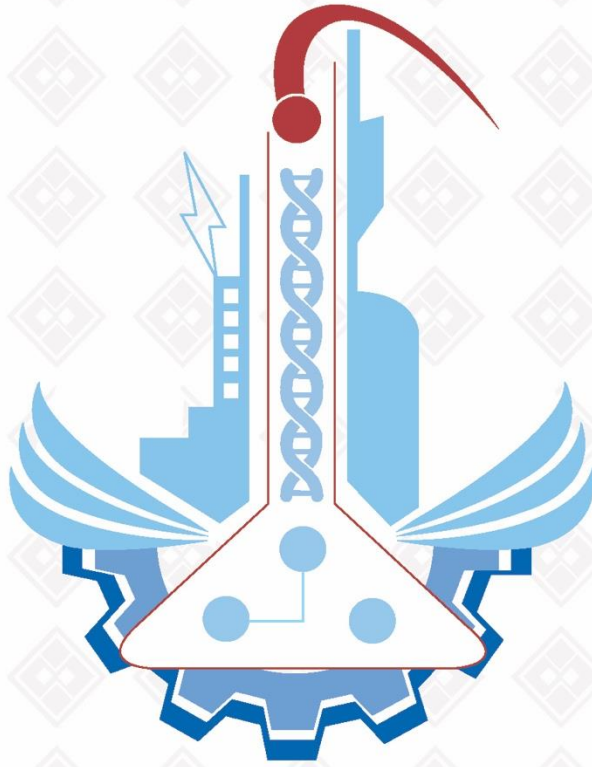


ISSN: 1308-9072

Cilt: 35 / Sayı: 2 / Yıl: 2023

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:35, Sayı:2, Yıl: 2023
ISSN: 1308 - 9072

İ l e t i Ő 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

Dr. Öğretim Üyesi Ferhat UÇAR
F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür Yrd.

Editör

Doç. Dr. Mesut TOĞAÇAR
Fırat Üniversitesi İİBF Öğretim Üyesi

DANIŞMA KURULU

Umran S. İNAN	Stanford Ü. Elekt-Elktr. Müh.	Cumali KINACI	İ.T.Ü. Çevre Müh.
Serdar SALMAN	Marmara Ü. Metal. Müh.	Ülkü YETİŞ	O.D.T.Ü. Çevre Müh.
Z. Hakan AKPOLAT	F.S.M.Ü. Elekt-Elktr. Müh.	Eres SÖYLEMEZ	O.D.T.Ü. Makine Müh.
Serkan DAĞ	O.D.T.Ü. Makine Müh.	Ayşe DALOĞLU	K.T.Ü. İnşaat Müh.
Erkan ŞAHİNKAYA	İ.M.Ü. Biyomühendislik	Ali KARCI	İnönü Ü. Bil. Müh.
Temel SAVAŞKAN	K.T.Ü. Makine Müh.	Coskun BAYRAK	Little Rock Ü Bilg. Bil.
İlker B. TOPÇU	Osmangazi Ü. İnş. Müh.	Hükmü ORHAN	Selçuk Ü. Jeoloji. Müh.
Yetkin TATAR	F.Ü. Bil. Müh.	Mehmet CEBECİ	F.Ü. Elekt-Elktr. Müh.
Mehmet ÖZKUL	Pamukkale Ü. Jeoloji. Müh.	Ertan GOKALP	K.T.Ü. Harita. Müh.
Hasan EFEUGLU	A.Ü. Elekt-Elktr. Müh.	Erhan AKIN	F.Ü. Bil. Müh.
Ercan AKSOY	F.Ü. Jeoloji Müh.	Sezgin BAKIRDERE	Y.T.Ü Kimya
Mehmet YILMAZ	F.Ü. İnşaat Müh.	Yusuf CELAYİR	F.Ü. İnşaat Müh.
Nurhan ARSLAN	F.Ü. Kimya Müh.	Cafer BAL	F.Ü. Mekatronik Müh.
Hanifi GULDEMİR	F.Ü.Tek. Elekt-Elktr. Müh.	Nilgün GULEC	O.D.T.Ü. Jeoloji Müh.

Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)
35-2, 2023

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

1. **Komşuluk Bileşen Analizi Tabanlı Makine Öğrenimi Yöntemleri ile Obezite Seviyelerinin Tahmini**
Prediction of Obesity Levels by Neighborhood Component Analysis Based Machine Learning Methods
Çağla DANACI, Derya AVCI, Seda ARSLAN TUNCER..... 433-442
2. **Kırma Taş Ocağı Çalışanlarının Psikososyal Risk Faktörlerinin Değerlendirilmesi**
Evaluation of Psychosocial Risk Factors of Quarrying Crushed Stone Employees
Mert MUTLU, Murat KALKAN..... 443-453
3. **Classification of Real and Fake Face Data Using Capsule Networks**
Kapsül Ağları Kullanılarak Gerçek ve Sahte Yüz Verilerinin Sınıflandırılması
Ayşe ÇOBAN, Fatih ÖZYURT..... 455-460
4. **Bağ Budama Atığına Uygulanan İnert ve Oksidatif Torrefaksiyon İşleminin Karşılaştırılması**
Comparison of Inert and Oxidative Torrefaction Process Applied to Vineyard Pruning Waste
Gizem ÖZER, Neslihan DURANAY..... 461-471
5. **Alzheimer ve Parkinson Hastalıklarının Derin Öğrenme Teknikleri Kullanılarak Sınıflandırılması**
Classification of Alzheimer's and Parkinson's Diseases Using Deep Learning Techniques
Esra YÜZGEÇ, Muhammed TALO..... 473-482
6. **Ön Karışımli Model Bir Yakıcıda Propan Gazının Swirl Sayısı Değişimlerinde Yanma Karakteristiğinin Araştırılması**
Investigation Of Combustion Characteristics Of Propane Gas At Swirl Number Variations In A Premixed Model Combustor
Caner SIPÇIK, Murat TAŞTAN..... 483-493
7. **Çift Kabuk Cephe Sistemlerinin Sıcak ve Soğuk İklim Bölgeleri için Isıl Performanslarının İncelenmesi**
Investigation of Thermal Performance of Double Skin Facade Systems for Hot and Cold Climate Regions
Elif Nur YÜKSEL, Betül BEKTAŞ EKİCİ..... 495-504
8. **Dalgacık Paket Dönüşümü, ReliefF Özellik Seçimi ve Topluluk Öğrenme Algoritması Tabanlı Bir Kısmi Deşarj Arızası Tespit Yöntemi**
A Partial Discharge Fault Detection Method Based on Wavelet Packet Transform, ReliefF Feature Selection and Ensemble Learning Algorithm
Belkis ERİŞTİ..... 505-516
9. **Hastaların Elektronik Sağlık Kayıt (ESK) Sistemleri için Güvenli Blok Zincir Destekli Bulut Sistemi**
Secure Blockchain-Supported Cloud System for Patients' Electronic Health Record (EHR) Systems
Hamit MIZRAK, Serpil ASLAN..... 517-526
10. **Kuantum Devrelerinde Kapı ve Giriş Tespiti için YOLO Tabanlı Bir Yöntem**
A YOLO-Based Method for Detection of Gate and Input in Quantum Circuits
Reyhan YILMAZ, Orhan YAMAN, Mehmet KARAKÖSE..... 527-540
11. **İki Girişli İki Çıkışlı Sistemlerde Ayrık Zamanda PI-PR² Kontrolör Tasarımı**
Discrete PI-PR² Controller Design for Two Input Two Output Systems
Ayşe DUMAN MAMMADOV, Emre DİNCEL, Mehmet Turan SÖYLEMEZ..... 541-559

12. **Feature Selection From MagFace Face Recognition Model With Optimization Algorithms**
Optimizasyon Algoritmaları ile MagFace Yüz Tanıma Modelinden Özellik Seçimi
Mehmet Fatih ÖZDEMİR, Davut HANBAY..... 561-567
13. **Siber Güvenlikte CIC-Darknet2020 Veri Seti Kullanarak VPN/NoVPN ve Tor/NoTor Sınıflandırması: Basit ve Karmaşık Modellerin Kullanımı**
Classification of VPN/NoVPN and Tor/NoTor Using CIC-Darknet2020 Dataset in Cybersecurity: Utilizing Simple and Complex Models
Yusuf ALACA..... 569-579
14. **Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e (TBDY-2018) göre betonarme bir binanın perde elemanlarının hasar sınır bölgelerinin tespit edilmesi**
Determining the damage zones of the shear walls of a reinforced concrete building according to the Turkish Building Earthquake Code 2018 (TBEC-2018)
Dilara TURSUN, Ömer Faruk TAŞ, Erkut SAYIN..... 581-595
15. **Pıhtı Birikiminin Abdominal Aort Anevrizması Yırtılma Riskine Etkisinin Mühendislik Yöntemleriyle İncelenmesi**
Investigation of the Effect of Clot Deposition on the Risk of Abdominal Aortic Aneurysm Rupture by Engineering Methods
Hüseyin Enes SALMAN 597-614
16. **Boşluk ve Arayer Kusurlarının Cu Nano Telinin Mekanik Özelliklerine Etkisi: Moleküler Dinamik Çalışması**
The Effect of Vacancy and Interstitial Defects on Mechanical Properties of Cu Nanowire: Study of Molecular Dynamics
Sefa KAZANÇ, Canan Aksu CANBAY 615-624
17. **Modül Yapay Sinir Ağları ile Doğrusal Olmayan Sistemlerin Denetimi**
Modular Neural Network Control of Nonlinear Systems
Şerafetdin BALOĞLU, Muammer GÖKBULUT 625-635
18. **Çinko Oksit Nanoparçacıkları Katkılı Polietersülfon Ultrafiltrasyon Membranlar**
Zinc Oxide Nanoparticle Blended Polyethersulfone Ultrafiltration Membranes
Evrım ÇELİK MADENLİ, Fulya ŞEN, Ahmet ERÇİN 637-645
19. **Buğday Ruşeym Yağı ile Doğal Vakslar Kullanılarak Üretilen Oleojellerin Fizikokimyasal Özellikleri**
Physicochemical Properties of Oleogels Made of Natural Wax with Wheat Germ Oil
Kübra CANPOLAT, Tuğça BİLENLER KOÇ, İhsan KARABULUT..... 647-656
20. **Koyunbaba Barajı'nın Hidrolojik Davranışının İncelenmesi**
Examination of Hydrological Behavior of Koyunbaba Dam
İsmail Ali MOHAMED, Eren YURDAKUL, Cihan DOĞRUÖZ 657-667
21. **Motor Yataklarında Meydana Gelen Arızaları Tespit Etmek için Yeni Bir Tek Boyutlu Konvolüsyonel Sinir Ağı Modeli**
A New One-Dimensional Convolutional Neural Network Model for Detecting Motor Bearing Failures
Merve ERTARĞIN, Özal YILDIRIM, Ahmet ORHAN 669-678
22. **Müşteri Duyarlılığını Keşfetmek İçin Yapay Zeka Destekli Analiz ile Çevrimiçi Ürün İncelemelerinden Anlamlı Bilgiler Elde Etme**
Mining Meaningful Insights from Online Product Reviews with AI-Powered Analytics to Discover Customer Sentiment
Özge CÖMERT, Nurcan YÜCEL 679-690
23. **Elektrikli Araç Teknolojisinde Kullanılan Kurşun Asit ve Li-iyon Bataryaların Galvanostatik Test Sonuçlarının Karşılaştırılması**
Comparison of Galvanostatic Test Results of Lead Acid and Li-ion Batteries Used in Electric Vehicle Technology
Esra BALCI, Gürkan GÜNDÜZ, Sebahat ALTUNDAĞ, Serdar ALTIN 691-697

24. Orman ve Tarım Atıklarından Sürdürülebilir Bitkisel Lifli Düşük Yoğunluklu Kompozit İzolasyon Levhası Üretimi <i>The Production of Sustainable Low Density Composite Insulation Boards with Vegetable Fibre from Forestry and Agricultural Wastes</i> Mehmet YAŞAR, Mustafa ALTUNOK	699-712
25. İzolatörlerde Buzlanmanın Yüzeysel Kaçak Akımlar Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi <i>Investigation of the Effect of Icing on Insulators on Surface Leakage Currents</i> Muhammed Buğracan ÖZKÜÇÜK, Muhsin Tunay GENÇOĞLU	713-723
26. Bir Boyutlu Evrişimsel Sinir Ağı Yardımıyla Faz Kilitleme Değeri ve Diferansiyel Entropi Özellikleri Kullanılarak EEG Sinyallerinde Duygu Tanınması <i>Emotion Recognition in EEG Signals Using Phase Lock Value and Differential Entropy Features with the Help of One-Dimensional Convolutional Neural Network</i> Hakan UYANIK, Salih Taha Alperen ÖZÇELİK, Abdulkadir ŞENGÜR	725-734
27. Tekrarlayıcı Sinir Ağları ile Mikropların Sınıflandırılması <i>Classification of Microbes with Recurrent Neural Networks</i> Talha Burak ALAKUŞ	735-743
28. Özel Blok Yapıları Kullanarak Tasarlanan Derin Öğrenme Mimarileri ile Alzheimer Hastalık Tespiti <i>Alzheimer's Disease Detection with Deep Learning Architectures Designed Using Special Block Structures</i> Eyup HANBAY, Ali ARI	745-752
29. Genetik Algoritma Temelli Yeni Bir Sentetik Veri Üretme Yaklaşımının Geliştirilmesi <i>Development of a New Synthetic Data Generation Approach Based on Genetic Algorithm</i> Fatma AKALIN	753-760
30. Akıllı Şehirler ve Trafik Güvenliği için Sürüş Kontrolü Uygulaması <i>Driving Control Application for Smart Cities and Traffic Safety</i> Yıldırım YİĞİT, Murat KARABATAK	761-770
31. Histopatolojik Görüntülerden Kolon Kanseri Tespiti için EfficientNetB0 ve DVM Tabanlı Yaklaşım <i>EfficientNetB0 and SVM Based Approach for Colon Cancer Recognition from Histopathological Images</i> Gaffari ÇELİK	771-781
32. Kırık Rotor Çubuğu Sayısının Ampirik Mod Ayrışımı ve Makine Öğrenmesi Yaklaşımları İle Belirlenmesi <i>Determination of The Number of Broken Rotor Bars by Empirical Mode Decomposition and Machine Learning Approaches</i> Fırat DİŞLİ, Mehmet GEDİKPINAR, Abdulkadir ŞENGÜR	783-795
33. Farklı Şiddetlerde Meydana Gelen Güneş Aktivitesinin GPS-PPP Doğruluğu Üzerindeki Etkisinin Bölgesel olarak Araştırılması <i>A Regional Investigation of the Effect of Solar Activity of Different Intensities on GPS-PPP Accuracy</i> Aziz SARAÇOĞLU	797-805
34. Sille'de Bulunan Tarihi Camilerin Harim Planlarına Tipolojik Bir Yaklaşım <i>A Typological Approach to the Harem Plans of the Historical Mosques in Sille</i> Fikret BADEMCİ	807-819
35. 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ Depreminin Jeomorfolojiye Yansımaları ve Karakaya Baraj Gölünde Oluşan Çizgisel Hatların Analizi <i>Reflections of the Sivrice-Elazığ Earthquake on 24th January 2020 on Geomorphology and Analysis of the Linear Lines in the Karakaya Dam Lake</i> Murat SUNKAR, Vedat AVCİ, Cevdet CANPOLAT	821-835

36. Ofislerde LED Tüp Retrofit Uygulamalarının Tekno-Ekonomik Analizi <i>Techno-Economic Analysis of LED Tube Retrofit Applications in Offices</i> Bilal CANOL, Alpaslan DEMİRCİ, Ramazan AYZAZ	837-846
37. Küçük İHA'lar İçin 3D Baskılı Şekil Değiştirebilir Kanat Tasarımı ve Testleri <i>Design and Tests of a 3D-printed Morphing Wing for Small UAVs</i> Fatma İlayda AYTAÇ, Ümit ÇELİK, Muhsin Tunay GENÇOĞLU	847-853
38. Derin Q Ağları Tabanlı Parçacık Sürü Optimizasyonu <i>Deep Q Networks Based Particle Swarm Optimization</i> Özlem TÜLEK, İhsan Hakan SELVİ	855-863
39. KOBİ'lerin Ekonomiye Sağladıkları Katkının Tahmini İçin Derin Öğrenme Tabanlı Model <i>Deep Learning Based Model for Predicting the Contribution of SMEs to the Economy</i> Anıl UTKU, Ali SEVİNÇ, M. Ali AKCAYOL	865-874
40. Doğal Dil İşleme Teknikleri Kullanarak E-Ticaret Kullanıcı İncelemelerinde Özellik Tabanlı Duygu Analizi <i>Aspect-Based Sentiment Analysis in E-Commerce User Reviews Using Natural Language Processing Techniques</i> Serpil ASLAN	875-882
41. Acı meyan bitkisinin çiçek, tohum ve yapraklarından ekstrakte edilen boyaların BDGP'lerin performansına etkisi <i>The effect of flower, seed and leaf extracts of Sophora alopecuroides plant on the performance of dye sensitive solar cells</i> Fehmi ASLAN	883-890
42. Simetrik ve Asimetrik Şifreleme Algoritmalarının Performans Karşılaştırılması <i>Performance Comparison of Symmetric and Asymmetric Encryption Algorithms</i> Alev KAYA, İbrahim TÜRKÖĞLU	891-900
43. Fotodiyot Dizi Boyutunun Görünür Işıklı Haberleşme (VLC) Performansına Etkileri <i>Effects of Photodiode Array Size on Visible Light Communication (VLC) Performance</i> Ramin ZOLFi, Yavuz EROL	901-910
44. Sol-Jel Yöntemiyle Sentezlenen Magnezyum Oksit ve Kadmiyum Oksit Nanoparçacıkların Yapısal ve Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi <i>Investigation of Structural and Morphological Properties of Magnesium Oxide and Cadmium Oxide Nanoparticles Synthesized by Sol-Gel Method</i> Cevher Kürşat MACİT, Cihan ÖZEL, Turan GÜRGENÇ	911-922
45. Asansör Kabininin Farklı Konumu İçin Kılavuz Raylarında Oluşan Gerilme Dağılımının Sonlu Elemanlar Metodu ile Analizi <i>Analysis of Stress Distribution Occurring in Guide Rails for Different Positions of Elevator Car by Finite Element Method</i> Cebeli ÖZEK, Emre SÜER	923-935

Komşuluk Bileşen Analizi Tabanlı Makine Öğrenimi Yöntemleri ile Obezite Seviyelerinin Tahmini

Çağla DANACI^{1,2*}, Derya AVCI³, Seda ARSLAN TUNCER⁴

¹ Yazılım Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Yazılım Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye

³ Yazılım Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

⁴ Yazılım Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*^{1,2} cdanaci@firat.edu.tr, ³ davci@firat.edu.tr, ⁴ satuncer@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 14/01/2023;

Kabul/Accepted: 01/04/2023)

Öz: Obezite, gelişmiş ülkelerde daha çok görülmekle birlikte gelişmekte olan ülkelerde de yaşam kalitelerini olumsuz yönde etkileyen bir hastalıktır. Obeziteyi tetikleyen birden çok etmen bulunmakla beraber bu etmenlerin en somut örneklerinden bazıları hareketsiz yaşam, dengesiz beslenme olarak sıralanabilir. Obezite, hastalar için farklı düzeylerde görülebilmektedir. Her düzey, tedavi aşamasında arz ettiği önem ile obezite tanısının erken aşamada belirlenme ihtiyacını doğurmaktadır. Bu doğrultuda uzmanlara karar aşamasında yardımcı olabilecek otonom bir sistem bu ihtiyaca destek niteliğinde tasarlanmıştır. Çalışmada obezite hastalarını, obezite düzeylerine göre sınıflandırabilmek amacıyla makine öğrenimi tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir. UCI makine öğrenimi deposundan 16 özelliğe sahip 2111 hasta verisi üzerinde Komşuluk Bileşen Analizi (KBA) yöntemi ile özellik seçimi yapılarak özellikler Aşırı Gradyan Artırma (XGBoost) ve Karar Ağacı algoritmaları ile sınıflandırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde özellik seçimi sonrası doğruluk oranlarında iki algoritma için de %1 artış gözlemlenmiştir. Sistemin amaca uygun olarak performans sergilemesi sebebiyle, obezite düzey tahmininde optimum özellik sayısı ile uzmanlara yardımcı bir çalışma olacağı öngörülmektedir.

Anahtar kelimeler: Obezite, Yapay Zekâ, Makine Öğrenmesi, Özellik Seçimi, Sağlık.

Prediction of Obesity Levels by Neighborhood Component Analysis Based Machine Learning Methods

Abstract: Although obesity is more common in developed countries, it is also a disease in developing countries that negatively affects people's quality of life. Although there are several factors that trigger obesity, some of the most concrete examples of these factors can be mentioned: sedentary lifestyle, unbalanced diet. Obesity can show up in patients at different levels. Each of these levels is important for treatment, so the diagnosis of obesity must be made early. With this in mind, an autonomous system was developed that can assist experts in decision making. In the study, a machine learning-based approach was proposed to classify obese patients according to their degree of obesity. Feature selection was made with Neighborhood Component Analysis (NCA) method on 2111 patient data with 16 features from UCI machine learning repository, and features were classified with Extreme Gradient Augmentation (XGBoost) and Decision Tree algorithms. When the results were examined, a 1% increase in accuracy rates was observed after feature selection for both algorithms. Since the system works according to the purpose, it is expected that a study will be conducted to help experts with the optimal number of features for predicting the degree of obesity.

Key words: Obesity, Artificial Intelligence, Machine Learning, Feature Selection, Health.

1. Giriş

Obezite, dünya genelinde beraberinde getirdiği etmenler ile insanların yaşam kalitesini negatif anlamda etkileyen bir sağlık sorunudur. Özellikle gelişmiş ülkelerde her yaştan ve cinsiyetten bireyleri önemli ölçüde etkileyen obezite, genç ve orta yaşlı bireylerde daha sık rastlanan bir hastalıktır [1]. Obezitenin etiyolojik yapısı tam olarak bilinmemekle birlikte gerçekleştirilen araştırmalara göre vücut kitle indeksinin 30 kg/m² üzerinde olması obezitenin temelini oluşturmaktadır [2]. Obezite oluşumunu etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunların başında yüksek kalori alımı, hareketsiz yaşam, sağlıksız yiyecek-ışecek tüketimi gibi somut faktörlerin yanı sıra psikolojik faktörler de obeziteyi tetiklemektedir. Tüm bu faktörlerin yol açtığı aşırı kilo alımıyla birlikte obezite riskinin artması, obezite tanısının ve kontrolünün erken aşamada belirlenmesi ihtiyacını doğurmaktadır

* Sorumlu yazar: cdanaci@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ^{1,2} 0000-0003-2414-1310, ³ 0000-0002-5204-0501, ⁴ 0000-0001-6472-8306

[3]. Teknoloji bu tür ihtiyaçların giderilmesi için günümüzde en sık başvurulan yöntemlerden biridir. Teknolojinin gösterdiği hızlı gelişim insan yaşamına yön vermekle beraber birçok farklı alanı içinde barındırarak problemlere çözüm üretmektedir. Teknoloji alt dallarından biri olan yapay zekâ en sık karşımıza çıkan kavramlardan biridir.

