainly achieved high segmentation performance in medical images. In this study, GAN models were designed and comparatively analyzed using U-Net, Volumetric convolutional neural network (V-Net), spatial and channel Squeeze-Excitation-based U-Net(scSEU-Net), Transformer-based U-Net (TransU-Net), and U-Net like pure Transformer (SwinU-Net) segmentation architectures which are widely used in the literature as generators. As a result of the comparative analyses, scSEU-Net-based GAN achieved the highest performance values with 0.8826 Thresholded Dice(DSC), 0.7901 Thresholded Intersection over Union (Thresh-IoU), 0.9805 Accuracy (ACC), 0.9268 Precision (PREC), and 0.9001 Recall (REC).

Key words: Deep Learning, Dental panoramic radiography segmentation, Generative adversarial networks, U-shaped Segmentation models, V-Net.

Dental Panoramik Radyografi Veri Setinde GAN Tabanlı Segmentasyon Modellerinin Karşılaştırmalı Analizi

Öz: Özellikle ceza soruşturmalarında mağdurun kimliği esastır. Mağdurların dişlerinden kimlik tespiti yöntemini kullanan adli tıp dalına adli odontoloji denir. Adli odontolojide, bireye ait fiziksel bilgiler dişlerin kemik ve mine yapısından elde edilebilir. Bireyin odontolojik kimlik tespitinde en sık kullanılanlar panoramik, periapikal ve sefalometrik görüntüleme tekniklerdir. Adli odontoloji, kitlesel felaketler, cinsel saldırı vakaları ve çocuk istismarı soruşturmaları sırasında kişisel kimlik tespitindeki temel rolüyle giderek daha fazla tanınmaktadır. Derin öğrenme algoritmaları son zamanlarda çürük, periodontal kemik kaybı ve apikal lezyonlar gibi diş bozukluklarını başarıyla tespit etmiştir. Üretken Çekişmeli Ağlar (GAN) modelleri çoğunlukla medikal görüntülerde yüksek segmentasyon performansı elde etmiştir. Bu çalışmada, literatürde üreteç olarak yaygın olarak kullanılan U-Net, Volumetrik Evrişimli Sinir Ağı (V-Net), Uzaysal ve Kanal Sıkıştırma-Uyartım Tabanlı U-Net (scSEU-Net), Transformatör Tabanlı U-Net (TransU-Net) ve U-Net benzeri Saf Transformatör (SwinU-Net) segmentasyon mimarileri kullanılarak GAN modelleri tasarlanmış ve karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Karşılaştırmalı analizler sonucunda scSEU-Net tabanlı GAN, 0,8826 Eşikli Zar (DSC), 0,7901 Eşikli Birleşim Kesişimi (Thresh-IoU), 0,9805 Doğruluk (ACC), 0,9268 Hassasiyet (PREC) ve 0,9001 Geri Çağırma (REC) değerleriyle en yüksek performans değerlerine ulaşmıştır.

Anahtar kelimeler: Derin Öğrenme, Dental panoramik radyografi segmentasyonu, Üretken çekişmeli ağlar, U şekilli segmentasyon modelleri, V-Net.

1. Introduction

Machine Learning (ML) based algorithms, especially Deep Learning models based on Convolutional Neural Networks (CNN), are one of the common areas of study in complex segmentation processes in dentistry [1-4]. However, imbalances in real-world data and the fact that standard data is more than pathological data cause deep learning models to perceive pathological data as noise and fail to learn. Due to the scarcity of pathological data in the dataset, deep learning architectures classify the pathological images they see as non-pathological images. As a solution, methods of augmenting pathological data by obtaining synthetic data from scarce pathological data are

* Sorumlu yazar: hocal@bartin.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: [1] 0000-0002-8061-8059, [2] 0009-0001-9935-5893

widely used [5, 6]. Many deep learning-based segmentation models have tried to cope with the difficulties in segmenting dental images [7]. Especially CNN-based architectures with spatial pyramid pooling (R-CNN) and architectures such as Resnet with residual blocks and Generative Adversarial Networks(GAN) have also shown high segmentation performances [8-13].

AI-driven models, particularly those employing CNNs, have also advanced the segmentation and classification of dental images, addressing critical challenges in identifying oral diseases. In dentistry, the first models based on convolutional neural networks (CNNs) and 2D and 3D photography are emerging for the 3D design of dental prostheses, with very encouraging results [14,15]. These advancements enhance diagnostic accuracy and support personalized treatment planning, demonstrating the growing synergy between AI and dental healthcare. While the integration of AI in dentistry is still evolving, several studies underscore its potential to enhance diagnostic workflows. For instance, Mask R-CNNs, GANs, and diffusion models combined with U-Net or V-Net architectures have effectively segmented complex dental structures, addressing anatomical variations and image quality challenges [16].