Yapay zekâ insana ait öğrenme yapısından esinlenerek, beynin eldeki bilgiden bir probleme yönelik çözüm üretme, karar verebilme yeteneğini kullanan sistemler olarak tanımlanabilir [4]. Sahip olduğu makine öğrenmesi, derin öğrenme, uzman sistemler, doğal dil işleme gibi alt dallar ile birçok farklı alanda faaliyet gösteren yapay zekânın en etkin kullanıldığı alanlardan biri sağlıktır [5]. Sağlık alanında teşhis ve tedavi aşamalarında uzman kararına başvurulmakla beraber, uzman kararını destekleyecek, iş gücü açısından maksimum fayda sağlayacak, zaman kavramını minimuma indirgeyecek bir destek sistemi yapay zekâ teknolojileri ile sağlanmaktadır [6,7]. Obezite açısından incelendiğinde ise yapay zekâ obezite teşhisi, kilo kontrolü, ilaç kullanımı vb. alanlarda uzmanlara yardımcı olmaktadır. Literatür incelendiğinde yapay zekâ yöntemleri ile obezite teşhisi, obezite seviyesi belirleme gibi birçok alanda gerçekleştirilen çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları şu şekildedir:

Cervantes ve Palacio makine öğrenimi yöntemleriyle obezite seviyelerini belirlemek için Kolombiya, Meksika ve Peru ülkelerinden 18-25 yaş arası, 81 erkek ve 97 kadın toplamda 178 öğrenciyi çalışmaya dâhil etmişlerdir. Algoritmaları verilere uygulayabilmek adına WEKA aracını kullanarak Karar Ağacı algoritması ve Destek Vektör Makineleri (DVM) ile sınıflandırma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Performans değerlendirme aşamasında Kesinlik, Gerçek Pozitif Oranı, Yanlış Pozitif Oranı ve Roc Alanı metriklerini kullanarak algoritma performanslarını değerlendirmişlerdir. Son adımda her sınıflandırma algoritmasının sonucunu, kümeleme algoritması ile birleştirerek K-Means tekniğine dayalı bir akıllı sistem elde etmişlerdir. K-Means yöntemi ile obezite seviyelerini dört kümeye ayırarak küme bazlı Karar Ağaçlarını kullanarak yeniden sınıflandırma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma sonucunda oluşturdukları K-Means + Karar Ağaçları yapısı ile %99.5 Roc Alanı değerini elde etmişlerdir. Elde ettikleri akıllı sistemin sonuçlarına paralel olarak bu sistemin farklı hastalıkların da incelenmesinde öncü olabileceğini belirtmişlerdir [8].

Ferdowsy ve arkadaşları obezite riskini tahmin edebilmek için makine öğrenimi temelli bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışmaya farklı yaşlardan 1100'den fazla hasta verilerini dâhil etmişlerdir. Toplamda 9 farklı makine öğrenimi algoritması (K-En Yakın Komşu (KNN), Rastgele Orman, Lojistik Regresyon (LR), Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA), DVM, Naive Bayes, AdaBoost, Karar Ağaçları ve Gradyan Artırma) ile tahmin işlemini gerçekleştirerek algoritmaların performanslarını karşılıklı olarak inceleyip en iyi modele karar vermişlerdir. Çalışma sonucunda en iyi performansı %97.07 doğruluk oranıyla Lojistik Regresyon (LR) ile elde ederken çözmeye çalıştıkları problem için en düşük başarıma sahip algoritmanın %64.08 ile Gradyan Artırma algoritması olduğunu belirtmişlerdir [9].

Cui ve arkadaşları UCI makine öğrenimi deposundan aldıkları obetize düzeylerini içeren açık erişim veri setini kullanarak makine öğrenimi yöntemleri ile obezite tahmini gerçekleştirmişlerdir. İlk adımda veri içerisinde birden fazla obetize seviyesi bulunduğu için bu seviyeleri iki grupta birleştirerek 1 ve 0 etiketlerini atamışlardır. Daha sonra özellikler arasındaki korelasyonu belirleyebilmek için özelliklere ait ısı haritasını inceleyerek bazı özellikleri veri içerisinden çıkarmışlardır. Elde edilen son veriyi LR, DVM, KNN, Karar Ağaçları, XGBoost, LightGBM sınıflandırıcılarına vererek algoritma performanslarını değerlendirmişlerdir. Algoritma performanslarını karşılıklı olarak incelemiş ve XGBoost algoritması ile %85.99 oranında doğruluk elde ederek en iyi sonuca ulaştıklarını ifade etmişlerdir [10].

Estren ve arkadaşları farklı ülkelerde bulunan üniversite öğrencilerine yönelik gerçekleştirilen ankete dayalı olarak oluşturulan veri setini kullanarak obezite düzeylerini tahminlemeyi amaçlamışlardır. Veri üzerinde ilk olarak veri temizleme ve dönüştürme işlemlerini uyguladıktan sonra InfoGain, GainRatio, Ki-Kare ve Relief özellik seçim yöntemlerini kullanarak özellik seçme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Seçilen özellikleri Rastgele Orman (RO), ÇKA, DVM ve Lojistik Model Ağacı (LMA) algoritmalarına vererek sınıflandırma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Sırasıyla RO (%95.62), ÇKA (%94.41), DVM (%83.89) ve LMA (%96.65) hassasiyet oranlarını elde ederek bu problem için en iyi çözümü gösterdiği yüksek performans sayesinde LMA algoritmasının sunduğunu belirlemişlerdir [11].

Quiroz hastaların yaşam tarzına bağlı olarak obezite seviyelerini belirlemek için makine öğrenimi tabanlı bir yaklaşım önermiştir. Çalışmaya Kolombiya, Meksika ve Peru ülkelerinden toplamda 2111 hasta verisini dâhil etmiştir. Obezite seviyelerini belirlemek için Hafif Gradyan Artırma, Rastgele Orman, Karar Ağacı ve LR algoritmalarını kullanmıştır. Sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirdiğinde %99 ile en yüksek doğruluk değerini Hafif Gradyan Artırma algoritması ile elde edildiğini belirtmiştir [12].

Alqahtani ve arkadaşları UCI makine öğrenimi deposundan aldıkları obezite seviyelerini içeren veri setini kullanarak makine öğrenimi yöntemleri ile obezite seviyelerini tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Verileri NObesity kullanarak Aşırı Kilolu I-II, Yetersiz Kilo, Normal Kilo ve Obezite Tip I-III olarak etiketleyerek kategorilere

ayırımıdır. Makine öğrenimi aşamasında Rastgele Orman ve ÇKA kullanarak sınıflandırma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda Rastgele Orman algoritması ile %96.7 oranında doğruluk oranına ulaşarak çalışmanın amacına ulaştığını belirtmişlerdir [13].

Pang ve arkadaşları 2 yaşına kadar olan hastalara ait Elektronik Sağlık Kaydı (ESK) verilerini kullanarak > 2 ile ≤ 7 yaş arasındaki çocukluk obezitesini tahmin etmek için yedi farklı makine öğrenimi algoritması kullanmışlardır. Çalışmaya Philadelphia Çocuk Hastanesi'nden 11.194.579 sağlık hizmeti başvurusu olan 860.510 hastanın ESK verilerini dâhil ederek Karar Ağacı, Gaussian Naive Bayes, Bernoulli Naive Bayes, LR, Yapay Sinir Ağları, DVM ve XGBoost algoritmaları ile tahminleme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Algoritmalara ait performans değerlerini karşılaştırmalı olarak inceleyerek en iyi performansı, 0.81 AUC değeri ile ederek sunulan modelin diğer ESK çalışmaları için uyarlanabilir olabileceğini belirtmişlerdir [14].

Bu çalışma, UCI makine öğrenimi deposundan [15] elde edilen yaşları 14 ile 61 arasında değişiklik gösteren toplamda 2111 hastaya ait obezite seviyelerini içeren veri setini kullanarak makine öğrenimi yöntemleri ile obezite seviyesini belirlemeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında belirlenen amaca ek olarak optimum parametre ile daha yüksek sınıflandırma başarısı elde etmek için karara etki eden parametrelerin önem seviyeleri, KBA özellik seçme yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Makine öğrenimi aşamasında Karar Ağaçları ve XGBoost algoritmalarını kullanarak özellik seçme yönteminin performansı, performans değerlendirme metrikleri ile değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın ikinci bölümünde kullanılan veri setine ve yöntemlere, üçüncü bölümde bulgular ve tartışmaya, dördüncü bölümde ise sonuçlar başlığında yer verilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Veri seti

Çalışmaya UCI makine öğrenimi deposundan [15] Meksika, Peru ve Kolombiya ülkelerinde bulunan farklı fiziksel durumlara ve çeşitli yeme alışkanlıklarına sahip 14-61 yaş arası bireylere ait toplamda 16 özellikten oluşan 2111 veri dâhil edilmiştir. Veri kümesi, bir web platformu üzerinden kimliği belli olmayan kullanıcıların yöneltilen soruları yanıtladığı bir anket aracılığı ile toplanmıştır. Anket verileri üzerinde veri dengeleme işlemi gerçekleştirilerek nihai veri seti elde edilmiştir [16]. Elde edilen verilere ait tanımlayıcı bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Veriye ait tanımlayıcı bilgiler

Parametre Kategorisi	Parametre	Parametre Açıklaması
Fiziksel Özellikler	Gender	Katılımcı Cinsiyeti
	Age	Katılımcı Yaşı
	Height	Katılımcı Boyu
	Weight	Katılımcı Kilosu
	Family_history_overweight	Katılımcı Aile Fazla Kilo Öyküsü
Yeme-İçme ve Zararlı Alışkanlıklar	FAVC	Yüksek Kalorili Gıda Tüketimi
	FCVC	Sebze Tüketim Sıklığı
	NCP	Ara Öğün Yeme Sayısı
	CAEC	Öğünler Arası Yeme Sıklığı
	CH20	Günlük Su Tüketimi
	CALC	Alkol Tüketimi
	SMOKE	Sigara Tüketimi
Fiziksel Aktiviteler	SCC	Kalori Tüketimi
	FAF	Fiziksel Aktivite Sıklığı
	TUE	Teknolojik Cihaz Kullanma Süresi
	MTRANS	Kullanılan Ulaşım Türü

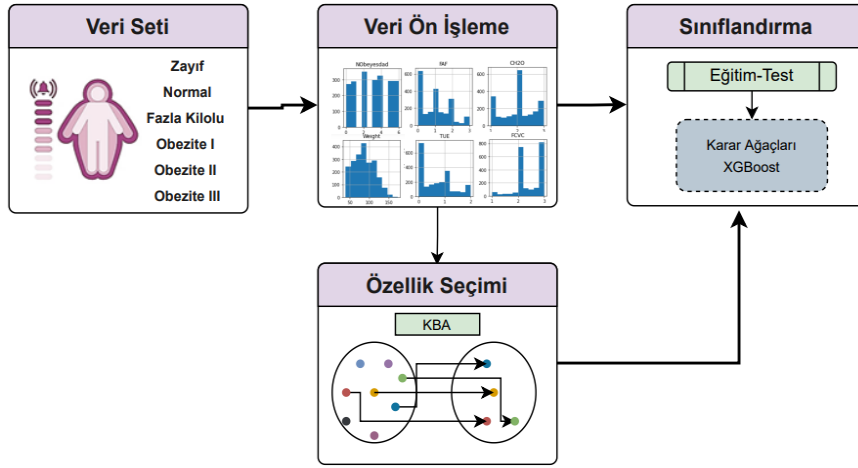
Tablo 1'de bulunan boy ve kilo değişkenlerine ait değerler kullanılarak vücut kitle endeksi hesaplanmış ve veri etiketleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Veri etiketleri ve etikete göre vücut kitle endeksleri incelendiğinde;

- Zayıf etiketi için Vücut Kitle Endeksi ≤ 18.5
- Normal etiketi için $18.5 \leq$ Vücut Kitle Endeksi ≤ 24.9

- Fazla Kilolu etiketi için $25 \leq \text{Vücut Kitle Endeksi} \leq 29.9$
- Obezite I etiketi için $30 \leq \text{Vücut Kitle Endeksi} \leq 34.9$
- Obezite II etiketi için $35 \leq \text{Vücut Kitle Endeksi} \leq 39.9$
- Obezite III etiketi için $\text{Vücut Kitle Endeksi} \geq 40$ olarak belirlenmiştir [16].

2.2. Metot

Çalışma, makine öğrenimi yöntemlerini kullanarak UCI makine öğrenimi deposundan elde edilen ve anket verilerinden oluşan veri kümesi ile obezite seviyelerini tahmin etmeyi amaçlamıştır. İlk adımda veriye ait çeşitli tanımlayıcı istatistikler incelenerek gerekli ön işlem adımları belirlenmiş ve ön işleme adımından sonra elde edilen kullanılmaya hazır veriler sınıflandırıcılara verilerek algoritma performansları incelenmiştir. Elde edilen anlamlı sonuçlar doğrultusunda sınıflandırma algoritmalarının performansını optimum parametre sayısı ile iyileştirerek hesaplama, zaman ve iş gücü maliyetlerini minimuma indirmek hedeflenmiştir. Hedef doğrultusunda KBA özellik seçim yöntemi kullanılarak 16 özelliğten oluşan veri kümesi 5 özelliğe indirgenerek optimum parametre sayısı belirlenmiştir. Belirlenen yeni parametreler ile sınıflandırma işlemi yeniden gerçekleştirilerek özellik seçim yöntemlerinin performansları değerlendirilmiştir. Şekil 1’de gerçekleştirilen çalışmaya ait süreç tasarımı verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma süreç tasarımı

2.2.1. Veri ön işleme

Çalışma kapsamında UCI makine öğrenimi deposundan [15] elde edilen verileri sınıflandırma aşamasında hazır duruma getirebilmek için veri ön işleme adımları uygulanmıştır. İlk olarak veri içerisinde boş veri olup olmadığı analiz edildiğinde, boş verilerin varlığı gözlemlenmemiştir. Bir sonraki adımda veriye ait betimleyici istatistikler ve dağılım grafikleri incelenerek veri üzerinde uygulanabilecek gerekli işlemler belirlenmiştir. İncelemeler sonucunda weight parametresinin diğer özelliklere kıyasla sapma değerinin yüksek olduğu ve bu duruma paralel olarak normale yakın bir dağılıma sahip olmadığı belirlenmiştir. Mevcut parametre istatistikleri ve dağılımı göz önünde bulundurularak weight parametresi için normal dağılımdan uzak olan verileri, normal dağılım formuna yaklaştırabilmek için kullanılan box-cox dönüşümü uygulanmıştır [17]. Ön işlem adımları tamamlandıktan sonra kullanılmaya hazır hale getirilen veri için sırasıyla “sınıflandırma” ve “özellik seçimi sonrası sınıflandırma” adımları değerlendirilmiştir.

2.2.2. Özellik seçimi

Özellik seçimi çok özellikli veri setlerinde, en iyi özelliklerin seçilerek optimum parametre sayısının elde edilmesi olarak tanımlanabilir. Özellik seçiminin temel amacı model performansını artırmak, zaman ve iş maliyetlerinden tasarruf sağlamaktır [18]. Özellik seçimi içerisinde birden çok yöntem barındırmaktadır. Bu

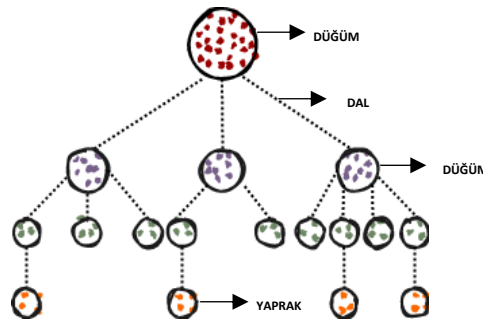
yöntemlerden biri makine öğrenimi uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan denetimli bir mekanizmaya sahip olan KBA yöntemidir [19]. KBA özellik seçim yönteminde özellik seçimi gerçekleştirilirken veri içerisinde herhangi bir bilgi kaybı gerçekleşmez. KBA yöntemi özellik etkisini belirleyebilmek için mesafe ölçüm metriklerini ele alır. Bu yöntem ile pozitif ağırlıklar elde edilirken ağırlıklar özelliklerin belirlenmesindeki en önemli unsurdur. Daha düşük ağırlıklar daha az önemli özellikleri temsil ederken, yüksek ağırlıklar önem seviyesi yüksek özellikleri temsil etmektedir [20]. Bu çalışmada KBA özellik seçim yöntemi kullanılarak her özellik için bir ağırlık değeri atanmış ve sonrasında bu ağırlıklara paralel olarak özellikler önem seviyesine göre sıralanmıştır. Sonraki adımda sınıflandırma algoritmalarına minimum özellik sayısı ile başlanarak verilen özelliklerin en iyi performansı 5 özellik ile sağladığı gözlemlenerek optimum parametre sayısı 5 olarak belirlenmiştir.

2.2.3. Sınıflandırma

Sınıflandırma makine öğreniminin temel alt dallarından biridir. Sınıflandırma işlemi gerçekleştirilebilmek için birçok algoritma bulunmaktadır. Bu çalışmada XGBoost ve Karar Ağacı algoritmaları kullanılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak veriler %70 eğitim ve %30 test verisi olarak kullanılmak için ayrıştırıldıktan sonra, eğitim verileri ile model eğitimi sağlanmıştır. Elde edilen anlamlı sonuç doğrultusunda test verileri ile model performansı çeşitli metrikler kullanılarak değerlendirilmiştir.

XGBoost, denetimli öğrenme modelleri için yüksek performans sağlayan algoritmalarından biridir. Sınıflandırma ve regresyon problemleri için uyarlanabilir olan bu yöntem sağladığı yüksek çalışma hızı ve kontrollü mekanizması sayesinde sıklıkla tercih edilmektedir [21]. XGBoost yöntemi, aşırı uyum sorununun önüne geçerek model doğruluğunu artırmaya yönelik tasarlanmış bir algoritmadır. Uygun parametre ayarı XGBoost sınıflandırıcısının performansını etkileyen en önemli etmenlerden biridir [22]. Bu çalışmada her algoritma için uygun parametreler otomatikleştirilmiş hiper parametre optimizasyon yöntemlerinden biri olan OPTUNA yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. XGBoost algoritması için belirlenen hiper parametreler öğrenme katsayısı 0.38, maksimum derinlik 72, ağaç sayısı 45, alt örneklem 1 olarak belirlenmiştir.

Karar ağaçları, makine öğrenimi uygulamalarında sıklıkla başvurulan ağaç tabanlı ardışık bir model yapısına sahip olan algoritmadır. Karar ağaçları ana düğümler, dallar ve yapraklardan oluşmaktadır. Düğümler karar ağaçlarında özelliklerin temsilini sağlarken, dallar sorulara ait cevapları, yapraklar ise sınıf etiketlerini temsil etmektedir [23]. Anlaşılabilir ve basit yapısı sebebiyle karar ağaçları farklı uygulama alanlarında sıklıkla tercih edilmektedir. Çalışma kapsamında karar ağacı hiper parametreleri sırasıyla; maksimum derinlik 7, öğrenme katsayısı 0.5 ve minimum örnek bölünme sayısı 3 olarak belirlenmiştir. Şekil 2'de karar ağacına ait örnek bir yapı verilmiştir.



Şekil 2. Karar ağacı örnek yapı

Çalışmada sınıflandırma algoritmalarının performanslarını değerlendirmek için doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F1-skor metrikleri kullanılmıştır. Performans değerlendirme metrikleri hesaplanırken karmaşıklık matrisi baz alınmıştır. Karmaşıklık matrisine göre;

Doğru Pozitif (DP): Obezite olup Obezite olarak tanımlanmış hasta sayısı.

Yanlış Pozitif (YP): Obezite olup Obezite değil olarak tanımlanmış hasta sayısı.

Doğru Negatif (DN): Obezite değil olup Obezite değil olarak tanımlanmış hasta sayısı.

Yanlış Negatif (YN): Obezite değil olup Obezite olarak tanımlanmış hasta sayısını ifade etmektedir.

Yukarıda verilen tanımlamalara göre performans değerlendirme metriklerine ait hesaplama formülleri aşağıda verilmiştir [17].

$$\text{Doğruluk} = (DN + DP)/(DN + DP + YP + YN) \quad (1)$$

$$\text{Duyarluluk} = DP/(DP + YN) \quad (2)$$

$$\text{Kesinlik} = DP/(DP + YP) \quad (3)$$

$$\text{F1 - Skor} = (2 \times \text{Duyarluluk} \times \text{Kesinlik})/(\text{Duyarluluk} + \text{Kesinlik}) \quad (4)$$

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma, UCI veri deposundan elde edilen ve açık kaynak olarak erişim sağlanabilen obezite hastalarına ait verileri kullanarak makine öğrenimi yöntemleri ile optimum özellik kullanarak obezite seviyelerini yüksek doğruluk ile tahmin etme yaklaşımına dayanarak gerçekleştirilmiştir. Toplamda 16 özellikten oluşan veri seti çalışmaya dâhil edilerek özellik seçim işlemi ile özellik sayısı 5'e indirgenmiştir. Özellik seçim işlemi ve sonrası Karar Ağacı ve XGBoost algoritmalarının performansları karşılıklı olarak incelenerek doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F1-Skor metrikleri ile değerlendirilmiştir. Çalışmaya ait sınıflandırıcıların özellik seçim işleminden önceki performans metrikleri Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 2. Özellik seçim işlemi öncesi sınıflandırma performansları

Sınıflar	Kesinlik (%)		Duyarluluk (%)		F1-Skor (%)	
	XGBoost	Karar Ağacı	XGBoost	Karar Ağacı	XGBoost	Karar Ağacı
Insufficient Weight	93	95	97	95	95	95
Normal Weight	96	86	91	74	93	80
Obesity Type_I	97	90	95	91	96	90
Obesity Type_II	98	97	99	97	98	97
Obesity Type_III	100	100	99	100	99	100
Overweight Level_I	92	69	97	86	94	77
Overweight Level_II	97	88	96	81	97	84

Tablo 3. Özellik seçim işlemi öncesi ortalama sınıflandırma performansları

Algoritmalar	Ortalama Kesinlik (%)	Ortalama Duyarluluk (%)	Ortalama F1-Skor (%)	Ortalama Doğruluk (%)
XGBoost	96	96	96	96
Karar Ağacı	90	89	89	89

Tablo 2 incelendiğinde elde edilen anlamlı sonuçlar doğrultusunda çalışmanın ilk adımı olan sınıflandırma işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Her obezite seviye sınıfı için ayrı değerlendirilme gerçekleştirildiğinde en iyi tahmin edilme oranına sahip olan sınıfın Obesity_Type_III sınıfı olduğu, diğer sınıflara kıyasla daha düşük oranla tahmin edilen sınıfın ise Overweight_Level_I sınıfı olduğu belirlenmiştir. Veri seti incelendiğinde bu farkın sınıf etiketlerinin veride bulunma sayısından kaynaklandığı belirlenmiştir. Tablo 3'te verilen ortalama doğruluk metriği incelendiğinde XGBoost algoritmasının %96 oran ile %89 doğruluk oranına sahip Karar Ağacı algoritmasından daha yüksek performans sergilediği gözlemlenmiştir. Sınıflandırma işleminden sonra KBA ile özellik seçimi gerçekleştirilerek çalışmaya pozitif performans yönünden en çok etki eden özellikler, sırasıyla önem seviyelerine göre "Height", "Weight", "Gender", "Age" ve "CALC" olarak belirlenmiştir. KBA yöntemi ile seçilen 5 özellik tekrar sınıflandırma işlemine tabi tutularak algoritma performansları karşılıklı olarak incelenmiştir. Özellik seçim işlemi sonrası algoritma performansları Tablo 4 ve Tablo 5'te verilmiştir.

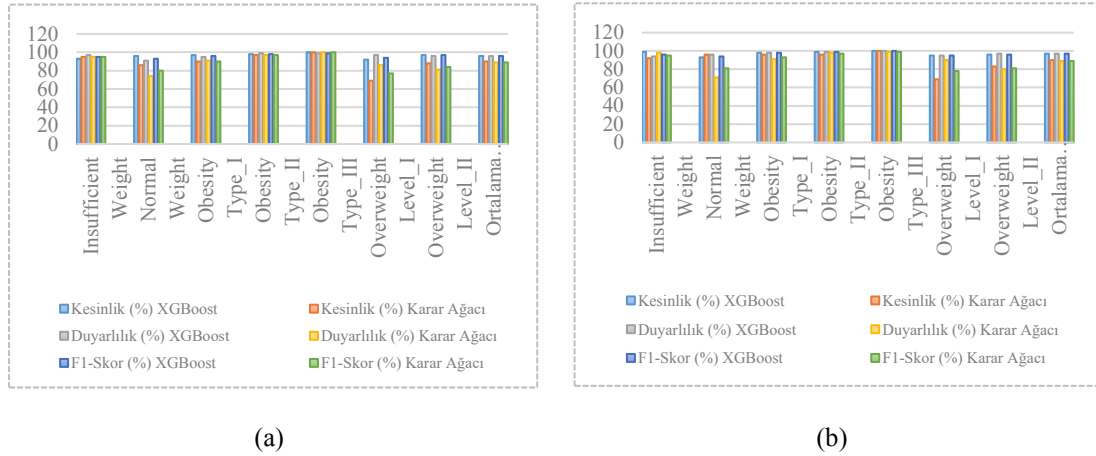
Tablo 4. Özellik seçim işlemi sonrası sınıflandırma performansları

Sınıflar	Kesinlik (%)		Duyarlılık (%)		F1-Skor (%)	
	XGBoost	Karar Ağacı	XGBoost	Karar Ağacı	XGBoost	Karar Ağacı
Insufficient Weight	99	92	94	98	96	95
Normal Weight	93	96	96	71	94	81
Obesity Type_I	98	96	98	91	98	93
Obesity Type_II	99	96	99	98	99	97
Obesity Type_III	100	100	100	99	100	99
Overweight Level_I	95	69	95	90	95	78
Overweight Level_II	96	83	97	80	96	81

Tablo 5. Özellik seçim işlemi öncesi ortalama sınıflandırma performansları

Algoritmalar	Ortalama Kesinlik (%)	Ortalama Duyarlılık (%)	Ortalama F1-Skor (%)	Ortalama Doğruluk (%)
XGBoost	97	97	97	98
Karar Ağacı	90	89	89	90

Tablo 4 incelendiğinde özellik seçim işlemi sonrası performans metriklerinin oranlarında artış olduğu görülmektedir. Her iki algoritma için Tablo 5’te verilen ortalama doğruluk oranlarına bakıldığında XGBoost algoritması için %98, Karar Ağacı algoritması için %90 değerlerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Özellik seçim işlemi öncesi bu oranlar her iki algoritma içinde minimum %1 oranında daha düşük olmakla beraber optimum özellik sayısı ile daha yüksek doğruluk elde edilebileceği kanıtlanmıştır. Özellik seçim işlemi öncesi ve sonrası algoritma performanslarına ait grafikler anlaşılabilirliği artırmak amacıyla Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. (a) özellik seçimi öncesi algoritma performansları (b) özellik seçimi sonrası algoritma performansları

Şekil 3 ve tablolar birlikte incelendiğinde deneysel sonuçlar sonunda oluşan performans değerlerinin çalışma amacını destekler nitelikte olduğu görülmektedir. Özellik seçim işlemi sonrası en yüksek performansı gösteren XGBoost algoritması için elde edilen karmaşıklık matrisi Şekil 4’te verilmiştir.

	Insufficient_Weight	Normal_Weight	Obesity_Type_I	Obesity_Type_II	Obesity_Type_III	Overweight_Level_I	Overweight_Level_II
Insufficient_Weight	80	5	0	0	0	0	0
Normal_Weight	1	88	0	0	0	2	1
Obesity_Type_I	0	0	86	1	0	0	1
Obesity_Type_II	0	0	1	97	0	0	0
Obesity_Type_III	0	0	0	0	97	0	0
Overweight_Level_I	0	2	0	0	0	77	2
Overweight_Level_II	0	0	1	0	0	2	90

Şekil 4. XGBoost Algoritması için Karmaşıklık Matrisi

Önerilen çalışmada, UCI açık erişim makine öğrenimi deposundan elde edilen veriler kullanılarak özellik seçimi tabanlı makine öğrenimi modelleri ile doğru bir şekilde obezite seviyelerini sınıflandırmak amaçlanmıştır. Kullanılan sınıflandırma algoritmaları özellik seçim işleminden önce ve sonra olmak üzere performans metrikleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde optimum özellik sayısı ile daha yüksek performans hedefine ulaşıldığı görülmüştür. Uzmanlara karar verme adımı destek olacak bu sistemin daha az özellik kullanımı sayesinde iş gücü, çalışma ve hesaplama maliyeti açısından tasarruf sağlayacağı öngörülmektedir. Çalışma giriş bölümünde verilen literatür özetinde, gerçekleştirilen obezite çalışmaları ile karşılıklı olarak incelendiğinde bu alana yönelik yapay zekâ tabanlı birden fazla çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Literatürde Gerçekleştirilen Çalışmalar

Referans	Yıl	Veri Seti	Algoritmalar	Özellik Seçimi	En İyi Sonuçlar (Doğruluk)
Cui ve diğerleri [7]	2021	UCI Makine Öğrenimi Deposu-2111 Obezite Verisi	LR, XGBoost, KNN, Karar Ağaçları, LightGBM	Isı Haritası	XGBoost- %85.99
Quiroz ve diğerleri [9]	2022	UCI Makine Öğrenimi Deposu-2111 Obezite Verisi	Hafif Gradyan Artırma, Rastgele Orman, Karar Ağacı, LR	-	Hafif Gradyan Artırma- %99
Alqahtani ve diğerleri [10]	2021	UCI Makine Öğrenimi Deposu-2111 Obezite Verisi	Rastgele Orman, Çok Katmanlı Algılayıcılar	-	Rastgele Orman- %96.7
Çelik ve diğerleri [24]	2021	UCI Makine Öğrenimi Deposu-2111 Obezite Verisi	Karar Ağacı, Yapay Sinir Ağları, DVM	Geriye Dönük Özellik Eleme	Cubic SVM- %97.8
Zheng ve diğerleri [25]	2017	Gençlik Riskli Davranış İzleme Sistemi Açık Erişim Veri Seti	Karar Ağacı, Yapay Sinir Ağları, KNN	-	KNN- %88.82
Önerilen Çalışma	2022	UCI Makine Öğrenimi Deposu-2111 Obezite Verisi	XGBoost, Karar Ağacı	KBA	Tüm Veri- XGBoost- %96 Seçilen Özellikler- XGBoost- %98

Tablo 6’da verilen çalışmalara göre özellik seçimi gerçekleştirilerek yapılan çalışmaların doğruluk oranlarının yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Fakat gerçekleştirilen mevcut çalışma ile karşılaştırmalı olarak incelendiğinde çalışmada kullanılan özellik seçim yönteminin daha önce aynı veri seti üzerinde hiç uygulanmadığı belirlenmiştir. Kullanılan özellik seçim yöntemi ile elde edilen verilerin algoritma performanslarına olumlu yönde

etki ettiği ve doğruluk oranının diğer çalışmalara kıyasla daha yüksek olması gerçekleştirilen çalışmayı değerli kılmaktadır.

4. Sonuçlar

Obezite çocuk, genç ve erişkin bireylerde günümüzde en sık rastlanan sağlık sorunlarından biridir. Obezite bir sağlık sorunu olmakla beraber, yol açtığı diyabet, kalp rahatsızlıkları vb. hastalıklarda bulunmaktadır. Bu aşamada obezitenin erken seviyede önlenmesi yaşam kalitesinin artması yönünde olumlu etki yaratmaktadır. Obezite her birey için farklı seviyelerde seyredilebilen bir hastalık olması sebebiyle obezite seviyelerinin belirlenerek kişilere özel tedavilerin uygulanması önem arz etmektedir.

Bu çalışmada obezite hastalarına ait açık erişim verileri kullanarak obezite seviyelerini özellik seçimi tabanlı makine öğrenimi algoritmalarıyla sınıflandırıp optimum özellik sayısı ile yüksek performans elde etmek hedeflenmiştir. Hedefe yönelik olarak özellik seçim aşamasında KBA yöntemi kullanılarak algoritma performansına en çok etki eden beş parametre "Height", "Weight", "Gender", "Age" ve "CALC" olarak belirlenmiştir. Elde edilen özellikler sınıflandırma algoritmalarına verilerek özellik seçim işlemi öncesi XGBoost algoritması için %96, Karar Ağacı algoritması için %89 doğruluk değerlerine ulaşıırken, özellik seçim işlemi sonrası XGBoost algoritması için %98, Karar Ağacı algoritması için %90 doğruluk değerleri elde edilerek başlangıç hedefine doğru bir şekilde ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Literatürde obezite seviyelerinin özellik seçim tabanlı makine öğrenimi modelleri ile sınıflandırılmasına yönelik çalışmaların az sayıda olması çalışmayı özgün kılmakla beraber optimum sayıda özellik ile hastalık tahmini için gerçekleştirilebilecek diğer çalışmalara ışık tutması beklenmektedir.

Kaynaklar

- [1] Sipahi, B. B. (2021). Türkiye’de obezite üzerine sosyoekonomik faktörlerin etkisi ve gelir eşitsizliği. Ankara Üniversitesi SBF Dergisi, 76(2), 547-573.
- [2] Parmaksız, H. (2007). Yetişkin obezlerde fiziksel aktivite seviyesinin belirlenmesi (Doctoral dissertation, DEÜ Sağlık Bilimleri Enstitüsü).
- [3] Quiroz, J. P. S. (2022). Estimation of obesity levels based on dietary habits and condition physical using computational intelligence. Informatics in Medicine Unlocked, 29, 100901.
- [4] PİRİM, A. G. H. (2006). Yapay zekâ. Yaşar Üniversitesi E-Dergisi, 1(1), 81-93.
- [5] Arıkan, M., Yapay zeka nedir? Yapay Zekâ Uygulama Alanları Nelerdir?. <https://www.mediaclick.com.tr/tr/blog/yapay-zeka-nedir>. Erişim Tarihi: 25.12.2022
- [6] Büyükgöze, S., & Dereli, E. (2019). Dijital sağlık uygulamalarında yapay zekâ. VI. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi-Fen ve Sağlık, 7(10).
- [7] İŞLER, B., & KILIÇ, M. (2021). EĞİTİMDE YAPAY ZEKÂ KULLANIMI VE GELİŞİMİ. Yeni Medya Elektronik Dergisi, 5(1), 1-11.
- [8] Cervantes, R. C., & Palacio, U. M. (2020). Estimation of obesity levels based on computational intelligence. Informatics in Medicine Unlocked, 21, 100472.
- [9] Ferdowsy, F., Rahi, K. S. A., Jabiullah, M. I., & Habib, M. T. (2021). A machine learning approach for obesity risk prediction. Current Research in Behavioral Sciences, 2, 100053.
- [10] Cui, T., Chen, Y., Wang, J., Deng, H., & Huang, Y. (2021, May). Estimation of Obesity Levels Based on Decision Trees. In 2021 International Symposium on Artificial Intelligence and its Application on Media (ISAIAM) (pp. 160-165). IEEE.
- [11] Molina Estren, D., De la Hoz Manotas, A. K., & Mendoza Palechor, F. (2021). Classification and features selection method for obesity level prediction.
- [12] Quiroz, J. P. S. (2022). Estimation of obesity levels based on dietary habits and condition physical using computational intelligence. Informatics in Medicine Unlocked, 29, 100901.
- [13] Alqahtani, A., Albuainin, F., Alrayes, R., muhanna, N. A., Alyahyan, E., & Aldahasi, E. (2021). Obesity Level Prediction Based on Data Mining Techniques. International Journal of Computer Science and Network Security, 21(3), 103–111. doi: <https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2021.21.3.14>
- [14] Pang, X., Forrest, C. B., Lê-Scherban, F., & Masino, A. J. (2021). Prediction of early childhood obesity with machine learning and electronic health record data. International journal of medical informatics, 150, 104454.
- [15] <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Estimation+of+obesity+levels+based+on+eating+habits+and+physical+condition>. Erişim Tarihi: 25.12.2022
- [16] Palechor, F. M., & de la Hoz Manotas, A. (2019). Dataset for estimation of obesity levels based on eating habits and physical condition in individuals from Colombia, Peru and Mexico. Data in brief, 25, 104344.

- [17] Danacı, Ç. (2022). Covid-19 Tanısında Biyokimya Parametre Baskınlığının Makine Öğrenimi Yöntemleri Kullanılarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [18] Budak, H. (2018). Özellik Seçim Yöntemleri ve Yeni Bir Yaklaşım. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22(Özel), 21. doi: <https://doi.org/10.19113/sdufbed.01653>
- [19] Koc, M., Sut, S. K., Serhatlioglu, I., Baygin, M., & Tuncer, T. (2022). Automatic prostate cancer detection model based on ensemble VGGNet feature generation and NCA feature selection using magnetic resonance images. *Multimedia Tools and Applications*, 81(5), 7125-7144.
- [20] Tuncer, T., Dogan, S., Pławiak, P., & Acharya, U. R. (2019). Automated arrhythmia detection using novel hexadecimal local pattern and multilevel wavelet transform with ECG signals. *Knowledge-Based Systems*, 186, 104923.
- [21] Hayri, A. B. A. R. (2020). Xgboost Ve Mars Yöntemleriyle Altın Fiyatlarının Kestirimi. *Ekev Akademi Dergisi*, (83), 427-446.
- [22] Osman, A. I. A., Ahmed, A. N., Chow, M. F., Huang, Y. F., & El-Shafie, A. (2021). Extreme gradient boosting (Xgboost) model to predict the groundwater levels in Selangor Malaysia. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1545-1556.
- [23] Bavaş, E., Karar Ağaçları (Decision Trees) ile Veri Sınıflandırma. <http://erdoganb.com/2017/07/karar-agaclari-decision-trees-ile-veri-siniflandirma/> Erişim Tarihi: 25.12.2022
- [24] Y. Celik, S. Guney and B. Dengiz, "Obesity Level Estimation based on Machine Learning Methods and Artificial Neural Networks," 2021 44th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2021, pp. 329-332, doi: 10.1109/TSP52935.2021.9522628.
- [25] Z. Zheng ve K. Ruggiero, "Lise öğrencilerinde obeziteyi tahmin etmek için makine öğrenimini kullanmak", 2017 IEEE Uluslararası Biyoinformatik ve Biyotıp Konferansı (BIBM) , 2017, s. 2132-2138, doi: 10.1109/BIBM.2017.8217988.

Kırma Taş Ocağı Çalışanlarının Psikososyal Risk Faktörlerinin Değerlendirilmesi

Mert MUTLU^{1*}, Murat KALKAN²

¹ Maden Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Aksaray Üniversitesi, Aksaray, Türkiye

² Jeoloji Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Aksaray Üniversitesi, Aksaray, Türkiye

*¹ mertmutlu@aksaray.edu.tr, ² mkalkan@aksaray.edu.tr

(Geliş/Received: 28/02/2023;

Kabul/Accepted: 05/05/2023)

Öz: Artan nüfus yoğunluğuyla beraber insanoğlunun barınma ve yapı sektörlerinde ihtiyacı artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak için taş ocaklarındaki malzeme üretimi artmakta ve hatta taş ocaklarının sayılarının artmasına neden olmaktadır. Taş ocaklarındaki çalışma koşullarının ağır ve tehlikeli olması insan sağlığı ve güvenliği bakımından önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kapsamda 6311 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nda Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği, doğrudan veya çalışana stres ile dolaylı yoldan etkileyen psikososyal tehlikelerin işveren tarafından belirlenip kayda alınması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Ancak psikososyal risk faktörleri, taş ocaklarında genelde önemsenmemektedir. Bu çalışmada Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından belirlenen kriterlere bağlı kalınarak hazırlanan anket yoluyla görüşleri alınan çalışanların demografik özellikleri ile birlikte, iş kazalarının oluşumunda psikososyal tehlikelerden kaynaklı en önemli risk etkenlerinin neler olduğu araştırılmış ve belirlenmiştir. Belirlenen bu faktörlerin çalışmada yaratabileceği mental olumsuzlukların neler olduğu detaylı bir şekilde vurgulanmıştır. Elde edilen sonuçların, işletmelerdeki söz konusu sürecin yeniden kolaylıkla yapılandırılabilmesi açısından karar vericilere, yöneticilere ve mühendislere yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Psikososyal tehlikeler, Dünya Sağlık Örgütü (WHO), Kırma taş ocakçılığı, Risk yönetimi.

Evaluation of Psychosocial Risk Factors of Quarrying Crushed Stone Employees

Abstract: With the increasing population density, the need of human beings in the housing and construction sectors is increasing. In order to meet this requirement, material production in quarries increases and even causes an increase in the number of quarries. The heavy and dangerous working conditions in quarries are an important problem in terms of human health and safety. In this context, the Risk Assessment Regulation in the Occupational Health and Safety Law No. 6311 has revealed the necessity of determining and recording psychosocial hazards that directly or indirectly affect the employee through stress. However, psychosocial risk factors are generally ignored in quarries. In this study, the most important risk factors arising from psychosocial hazards in the formation of occupational accidents were investigated and determined, together with the demographic characteristics of the employees whose opinions were taken through a survey that prepared by adhering to the criteria determined by the World Health Organization (WHO). The mental negativities that these determined factors can cause in the employee are emphasized in detail. It is expected that the results that obtained from this study will guide for decision makers, managers and engineers to re-structuring the process in enterprises easily.

Key words: Psychosocial hazards, World Health Organization (WHO), Quarrying crushed stone, Risk management.

1. Giriş

İnsanoğlunun varoluşundan günümüze, uygarlıkları şekillendiren en eski, en köklü sektörlerden birisi madenciliktir. Mineral çeşitliliği bakımından 70'in üzerinde mineralin üretimi ülkemizde yapılmaktadır [1]. Maden kaynakları bakımından da ülkemiz dünyanın zengin ülkeleri arasında yer almaktadır.

Madencilik üretimin her aşamasında özel önlemler gerektiren emeğin yoğun olduğu, en riskli iş kollarından biridir. Sektörde faaliyet gösteren işletmelerdeki çalışma koşulları, kendine özgü muhtemel tehlikeleri ve bunlardan kaynaklanabilecek riskleri bünyesinde barındırmaktadır. Bu nedenle, sektörde çalışanlara sağlıklı bir çalışma ortamı sağlamak, onları iş kazaları ve meslek hastalıklarından korumak ve çalışma ortamında iş güvenliği kültürünün oluşturulması işverenin her zaman birinci önceliği olmalıdır.

İşyerindeki mevcut tehlikelerin belirlenebilmesi amacıyla yapılan risk değerlendirmesi çalışmaları sadece yasal bir zorunluluk olarak görülmemelidir. Bu çalışmaların önleyici yani proaktif bir yaklaşımla ve tüm çalışanların sürece dâhil edilerek yapılması amacına ulaşmasını kolaylaştıracak, verimliliği artıracaktır.

* Sorumlu yazar: mertmutlu@aksaray.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-6040-1186, ² 0000-0002-4350-1599

6311 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) Kanunu'nda Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği'nde çalışanın sağlığını doğrudan veya stres ile dolaylı yoldan etkileyen psikososyal tehlikelerin de işveren tarafından belirlenip, kayda alınması gerektiği ifadesi yer almaktadır. Ancak yasal mevzuatta yer alan psikososyal tehlike kaynaklarının belirlenerek bunlara bağlı potansiyel risklerin değerlendirilmesi konusu genellikle göz ardı edilmekte, üzerinde fazla durulmamaktadır. Bu amaçla literatürde yapılan çalışmalarında oldukça sınırlı olduğu görülmektedir (Tablo 1).

Tablo 1. Literatürde yapılan güncel çalışmalar.

Araştırmacı(lar)	Uygulama alanı ve yöntem	Sonuçlar
[2]	Gana'daki 5 ayrı işletmede 307 maden çalışanı ile gerçekleştirilen anket çalışması verileri kullanılarak bir Poisson regresyon analizi yapılmıştır.	Araştırmacılar, oluşturdukları model ile madencilik ekipman ve ortam koşullarının işçilerin maruz kaldıkları iş kazalarında ve ramak kala olaylarda en büyük etken olduğu sonucuna ulaşmışlardır.
[3]	Gana'da 5 ayrı büyük kapasiteli altın, manganez ve boksit cevheri üretimi yapılan işletmede çalışan 307 maden işçisinin anket yoluyla görüşleri alınmıştır.	Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, madencilik ekipmanlarının, ortam koşullarının psikososyal riskler üzerinde önemli birer etken olduğu; yaş demografik değişkeninin çalışanların yaşam kalitesini artırdığı sonucuna ulaşmışlardır.
[4]	Denizli ilinde yeraltı üretim yöntemiyle linyit üretimi yapılan bir kömür madeninde çalışan 65 maden işçisinin anket yoluyla görüşleri alınmıştır.	Çalışanların iş yükünün ve sosyal çevrelerinin, işyeri yönetiminin çalışanlara karşı tavrının, vardiyalı çalışmanın iş kazalarının meydana gelmesindeki en önemli etkenler olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
[5]	Endonezya'da açık işletme üretim yöntemiyle üretim yapan bir madende çalışan 201 maden işçisinin anket yoluyla görüşleri alınmıştır. Doğrusal regresyon analizi ile sonuçlar değerlendirilmiştir.	İşletmede farklı pozisyonlarda çalışanların yaptıkları işe ve maruz kaldıkları psikososyal risk faktörlerine göre risk skorları hesaplanmıştır. Yüksek efor gerektiren stresli işlerde çalışan, cevher hazırlama tesisinde çalışan operatörler ve maden operatörlerinin risk skorları yüksek olarak hesaplanmıştır.
[6]	Eskişehir ilinde bir manyezit madeninde triyaj işinde çalışan 104 kadının psikososyal tehlike düzeyleri anketler yoluyla belirlenmeye çalışılmıştır.	İşyerindeki çalışma ortamının, çalışanların psikososyal tehlikelere maruz kalmaları açısından kanun ve ilgili yönetmelikler açısından oldukça güvenli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. İşyerinde gerçekleştirilen çeşitli etkinliklerin, çalışanların motivasyonlarını ve morallerini artırdığı görülmüştür.
[7]	Polonya'daki maden ocaklarında çalışan 483 maden işçisinin anket yoluyla görüşleri alınmıştır.	Araştırmacılar çalışanların iş stresi seviyesinin, örgüt kültürü, organizasyondaki rol, sorumluluk, kariyer gelişimi ve ev-iş arayüzü ile ilişkili olarak etkilendiği sonucuna ulaşmışlardır. Çalışanların işe katılımlarının artmasıyla birlikte, işyerindeki rol çatışması da azalacaktır.

Artan nüfus ile birlikte köyden kente göç artmaktadır. Kentlerdeki yapı stoğunun yeterli olmamasından dolayı, inşaat ve yapı sektöründe giderek artan hammadde talebi, sektörün ihtiyaçlarına paralel olarak taş ocaklarının sayılarının giderek artmasına sebebiyet vermektedir. Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü'nün (MAPEG) güncel maden üretim miktarı verilerine göre çimento ve inşaat hammaddeleri sektörde ihtiyaç duyulan başlıca madenleri oluşturmaktadır [8]. Taş ocaklarındaki emeğin yoğun olduğu, ağır ve tehlikeli çalışma koşulları, İSG bakımından önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır.