Despite these advancements, challenges remain, particularly in ensuring the generalizability and robustness of AI models across diverse populations and imaging conditions. Limited datasets, imbalanced learning tasks, and the need for extensive expert annotations highlight the technical and practical hurdles to widespread AI adoption. Addressing these issues requires collaborative efforts to standardize data collection, enhance model training methodologies, and develop explainable AI systems that align with clinical requirements. Deep convolutional neural networks (CNNs) have shown promise in various medical imaging applications, including dental image analysis. For instance, Mask R-CNN has been employed to detect and segment oral diseases, demonstrating its effectiveness in identifying and localizing dental conditions from intraoral images [17,18].

The continuous evolution of deep learning technologies offers significant opportunities to bridge these gaps. The convolutional neural network, a substantial type of deep learning architecture, is best known for its vast visual imagery analysis capabilities. These networks comprise regularized versions of complicated multi-layer perceptrons, enabling comprehensive analysis in various medical applications. Furthermore, CNNs have demonstrated their applicability in identifying and localizing dental conditions from intraoral images. These advanced models allow dental practitioners to optimize workflows and enhance patient care. Various retention and restoration methods, which have been proposed and improved for treating dental caries, have been successfully developed over the past few decades [19,20].

Additionally, emerging technologies such as GANs and improved U- and V-shaped segmentation architectures offer innovative solutions to long-standing challenges in dentistry, such as segmentation of complex dental structures and accurate tooth identification on panoramic radiographs. These technologies are particularly effective in addressing the unique challenges presented by complex anatomical structures and differences in tooth morphology among adults. By comparing the estimated dental images obtained by the segmentation-based generators of GAN architectures with the images segmented by forensic experts with the help of a discriminator, segmentation architectures can be better optimized by distinguishing whether the forensic expert segments the images.

Among the studies on the segmentation of dental panoramic radiography images in the literature, Li et al. attempted to segment dental panoramic X-ray images using the fine-tuned Segment Anything Model 2 (SAM 2) [21]. Şahin et al. used the U-Net 3+ model for fine segmentation of a dataset of 2,693 dental panoramic radiographs of children aged 2 to 13 years [22]. Yang et al. segmented dental panoramic radiographs obtained from 100 patients using a ResU-Net-based CNN model. The proposed study used Principal Component Analysis (PCA) and linear regression techniques to feature extracted tooth regions in the image [23]. Özçelik et al. proposed the Squeeze and Excitation Inception Block-based Encoder–Decoder (SE-IB-ED) architecture to segment teeth from panoramic X-ray images. They adopted the polygonal semantic pixel labeling (PSPL) method in labeling teeth [24]. Zhou et al. created a dual-labeled dataset to find both the status of teeth and the number of teeth affected in panoramic radiographs. They segmented the dataset with a GAN-based architecture consisting of the proposed end-to-end fully automatic YOLOv9-e segmentation model and the EfficientNetV2-I discriminator [25]. Kong et al. used Super-Resolution Generative Adversarial Networks (SRGANs) architecture, which combines super-resolution and GAN architectures, to segment periodontal bone loss [26]. Altundağ and Öcal proposed a Semi-stage Hybrid Convolution U-Net-based GAN architecture that reduced the number of parameters from 22 million to 11 million by modifying the U-Net architecture in the U-Net-based GAN architecture used for segmentation of teeth from panoramic radiographs [27].

In this study, considering the high-performance values of GAN architectures in Segmentation, GAN models in which segmentation models that have achieved high-performance results in the literature are used as generators and fed to a discriminator are comparatively analyzed.

2. Materials and Methods

This section gives comprehensive information about the dataset used, the deep learning models on which comparative analyses were made, the loss function used, and the performance metrics.

2.1. Preparing the panoramic radiography dataset

The dataset for training and testing the proposed model consists of high-resolution digital X-ray and radiographic dental images obtained from forensic institutions. The publicly available dataset to be used includes a total of 7000 images covering various age groups and tooth types. The dataset to be used was published in the Scientific Data Journal of Nature and shared with scientists [9]. The images in the dataset were taken at different angles, using various lighting conditions and imaging techniques. The dataset was divided as follows for training and testing: In the training phase, 5000 images were used for model training, while 1000 images were separated to monitor the model's performance during training and to prevent overfitting. In addition, 1000 images were used for the final performance evaluation and testing of the model. Examples from the panoramic dental radiography dataset are shown in Figure 1. In the figure, the images in the upper row show the panoramic dental radiography images of the cases, and the images in the lower row show the ground truths of the radiography images.

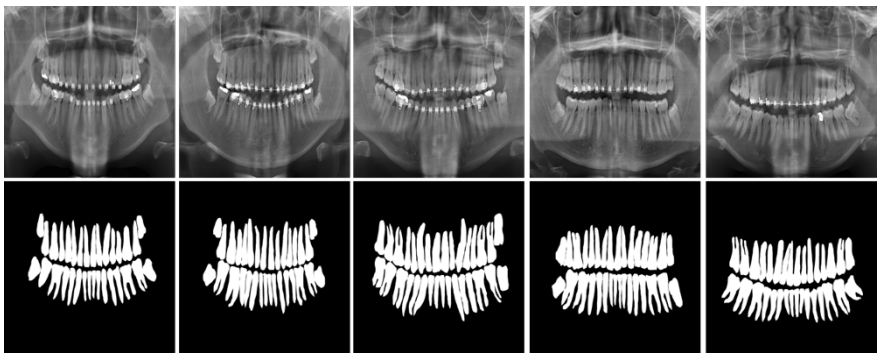


Figure 1. Examples from the dental panoramic radiography dataset(The top row is images, the bottom row is their ground truths.).