Açık işletme taş ocaklarında yaşanan iş kazalarının ana sebebinde genellikle dikkatsizlik, yorgunluk, konsantrasyon eksikliği ve iş stresi gibi nedenler yer almaktadır [9, 10]. Ocak içerisinde hareket halinde olan iş makinalarından (kamyon, ekskavatör, lastik tekerlekli yükleyici vb.) taş sıçraması, ocak yollarında araç, kamyon vb. kullanılırken hız kurallarına uyulmaması sonucu meydana gelen kazalar (devrilme gibi), el aleti düşmesi, elektrik çarpması, yüksekten düşme, kayarak düşme (zeminin kaygan olması), donanımların güvenlik kurallarına uyulmadan kullanılması, kusurlu alet/edevat bulundurulması/kullanılması, kişisel koruyucu donanım (KKD) kullanılmaması/kullanım kurallarına uyulmaması, mesleki eğitim yetersizliği, yetersiz denetim/yaptırım, eğitim seviyesinin düşüklüğü, çalışanların aldıkları iş güvenliği eğitimlerine uygun hareket etmemeleri, çalışma ortamındaki olumsuz fiziksel koşullar (ısı, toz, gürültü, yetersiz havalandırma ve aydınlatma), patlatma faaliyetleri esnasında oluşan titreşim, hava şoku, kaya fırlaması, şev kayması, şev üstünden kaya parçası düşmesi ve şevden

düşme bu sektörde yaşanan iş kazalarının en önemli sebepleri olarak sayılabilir [11, 12]. Taş ocaklarında bu nedenlerden dolayı meydana gelen iş kazalarının birçoğu her ne kadar hafif yaralanma ile neticelenmiş olsa da, bazıları ağır yaralanma sonucu iş görememe, sakat kalma, uzuv kaybı/kayıpları ve hatta ölüm ile de sonuçlanabilmektedir.

Çalışma kapsamında, Aksaray ili sınırları içerisindeki bir kırma taş ocağında, yukarıda sayılan sonuçlara neden olabilecek ve değerlendirmelerde genellikle göz ardı edilen çalışanların maruz kaldıkları psikososyal tehlikelerden kaynaklı en önemli risk etkenlerini tespit edebilmek için anket yoluyla görüşleri alınmıştır. Bu araştırma çalışmasının Etik Kurul İzni Aksaray Üniversitesi İnsan Araştırmaları Etik Kurulu tarafından 25/10/2022 tarihli 07 sayılı toplantısında ve 2022/07-42 karar numarası ile uygun bulunarak verilmiştir.

2. Metot

2.1. Psikososyal tehlikeler

Sağlıklı olmak, yalnızca hastalık ve sakatlık durumunun olmaması değil; bedenen, ruhen ve sosyal yönden tam bir iyilik hâli olarak tanımlanmaktadır [13]. Mental sağlık yani ruh sağlığı, bireyin kendi potansiyelinin farkına varabildiği, hayatın normal stresleriyle başa çıkabildiği, verimli şekilde çalışıp bulunduğu topluma katkı sağladığı, duygusal, davranışsal ve bilişsel bir refah halidir.

Kötü çalışma koşulları çalışanlar üzerinde iş stresi faktörlerinin artmasına ve ruhsal bozukluklara sebebiyet verebilmektedir [14]. Kötü çalışma koşullarına ek olarak, kötü bir çalışma ortamı ve kötü yönetim ve denetim de maden çalışanlarının mesleki yaralanmaları üzerinde önemli etkiye sahiptir; özellikle üretim hedeflerine ulaşma kaygısıyla sağlık ve güvenlik için düşük denetim desteği, çalışan davranışını ve genel refahı etkileyebilir [15].

Psikososyal tehlikeler, işin tasarımı, yönetiminde ve organizasyonunda işle ilgili stres riskini artıran ve psikolojik veya fiziksel zarara yol açabilen faktörlerdir. Bu etki doğrudan veya dolaylı yoldan olabilir. Psikososyal tehlikeler iş stresiyle birleştiğinde önemli bir risk faktörüdür, bu nedenle işverenler bu tehlikeleri iş stresinden izole bir şekilde düşünerek değerlendirme yapmamalıdır. Çalışmada psikososyal tehlikeleri ölçmek için WHO tarafından belirlenen 9 ana başlık ve bunun alt başlıkları altında değerlendirme yapılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. WHO kriterlerine göre çalışmada belirlenen psikososyal tehlikeler [16].

WHO kriterleri	Tehlikeler
İş içeriği:	İş monotonluğu (tekdüzelik) veya kısa çalışma döngüsü, Yapılan işin belirsizliği (bilgi eksikliği), Hoş olmayan görevler, Yapılan işin anlamsızlığı ve uygun olmaması
İş yükü ve temposu:	Aşırı iş yükü veya çok az iş yükü, Zaman baskısı altında çalışmak
Çalışma saatleri:	Çalışma düzeninin esnek olmaması, Uzun mesai saatleri, Öngörülemeyen çalışma saatleri, Kötü tasarlanmış vardiya sistemleri
Katılım ve kontrol:	Karar alma süreçlerine katılım eksikliği, Kontrol eksikliği
Kariyer gelişimi, statü ve ücret:	İş belirsizliği (güvencesizliği), Terfi (yükselme) ihtimalinin bulunmaması, Yapılan ek iş karşılığında ek ücret (promosyon) ödenmemesi, İşin düşük sosyal değeri, Ücreti zamanında tam ve eksiksiz alamama, Liyakate uygun olmayan görevlendirmeler yapılması, İşte becerilerini tam olarak kullanamama
Organizasyondaki rol:	Personel organizasyonunun belirsizliği, Asıl rol ile yapılan işin çelişmesi, Yetki belirsizliği, Diğer insanların problemlerinin yapılan işi etkilemesi
İşyerinde kişilerarası ilişkiler:	Amirlerden yeterli ilgi ve yardımı alamama, İşyerindeki çalışanlar arası iletişim bozuklukları, İşyerinde zorbalık, taciz, şiddet, İzole çalışma, İşyerinde şikâyet iletileceği birim ya da amir olmaması
Örgüt kültürü ve işlevi:	Amirlerle olan iletişim eksikliği, Yöneticilerin zayıf liderlik vasıfları, Alınan kararların çalışanlara örgütsel şekilde iletilmemesi
Ev ve iş etkileşimi:	Aile problemlerinin işe etkisi, Aile problemleri ile alakalı işyerinin destek eksikliği, İşyerinde karşılaşılan problemler konusunda aile desteği eksikliği

2.2. Likert ölçeği ve anket tasarımı

Veri toplama amacıyla hazırlanan anket iki bölümden oluşmaktadır. Anketin ilk bölümünde işletmelerde çalışanların kişisel bilgileri ve demografik özellikleri (cinsiyet, yaş, medeni durum, öğrenim durumu, gelir durumu, deneyim, mesleki eğitim, iş kazasına maruz kalma durumu, ramak kala olay yaşama durumu ve yakın zamanda bir iş kazasına maruz kalabileceğini düşünüp düşünmeme durumları) sorgulanmıştır. Anketin ikinci bölümüne yer alan psikososyal risk etkenleriyle ilgili sorular hazırlanırken Likert ölçeği kullanılmıştır.

Likert ölçeği, tutum ölçekleri arasında psikolog Rensis Likert tarafından geliştirilen ve anket uygulamalarında en yaygın kullanım alanı olan, bireylerin bir konudaki tutum ve öngörülerini sıralı formda puanlama yoluyla belirlemeye imkân tanıyan tutum ölçeklerinden biridir [17, 18, 19, 20]. Bu ölçekte toplam olarak üç, beş, yedi gibi tek sayıda seçenek sunulabilmekte olup, bunlar içerisinde en yaygın kullanılanı beşli ölçektir [21]. Çalışmada 5'li Likert ölçeğinin tercih edilme nedeni, tasarımının, oluşturulmasının, uygulanmasının kolay, hızlı ve ekonomik olması, farklılıkları ölçmede sağladığı faydalar olup ve bu nedenle akademik çalışmalarda sıklıkla tercih ediliyor olmasıdır [22]. Söz konusu ölçek ifadelerin oluşturulması ile başlamakta, lehte ve aleyhte ifadelerin ne kadar desteklendiğinin sorgulanması ile devam etmektedir. Tutumun yönünün ve şiddetinin ölçülebildiği Likert ölçekte, cevaplar en az beşli olmalıdır. Uygulama çalışmasında da sorular hazırlanırken beş seviyeli Likert ölçek tercih edilmiştir. "Kesinlikle katılıyorum" ve "Katılıyorum" cevaplarının arasındaki fark ise tutumun şiddetinin derecelendirilmesini ifade etmektedir. Ortada ise nötr cevap yer almaktadır. Likert ölçeğinde sınıması yapılan ifade eğer olumsuzluk içeriyorsa cevaplar 1= kesinlikle katılıyorum; 2=katılıyorum; 3=karasızım; 4=katılmıyorum; 5=kesinlikle katılmıyorum şeklinde sıralanır. Aksi durumda yani ifade eğer olumlu ise; 1=kesinlikle katılmıyorum; 2=katılmıyorum; 3=karasızım; 4=katılıyorum; 5= kesinlikle katılıyorum gibi sıralanmalıdır [23].

3. Uygulama Çalışması

3.1. İşletmenin tanıtımı

Çalışma için seçilen taş ocağı (kalker) işletmesinde açık ocak üretim yöntemi ile üretim yapmakta olup, Aksaray ilinin doğusunda yer almaktadır. İşletmede kırma eleme tesisi de bulunmakta olup, yıllık üretim yaklaşık 550.000 tondur. Ancak planlanan bu üretim miktarı talep artışı veya azalışına göre değişiklik gösterebilmektedir. Mevcut ruhsat sahasında yaklaşık 10 yıl boyunca üretim gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Üretim aşaması sırasıyla deliklerin delinmesi, delinen deliklere yerleştirilen patlayıcıların patlatılmasıyla tüvenan cevher üretimi, kırıcı ekskavatör ile malzemenin kırılması ve kırılan malzemenin kamyonlara ekskavatörler ile yüklenerek kırma-eleme tesisine gönderilmesinde oluşmaktadır. Üretilen malzeme müşteri taleplerine göre boyutlandırılarak, piyasaya arz edilmektedir.



Şekil 1. Taş ocağında yapılan üretim faaliyetine ait görüntü.

3.1. Sonuçların güvenirliliği ve elde edilen bulgular

İşletmede çalışanların maruz kaldıkları iş kazalarının oluşumunda psikososyal tehlikelerden kaynaklı en önemli risk etkenlerinin neler olduğunu belirleyebilmek amacıyla 5'li Likert ölçeği yardımıyla bir anket uygulaması hazırlanmış ve çalışanlara bu ankette yer alan sorular yöneltilmiştir. Likert ölçeği bireylerin bir konudaki tutum ve öngörülerini sıralı formda puanlama yoluyla belirlemeye imkân tanıyan bir ölçektir.

Güvenirlilik (iç tutarlılık) bir ölçme aracı olup, örnekleme oluşturan katılımcıların ölçek maddelerine verdikleri cevapların kendi içindeki tutarlılığı olarak tanımlanmaktadır [24, 25]. Bu çalışmada ölçeğin güvenirliliği ve geçerliği, özellikle psikolojik özelliklerin ölçülmesinde yaygın kullanım alanı bulunan Cronbach alfa (α) analizi ile test edilmiştir [26]. α güvenirlilik katsayısı, ölçeklerin uygulama çalışmasındaki gibi sıralı (ordinal) puanlandığı durumlarda kullanılması uygun olan bir iç tutarlılık belirleme yöntemidir [27]. Kullanılan ölçeğin soru türdeşliğini ve genel tutarlılığını belirlemektedir. α güvenirlilik katsayısı ölçekte yer alan maddelerin varyansları toplamının genel varyansa oranlanması ile hesaplanan bir değer olup, o anketten elde edilen verilerin genel güvenirliliğini belirtmektedir. Hesaplanan değer $0 \leq \alpha \leq 1$ aralığında değerler almaktadır. Genel olarak hesaplanan bu değer 0,7 değerine eşit veya büyük olması beklenir. α güvenirlilik katsayısı değerinin sınıflandırması ve yorumu Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir [27].

Tablo 3. Cronbach alfa (α) güvenirlilik katsayısı değerinin sınıflandırması

Güvenirlilik katsayısı (Cronbach alfa) değeri	Güvenirlilik sınıfı
$\alpha \geq 0,9$	Mükemmel
$0,7 \leq \alpha < 0,9$	İyi
$0,6 \leq \alpha < 0,7$	Kabul edilebilir
$0,5 \leq \alpha < 0,6$	Zayıf
$\alpha < 0,5$	Kabul edilemez

Tablo 4. Cronbach alfa (α) güvenirlilik katsayısı değerinin yorumu

Güvenirlilik katsayısı (Cronbach alfa) değeri	Yorum
$0,81 < \alpha < 1,00$	Ölçek yüksek güvenirliliktir
$0,61 < \alpha < 0,80$	Ölçek orta güvenirliliktir
$0,41 < \alpha < 0,60$	Ölçek düşük güvenirliliktir
$0,00 < \alpha < 0,40$	Ölçek güvenilir değildir

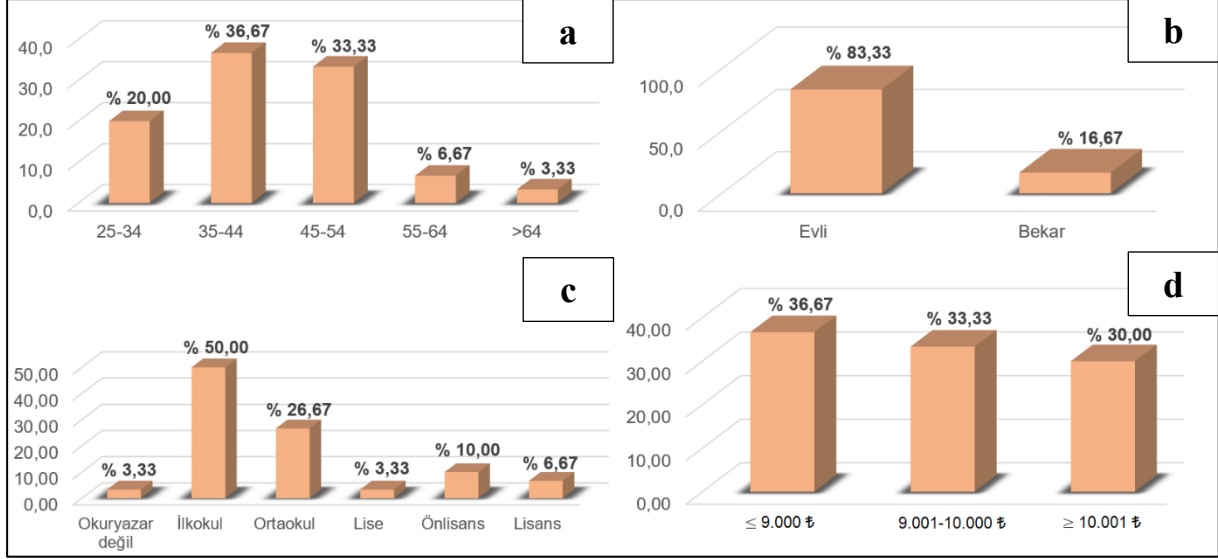
İşletmede görev yapan 30 çalışana uygulanan anket çalışmasından elde edilen verilerin analizi IBM SPSS 17 istatistiksel analiz paket programı kullanılarak yapılmıştır. Program kullanılarak hesaplanan α güvenirlilik katsayısı değeri ekran görünümü Tablo 5'te sunulmuştur. 34 soruyu kapsayan ölçeğin Cronbach alfa (α) güvenirliliği %95,9 olarak hesaplanmıştır. Tablo 3 ve Tablo 4'e göre değerlendirildiğinde, anketi oluşturan soruların ve ölçeğin güvenirlilik sınıfının mükemmel ve yüksek güvenirlilikle kullanılabilir olduğu yorumlanmıştır.

Tablo 5. Güvenirlilik analizi sonuçları

Güvenirlilik Analizi	
Cronbach alfa (α) güvenirlilik katsayısı	Soru sayısı
0,959	34

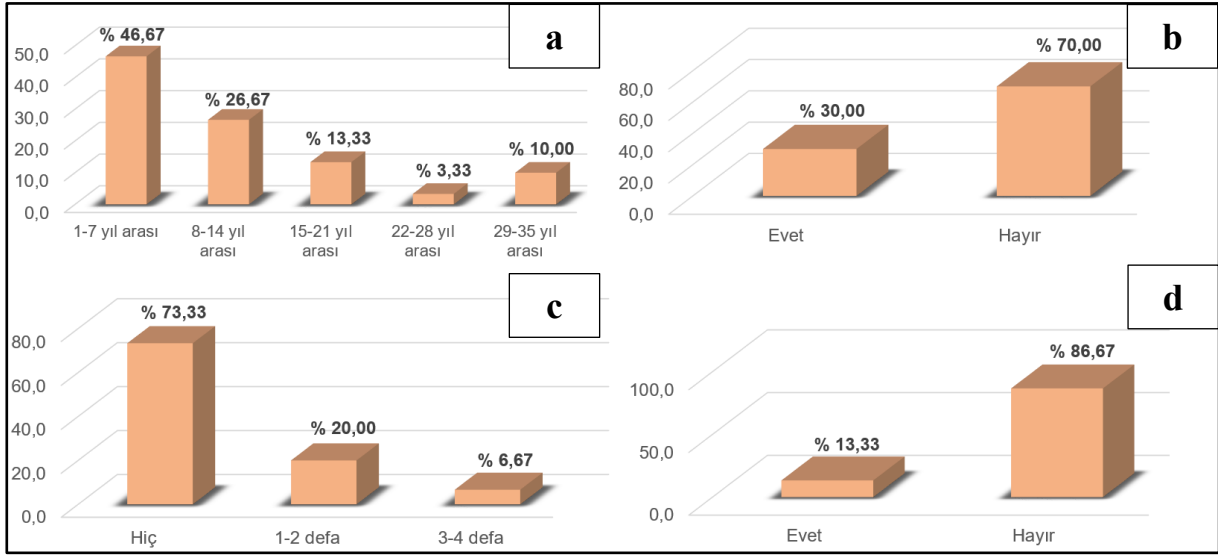
Anket uygulamasında yer alan, çalışanlara yöneltilen sorulara verilen cevaplara ilişkin elde edilen bulgular ise aşağıda verilmiştir. Uygulama çalışmasına katılan tüm çalışanlar erkektir. Çalışanların yaş dağılımları İş Kazalarına İlişkin Avrupa İstatistikleri (ESAW) [28] metodolojisine göre değerlendirilmiştir. İşletmede çalışanların %36,67'sinin 35-44 yaş aralığında olduğu; %33,33'ünün 45-54 yaş aralığında olduğu, yani çalışanların %70'inin orta yaş ve üzeri yaşta olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2(a)). Çalışanların medeni durumlarına göre dağılımları incelendiğinde %83,33'ünün evli, %16,67'sinin ise bekâr olduğu görülmektedir (Şekil 2(b)). Bu durum çalışanların ailevi problemlerinin sorgulanması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Çalışanların öğrenim durumları dağılımı grafiği incelendiğinde ise %50'sinin ilköğretim; %26,67'sinin ortaöğretim; %20'sinin ise lise ve üstü öğretim seviyesine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 2(c)). Buradan ortaokul ve altı eğitim seviyesinde olan çalışanların mesleki eğitim yeterliliklerinin sorgulanması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Çalışanların gelir durumuna göre dağılımları grafiği (Şekil 2(d)) incelendiğinde ise, %36,67'sinin asgari ücret ile 9.000₺ arasında, %33,33'ünün 9001-10.000₺ arasında, %30'unun ise 10.001₺ ve üstü ücret aldığı görülmektedir. Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK)'nun en güncel 2021 yılı istatistik bilgilerinde ülkemizde "Diğer madencilik ve taş ocakçılığı" faaliyet grubunda çalışanların ortalama günlük kazançları 214,31₺ olarak belirlenmiştir [29]. İşletmede çalışanların aylık ortalama geliri her ne kadar söz konusu miktardan yüksek olsa da, yapılan işin emek yoğun

olması ve ağır iş sınıfında yer alması günümüz sosyo-ekonomik koşulları ve ağır iş yükü düşünüldüğünde, alınan ücretlerin çalışanların ruh hallerini tatmin edici olmaması bir psikososyal tehlike unsuru olarak değerlendirilmelidir. Ayrıca ankette yer alan çalışanların mesleki eğitim alıp almadıklarına yönelik soruda çalışanların %90'ının eğitim aldığı tespit edilmiştir.



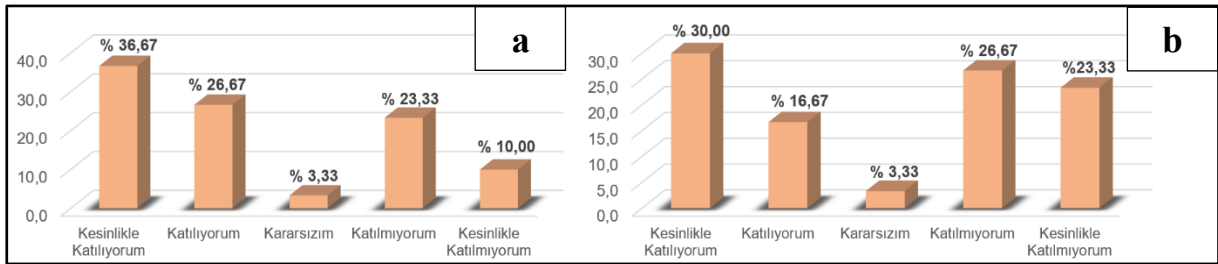
Şekil 2. Çalışanların a) yaşına göre; b) medeni durumuna göre; c) öğrenim durumuna ve d) gelir durumuna göre dağılımları.

Genel olarak çalışanların deneyimine göre bir değerlendirme yapıldığında, çalışanların %46,67'sinin 1-7 yıl arası; %53,33'ünün ise 8 yıl ve üzeri madencilik sektöründe deneyime sahip olduğu görülmektedir (Şekil 3(a)). Ramak kala olay (kılpayı atlatma) personeli, işyerini ya da ekipmanları zarar uğratma potansiyeli olduğu halde zarara uğratmayan olaydır. "Daha önce herhangi bir ramak kalay olay yaşadınız mı?" sorusuna verilen cevapların dağılımı değerlendirildiğinde, işletmede çalışanların %30'luk kısmı daha önce herhangi bir ramak kala olay yaşadığını düşünmektedir (Şekil 3(b)). İşletmede çalışanların %73,33'lük kısmının daha önce hiç iş kazası geçirmemiş olduğu; %20'sinin ise 1-2 defa iş kazası geçirdiği tespit edilmiştir (Şekil 3(c)). Çalışanların %53,33'ünün 8 yıldan daha uzun süredir madencilik sektöründe çalıştığı düşünülürse bu oranın çok gerçekçi olmadığı söylenilebilir. Çalışanlar iş kazası geçirme olayını uzun kayıplı günlerce veya haftalarca işe gelemeyecek ağırlıkta olan olay olarak düşünmektedir. Fakat kesik, ezilme, burkulma ile sonuçlanan küçük boyutlu olayları iş kazası olarak saymamaktadırlar. Bu kazalar amirlere bildirilse ve dikkate alınarak değerlendirme yapılsa, büyük boyutlu iş kazalarının olması da proaktif bir yaklaşımla engellenebilecektir. Benzer sonuç bir önceki grafikte hesaplanan %70'lik ramak kala olay yaşamamış olduğunu düşünme ile örtüşmektedir. Buradan, çalışanların işletmede yaşadıkları küçük çaplı olayları küçümsediği ve çok önemsemediği yorumu yapılabilir. Çalışanların "Gelecekte iş kazasına maruz kalabileceğinizi düşünüyor musunuz?" sorusuna verdikleri cevaplar değerlendirildiğinde ise %86,67'sinin gelecekte işletmede herhangi bir iş kazasına maruz kalmayacaklarını düşündükleri görülmektedir (Şekil 3(d)).