Before training and testing the model, all panoramic radiography images will be resized to 224 x 224 pixels, the input size required by the models in the dataset. In addition, the pixel values of the images will be normalized to the range [0, 1], facilitating faster and more effective learning. In addition, histogram equalization will be applied to increase the contrast of the teeth and simplify the segmentation process. Data augmentation techniques will improve the model's generalization ability. The methods to be used include random rotation (0°-360°), horizontal and vertical flip, zooming, brightness adjustment, and noise addition. These augmentations will help the model become more robust to changing imaging conditions.

2.2. Proposed discriminator of the GAN

In this study, the segmentation models used as a Generator in the proposed generative adversarial network model were selected from the widely used models in the literature. The discriminator was designed most optimally by manually fine-tuning the hyperparameters. In the proposed study, five different segmentation models were used as Generators. The segmentation models are used as Generators in the GAN model. The models were designed as four layers from 32 to 512 depth, except for TransU-Net and SwinU-Net. TransU-Net and SwinUnet architectures

were reduced to four layers (32 to 256 depth) due to overfitting. The architectural structure of the GAN models, which consists of the generator and discriminator, is shown in Figure 2. 3 x 3 convolutional filters are used in all segmentation models. The filters of the model, the number of layers, the optimization algorithms to be used, and the activation function were determined as a result of 10-fold cross-validations to be performed on the dataset, and the random search and grid search algorithms ran on the designed model.

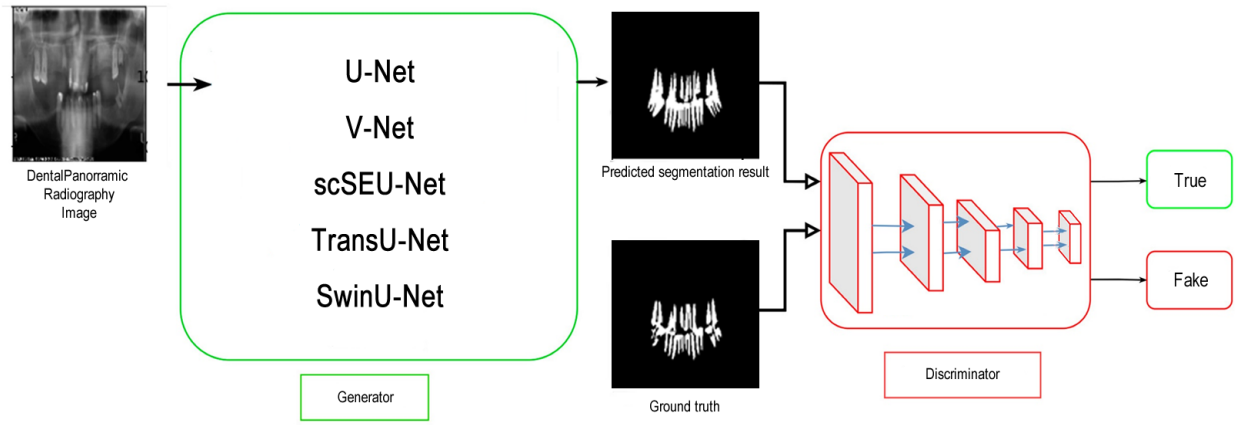


Figure 2. The GAN architecture used in the comparative analysis.

Discriminator: The discriminator section is designed to consist of 3 x 3 filters consisting of 5 layers from 32 channels to 512 channels. LeakyRelu is used as the activation function in the discriminator layer. 2-dimensional Global average pooling is added to the output of the layer. Dropouts with a coefficient of 0.1 and Dense(1) for binary classification are added to the output of the Global Average Pooling layer, respectively. The proposed Discriminator model is shown in Figure 3.

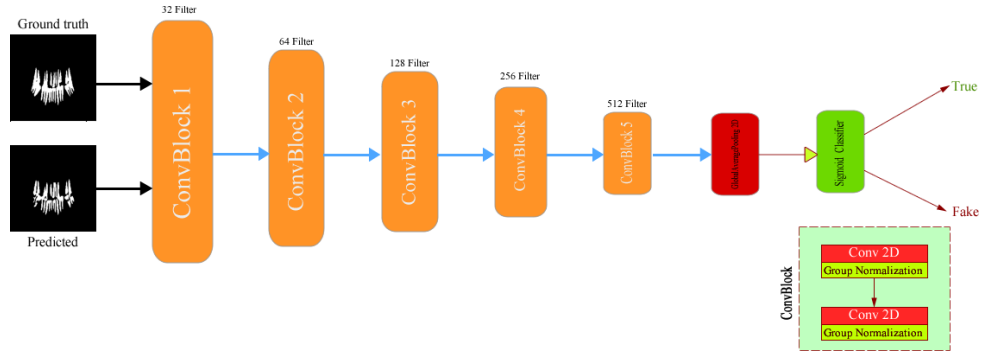


Figure 3. The architectural structure of the Discriminator model.