Şekil 3. Çalışanların a) deneyimine göre; b) ramak kala olay yaşama durumuna göre; c) iş kazasına maruz kalma durumuna göre ve d) iş kazasına maruz kalabileceğini düşünme durumuna göre dağılımları.

İşletmede çalışanların demografik özellikleri değerlendirildikten sonra, iş kazalarının oluşumunda psikososyal tehlikelerden kaynaklı en önemli risk faktörlerinin belirlenebilmesi amacıyla çalışanlara çeşitli sorular yöneltilmiş ve en önemli risk etkenleri belirlenmiştir. Çalışanların yarısından fazlası (%63,34'ü) işyerinde sürekli aynı işi yaptığını, yani işinin tekdüze (monoton) olduğunu düşünmektedir. Monotonluk ve tekrarlayıcılık (repetitif) çeşitli fiziksel sorunlara, dalgınlık, tükenmişlik, konsantrasyon güçlüğü vb. psikolojik sorunlar ile iş verimliliğinin düşmesine, işe karşı isteksizlik gibi davranışsal sorunlara yol açabilmekte ve çalıştıkları iş yeri ortamına bakış açılarını olumsuz etkilemektedir. Söz konusu fiziksel, psikolojik ve davranışsal sorunlar da çalışanların iş kazası, meslek hastalığı ve işle ilgili hastalıklara yakalanma riskini artırdığı söylenilebilir (Şekil 4(a)) [30]. Şekil 4(b) incelendiğinde ise, işyerinde çalışanlar arasında kararsızlar da dâhil edildiğinde, yaptığı işin hak ettiği saygınlığı ve değeri görmediğini düşünenler ile gördüğünü düşünenlerin oranlarının neredeyse birbirine eşit olduğu söylenilebilir. Çalışanların üzerinde oldukça etkili olan, insanın doğasında olan "yaptığı işin beğenilmesi ve takdir görmesi" ihtiyacı, çalışanların işe aidiyet duygularını geliştirmekte, işe bağlılıklarını ve verimliliklerini artırmaktadır. Bu oranın yarı yarıya çıkması işletme için önemli bir psikososyal risk faktörü olarak ön plana çıktığı söylenilebilir.

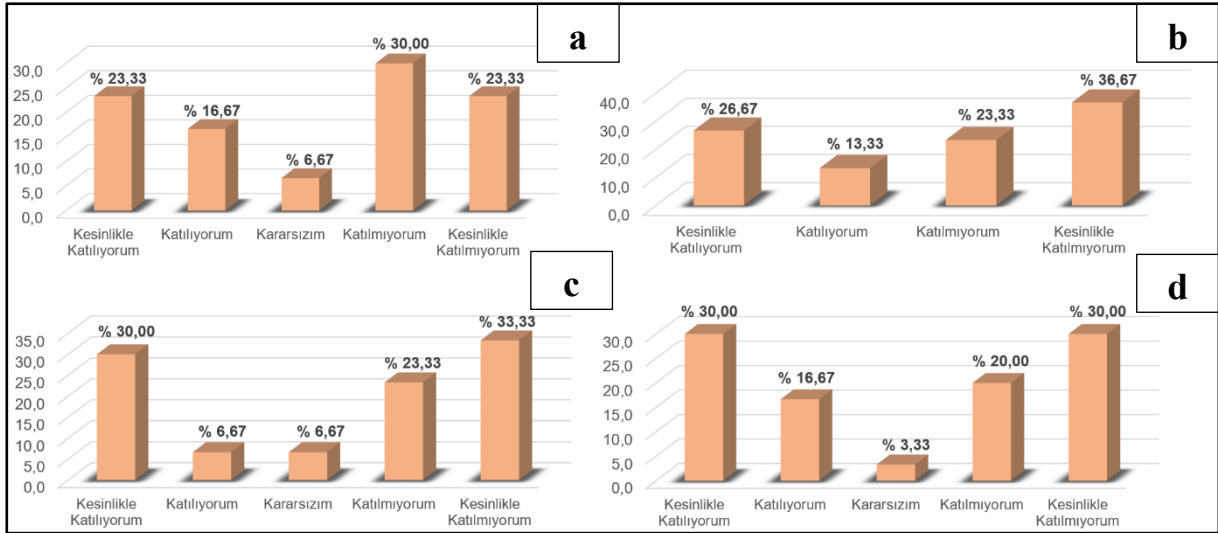


Şekil 4. Çalışanların (a) yaptıkları işin monoton olduğunu düşüncelerine göre dağılımı (b) yaptıkları işin hak ettiği saygınlığı ve değeri görmediğini düşüncelerine göre dağılımı.

İşyerinde çalışanlar arasında, yaptığı işin belirsiz olduğunu (işle ilgili yeterli bilgiye sahip olmadığını) düşünenlerin oranı kararsız kalanlarda dâhil edildiğinde %46,67'ye ulaştığı görülmektedir (Şekil 5(a)). İşyerinde çalışanların yaptıkları işle alakalı eğitimleri yeterli deneyime sahip kişilerden almaları ve işle ilgili yeterlilik belgelerini almaları sağlanmalıdır. Çalışanların ayrıca işyerindeki yaptığı işle ilgili yaşayabilecekleri olası iş kazaları ve bunlardan korunma yolları konusunda öncelikli olarak eksiksiz bir şekilde bilgilendirilmeleri ve bilinçlendirilmeleri gerekir. Yasal mevzuatta çok tehlikeli sınıfta yer alan iş yerleri için çalışan başına verilmesi

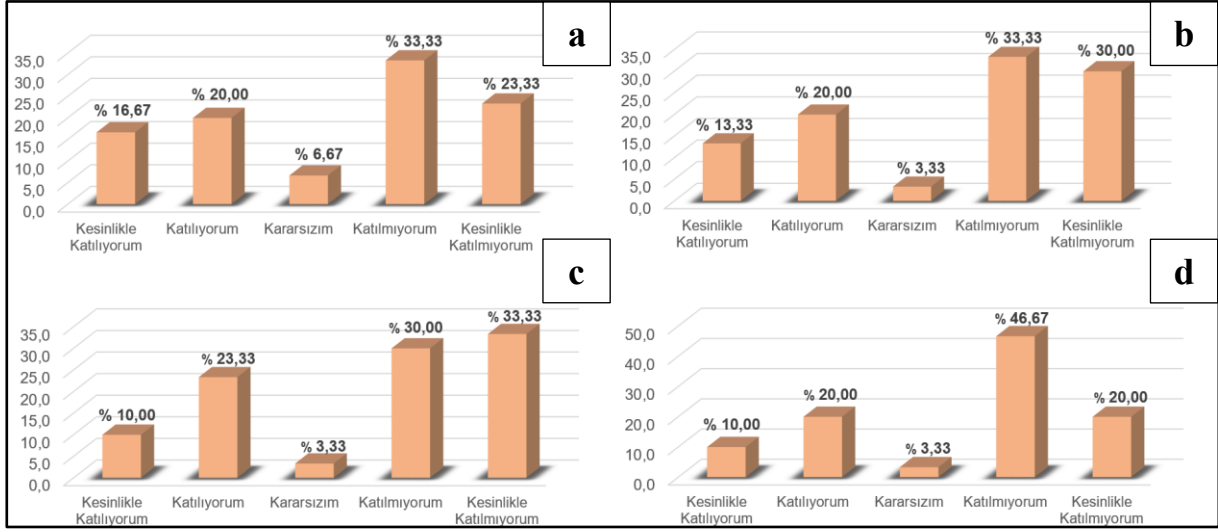
gereken zorunlu 16 saatlik İSG eğitim süresi dışında söz konusu eğitimler daha da sıklaştırılmalıdır. Şekil 5(b) incelendiğinde, araştırmaya katılan işyerinde çalışanların neredeyse yarıya yakınının (%40'ı) ücretinin zamanında ve tam olarak ödenmediğini düşündüğü görülmektedir. Bu durum çalışanlar üzerinde psikolojik çöküntü, dalgınlık, huzursuzluk, işe odaklanamama, mutsuzluk ve verimsizlik gibi davranışsal çöküntülere sebebiyet verebilmektedir [30]. Söz konusu psikososyal tehlike içeren çalışma koşullarından etkilenen çalışanlarında da iş kazalarına maruz kalabilme ihtimallerinin daha fazla olduğu yorumu yapılabilir.

Liyakat, Türk Dil Kurumu (TDK)'nda "Bir kimsenin, kendisine iş verilmeye uygunluk, yaraşırılık durumu" olarak tanımlanmıştır. Bir işyerinde üretkenlik, verimlilik, adalet düzeni, iş dağılımı ciddi önem arz etmektedir. Bu noktada liyakat kavramı ön plana çıkmaktadır. Uygulama çalışması yapılan işyerindeki çalışanlardan liyakate uymayan görevlendirmeler yapıldığını düşünenlerin oranı kararsızlarla birlikte %43,34 olduğu görülmektedir (Şekil 5(c)). Kayırmacılık yapılarak hak etmeyen çalışanlara iltimas geçilmesi yani ayrımcılık yapılması, çalışanlarda iş veriminin düşmesine isteksiz çalışmasına, yapılan işin başarısızlıkla sonuçlanmasına, sahip oldukları yeteneği tam olarak yaptıkları işe yansıtamamalarına sebebiyet vermektedir. Böyle bir çalışma ortamı çalışanların psikolojilerine de zarar verebilmekte ve depresyona girmelerine neden olmaktadır. Çalışanların %46,67'si işe, yaptığı işte becerilerini tam olarak kullanamadığını düşünmekte olduğu görülmektedir (Şekil 5(d)). İş ortamında verimlilik ve performans birçok etkene bağlıdır. Genellikle kendine verilenleri yerine getirmek insan için yeterli olmaz. Yeteneklerini tam olarak kullanamama duygusu hüznü yaratmaktadır [31].



Şekil 5. Çalışanların (a) yaptıkları işin belirsizliği ile ilgili dağılımları, (b) ücretinin zamanında tam olarak ödenmediğini düşünenlerin dağılımı, (c) işyerinde liyakate uygun olmayan görevlendirmeler yapıldığını düşünenlerin dağılımı, (d) yaptığı işte becerilerini tam olarak kullanamadığını düşünenlerin dağılımı.

Kararsızlarla birlikte bir değerlendirme yapıldığı takdirde, işyerinde çalışanların neredeyse yarısının (%43,34'ünün) amirleriyle iletişim problemi yaşadığını düşündüğü görülmektedir (Şekil 6(a)). Karşılıklı saygı çerçevesinde bir üst-as iletişimi kurmak, her zaman doğruyu konuşmak ve dürüstlük en etkili iletişim kanallarından birisi olup, bu dengenin kurulması çalışanların çalışma ortamı psikolojisi bakımından büyük önem arz etmektedir. Amirleriyle iletişim kuramayan çalışan işine karşı isteksiz, motivasyonu düşük ve huzursuz bir çalışma ortamında çalışmaya mahkûm edilmektedir. Şekil 6(b)'de görüleceği üzere yaptığı işin yükünün fazla olduğunu düşünenlerin oranı kararsızlar ile birlikte %36,66 oranında olduğu görülmektedir. İş yükü fazlalığı çalışmada yorgunluğa, bitkinliğe ve işe karşı isteksizliğe neden olabilmektedir. Çalıştığı yerde alınan kararların kendilerine örgütsel şekilde yazılı olarak tebliğ edildiğini düşünmeyenlerin oranının %33,33 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6(c)). İş yerinde alınan kararlardan haberi olmayan, bilgilendirilmeyen çalışan iş yerine karşı aidiyet duygusunu kazanamaz, kendisini oranın bir çalışanı olarak hissedemez. Buda çalışanın ruh halinin bütünlüğünün bozulmasına neden olabilmektedir. Çalışanlar arasında fazla yaptığı işin karşılığında ek ücret (promosyon) ödenmediğini düşünenlerin oranı ise kararsızlar ile birlikte %33,33 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6(d)). Yaptığı fazla işin karşılığını alamayan çalışan, emeğinin karşılığının olmadığını ve kendisinin değersizleştirildiğini düşünebilir.



Şekil 6. Çalışanların (a) amirleri ile iletişim eksikliği olduğunu düşünenlerin dağılımları, (b) yaptığı iş yükünün fazla olduğunu düşünenlerin dağılımı, (c) işyerinde alınan kararların çalışanlara örgütsel şekilde yazılı olarak tebliğ edildiğini düşünmeyenlerin dağılımı, (d) fazla yaptığı işin karşılığında ek ücret (promosyon) ödenmediğini düşünenlerin dağılımı.

4. Bulgular ve Tartışma

Çalışmada Aksaray ilinde faaliyet gösteren açık işletme üretim yöntemiyle üretim yapan bir taş ocağında çalışanların psikososyal risk faktörlerini proaktif bir yaklaşımla tespit etmek amacıyla WHO tarafından belirlenen konu başlıklarından yola çıkılarak çeşitli sorular içeren bir anket oluşturulmuş ve bu sorulara işletme çalışanları tarafından verilen cevaplar istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. İş kazalarının oluşumunda psikososyal tehlikelerden kaynaklı en önemli risk faktörlerinin neler olduğu araştırılmıştır.

Çalışanların demografik özellikleri genel olarak değerlendirildiğinde; %70'inin orta yaş ve üzeri yaşta olduğu; %83,33'ünün evli olduğu; öğrenim durumlarına bakıldığında ise %20'sinin lise ve üstü öğretim seviyesine sahip olduğu; gelir durumları değerlendirildiğinde ise %30'unun 10.001₺ ve üstü ücret aldığı; çalışanların %53,33'ünün madencilik sektöründe 8 yıl ve üzeri deneyime sahip olduğu tespit edilmiştir.

İşletmede çalışanların herhangi bir ramak kala olaya maruz kalma durumları sorgulandığında ise %30'luk kısmı ramak kala olay yaşadığını düşünmektedir. Her ne kadar çalışanların yarıdan fazlası madencilik sektöründe 8 yıldan daha uzun süreli bir deneyime sahip olsa da, %73,33'lük kısmı daha önce bir iş kazası geçirmediğini beyan etmiştir. Bu durum çalışanların iş kazasına maruz kalma durumunu, uzuv kayıplı günlerce veya haftalarca işe gelemeyecek ağırlıkta bir olay olarak düşünüyor olmalarının bunda etken olduğu söylenilebilir. Çalışanlar geçirdikleri küçük boyutlu olayları (kesik, ezilme, burkulma vb.) iş kazası olarak kabul etmemekte, amirlerine dahi bildirmemektedirler.

Çalışmada iş kazalarının oluşumunda psikososyal tehlikelerden kaynaklı en önemli risk faktörleri tespit edilmiştir. Bunların ilk sırasında yer alan monotonluk ve tekrarlayıcılık çeşitli fiziksel sorunlara, iş verimliliğinin düşmesine, işe karşı isteksizliğe yol açabilmekte olup, işletmede çalışanların yarısından fazlası işyerinde sürekli aynı işi yaptığını düşünmektedir. Çalışanların yarıya yakını, yaptığı işin hak ettiği saygınlığı ve değeri görmediğini düşünmekte, buda işe karşı aidiyet duygusunu ve bağlılıklarının azalmasına neden olmaktadır. Yaptığı işin belirsiz olduğunu düşünen çalışan oranının da yine yarıya yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu durum çalışanların yaptıkları işle alakalı gerekli bilgilendirme ve eğitimlerinin düzenli yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Ücretin tam olarak ve zamanında ödenmediğini düşünen %40'a yakın çalışan mevcut olup, bu durumun çalışanlarda mutsuzluk ve verimlilik düşüklüğü gibi psikolojik çöküntülere sebebiyet verdiği söylenilebilir.

Anket çalışması yapılan işyerinde %43,34'lük kesimin liyakate uymayan görevlendirmeler yapıldığını beyan ettiği görülmüştür. Böyle bir çalışma ortamı, çalışanların ayrımcılığa uğradığını düşünmelerine sebebiyet verebilmekte ve psikolojilerini olumsuz yönde etki etmektedir. Yaptığı işte becerilerini tam olarak kullanmadığını düşünen yarıya yakın çalışan olduğu tespit edilmiştir. Yeteneğini gösterememe ve tam olarak kullanamama duygusunun çalışanlarda duygusal açıdan hüzne yol açtığı bilinmektedir. Amirleriyle iletişim problem yaşadığını

düşünen çalışanların işe karşı isteksiz, motivasyonu düşük ve huzursuz bir çalışma ortamında verimli olamayacakları aşikârdır. Kararsızlarla birlikte yaptığı iş yükünün fazla olduğunu düşünen %36,66'lık çalışanın olması, iş yükü fazlalığının çalışanda yorgunluğa ve bitkinliğe neden olabileceği bilindiğinden psikososyal bir risk faktörü olarak bunun da iş kazalarının oluşumunda etkili olduğu sonucuna ulaşılabilir. İşyerinde alınan kararlar yazılı olarak çalışanlara tebliğ edilmediğinde alınan karardan haberi olmayan çalışan kendisini aidiyet duygusu ve oranın bir çalışanı olarak hissedememesine neden olabilmektedir. İşyerinde böyle olduğunu düşünen %33'33'lük bir çalışan kesimi bulunmaktadır. Fazla yaptığı işin karşılığında ek ücret alamadığını düşünen kararsızlarla birlikte %30'dan fazla çalışan bulunmaktadır. Emeğin karşılığının alınmaması, kişide kendisinin değersizleştirildiği ve önemsenmediği duygusu yaratabilmektedir.

Çalışma kapsamında açık işletme yöntemiyle üretim yapan kırma taş ocağında tespit edilen en önemli psikososyal risk faktörleri dışında ayrıca konu ile ilgili çok tehlikeli işler grubunda yer alan farklı sektörleri kapsayan çalışmalar da incelenmiştir. Psikososyal risklerin de fiziksel, kimyasal, biyolojik ve ergonomik risk etmenleri gibi sektör ve çalışma ortamı bazında değişiklik göstermekte olduğu görülmüştür. Örneğin; çalışma koşullarının madencilik sektörüne benzer şekilde ağır ve emek yoğun olduğu en riskli iş kollarından birisi olan inşaat sektöründe çalışanların gelir seviyesinin düşük olması, fazla iş yükü ve işin monotonluğu, yöneticilerle olan zayıf ilişkiler, işyerinde sözel ve fiziksel şiddete maruz kalmak, yetersiz terfi olanakları (yükselme ihtimalinin bulunmaması), iş taleplerinin birbiri ile çatışması, mesai zamanlarının belirsizliği, işyerlerinde çalışanlar arasındaki iletişim bozuklukları ve iş belirsizliği (güvencesizliği) gibi faktörler en önemli psikososyal risk etkenleri olarak belirlenmiştir [30, 32, 33, 34]. Metal ve demir-çelik sanayinde ise iş stresi, çalışanların gelir seviyesinin düşük olması, işyerinde özgürlük eksikliği ve tükenmişliğin önemli birer psikososyal risk faktörü olduğu sonucuna ulaşılmıştır [32, 35, 36, 37].

5. Sonuçlar

Sonuç olarak yapılan çalışmanın, açık ocak işletmelerinde WHO kriterlerine göre belirlenen başlıklar çerçevesinde belirlenen psikososyal risk faktörlerinin, maden işletmelerindeki karar verici yöneticilerin kendi işletmelerinde kısa yoldan psikososyal tehlikelerin nasıl kolaylıkla belirlenebileceği konusunda yol gösterici bir kaynak olacağı söylenilebilir. Bu çalışmada anket sonuçlarına göre ön plana çıkan on başlık, çalışmanın gerçekleştirildiği açık ocak işletmesindeki çalışanların psikososyal risk faktörlerini göz önüne sunmakta ve iş kazasına uğramalarına neden olabilecek faktörler olarak değerlendirilmelidir. Tespit edilen bu faktörlerin ve bunlarla ilişkili psikososyal tehlikelerin önlenmesi, iş kazası ve ramak kala olayların etkili bir biçimde azaltılmasında veya ortadan kaldırılmasında belirleyici olacağı söylenebilir. Madenciliğin dinamik koşulları göz önünde bulundurularak, işletmelerdeki risk yönetimi sürecinin dinamik bir süreç olarak görülmesi, mühendislik kontrollerinin sürekli güncellenmesi ve gözden geçirilmesi esastır.