2.3 Generator models

U-Net: The U-Net architecture proposed by Ronneberger and his colleagues in the literature has been a groundbreaking study for later segmentation models with its success in medical image segmentation [18]. One of the most significant innovations in U-Net, which has a U-shaped architecture, is the skip-connections. The skip-connections ensure that the high-level features and spatial information lost in the pooling process in the encoder layer are fed to the decoder layer and preserved. While the encoder layer consists of convolutional blocks, the decoder layer consists of transposed convolutional blocks. 3x3 convolutional filters and Group nominalization

method were used in the U-Net model used in comparative analysis. The architectural structure of the U-Net model is shown in Figure 4.

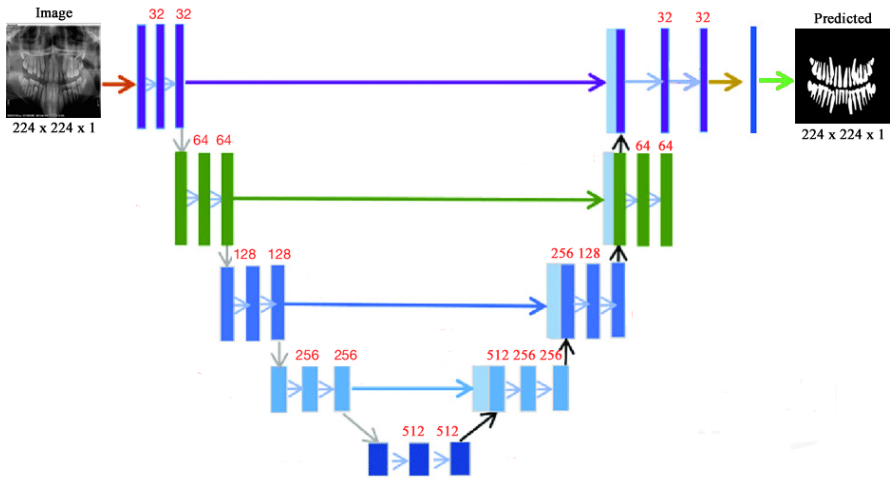


Figure 4. The architectural structure of the U-Net model.

V-Net: It is a deep learning model developed by Milletari et al., which uses convolutional layers instead of the pooling layer in the U-Net architecture and is proposed for robust volumetric segmentation of organs [28]. Fine-grained features are fed from the encoder layer to the decoder layer with the help of a skip-connection, thus preserving the edge information of the objects in the image, which is learned in the first layers and forgotten in the following layers. The V-Net segmentation model used as a generator in comparative analyses is shown in Figure 5.

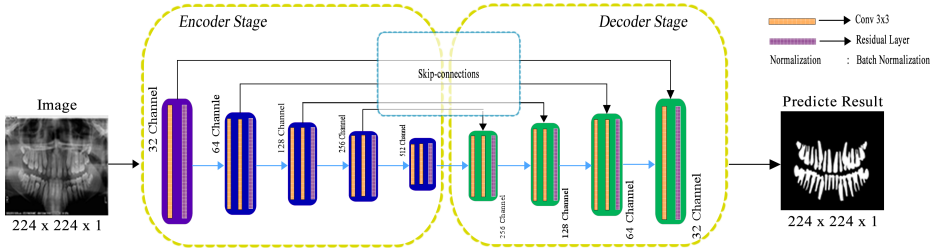


Figure 5. The architectural structure of the V-Net model.

scSEU-Net: It is a deep learning model obtained using the spatial and channel Squeeze and Excitation module proposed by Roy et al. in the decoder layer of the U-Net model [29]. Thanks to the SE blocks, higher segmentation success is achieved by focusing on the important regions in the image, just like in the Bottleneck attention module (BAM). Thanks to the scSE module, feature space and channel are calculated simultaneously. This way, it aims to emphasize high-level features, including dental regions, and suppress low-level features by recalibrating panoramic radiography images. The scSEU-Net model is shown in Figure 6.