Kaynaklar

- [1] MTA. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/Dunyada+ve+Turkiyede+Kalay.pdf>, Erişim Tarihi: 17.04.2023.
- [2] Amponsah-Tawiah, K., Jain, A., Leka, S., Hollis, D., Cox, T. Examining psychosocial and physical hazards in the Ghanaian mining industry and their implications for employees' safety experience. *J. Saf. Res.* 2013; 45: 75-84.
- [3] Amponsah-Tawiah, K., Leka, S., Jain, A., Hollis, D., Cox, T. The impact of physical and psychosocial risks on employee well-being and quality of life: The case of the mining industry in Ghana. *Saf. Sci.* 2014; 65: 28-35.
- [4] Önder, S. Bir yeraltı kömür madeni çalışanlarının psikososyal risk faktörlerinin istatistiksel değerlendirmesi. *Türkiye 25. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı 2017*; 417-423.
- [5] Widanarko, B., Modjo, R., Rantetampang, J. Risk factors associated with work-related fatigue among Indonesian mining workers. *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018) Volume VIII: Ergonomics and Human Factors in Manufacturing, Agriculture, Building and Construction, Sustainable Development and Mining 20*. Springer International Publishing 2019; 1029-1037.
- [6] Önder, S., Kundak, E., Önder, M. Madencilik sektöründe çalışan kadınların psikososyal tehlikelerinin belirlenmesi: Manyetiz örneği. *Türkiye 26. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı 2019*; 1541-1551.
- [7] Mościcka-Teske, A., Sadłowska-Wrzesińska, J., Najder, A., Butlewski, M. The relationship between psychosocial risks and occupational functioning among miners. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* 2019; 32(1).
- [8] MAPEG. https://www.mapeg.gov.tr/maden_istatistik.aspx, Erişim Tarihi: 05.11.2022.
- [9] Bacak, B. İş kazalarını etkileyen faktörler ve bunları önlemenin yolları. *Doktora Tezi. İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Doktora Tezi, İstanbul. 2002.*

- [10] Eren, N.Ö. Taş ocağı işletmelerinde iş sağlığı ve güvenliği şartları. Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı. Yüksek Lisans Tezi. Konya 2019.
- [11] Alejano, L.R., Stockhausen, H.W., Alonso, E., Bastante, F.G., Oyanguren, P.R. ROFRAQ: A statistics-based empirical method for assessing accident risk from rockfalls in quarries. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2008; 45(8): 1252-1272. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.01.003>
- [12] Mutlu, M. Aksaray ilindeki bir taş ocağında iş sağlığı ve güvenliği kapsamında Fine-Kinney metodolojisi ile risk değerlendirmesi. Uluslararası Bilimsel Çalışmalar Kongresi; 26-28 Temmuz 2021; Online. 667-677.
- [13] İlhan, M.N. Psikososyal risk etmenleri. <http://docplayer.biz.tr/13529332-Unite-7-is-sagligi-ve-guvenligi-icindekiler-doc-dr-mustafa-necmi-ilhan-hedefler-psikososyal-risk-etmenleri.html>, 2016, Erişim Tarihi: 07.10.2022.
- [14] Li, C.Y., Chen, K.R., Wu, C.H., Sung, F.C. Job stress and dissatisfaction in association with non-fatal injuries on the job in a cross-sectional sample of petrochemical workers. *Occupational Medicine* 2001; 51(1): 50-55.
- [15] Ghosh, A.K., Bhattacharjee, A., Chau, N. Relationships of working conditions and individual characteristics to occupational injuries: a case-control study in coal miners. *Journal of Occupational Health* 2004; 46(6): 470-480.
- [16] Leka, S., Griffiths, A., Cox, T. Work organisation and stress: systematic problem approaches for employers, managers and trade union representatives. World Health Organization 2003.
- [17] Doğan, Z., Bağış, M. Toplumun polisten beklenti ve düşüncelerine etkili olan faktörlerin likert ölçekli sorularla belirlenmesi. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi* 2011; 25(1): 207-223.
- [18] Bryman, A. *Social research methods* 4th ed. Oxford: Oxford University Press 2012.
- [19] Çevik, N. K., Korkmaz, O. Türkiye’de yaşam doyumu ve iş doyumu arasındaki ilişkinin iki değişkenli sıralı probit model analizi. *Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi* 2014; 7(1): 126-145.
- [20] Koğar, E.Y., Demircioğlu, E. 6.-7.-8. Sınıf matematik dersi öğrenme alanlarına ilişkin ölçekleme çalışması. *Başkent University Journal of Education* 2016; 3(1): 44-52.
- [21] Arıkan, R. Anket yöntemi üzerinde bir değerlendirme. *Haliç Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi* 2018; 1(1): 97-159.
- [22] Özkan, M., Turgut, N., Ay, A., Uslu, K. Hastanelerde modern yönetim felsefesinin verimliliğe etkisi: Eğitim ve Araştırma Hastanesi Uygulaması. *Okmeydanı Tıp Dergisi* 2013; 29(1): 26-32.
- [23] Sencer, M., Sencer, Y. *Toplumsal araştırmalarda yöntem bilim. Türkiye ve Orta Doğu Amme İdaresi Enstitüsü. Ankara: TODAİ yayınları* 1978; 288.
- [24] Büyükköztürk, Ş. *Sosyal bilimler için veri analizi el kitabı*, 9. Baskı, Pegem Akademi, Ankara 2008; 169.
- [25] Tavşancıl, E. Tutumların ölçülmesi ve SPSS ile veri analizi, Nobel Akademik Yayıncılık 2019; 230.
- [26] Cronbach, L.J. Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika* 1951; 16(3): 297-334.
- [27] Özdamar, K. *Paket programlarla istatistiksel veri analizi-1*. 4. Baskı. Eskişehir: Kaan Kitabevi 2002.
- [28] EUROSTAT. *European statistics on accidents at work (ESAW) methodology*. 2001 Edition. Luxembourg: European Commission, Eurostat. http://www.hsa.ie/eng/Topics/Statistics/ESAW_Methodology.pdf, 2001, Erişim Tarihi: 07.11.2023.
- [29] SGK. http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari, Erişim Tarihi: 17.04.2023.
- [30] Kocabaş, F., Aydın, U., Özgüler, V.C., İlhan, M.N., Demirkaya, S., Nihan, A.K., Özbaş, C. Çalışma ortamında psikososyal risk etmenlerinin iş kazası, meslek hastalıkları ve işle ilgili hastalıklarla ilişkisi. *Sosyal Güvence* 2018; 14: 28-62.
- [31] Semerci, B. <https://bengisemerci.com/is-yerindeki-gizli-psikiyatrik-sorunlar/>, 2013, Erişim Tarihi: 23.02.2023.
- [32] Eşsiz, T. İş Kazalarının meydana gelmesinde ücret faktörü: Türkiye uygulaması/Demir Çelik uygulaması/İnşaat Sektörü Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, T.C. İstanbul Rumeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İş Sağlığı Güvenliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2019.
- [33] Yiğci, K.M.S., Babaoğlu, E. Bir inşaat firmasında çalışan işçilerin stresle baş etme biçimleri ve etkileyen faktörlerin incelenmesi. *Ohs Academy* 2021; 4(2): 81-92. <https://doi.org/10.38213/ohsacademy.984598>
- [34] Korkut, A.E. Psikososyal risk faktörleri ve inşaat sektöründe bir çalışma. *İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi*, T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara, 2014.
- [35] Tüfekçi, Ü. Gökçe, A. Metal sanayinde çalışan kadınlar arasında algılanan bir risk faktörü olarak psiko-sosyal riskler. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 2015; 3(3): 301-307.
- [36] Şahin, G. Ağır sanayi kuruluşunda çalışan erkeklerde iş stresi, yeme tutumu, anksiyete ve depresyon düzeyleri arasındaki ilişkinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Işık Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Klinik Psikoloji Ana Bilim Dalı, İstanbul, 2017.
- [37] Tüzün, E. 2022. Manisa’da bir çelik fabrikasında iş kazası ve psikososyal riskler arasındaki ilişkiler. *Tıpta Uzmanlık Tezi*, T.C. Manisa Celal Bayar Üniversitesi Tıp Fakültesi Halk Sağlığı Anabilim Dalı. Manisa, 2022.

Classification of Real and Fake Face Data Using Capsule Networks

Ayşe ÇOBAN^{1*}, Fatih ÖZYURT²

¹ Department of Software Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Firat University, Elazig, Turkey.

² Department of Software Engineering, Faculty of Engineering, Firat University, Elazig, Turkey.

*¹ aysecoban9603@gmail.com, ² ozyurtfatih@gmail.com

(Geliş/Received: 14/12/2022;

Kabul/Accepted: 01/04/2023)

Abstract: Recently, with the advancement of technology, artificial intelligence has begun to be used in many areas. It is used in many fields, such as artificial intelligence, image processing, natural language processing, and recommended systems. The increase in the use of artificial intelligence has revealed the need for data, which has led to the production of new data from existing data. Today, generative adversarial networks (GAN) synthesize a wide variety of data inspired by existing data. These fake data produced from real image data can sometimes cause undesirable situations. It is essential to know whether the images, crucial for security, are fake or not. In this study, the classification of real human face data and fake face data generated from these data has been made. Fake face data were generated with the help of StyleGAN2-ADA from a small-sized dataset created by collecting the facial data of a famous person. It is aimed to classify the generated fake face data and real face data with the capsule network model.

Keywords: Capsule Networks, StyleGAN, Deep Learning.

Kapsül Ağları Kullanılarak Gerçek ve Sahte Yüz Verilerinin Sınıflandırılması

Öz: Son zamanlarda teknolojinin ilerlemesiyle birlikte yapay zekâ birçok alanda kullanılmaya başlandı. Yapay zekâ, görüntü işleme, doğal dil işleme, öneri sistemleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Yapay zekâ kullanımının artması, veriye olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Bu durum mevcut verilerden yeni verilerin üretilmesine yol açmıştır. Günümüzde, çeşitli üretici ağlar (GAN), mevcut verilerden ilham alarak çok çeşitli verileri sentezler. Gerçek görüntü verilerinden üretilen bu sahte veriler bazen istenmeyen durumlara neden olabilmektedir. Özellikle güvenlik açısından önem arz eden görüntülerin sahte olup olmadığının bilinmesi önemli bir konudur. Bu çalışmada, gerçek insan yüzü verilerinin ve bu verilerden üretilen sahte yüz verilerinin sınıflandırılması yapılmıştır. Ünlü bir kişinin yüz verileri toplanarak oluşturulan küçük boyutlu bir veri setinden StyleGAN2-ADA yardımıyla sahte yüz verileri üretilmiştir. Kapsül ağ modeli ile üretilen sahte yüz verileri ile gerçek yüz verilerinin sınıflandırılması amaçlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Kapsül Ağlar, StyleGAN, Derin Öğrenme.

1. Introduction

Facial data classification is one of the deep learning problems studied extensively. Recently, with the popularization of GANs, fake data has started to be generated from real data. GANs consist of two structures: Generator and Discriminator. The Generator is the part that produces fake image data from related image data. On the other hand, Discriminator distinguishes the fake images generated by the Generator from the real images [1]. Thus, it is aimed that the image data generated is similar to the real data.

Obtaining fake data from real data can be used for malicious purposes. Fake data, such as face and signature images, essential for security, can cause problems in many areas. From this point of view, it is crucial to learn whether the image data is fake or not.

Convolutional neural networks are one of the most preferred methods in image data classification processes. Convolutional neural networks generally consist of convolution, pooling, and fully connected layers. The structure of convolutional neural networks is shown in Figure 1. The reason why convolutional neural networks are preferred is; They are easy to implement, and these networks perform classification with high performance.

* Sorumlu yazar: aysecoban9603@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-9922-8616, ² 0000-0002-8154-6691.

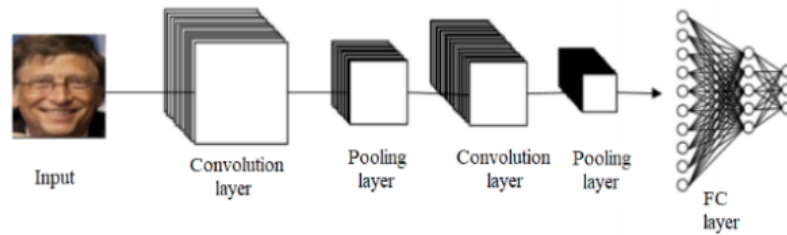


Figure 1. Convolutional neural networks layer

However, convolutional neural networks may only be able to perform somewhat efficient classification in some cases. The pooling layer in the structure of convolutional neural networks is a layer that provides the desired attributes from the data. This layer can cause information loss in the data [2]. In addition, convolutional neural networks may not be able to make successful classifications in datasets with insufficient samples with different angles, poses, and states [3]. For each sample, the need for a sufficient number of similar samples affects the performance of convolutional neural networks. Capsule networks are one of the preferred methods to solve these problems. Capsule networks receive data as vectors, not scalars. The vector parameters contain information about the state of the components in the data. Therefore, capsular networks; are the networks that perform the training process by considering the features of the components in the data, such as position, angle, and orientation relative to each other. Capsule networks learn more information from data than convolutional neural networks. This shows that capsule networks can also classify small data sets successfully [4].

In recent years, many studies have been carried out to solve such problems. One of these studies was done using a 9000-image real-fake human face dataset from the Kaggle depository. The study was conducted to classify the data in question with VGG16, ResNet50, MobileNet, InceptionV3, and a model they recommend and compare the obtained performance. As a result of the study concluded the proposed model with 95%, VGG19 93%, ResNet50 99%, MobileNet 98%, and InceptionV3 99% test accuracy[5].

Another study proposed an approach called FakeSpotter[6]. This proposed approach incorporates the Neuron coverage technique. In this study, the authors obtained fake face images from the CelebA-HQ and FFHQ datasets using InterFaceGAN [7] and StyleGAN [8] models. 12,000 images, 10,000 train, and 2,000 test images were used in the study. In this research, the FakeSpotter approach achieved fake face detection accuracy of 78.23%, 80.54%, and 84.78% in VGG-Face, OpenFace, and FaceNet, respectively.

Another study is based on data from the UW dataset[9], which consists of Google Earth satellite images and fake images produced with CycleGAN [10]. They used ResNet50, InceptionV3, Xception, and VGG16 models in the study. As a result, they achieved the best result among these models with the ResNet50 model.

Studies on this subject continue to be carried out. This study includes the classification of real face image data and fake face image data on a small data set. The study aims to investigate how the capsule networks will obtain results on this dataset.

2. StyleGAN

The general structure of generative adversarial networks consists of Generator and Discriminator. The Generator first performs a generation operation with latent space, and the Discriminator distinguishes whether the generated data is real. Gradients are calculated with backpropagation in each epoch, and the difference between the real and generated images is found [11]. According to the error, it is aimed that the Generator generates data more similar to the real data. This structure is shown in Figure 2.

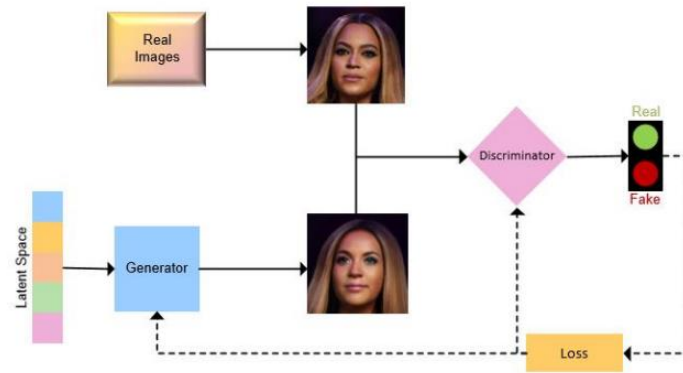


Figure 2. GAN structure

The primary purpose of GANs is to generate fake data very similar to real data. There are many types of GANs used in this sense. One advanced network that generates high-resolution fake image data from the given high-resolution real image data is StyleGAN [8]. It needs to be more manageable how the latent space evolves in traditional GANs. StyleGAN has included a nonlinear mapping network in this latent space. Thus, the generation process can be concluded more successfully. StyleGAN generates the fake image data incrementally, starting from low resolution to high resolution. Another feature is that it combines image styles using adaptive instance normalization (AdaIN) at each layer [12]. Adaptive Instance Normalization causes blobs (Blob artifacts) resembling water droplets to form in the generated images. In the proposed StyleGAN2, adaptive instance normalization is restructured as weighted demodulation [13]. On the other hand, it has been observed that the approach of generating high-resolution data leads to feature degradation in images. In StyleGAN2, the Generator and Discriminator are connected using multi-hop connections at each resolution level [12].

StyleGAN2-ADA is very similar to StyleGAN2 in structure. However, it applies the Adaptive Discriminator Augmentation approach to the inputs. This technique considerably reduces the amount of data needed for training [13], and this enables successful data synthesis with small datasets.

3. Capsule Networks

The first layer of capsule networks is a standard convolution layer. After the convolution layer comes the second layer called the primary capsule layer. The data is resized and passed through the activation function in the primary capsule layer. At the end of these processes, vectors called DigitCaps are obtained from the data as much as the number of classes. The layers of the capsule networks are given in Figure 3.

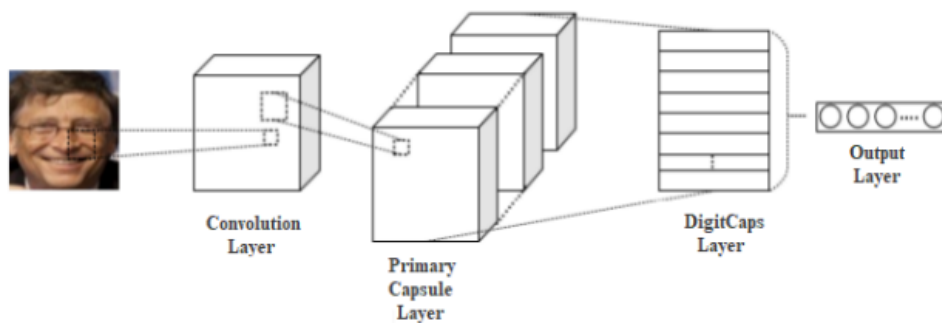


Figure 3. Capsule networks layer

Capsule networks, unlike convolutional neural networks, receive data in vector form. It contains a dynamic routing algorithm in its structure instead of a pooling layer, and the squash function is used as the activation function. A dynamic routing algorithm is an algorithm that matches lower-level capsules with similar inputs to higher-level capsules. It is stated that the dynamic routing algorithm will be more efficient than the pooling layer [14].

In areas where the desired object component is present in the image, the vector size is small in areas where it is not large [3]. The squash function ensures that vector lengths take a value between zero and one, depending on the size of the vectors. The vectors here represent the probability of the received data component being in the target class and its state, namely its parameters [15]. The direction of the vector in question represents the state of the component. (angle, direction, thickness, etc.).

4. Method And Material

In this study, the face data classification process was carried out with Tesla K80 hardware in a Google Collaboratory working environment using a capsule networks model. The data used in this study were created by collecting facial images of a celebrity person from the internet. The dataset consists of 200 face image data, and 200 new data was synthesized from the aforementioned data set using StyleGAN2-ADA. Thus, a dataset of 200 real and 200 fake face images was created to perform the classification study. The data has been reduced to 64x64 dimensions to complete the classification process with less cost using capsule networks. An example of the prepared data set is shown in Figure 4. 60% of the prepared data set was used for training, 20% for validation, and 20% for testing.



Figure 4. Sample of dataset

5. Results

The results of the capsule networks model from the experiment on the data are shown in Table 1. As a result of the classification study, the capsule networks model obtained 87.9% training accuracy, 86.2% validation accuracy, and 85% test accuracy. The training and validation graph of the model is given in Figure 5.

Table I. Capsule networks model results

Capsule networks model results	
<i>Training</i>	87.9%
<i>Validation</i>	86.2%
<i>Test</i>	85%

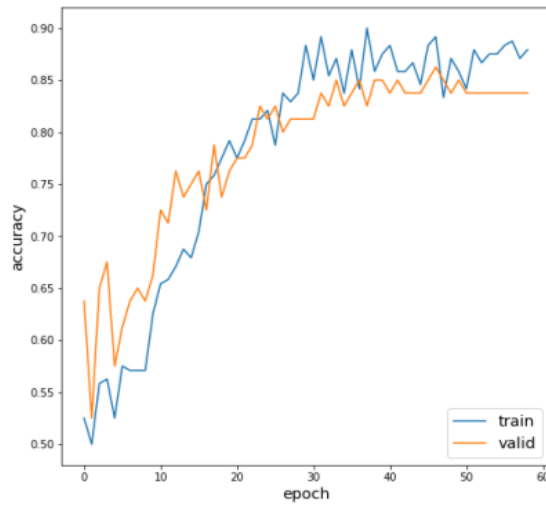


Figure 5. Graph of the training and validation process of the model

No significant change was observed between the training and validation accuracy results. Since the experiment's validation accuracy result remained constant after a while, the study resulted in 59 epochs. The confusion matrix of the model is given in Figure 6.

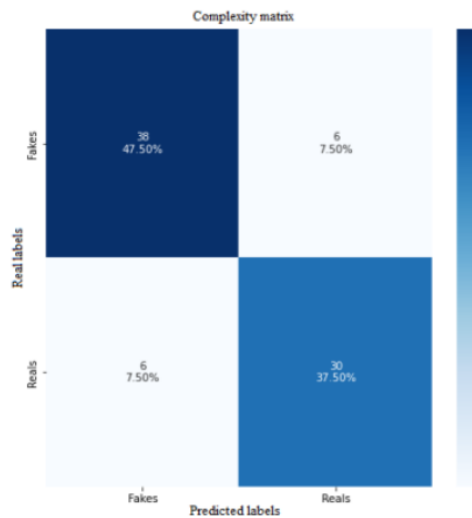


Figure 6. The confusion matrix of the model

An example of the capsule networks model to predict the classes of some of the face data used is as in Figure 7.

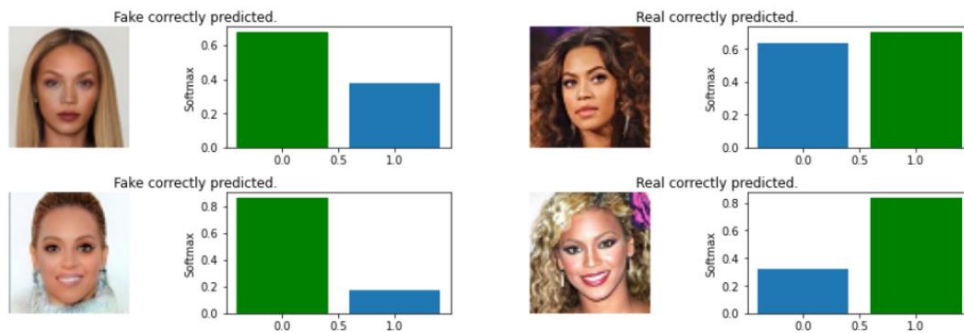


Figure 7. Prediction example of the model

Capsule networks successfully performed the classification process, and the performance is expected to increase if the dataset is prepared larger in size. The disadvantage encountered in the classification is that the capsule network model performs the training process for a long time. The training process, which takes about 20 minutes, is likely to be costly in terms of time compared to other networks.

6. Conclusion and Recommendations

Today, GANs produce similar data sets inspired by image data. These fake data produced from real image data are used in many areas where artificial intelligence is used. The dataset used in the study consisted of facial images of a famous person and fake images produced with StyleGAN2-ADA. This data is a relatively small dataset consisting of 200 real and 200 fake images. On this dataset, the capsule networks reached 85% test accuracy. Capsule networks have performed a classification process that can be considered successful with the dataset it works with. It is estimated that the study has a high probability of being examined in the future. The fake face dataset obtained using real face data shows that the proposed framework is effectively different from the real face data. In addition, the comparisons between the proposed and other methods show that the proposed model is sufficient in fake detection capacity.

In the future, data can be generated and classified with different GANs. Different models can be used for the classification process. The models used can be developed, and performance comparisons can be made. The results can be examined by increasing or decreasing the dataset size. With different data types, fake and real classification processes can be performed and the results can be examined.

References

- [1] Bahar MS, Buluş E. Derin Öğrenme Teknikleri Kullanılarak Sahte Yüz Fotoğrafı ve Videosu Sentezi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2021; 9(6): 354-369. DOI: 10.29130/dubited.1017584.
- [2] Sabour S, Frosst N, Hinton GE. Dynamic Routing Between Capsules. arXiv preprint 2017; arXiv:1710.09829.
- [3] Kızrak MA, Beser F, Bolat B, Yildirim T. Kapsül Ağları ile İşaret Dili Tanıma Recognition of Sign Language using Capsule Networks. 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) 2018; 1-4. doi:10.1109/SIU.2018.8404385.
- [4] Osman AA, Face Identification Using Capsule Network with Small Data Set. Master Thesis, Tallin University of Technology, 2020.
- [5] Salman, FM, Abu-Naser, SS. Classification of Real and Fake Human Faces Using Deep Learning. *International Journal of Academic Engineering Research (IJAER)* (2022); 6 (3):1-14.
- [6] Wan R, Ma L, Juefei-Xu F, Xie X, Wang J, Liu Y. FakeSpotter: A Simple Baseline for Spotting AI-Synthesized Fake Faces. 2019; arXiv:1909.06122.
- [7] Shen Y, Gu J, Tang X, Zhou B, Interpreting the Latent Space of GANs for Semantic Face Editing. in Proc. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2020.
- [8] Karras T, Laine S, Aila T. A style-based generator architecture for generative adversarial networks. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2019; 4401–4410.
- [9] Zhao B, Zhang S, Xu C, Sun Y, Deng C. Deep fake geography? when geospatial data encounter artificial intelligence. *Cartography and Geographic Information Science* 2021; 48(4): 338–352.
- [10] Fezza SA, Ouis M, Bachir K, Hamidouche W, Hadid A. Evaluation of Pre-Trained CNN Models for Geographic Fake Image Detection. arXiv preprint 2022; arXiv:2210.00361.
- [11] Goodfellow I, Pouget-Abadie J, Mirza M, Xu B, Warde-Farley D, Ozair S, Courville A, Bengio Y. Generative adversarial nets. In *Advances in neural information processing systems* 2014; 2672–2680.
- [12] Situ Z, Teng S, Liu H, Luo J, Zhou Q. Automated Sewer Defects Detection Using Style-Based Generative Adversarial Networks and Fine-Tuned Well-Known CNN Classifier. in *IEEE Access* 2021; 9: 59498-59507. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3073915.
- [13] Karras T, Aittala M, Hellsten J, Laine S, Lehtinen J, Aila T. Training generative adversarial networks with limited data. *Proc. Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 2020; 33: 1-15.
- [14] Kınlı F, Kırac F. FashionCapsNet: Clothing Classification with Capsule Networks. *Bilişim Teknolojileri Dergisi* 2020; 13(1): 87-96. doi:10.17671/gazibtd.580222.
- [15] Çoban A, Özyurt F. Kapsül Ağları ile Yüz Verilerinin Sınıflandırılması, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2022; 33: 176-183. doi:10.31590/ejosat.999055.

Bağ Budama Atığına Uygulanan İnert ve Oksidatif Torrefaksiyon İşleminin Karşılaştırılması

Gizem ÖZER¹, Neslihan DURANAY^{2*}

^{1,2} Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 23279 Elazığ, Türkiye

¹ 9314gizem@gmail.com, ² nduranay@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 31/01/2023;

Kabul/Accepted: 12/05/2023)

Öz: Sunulan çalışmada tarımsal atıkların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla farklı ortamlarda torrefaksiyon işlemi uygulanan bağ budama atığının (BBA) biyokömür (katı ürün) verimi ve yakıt özelliklerindeki değişim araştırılmıştır. Bunun için BBA önce 280°C’de, inert ve oksitleyici ortamlarda, kısa kalma süresinde torrefaksiyona edilmiştir. İşlem sonucu oluşan biyokömürün yakıt özelliklerindeki değişimin tespiti için kısa ve elementel analizler ile birlikte üst ısı değeri ve enerji verimindeki değişim belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen biyokömürün doğal konveksiyonlu sabit yatak yakma sisteminde yanma davranışı incelenerek ham biyokütle ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda her iki ortamda da torrefaksiyon sonrası oluşan biyokömürün yakıt özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak yüksek işlem sıcaklıklarında torrefaksiyon için oksidatif atmosferlerin de kullanılabilirliği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Tarımsal atık, torrefaksiyon, biyokömür, yanma.

Comparison of Inert and Oxidative Torrefaction Process Applied to Vineyard Pruning Waste

Abstract: In the present study, the change in the product yield and fuel properties of the vineyard pruning waste (BBA) was investigated with the torrefaction process applied in different environments in order to improve the fuel properties of agricultural wastes. BBA was first torrefied at 280°C, in inert and oxidizing environments, for a short residence time. In order to determine the change in the fuel properties of the biochar formed as a result of the process, the change in the upper heat value and energy efficiency was determined together with the proximate and elemental analyzes. Torrefied and raw biomass were burned in a fixed bed with natural convection and differences in combustion behavior were evaluated and compared. The results of study show that the fuel properties of the biochar formed after torrefaction in both environments improved. As a result, it can be said that oxidative atmospheres can also be used for torrefaction at high processing temperatures.

Key words: Agricultural waste, torrefaction, biochar, combustion.

1. Giriş

Günümüzde karşılaşılan atmosferik sera etkisi, çevre kirliliği ve fosil yakıtların hızlı tükenmesi nedeniyle, yenilenebilir enerjinin geliştirilmesine olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Güneş, rüzgar, biyokütle, hidroelektrik ve gelgit gibi alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi çalışmaları sürdürülmektedir [1,2]. Bu yenilenebilir enerjiler arasında biyokütle enerjisi; az gelişmiş, gelişmekte olan ve gelişmiş ülkeler de dahil olmak üzere dünya çapında kullanıldığı için en büyük ve en önemli olanıdır [3]. Biyokütle enerjisi, fosil yakıt kullanımından kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltmak için umut verici bir kaynak olarak görülmektedir. Güneş enerjisi fotosentez yoluyla su ve karbondioksitin birleşerek karbonhidratlara dönüşmesi sonucu biyokütlerde kimyasal enerji olarak depolanmaktadır. Biyokütle yakıldıktan sonra bitkide depolanmış olan kimyasal enerji termal enerjiye dönüştürülür ve atmosfere karbondioksit salınır. Atmosfer ve biyokütle arasındaki karbon döngüsünden dolayı, biyokütle karbon nötr bir yakıt olarak kabul edilmiştir [4,5]. Sonuç olarak, fosil yakıtların aksine, enerji kaynağı olarak biyokütle tüketmek, sera gazı emisyonlarının azaltılması, enerji güvenliği ve çevrenin sürdürülebilir kalkınması için faydalıdır.

Biyokütle, genel olarak bitki veya hayvanlardan elde edilen biyolojik materyal ile bunların atık ve kalıntıları olarak tanımlanmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerdeki nüfus için, tarımsal atık ve mahsul atıkları biyokütle enerjisi olarak, birincil enerji kaynaklarından biridir [6]. Sürdürülebilir bir gelecek üzerinde atık biyokütlenin önemli rol oynayacağı düşünülmektedir. Çünkü biyokütle, karbon bazlı yakıtlar ve kimyasallar için tek yenilenebilir ve/veya atık bazlı alternatiftir. Biyokütleden elde edilen yakıtlar kükürt ve sağlığa zararlı maddeleri içermediğinden çevre dostudur. Biyokütlenin oluşumu güneşin varlığı ile devam ettiğinden sürekli bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Bunların yanında atık biyokütle mobil karbonu geri dönüştürürken aynı zamanda oluşan organik

* Sorumlu yazar: nduranay@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-3610-8454, ² 0000-0001-7259-1864

atıkların kütlelerini de aynı anda ve etkin bir şekilde yönetir [7]. Ayrıca, biyokütle kaynaklı ulaşım yakıtlarının işlenmesi, eser miktarda kükürt, nitrojen ve ağır metaller içerdiklerinden daha temiz olma eğilimindedir. Ek olarak, atık biyokütle geniş çapta dağılmıştır; dolayısıyla kullanımı kırsal kalkınmayı teşvik etmek için büyük bir potansiyele sahiptir [8]. Biyolojik atık türevli yakıtların kullanımının, yeni ekonomik kalkınma projeleri için önemli bir katkı olacağı düşünülmektedir [9].

Bütün bunların yanında biyokütle türleri, özellikle tarımsal biyokütle, mevsimsellik, güçlü hidrofiliklik, yüksek nem ve oksijen içeriği, düşük enerji yoğunluğu ve zayıf öğütülebilirlik özellikleri gibi dezavantajlara sahiptir [10,11]. Bu dezavantajların biyokütlenin depolanması ve taşınması üzerinde ciddi etkileri vardır; ayrıca bu özellikler, piroliz [12,13], gazlaştırma [14,15] ve yanma [16,17] gibi sonraki termokimyasal dönüşüm üzerinde de olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bu nedenle, termokimyasal dönüşümden önce biyokütlenin kalitesini iyileştirmek için biyokütlenin ön arıtımı esastır. Son yıllarda biyokütle uygulanan torrefaksiyon işleminin biyokütle kalitesini iyileştirmede etkili bir yöntem olduğu vurgulanmaktadır [6, 18].

Torrefaksiyon, ham biyokütlenin inert veya azot atmosferinde 200-300°C sıcaklık aralığında ısıtıldığı bir tür termal ön arıtma prosesidir [19]. Biyokütlenin 235-275 ve 275-300°C sıcaklıklarında gerçekleştirilen ısı parçalanması sırasıyla hafif ve şiddetli torrefaksiyon olarak sınıflandırılmaktadır [20]. Torrefaksiyon uygulamalarının temel amacı; biyokütlerdeki oksijeni uzaklaştırarak içeriğindeki karbon oranının artırılması, biyokütlenin neminin uzaklaştırılması ve ısı değerinin artırılmasıdır. Bu ayrışma yoluyla, biyokütle kütlelerinin %70'inin ve ısı değerinin %90'undan fazlasının korunduğu daha homojen katılara (biyokömür) dönüştürülebilir [21-22]. Biyokütlenin özellikleri, torrefaksiyon yoluyla daha kullanılabilir duruma getirilebilmektedir [23-24]. Torrefaksiyon işlemi biyokütlenin ısı değeri veya enerji yoğunluğunun artmasına, H/C ve O/C oranları ve nem içeriğinin azalmasına, öğütülebilirlik ve reaktivitenin iyileşmesine sebep olarak, biyokütleye daha homojen bir yapı kazandırmaktadır [25,26]. Ayrıca torrefaksiyon piroliz [27-28], gazlaştırma [29] ve yanma [30] gibi biyokütlenin sonraki termokimyasal süreçlerini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir.

Torrefaksiyon ön işleminin biyokütle besleme stoklarının ve pirolitik ürünlerinin enerji kullanım kalitesini önemli ölçüde iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, biyokütle torrefaksiyonu için endüstriyel uygulamayı gerçekleştirmede çözülmesi gereken iki ana problem daha vardır. Birincisi torrefaksiyon işlemi sırasında ısıtma için gerekli olan enerji tüketimi, ikincisi ise cihazın inert atmosfer gereksinimi ve hava sızdırmazlığıdır. Taşıyıcı gaz olarak CO₂ [31], baca gazı [32], piroliz gazı [33] ve inert gaz-hava karışımının [34] kullanıldığı bazı çalışmalar, torrefaksiyon atmosferinin önemli bir işlem parametresi olduğunu göstermiştir. Yakma sistemlerinde oluşan düşük oksijen içerikli (%2-6) baca gazının kurutma ve oksidatif torrefaksiyon işlemlerinde taşıyıcı gaz olarak kullanılması, sıcak atık bir gazın değerlendirilmesini sağlayarak, enerji tasarrufuna katkıda bulunacaktır [35]. Ayrıca, ortamdaki oksijen, torrefaksiyon işlemi sırasında üretilen hafif uçucu maddelerle reaksiyona girebilir ve ardından ilave ısı açığa çıkararak kendi kendine devam eden bir ısı torrefaksiyon işlemine yol açabilir ve böylece torrefaksiyon maliyetini düşürebilir [36]. Oksidatif torrefaksiyonun reaksiyon hızının genellikle oksidatif olmayan torrefaksiyona göre daha hızlı olduğu ve hedeflenen kütle kaybına ulaşmak için süreyi kısaltacağı veya sıcaklığı düşüreceği bildirilmektedir [37]. Daha yüksek torrefaksiyon sıcaklığı ve oksijen konsantrasyonu, katı ürünün özelliklerini ve bileşimlerini önemli ölçüde etkileyebilir. Oksidatif olmayan torrefaksiyon ile karşılaştırıldığında, oksidatif torrefaksiyon daha fazla avantaja ve endüstriyel ve ticari alanlarda daha büyük uygulama beklentisine sahiptir [38].

Torrefaksiyonun ana amacı, biyokütlenin elektrik üretimindeki payını artırmak ve kömür kullanımını azaltarak emisyon seviyesini düşürmektir; torrefiye biyokütle, kömürle karşılaştırılabilir yanma özelliklerine sahip olmalıdır. Torrefiye biyokütle, termal olarak ham biyokütleden daha karardır ve yanma sırasında daha yüksek reaksiyon ısısı oluşur. Torrefiye numunenin ekzotermikliği ham biyokütleden daha yüksektir ve torrefaksiyon işleminin şiddeti ile artar. Uçucu madde içeriğinin düşük olmasından dolayı, torrefaksiyon işleminden sonra biyokütlenin yanma hızı düşer. Dolayısıyla torrefiye biyokütlenin yakılması ham biyokütleye kıyasla daha uzun sürer. Bu etki, daha yüksek uçucu madde ayrılma potansiyeli nedeniyle, yüksek sıcaklıklarda torrefiye edilmiş biyokütlerde daha belirgindir [39].

Torrefiye ve ham biyokütlenin yanma davranışları karşılaştırıldığında daha kısa duman ve alev periyodu ve daha uzun akkor periyodu tespit edilmiştir. Torrefaksiyon sırasında biyokütlenin uçucu içeriğindeki azalma, sabit karbon içeriği ve yoğunluğundaki artma, hemiselülozun moleküler değişiminden kaynaklanmaktadır. Ham biyokütle ile karşılaştırıldığında torrefiye biyokütlenin daha yüksek aktivasyon enerjisine, daha yüksek uçucu madde ayrılma, tutuşma ve yanma sıcaklıklarına sahip olduğu, karbon yanma periyodunda daha uzun sürede ve düşük hızla yandığı tespit edilmiştir [40].

Son yıllarda çevresel kirliliğin önlenmesi ve atıkların değerlendirilmesi amacıyla bitkisel üretim sonucunda oluşan hasat atıklarının veya hammaddesi tarımsal ürün olan pek çok fabrikasyon atığının farklı alanlarda yeniden kullanılabilir hale getirilmesi yaygınlaşmıştır. Bu amaçla değerlendirilen tarımsal sanayi ürünlerinden biri de

üzümdür. Üzüm dünyada, 7155187 ha alanda, 77181122 ton üretim miktarı ile en fazla üretilen meyvelerin başında gelmektedir [41]. Üzümün işlenmesi sonucunda açığa çıkan cibre (kabuk, çekirdek ve üzüm çöpleri) ve budama atıkları çok eskiden beri değişik şekillerde değerlendirilmektedir. Türkiye’de yaklaşık olarak 467000 hektar alanda bağcılık yapılmakta ve her yıl yaklaşık 2335000 ton budama artığı ortaya çıkmaktadır [42]. Her geçen gün atık teknolojilerinin gelişmesinin sonucu olarak bu atıkların katma değeri artmaktadır. Bağ budama mevsimi sonunda oluşan bu atık, yakıt olarak önemli bir değer oluşturmamakta ve birçok yerde toprağa gömülerek bertaraf edilmektedir. Bağ budama atıklarının direkt yakıt olarak değerlendirilmesi de araştırılmıştır, çalışmalarda özellikle ince çubukların emisyon sorununa neden olduğu belirtilmiştir. Daha kalın odunsu çubukların ise sadece endüstriyel sistemlerde yakıt olarak kullanılabilmesi ve evlerde kullanılmasının uygun olmadığı tespit edilmiştir [43]. Bu atığın yakıt olarak kullanılabilmesi için özellikle nem içeriğinin ve hacminin yüksek olmasından kaynaklanan taşıma, depolama ve yakma sistemine yükleme gibi problemlerin çözülmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada şiddetli torrefaksiyon şartlarında, inert ve oksitleyici ortamda bağ budama atıklarının torrefaksiyonu sonucu oluşan katı ürünün karakterizasyonu ve yanma davranışının karşılaştırılması araştırılmıştır. İşlemin ekonomik ve uygulanabilir olması için ileri bir ön işlem (öğütme ve peletleme vb.) uygulanmamış orijinal boyutlarına yakın bağ budama atıkları ve oksitleyici ortam olarak da hava kullanılmıştır.

2. Materyal ve Metod

Yapılan çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak bağ budama atıklarının (BBA) 280°C torrefaksiyonu ve elde edilen katı ürünün karakterizasyonu yapılmıştır. İkinci aşamada ise ham ve torrefiye BBA numuneleri doğal konveksiyonlu sabit yatak yakma sisteminde 700°C’de yakılmıştır.

2.1. Örneklerin hazırlanması

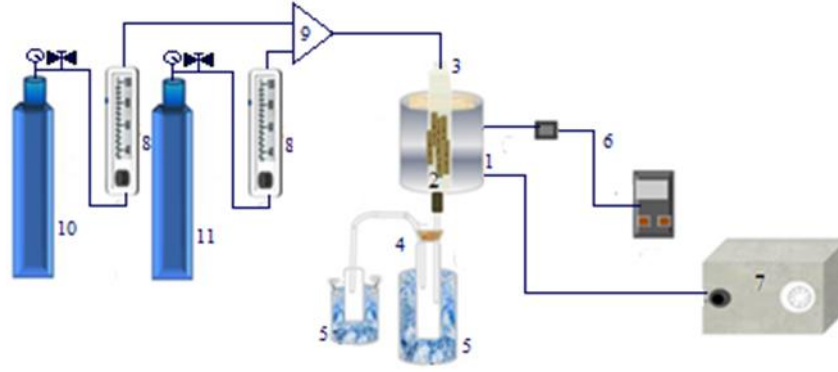
Çalışmalarda Elazığ iline bağlı Hankendi beldesinden toplanan BBA kullanılmıştır. Deneylerden önce BBA iki hafta laboratuvar ortamında kurutulmuştur. Kurutulan BBA çubuklarının bir kısmı torrefaksiyon ve yakma deneylerinde kullanılmak üzere 2,5-3 cm uzunluğunda parçalara (Şekil 1) bağ makasıyla kesilmiştir. Diğer kısmı ise öğütülüp ve elenerek 100 mesh boyutundan küçük taneler ayrılarak kısa (proximate), elementsel ve SEM analizleri ile ısı değerleri belirlenmek üzere kapalı kaplarda muhafaza edilmiştir.



Şekil 1. Bağ budama atığı (BBA)

2.2. Torrefaksiyon deneyleri

Torrefaksiyon deneyleri Şekil 2’de verilen sistemde gerçekleştirilmiştir. Torrefaksiyon sistemi içinden direnç telleri geçirilmiş 45 mm iç ve 115 mm dış çapında ve 105 mm yüksekliğinde refrakter malzemeden yapılmış dikey bir kamara (1) ve içine yerleştirilen 35 mm çap ve 150 mm uzunluğunda pyreks camdan üretilmiş tüp reaktörden oluşmaktadır (2). Reaktörün üst bölümü sisteme inert gazın girişini sağlayacak şekilde pyreks cam kapakla kapatılmıştır (3). Reaktörün alt bölümü ise soğutma sistemine birleştirilmiştir. Soğutma sistemi yoğunlaşabilen torrefaksiyon buharının toplanması için buz banyosuna yerleştirilmiştir. Ayrıca yoğunlaşmayan buharın yakalanması için iki soğutucu kullanılmıştır (4-5). Kamaranın ısıtılması voltaj değiştirici (7) ile sıcaklık kontrolü ise ısıtma kamarasının içine reaktöre degecek şekilde yerleştirilen NiCr termoçift (6) ile yapılmıştır.



Şekil 2. Torrefaksiyon sistemi: 1. Isıtma kamarası; 2. Reaktör; 3. Kapak; 4. Sıvı ürün yoğunlaşma kabı; 5. Buz banyosu; 6. Termoçift; 7. Voltaj değiştirici; 8. Akış ölçer; 9. Karıştırıcı; 10. Hava tüpü; 11. Azot tüpü.

Deneye başlamadan önce reaktör ve sıvı ürün toplama kabı çözücü ile temizlenip etüvde 105°C'de 2 saat kurutulmuş ve soğutulduktan sonra tartılmıştır. Reaktöre yaklaşık olarak 9 g numune konulup, kamara içine yerleştirilmiş ve kapağı kapatılmıştır. Reaktörden 100 ml/dk hızında gazı akışı başlatılmıştır. Torrefaksiyon deneylerinde taşıyıcı gaz olarak oksitleyici ortam için hava, inert ortam için azot gazı kullanılmıştır. Sistem daha sonra voltaj değiştirici ile çalışma sıcaklığına 14°C/dk sabit hızda ısıtılmıştır. Reaktör sistemi çalışma sıcaklığı 280°C'ye ulaştığında fırının ısıtılması durdurulmuştur (işlem sıcaklığında 0 dk kalma süresi). Reaktör yaklaşık 50°C sıcaklığa ulaşıncaya kadar taşıyıcı gaz akışı sürdürülerek soğutulmuştur. Daha sonra gaz akışı durdurularak ortam sıcaklığına kadar soğutulan reaktör içerisindeki örnek çıkarılarak tartılmış ve Eşitlik 1'e ile katı ürün verimi hesaplanmıştır. Katı ürün karakterizasyon için kilitli plastik poşetlerde muhafaza edilmiştir. Ağırlığı deney öncesi bilinen sıvı ürün toplama kabı deney sonunda tartılmış ve ağırlık farkından sıvı ürün miktarı ve verimi (Eşitlik 2) hesaplanmıştır. Gaz ürün verimi ise farktan bulunmuştur (Eşitlik 3).

Deneyler şiddetli torrefaksiyonun gerçekleştiği 280°C'de ve 0 dk kalma süresinde (hava ortamında yanmanın önlenmesi için) azot ve hava olmak üzere iki farklı taşıyıcı gaz ortamı için tekrarlanmıştır. Burada 0 dk, izotermal sürenin başlangıcını veya reaktör sıcaklığı 280°C'ye ulaşıncaya kadar geçen 20 dakikalık ısıtma süresinin sonunu ifade etmektedir.

$$\% \text{Katı ürün verimi} = \frac{m_{bk}}{m_{ham}} \times 100 \quad (1)$$

$$\% \text{Sıvı ürün verimi} = \frac{m_{sıvı}}{m_{ham}} \times 100 \quad (2)$$

$$\% \text{Gaz ürün verimi} = 100 - (\% \text{ Katı ürün verimi} + \% \text{ Sıvı ürün verimi}) \quad (3)$$

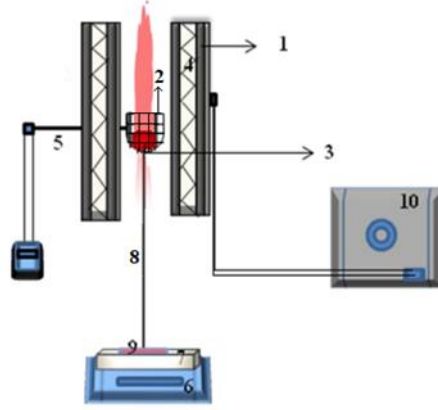
Burada m_{bk} ve m_{ham} sırasıyla biyokömür ve ham biyokütlenin, $m_{sıvı}$ ise sıvı ürünün kütlelerini göstermektedir.

2.3. Yakma deneyleri

Ham ve torrefiye BBA örneklerinin yanma davranışı torrefaksiyon deneylerinde kullanılan ısıtma kamarası (4) içerisinde hazırlanan ve Şekil 3'de verilen doğal konveksiyonlu sabit yatak sisteminde gerçekleştirilmiştir (1). Bu amaçla fırın içerisine 35 mm çapında paslanmaz çelikten yapılmış elek sepet (2) 250 mm uzunluğunda ve 2 mm çaplı çelik çubuğun ucuna takılarak (8), bir destek (7) üzerine sabitlenmiştir. Kamara içerisindeki meydana gelen olayları gözlemek için ayna (9) kullanılmıştır. Sepet ve destek yanma sırasındaki ağırlık değişimlerinin kaydedilmesi amacı ile terazi (6) üzerine yerleştirilmiştir. Kamaranın ısıtılması voltaj değiştirici (10) ile sıcaklık kontrolü ise fırın içerisine elek sepet ile temas etmeyecek şekilde yerleştirilen NiCr termoçift (5) ile yapılmıştır.

Deney öncesinde yakma sistemi, çalışma sıcaklığı olan 700°C'ye ısıtılmıştır. Ön ısıtılmış kamara içindeki sepete ağırlığı bilinen numune düşürülmüş ve kronometre çalıştırılmıştır. İlk andan itibaren numune ağırlığındaki değişim kamera ile kaydedilmiştir. Ayrıca örneklerin yanması esnasında alev görünme süresi, alevin sönme süresi ve korun sönme süresi tespit edilmiştir.

Zamana bağlı olarak kaydedilen ağırlık değişimi verileri kullanılarak uçucu madde yanma ve karbon yanma hızları hesaplanmıştır.



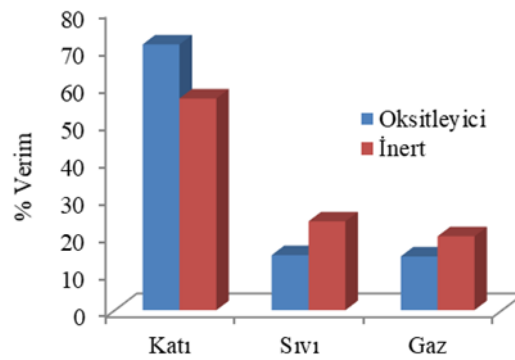
Şekil 3. Sabit yatak yakma sistemi: 1.Refrakter tuğla; 2.Sepet; 3.Pelet; 4.Direnç teli; 5.Termoçift; 6.Terazi; 7.Destek; 8.Sepet çubuğu; 9. Ayna; 10.Voltaj değiştirici.