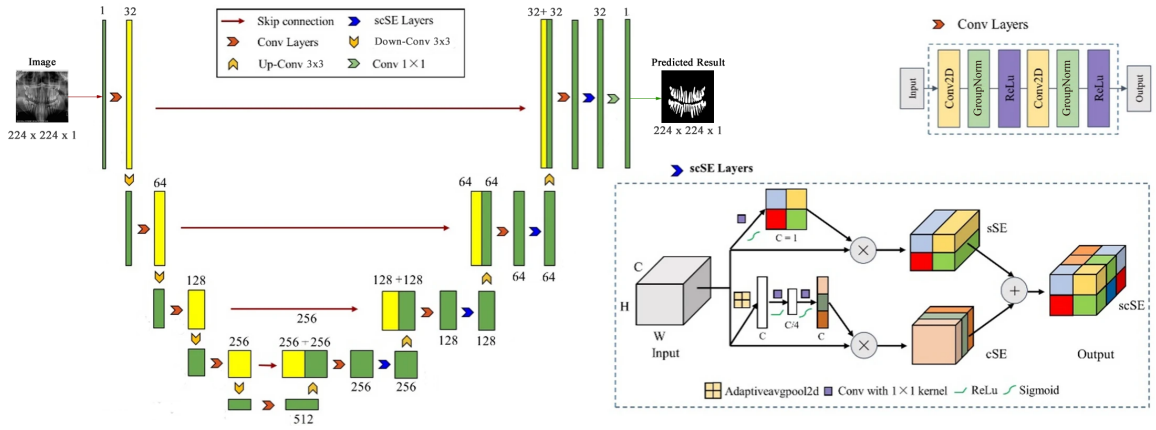


Figure 6. The architectural structure of the scSEU-Net model.

TransU-Net: Chen et al. proposed the TransU-Net model with self-attention modules to predict the contexts between pixels in an image [30]. To prevent the loss of feature resolution in high-resolution images due to the narrow receptive field network of transformers, both the success of CNN architectures in learning spatial information in high-resolution images and the high performance of Transformers in global context extraction are combined. Transformers in the TransU-Net architecture extract the contexts between features in an image with the help of self-attention modules and feed them to CNN layers to obtain high-level features in the image. This way, edge information, low-level features extracted in the first layers and forgotten in the following layers, is preserved, and a better segmentation result is obtained. In TransU-Net architecture, embed_dim=512, num_mlp=256, num_heads=6, and num_transformer=6 were determined as a result of the experimental studies. The scSEU-Net model is shown in Figure 7.

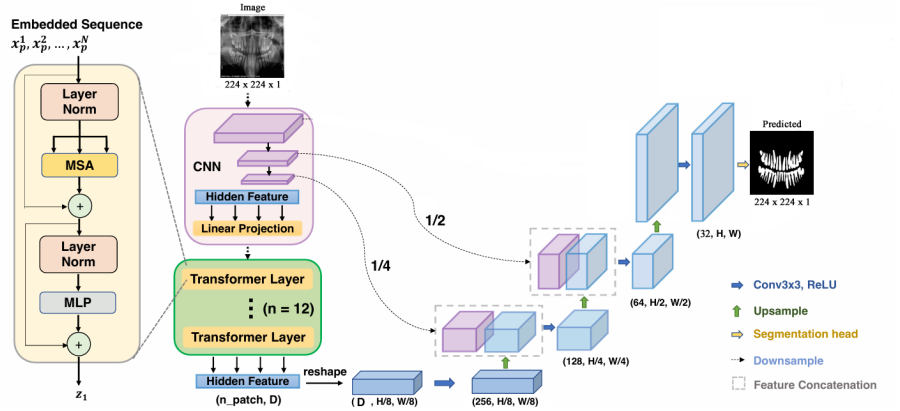


Figure 7. The architectural structure of the TransU-Net model.

SwinU-Net: The architecture proposed by Cao et al. uses a Transformer-based U-shaped model [31]. The proposed methodology has tokenized image patches and skip-connections where local global features from the encoder layer are fed to the decoder layer. Specifically, Swin Transformers with shifted windows are used in the encoder layer to provide context-related feature extraction. Additionally, researchers have reported that the model with four encoder and decoder layers each has higher performance in organ segmentation than pure transformer-based architecture and traditional CNN architectures. In the SwinU-Net architecture, as a result of the experimental studies, patch_size=(2, 2), num_heads=[4, 8, 8, 8], window_size=[4, 2, 2, 2], num_mlp=128 were determined. The architectural structure of the proposed model is shown in Figure 8.

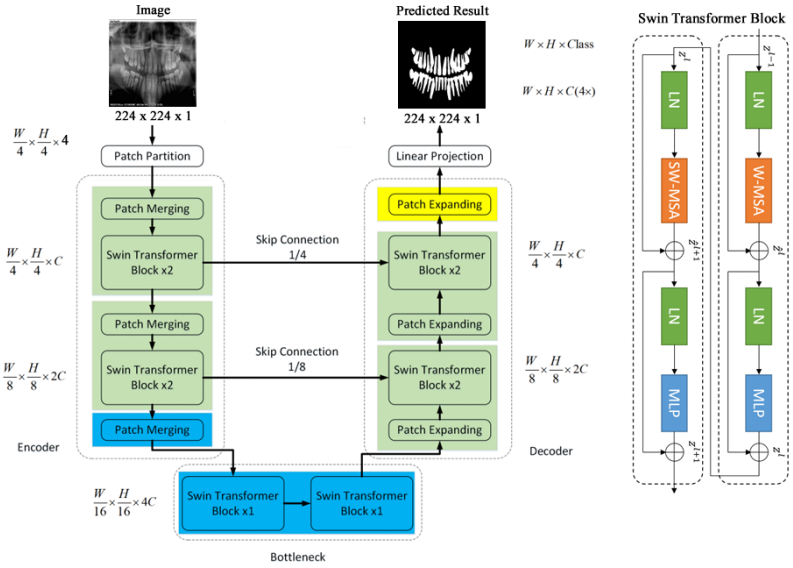


Figure 8. The architectural structure of the SwinU-Net model.

Training details of the models: In this study, comparative analyses of U-Net-based GAN, V-Net-based GAN, scSEU-Net-based GAN, TransU-Net-based GAN, and SwinU-Net based GAN models were performed on Adult Dental Panoramic Radiography dataset. Images were fed to the models in 224 x 224 x 1 dimensions. Models were trained for 7500 epochs. By using the early stopping parameter in the tensorflow-keras 2.12 library based on Python 3.8, which was created in the anaconda ecosystem used for training the models, training was stopped if the validation loss of the models did not progress more than five epochs. The training of SwinU-Net and TransU-Net generator models stopped because there was no progress in validation loss after 3500 epochs. As a result of the experimental studies, it was seen that 3550 and 7500 epochs were sufficient for separate training of all generator and discriminator models. Learning_rate=0.0001, weight_decay=6e-8, activation_funciton=ReLU, and batch_size=16 were selected for the generator part of the models. For the discriminator, learning_rate=0.0001 and batch_size=16 were used. The training of the GAN models was determined as 160 epochs. However, the training of scSEU-Net-based GAN 50 epochs, V-Net-based GAN 56 epochs, and TransU-Net-based GAN models stopped after 75 epochs because there was no progress in the validation loss. Adam optimizer was used in the proposed models [32]. A hardware structure consisting of a Tesla P100 graphics card, 64 GB RAM, and an Intel i5-8500H processor running on the Windows operating system was used for comparative analysis. **Loss Functions:** While the BinaryFocalCrossentropy loss function is used in the Generator modules of Gan architectures, the Mean Square Error (MSE) loss function is used in the Discriminator section. The mathematical equations of the loss functions are seen in Equation 1 and Equation 2.

$$\frac{-1}{N}\sum_{i=1}^{N} t_i.\log(p(t_i)) + (1-t_i).log(1-p(t_i)) \quad (1)$$

$$\text{MSE} = \Sigma(\text{yi} - \text{pi})^2\text{n} \quad (2)$$

In Equation 1, p(ti) is the probability of one, 1-p(ti) is the probability of zero. In Equation 2, yi is the ith observed value, pi is the corresponding predicted value for yi, and n is the number of observations. Σ indicates that a summation is performed over all values of i.

Performance metrics: Various metric-based algorithms will be used to determine the segmentation performance of the model. The performance metrics in Equations 3, 4, 5, 6, and 7 were used for training and testing the model on publicly available datasets. The most commonly used metrics in the literature for testing two-dimensional images are the Dice(DSC) and Intersection over Union (IoU-Jaccard) metrics. In addition, a threshold of 0.3 was added to these two metrics. Threshold aims to get a more robust model that undercuts a prediction score

of 0.3 to 0 in metrics. Thresholded Dice and Thresholded IoU metrics are shown in Equation 3 and Equation 4, respectively. These metrics were imported from a Python library called MedPy. In Equations 3 and 4, TP stands for True Positive, FP stands for False Positive, and FN stands for False Negative. The mathematical equation of the Accuracy (ACC) metric is seen in Equation 5. The Recall (REC) metric in Equation 6 measures our model's correct identification of True Positives. The performance metric Precision (PREC) given in Equation 7 is the ratio between TP and all positives.

$$Thresh\text{-}DSC = \frac{2*TP}{2*TP+FP+FN} > 0.3 \tag{3}$$

$$Thresh\text{-}IoU = \frac{TP}{TP+FN+FP} > 0.3 \tag{4}$$

$$ACC = \frac{TN+TP}{TN+TP+FN+FP} \tag{5}$$

$$REC = \frac{TP}{TP+FN} \tag{6}$$

$$PREC = \frac{TP}{TP+FP} \tag{7}$$

3. Experimental Results and Discussion

This study performs GAN-based segmentation of dental images in the panoramic radiography dataset. Various data augmentation techniques are applied to the dataset, and 7,000 images and 28 thousand augmented data are obtained. In the generator part of the GAN models, the models' segmentation performances obtained using high-impact architectures in the literature, such as U-Net, V-Net, scSEU-Net, SwinU-Net, and TransU-Net, are evaluated. The obtained prediction results are analyzed comparatively with performance metrics widely used in the literature, such as Thresh-DSC, Thresh-IoU, Acc, Prec, and Recall. The quantitative analysis results are shown in Table 1. The quantitative analyses show that scSEU-Net-based GAN architecture obtained the highest prediction results.

Table 1. Quantitative performance analysis results of models.

Dataset	Model[Method]	Prm(M)	Thresh-DSC	Thresh-IoU	ACC	PREC	REC
Dental Panoramic Radiography Dataset	U-Net-based GAN [18]	5.4	0.8512	0.7413	0.9723	0.8904	0.8630
	V-Net-based GAN [28]	58.6	0.8434	0.7160	0.9740	0.8885	0.8835
	TransU-Net-based GAN[30]	42.3	0.8656	0.7633	0.9761	0.9268	0.8848
	SwinU-Net-based GAN [31]	**2.4**	0.7031	0.5183	0.9437	0.8098	0.6622
	scSEU-Net-based GAN [29]	22.3	**0.8826**	**0.7901**	**0.9805**	**0.9268**	**0.9001**

As can be seen from Table 1, the best result was obtained by the scSEU-Net-based GAN architecture. The second-best result was obtained by the TransU-Net architecture. The worst segmentation scores were obtained by the SwinU-Net architecture. This situation is thought to be due to the difficulty in learning local and global features in the image due to the narrowness of the receptive field network in the transformers. TransU-Net and SwinU-Net architectures were designed as four layers with 32 to 256 filters to cope with the overfitting. In addition, the multi-layer perceptrons in the self-attention modules were set to 256.

Figure 9 shows the qualitative analyses of the models whose comparative analyses were performed in the study. As can be understood from the images, scSEU-Net-based GAN compressed the features both channel and spatially. It brought the essential features to the forefront, achieving higher performance values compared to other models. Then, the best result was obtained by TransU-Net-based GAN architecture. U-Net-based GAN and V-Net-based GAN architectures, which achieved high performance in volumetric image segmentation, achieved similar results. SwinU-Net-based GAN, on the other hand, showed poor performance.

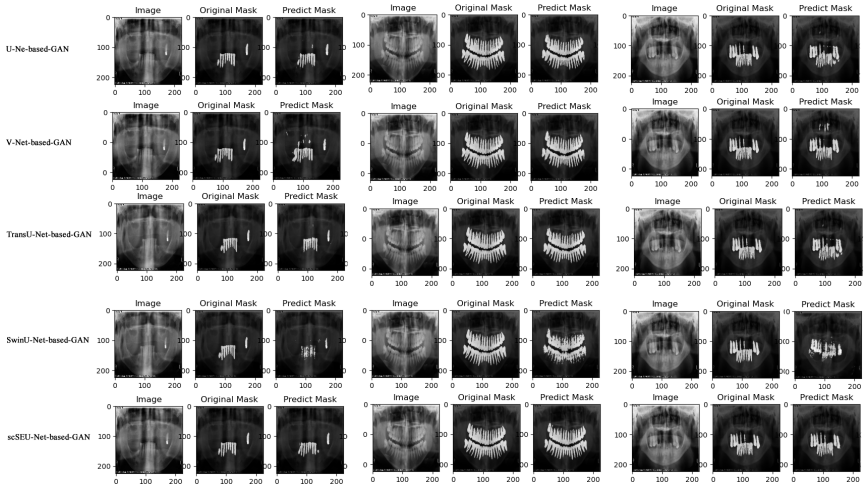


Figure 9. Examples of Qualitative analysis results of the GAN models used in my study on the Dental Panoramic Radiography dataset.

4. Conclusions

In this study, U-Net, V-Net, scSEU-Net, TransU-Net, and SwinU-Net architectures, which have achieved high performance in the segmentation of medical images in the literature, were used as generators in GAN models, and the segmentation results were analyzed comparatively. Comparative analyses of GAN models were performed using Thresh-DSC, Thresh-IoU, ACC, PREC, and REC performance metrics. For the Generator models, the BinaryFocalCrossentropy loss function was used, while the Discriminator model used the MSE loss function. In the comparative analysis, the highest performance result was obtained by the scSEU-Net-based GAN architecture. The TransU-Net-based GAN architecture obtained the second-highest performance result. However, while the TransU-Net-based GAN architecture achieved these performance results, it used almost twice as many parameters as the scSEU-Net-based GAN architecture. The high resource usage of transformer-based architectures is still a significant challenge. Future studies will investigate ways to achieve high performance with low parameters in Transformer-based GAN architectures.

References

[1] Arsiwala-Scheppach LT, Chaurasia A, Mueller A, Krois J, Schwendicke F. Machine learning in dentistry: a scoping review. J Clin Med 2023; 12(3), 937.

[2] Krois J, Ekert T, Meinhold L, Golla T, Kharbot B, Wittemeier A, Schwendicke F. Deep learning for the radiographic detection of periodontal bone loss. Sci Rep 2019; 9(1), 8495.

[3] Ekert T, Krois J, Meinhold L, Elhennawy K, Emara R, Golla T, Schwendicke F. Deep learning for the radiographic detection of apical lesions. J Endod 2019; 45(7), 917-922.

[4] Lee JH, Kim DH, Jeong SN, Choi SH. Detection and diagnosis of dental caries using a deep learning-based convolutional neural network algorithm. J Dent 2018; 77, 106-111.

[5] Schwendicke FA, Samek W, Krois J. Artificial intelligence in dentistry: chances and challenges. J Dent Res 2020; 99(7), 769-774.
[6] Mateusz B, Atsuto M, Mazurowski MA. A systematic study of the class imbalance problem in convolutional neural networks. Neural nets 2018; 106, 249-259.
[7] Bhat S, Birajdar GK, Patil MD. A comprehensive survey of deep learning algorithms and applications in dental radiograph analysis. Healthc Anal 2023; 100282.
[8] Girshick R, Donahue J, Darrell T, Malik J. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. Proc. IEEE Comput Soc Conf Comput Vis Pattern Recognit 2014; Ohio, USA, 580–587.
[9] He K, Zhang X, Ren S, Sun J. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition. IEEE PAMI 2015; 37, 1904–1916.
[10] Girshick R. F R-CNN. ICCV 2015; Santiago, Chile, 1440–1448.
[11] Ren S, He K, Girshick R, Sun J. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks. NIPS 2015; Montreal, Canada, 91–99.
[12] Szegedy C, Iofe S, Vanhoucke V. Inception-v4, Inception-ResNet and the Impact of Residual Connections on Learning. AAAI 12 2017; San Frnasisco, USA, 1602-1625.
[13] He K, Zhang X, Ren S, Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition. CVPR IEEE 2016; Las Vegas, USA, 770–778.
[14] Xu X, Liu C, Zheng Y. 3D tooth segmentation and labeling using deep convolutional neural networks. IEEE Trans Vis Comput Graph 2018; 25(7):2336-2348.
[15] Tian S, Dai N, Zhang B, Yuan F, Yu Q, Cheng X. Automatic classification and segmentation of teeth on 3D dental model using hierarchical deep learning networks. IEEE Access 2019; 7, 84817-84828.
[16] Sampath V, Maurtua I, Aguilar Martin JJ, Gutierrez A. A survey on generative adversarial networks for imbalance problems in computer vision tasks. J Big Data 2021; 8, 1-59.
[17] Fatima A, Shafi I, Afzal H, Mahmood K, Díez IDLT, Lipari V, Ashraf I. Deep learning-based multiclass instance segmentation for dental lesion detection. Healthcare MDPI 2023, Basel, Balgium, Vol. 11, No. 3, p. 347.
[18] Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. MICCAI 2015; Munich, Germany 234-241.
[19] Tyas MJ, Anusavice KJ, Frencken JE, Mount GJ. Minimal intervention dentistry—a review. Int Dent J 2000; 50(1), 1-12.
[20] Featherstone JD. The caries balance: the basis for caries management by risk assessment. Oral Health Prev Dent 2004; 2, 259-264.
[21] Li Z, Tang W, Gao S, Wang Y, Wang S. Adapting SAM2 Model from Natural Images for Tooth Segmentation in Dental Panoramic X-Ray Images. Entropy 2024; 26(12), 1059.
[22] Şahin ME, Ulutaş H, Süzgen EE. Automated Segmentation of Dental Structures in Panoramic Radiographs Using U-Net 3+. IDAP IEEE 2024; Malatya, Türkiye, 1-6.
[23] Xing Y, Liao P, Alasleh RA, Khampatee V, Alizadeh-Shabdiz F. Dental X-ray Segmentation and Auto Implant Design Based on Convolutional Neural Network. MIPR IEEE 2024; San Jose, CA, USA, 243-246.
[24] Özçelik STA, Üzen H, Şengür A, Fırat H, Türkoğlu M, Çelebi A, Sobahi NM. Enhanced Panoramic Radiograph-Based Tooth Segmentation and Identification Using an Attention Gate-Based Encoder–Decoder Network. Diagnostics 2024; 14(23), 2719.
[25] Zhou W, Lu X, Zhao D, Jiang M, Fan L, Zhang W, Liu X. A dual-labeled dataset and fusion model for automatic teeth segmentation, numbering, and state assessment on panoramic radiographs. BMC Oral Health 2024; 24(1), 1201.
[26] Kong V, Lee EY, Kim KA, Shon HS. Integrating Super-Resolution with Deep Learning for Enhanced Periodontal Bone Loss Segmentation in Panoramic Radiographs. Bioeng. 2024; 11(11), 1130, (2024).
[27] Altundağ G, Öcal H. A Comparison of shcU-Net Based GAN and U-net Based GAN in Adult Dental Segmentation. UBMK IEEE 2024; Antalya, Türkiye, 1040-1045.
[28] Milletari F, Navab N, Ahmadi SA. V-net: Fully convolutional neural networks for volumetric medical image segmentation. 3DV IEEE 2016; Stanford University, CA, USA; 565-571).
[29] Roy AG, Navab N, Wachinger C. Recalibrating fully convolutional networks with spatial and channel “squeeze and excitation” blocks. IEEE Trans Med Imaging 2018; 38(2), 540-549.
[30] Chen J, Lu Y, Yu Q, Luo X, Adeli E, Wang Y, Zhou Y. Transunet: Transformers make strong encoders for medical image segmentation. arXiv preprint arXiv:2102.04306 2021.
[31] Cao H, Wang Y, Chen J, Jiang D, Zhang X, Tian Q, Wang M. Swin-unet: Unet-like pure transformer for medical image segmentation. ECCV 2022; Switzerland, 205-218.
[32] Ba J, Kingma P. Adam: a method for stochastic optimization. ICLR 2015; San Diego, USA, 1–11.

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.