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Torrefaksiyon İşlemi Sonuçları

3.1.1. İşlem şartının ürün verimine etkisi

Oksitleyici bir ortamda biyokütle ısıtıldığında sıcaklık arttıkça önce termal parçalanma başlar daha sonra oksidasyon reaksiyonları oluşmaya başlar. Oksitleyici ortamda biyokütleden salınan uçucu bileşenler yeterli konsantrasyona ulaştığında tutuşma meydana gelir. Bu çalışmada amaç oksitleyici ortamda biyokütlenin tutuşmasına engel olarak torrefiye edilmesidir. Yüksek sıcaklık ve O₂ konsantrasyonunda yapılacak torrefaksiyonda işlem süresinin önemi artmaktadır. Çünkü artan işlem süresi biyokütlenin tutuşmasına ve yanmasına neden olmaktadır. Bu nedenle her iki ortamda da (hava ve inert) sistem 280°C sıcaklığa ulaştınca ısıtma durdurulup sistem soğutulmuştur. Şekil 4’de 280 °C’de, 0 dk kalma süresinde hava ve inert atmosferde gerçekleştirilen torrefaksiyon işlemi sonucunda elde edilen ürün verimleri verilmektedir. Oksitleyici ve inert ortamda gerçekleştirilen torrefaksiyon işlemleri karşılaştırıldığında, oksitleyici ortamında katı ürün, inert ortamda ise sıvı ve gaz ürün verimlerinin yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4. BBA'nın oksitleyici (hava) ve inert (N₂) ortamda torrefaksiyonu sonucu elde edilen katı, sıvı ve gaz ürün verimleri (280°C, 0 dk kalma süresi)

Oksitleyici ortamda elde edilen biyokömür veriminin inert ortamdaki yüksek olması literatürle uygunluk göstermemektedir. Hem işlem sıcaklığının hem de O₂ konsantrasyonunun yüksek olduğu şartlarda biyokütlenin farklı davrandığı ve daha düşük olması beklenenden biyokömür veriminin inert ortamda elde edilenden yüksek olduğu tespit edilmiştir [44]. Oksitleyici ortamında torrefaksiyon sıcaklığına ısıtılan örneklerden nem ve yüzeye

yakın düşük molekül ağırlıklı uçucu bileşenlerin ayrılması ile birlikte artan sıcaklık ile oluşan oksidasyon reaksiyonlarının yüzeyde bir miktar karbon kaybına neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca tane çevresinde oluşan oksidasyon ürünleri ve kalma süresinin kısa olmasından dolayı örnek içindeki uçucu bileşenlerin dışarı çıkamayıp tane içinde kaldığı ve sonuç olarak katı ürün miktarında artmaya sıvı ve gaz ürün miktarlarında azalmaya neden olduğu belirlenmiştir.

3.1.2. Katı ürünün kısa(proximate) analizi

Tablo 1’de BBA’nın farklı torrefaksiyon ortamlarında elde edilen katı ürünün (biyokömür) kısa (proximate) analiz değerleri ve yakıt oranları verilmektedir. Orijinal numunenin uçucu madde oranı yüksek, sabit karbon ve kül oranının düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca numune %9 oranında nem içermektedir. Uygulanan torrefaksiyon işlemi sunucunda her iki ortamda da BBA’nın uçucu madde oranının azaldığı, kül ve sabit karbon oranlarının arttığı tespit edilmiştir. Oksitleyici ve inert ortamda yapılan torrefaksiyon işlemleri karşılaştırıldığında, oksitleyici ortamda elde edilen biyokömürün uçucu madde oranının inert ortamda elde edilenden yüksek, sabit karbon oranının inert ortamdakinden daha düşük olduğu ve kül oranlarının ise çok farklı olmadığı olduğu tespit edilmiştir. Literatürde oksidatif torrefaksiyonla elde edilen biyokömürün sabit karbon oranının hiçbir zaman inert ortamdaki kadar artmadığı belirtilmiştir [44]. Çünkü oksidatif torrefaksiyon esnasında biyokütle yüzeyinde gerçekleşen oksidasyon reaksiyonlarından dolayı bir miktar karbon kaybı olmaktadır. Diğer taraftan oksitleyici ortamda tane yüzeyinde gerçekleşen oksidasyon reaksiyonları sonucu oluşan gaz ürünlerin, uçucu bileşenlerin tane içinden çıkışını engelleyerek elde edilen biyokömürün uçucu madde oranının yüksek olmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Uçucu madde ve sabit karbon oranları, katı yakıtların iki önemli indeksidir. Bir malzemede daha yüksek bir uçucu madde, daha düşük kalorifik değerli fakat daha reaktif bir yakıtı gösterirken, yüksek sabit karbon, yakıtın daha az reaktif olduğu ancak kalorifik değerinin yüksek olduğunu işaret eder [45]. Tablo 1’de ham ve torrefiye BBA’nın yakıt oranı değerleri de verilmektedir. Yakıt oranı, bir yakıtın sabit karbon ve uçucu madde içeriği oranı olarak tanımlanır. Termik santrallerde yakıt oranı genellikle 0,5-2 aralığında olan kömürler kullanılmaktadır. Yakıt oranı kömür ile biyokütlenin birlikte yakılmasında önemli bir parametredir. Tablo 1’de Ham BBA’nın yakıt oranının düşük olduğu görülmektedir. Bu durum uçucu madde oranının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sonuç BBA’nın kömürle birlikte yakılması durumunda farklı yanma hızları nedeniyle alevde kararsızlığa ve kömür ile birlikte yakmanın yapıldığı enerji santrallerinde işletim güçlüklerine ve düşük yanma verimliliğine neden olacağına işaret etmektedir [46]. Hem inert hem de oksitleyici ortamda torrefiye edilen BBA’nın yakıt oranının yükseldiği görülmektedir. Artan yakıt oranı, BBA’nın inert ve oksitleyici şartlarda torrefaksiyonu sonucu elde edilen biyokömürlerin yakıt özelliklerinin kömürle birlikte yakılabileceği sınırlar arasına yaklaştığını göstermektedir. Böylece biyokütlenin yakıt oranını kömür ile karşılaştırılabilir şekilde iyileştirerek, birlikte yakmanın yapıldığı santrallerde biyokütlenin payı artırılabilir [47].

Tablo 1. Ham ve torrefiye BBA’nın kısa analiz verileri (kuru temel)

Numune	Torrefaksiyon ortamı	%Uçucu madde	%Kül	%Sabit karbon*	Yakıt oranı
Ham		80,0	2,1	17,9	0,2
Torrefiye	Oksitleyici (%21 O ₂)	70,1	3,5	26,4	0,4
	İnert (N ₂)	58,0	3,2	38,8	0,7

*Farktan hesaplandı

3.1.3. Katı ürünün elementel analizi ve üst ısı değeri

Torrefaksiyon ön işleminin hafif bir piroliz işlemi olduğu bilinmektedir. Torrefaksiyona uğradıktan sonra hidrojen ve oksijen biyokütleden nem ve hafif uçucular olarak ayrılırken karbon tutulur. Bu da biyokütlenin karbonizasyonuna neden olur. Karbonizasyon sonucu olarak torrefiye biyoküttele tutulan hidrojen ve oksijene oranla daha fazla miktarda karbon vardır [36]. Tablo 2’de görüldüğü gibi her iki ortamda da torrefaksiyon işlemi sonrasında karbon oranı artarken hidrojen ve oksijen oranları düşmektedir. Oksitleyici ortamda elde edilen biyokömürün karbon oranının inert ortamda elde edilenden daha düşük, hidrojen ve oksijen oranlarının ise yüksek olduğu görülmektedir. Elementel analiz verileri kısa analiz ile uygunluk göstermektedir. Bu durum oksitleyici ortamda örnek yüzeyinde meydana gelen oksidasyon reaksiyonları sonucu oluşan karbon kaybı ve elde edilen biyokömürün daha fazla uçucu madde oranına sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 2. Ham ve torrefiye BBA' nın elementel analiz verileri.

Numune	Torrefaksiyon ortamı	%C	%H	%N	%O*	%S	Atomik H/C	Atomik O/C
Ham		45,2	6,7	0,8	47,3	-	1,78	0,78
Torrefiye	Oksitleyici (%21 O ₂)	54,9	5,8	1,0	38,3	-	1,26	0,52
	İnert (N ₂)	58,9	5,2	1,2	34,6	-	0,96	0,44

*Farktan hesaplandı

Atomik H/C ve O/C oranları, biyokütlenin torrefaksiyonunda enerji yoğunluğunun performansını değerlendirmek için önemli göstergelerdir. Genel olarak ham biyokütlerdeki H/C ve O/C oranları sırasıyla 1,2-2,0 ve 0,4-0,8 aralığındadır. Her iki ortamda da atomik H/C ve O/C oranlarının torrefaksiyon sonrası düştüğü görülmektedir. Atomik H/C oranı inert ortamda %46 azalırken, oksitleyici ortamda %30 azaldığı, atomik O/C oranının ise inert ortamda %44 azalırken, oksitleyici ortamda %33 azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum oksitleyici ortamda elde edilen biyokömürde (char) OH içeren bileşiklerin daha fazla olduğu göstermektedir.

Tablo 3'te oksitleyici ve inert ortamda elde edilen biyokömürlerin üst ısı değerleri ve enerji verimleri karşılaştırılmaktadır. Torrefaksiyon sonrası üst ısı değerlerinin arttığı görülmektedir. Biyokütlerde artan karbon ile azalan hidrojen ve oksijen içeriği üst ısı değerinin artmasına neden olmaktadır. Yakıt içerisindeki karbon yanma esnasında açığı çıkan ısının ana kaynağıdır. Hidrojen de yanma ısısının ana kaynaklarından biridir. Fakat yakıtta bulunan fazla hidrojen karbon oranını düşürmektedir. Biyokütlerde bulunan oksijen ise yakıtın yanmasına yardımcı olur, fakat biyokütlenin ısı değerini düşürür [21]. Bu durum Tablo 3'te açıkça görülmektedir. H/C ve O/C oranlarının düşmesiyle orantılı olarak her iki ortamda da BBA'nın üst ısı değeri artmıştır. Kömürün üst ısı değeri genellikle 25-35 MJ/kg aralığındadır. Literatürde yüksek sıcaklıklarda torrefaksiyon işlemi sonrası biyokütlenin ısı değerinin kömüre yaklaştığı belirtilmiştir [21]. İnert ortamda elde edilen BBA biyokömürünün üst ısı değerinin kömürün üst ısı değerine daha fazla yaklaştığı görülmektedir.

Katı verimi ve ısı değere bağlı olan enerji verimi, torrefaksiyon esnasında kaybedilen enerji miktarının bir göstergesidir [6]. Enerji verimi Eşitlik 4 ve 5'e göre hesaplanmıştır. BBA'nın sahip olduğu enerjinin inert ortamda %75'korunurken daha fazla katı veriminin elde edildiği oksitleyici ortamda %72'si korunmuştur. Enerji verimindeki fark oksitleyici ortamdaki karbon kaybından kaynaklanmaktadır.

$$\text{Üst ısı artma faktörü} = \frac{\text{ÜID}_{\text{tor}}}{\text{ÜID}_{\text{ham}}} \quad (4)$$

$$\% \text{ Enerji verimi} = \% \text{ Katı ürün verimi} \times \text{Üst ısı artma faktörü} \quad (5)$$

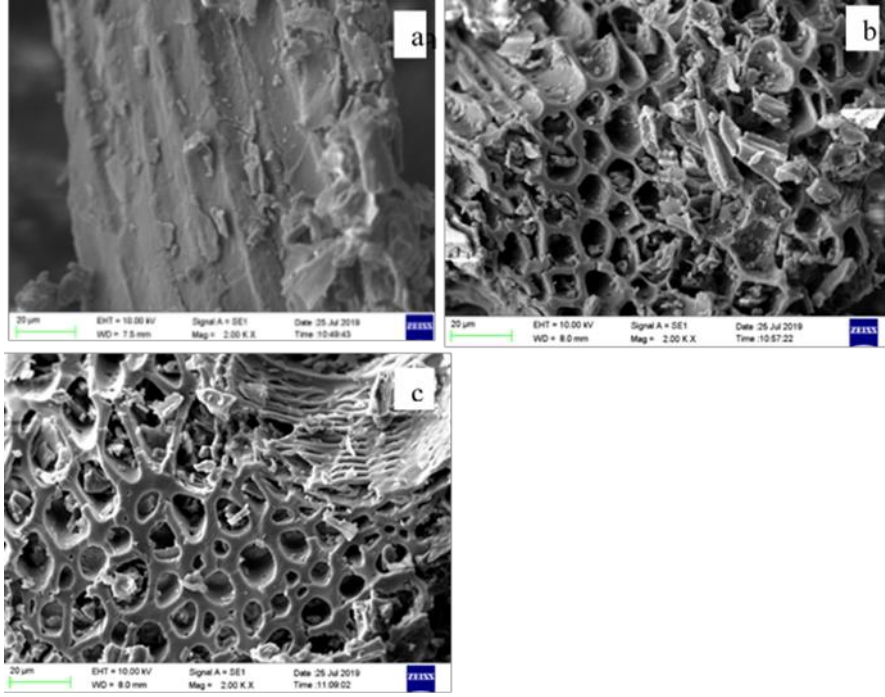
Burada ÜID_{tor} ve ÜID_{ham} sırasıyla torrefiye ve ham biyokütlenin üst ısı değerlerini göstermektedir.

Tablo 3. Ham ve torrefiye BBA'nın üst ısı değeri ve enerji verimi

Numune	Torrefaksiyon ortamı	Katı verimi (%)	Üst ısı değeri (MJ/kg)	Üst ısı artma faktörü	Enerji verimi (%)
Ham			17,79		
Torrefiye	Oksitleyici (%21 O ₂)	71,00	18,18	1,02	72,32
	İnert (N ₂)	56,53	23,66	1,33	75,12

3.1.4. Ham ve torrefiye BBA' nın SEM analizi

Oksitleyici ve inert ortamda yapılan torrefaksiyon işleminin biyokütle yapısı üzerindeki etkisini belirlemek için, BBA'nın torrefaksiyon öncesi ve sonrasındaki SEM görüntüleri Şekil 5'de gösterilmektedir. Görüntüler, biyokütle kesitlerinin mikro yapılarını göstermek için 2 K, faktörleriyle büyütülmüştür. Ham BBA'nın torrefaksiyon öncesi yüzeyinin düzgün ve gözenek içermediği görülmektedir. Her iki ortamda da BBA'nın torrefaksiyon sonrası gözenekli bir yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir. Torrefaksiyondan sonra kapanımların kaybolduğu ve tübüler yapıların oluştuğu görülmektedir. Bu esas olarak hemiselüloz ve bir miktar da ligninin tükenmesinden kaynaklanmaktadır [45].



Şekil 5. BBA'nın Sem analizi görüntüleri: Ham (a), oksitleyici ortamda torrefiye (b) ve inert ortamda torrefiye (c).

İnert ve oksitleyici ortamda elde edilen biyokömürlerin SEM analizlerinde benzer bir yapı değişikliği görülse de oksitleyici ortamda torrefiye edilen biyokütlenin daha pürüzlü gözenek ve yüzeye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum oksitleyici ortamda lignoselülozik yapının oksidasyon reaksiyonlarına maruz kalmasından kaynaklanmaktadır [45]. Oksidatif torrefaksiyon işlemi boyunca özellikle yüzeye yakın bölgelerde oluşan bu pürüzlü yapının biyokütlenin iç kısımlarındaki uçucu bileşenlerin salınmasını etkileyerek tane dışına çıkışını geciktirdiği ve bu bileşenlerin tane içinde kalarak katı ürün veriminin artmasına katkıda bulunduğu tespit edilmiştir.

3.2. Yakma işlemi sonuçları

Tablo 4'de ham ve torrefiye BBA'nın yanma verileri verilmektedir. Yakma sistemine atıldıktan sonra örneğin alev alması için geçen süre tutuşma süresi olarak kaydedilmiştir. Bir yakıtın tutuşması için, yakıt yakma sistemine konulduğu andan itibaren ayrılmaya başlayan uçucu bileşenlerin yakıt etrafında belli bir konsantrasyona ulaşması gerekmektedir. Yakıt etrafında bu konsantrasyona ne kadar çabuk ulaşırsa o kadar hızlı tutuşur. Tablo 4'de hem oksitleyici (hava) hem de inert (azot) ortamda torrefiye edilen BBA'dan elde edilen biyokömürlerin tutuşma sürelerinin düştüğü yani daha hızlı tutuştukları tespit edilmiştir. Tutuşma süresindeki azalmanın torrefaksiyon sonucu uzaklaşan nem ve biyokütlenin yapısında oluşan değişimlerden kaynaklanmaktadır [48-49].

Görünür alevle belirlenen uçucu yanma periyodu, örnekten uçucu maddenin salınması ve örneğin çevresinde yanması ile ilgilidir. Her iki ortamda torrefiye edilen BBA'nın uçucu madde yanma sürelerinin ham örnekten biraz kısa olduğu görülmektedir. Bu fark torrefaksiyon sonrası azalan uçucu madde miktarından kaynaklanmaktadır [47]. Çünkü örnek etrafında uçucu madde yanma süresi (görünür alevin izlendiği periyod) hidrokarbon konsantrasyonuna bağlıdır [50].

Alev kaybolunca oluşan korun sönmesi için geçen süre ise karbon yanma süresi olarak tespit edilmiştir. Her iki torrefaksiyon ortamında elde edilen biyokömürlerin yanma sürelerinin artması torrefaksiyon işleminin amacına ulaştığını göstermektedir. Karbon içeriği yüksek ve daha uzun sürede yanan bir katı ürün elde edilmiştir.

Tablo 4'de ham ve her iki ortamda torrefiye edilen BBA'nın uçucu madde ve karbon yanma hızları da verilmektedir. Yanma hızları Şekil 6'da örnek olarak verilen ham ve torrefiye BBA'nın sabit yatak sisteminde yakılması esnasında oluşan kütle kaybı eğrilerinin eğimlerinden hesaplanmıştır ve en az iki deneyin ortalama değeri alınmıştır. Grafikler iki bölgeye ayrılabilir; uçucu madde yanma periyodu olarak tanımladığımız ve eğimi

yüksek olan birinci bölge ve karbon yanma periyodu olarak tanımlanan daha düşük eğime sahip ikinci bölge. Birinci bölgenin eğimi ve numunenin içerdiği uçucu madde miktarından yararlanılarak uçucu madde yanma hızı, aynı şekilde ikinci bölgenin eğimi ve sabit karbon miktarı da kullanılarak karbon yanma hızı Eşitlik 6' ya göre hesaplanmıştır. Ayrıca Tablo 4' de verilen lineer regresyon (R^2) katsayılarının büyüklükleri sonuçların kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.

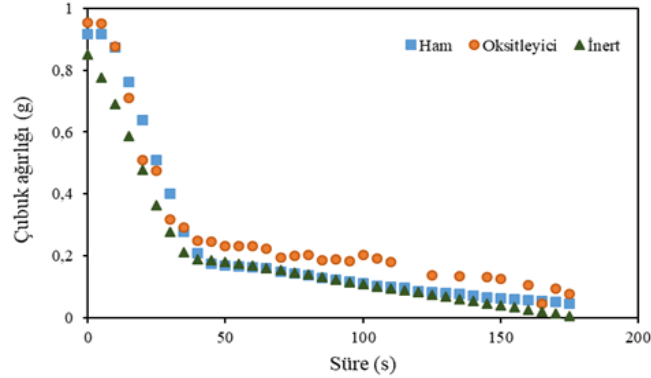
$$r = (1/w_0) \times (dw/dt)_{ort} \quad (6)$$

Burada w_0 örneğin başlangıçtaki kısı analiz ile belirlenen uçucu madde veya sabit karbon miktarı, $(dw/dt)_{ort}$ uçucu madde periyodu veya karbon yanma periyodunda yanma grafiklerinden hesaplanan eğim değerlerinin ortalamasıdır. Genel olarak torrefiye BBA'nın uçucu madde yanma hızları ham örneklerden biraz daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu davranış ham örnekteki nemin etkisini göstermektedir [47]. Ayrıca torrefaksiyon sonrasında oluşan gözenekli yapıdan dolayı da uçucu bileşiklerin yanma esnasında biyokömürden daha hızlı ayrıldığı söylenebilir [48].

Karbon yanma hızları karşılaştırıldığında inert ortamda torrefiye edilmiş BBA'nın biyokömürünün daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum uçucu madde içeriğindeki azalma ve artan sabit karbon oranından kaynaklanmaktadır. Torrefiye biyokütledeki uçucu içeriğin düşük olması nedeniyle, torrefaksiyon işleminden sonra biyokütlenin yanma hızı düşer. Dolayısıyla torrefiye biyokütlenin aynı şartlarda yanması ham biyokütleye kıyasla daha uzun sürer [51]. Çünkü biyokütlenin yüksek uçucu madde içeriği yanma esnasında karbon yanma periyodunun daha hızlı gerçekleşmesine katkıda bulunmaktadır [48,52].

Tablo 4. Ham ve torrefiye BBA'nın yanma verileri (700°C, 1±0,15g).

Numune	Torrefaksiyon ortamı	Tutuşma süresi (s)	Uçucu madde yanma süresi (s)	Karbon yanma süresi (s)	Uçucu madde yanma hızı (s^{-1})x10 ³	R ²	Karbon yanma hızı (s^{-1})x10 ³	R ²
Ham		3,7	32,6	195,5	29,0	0,97	5,6	0,97
Torrefiye	Oksitleyici (%21 O ₂)	3,0	31,0	277,0	32,3	0,96	6,0	0,93
	İnert (N ₂)	3,0	30,0	247,0	36,3	0,99	4,2	0,99



Şekil 6. Ham ve torrefiye BBA'nın yanma davranışı (700°C, 1±0,15g).

4. Sonuçlar

Şiddetli torrefaksiyon şartlarında bağ budama atığının ürün verimi ve özelliklerine torrefaksiyon ortamının etkisinin araştırıldığı bu çalışmada aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır. Torrefaksiyon işlemi sonrasında hem işlem sıcaklığının hem de O₂ konsantrasyonunun yüksek olduğu şartlarda biyokütlenin beklenenin aksine daha fazla katı ürün (biyokömür) oluştuğu tespit edilmiştir. Oksitleyici ortamda daha reaktif bir biyokömür oluştuğu belirlenmiştir. Ayrıca her iki ortamda da yükselen yakıt oranı değeri, torrefaksiyon işleminin biyokütleyi kömürle birlikte yakılabilecek bir yakıtla dönüştürdüğünü göstermektedir. Atomik H/C ve O/C oranları oksitleyici ortamda elde edilen biyokömürde OH içeren bileşiklerin daha fazla olduğu işaret etmiş ve bu oranların düşmesiyle orantılı

olarak her iki ortamda da BBA'nın üst ısı değerinin arttığı, biyokütlenin içerdiği enerjinin ise %70-75'inin korunduğu tespit edilmiştir. Oksitleyici ortamda torrefiye edilen BBA'nın daha pürüzlü gözenek ve yüzeye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun oksitleyici ortamda lignoselülozik yapının oksidasyon reaksiyonlarına maruz kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Genel olarak, sonuçlar, yüksek işlem sıcaklıklarında torrefaksiyon için oksidatif atmosferlerin kullanılabilirliğini göstermektedir. Bu durumda biyokütleyi termal olarak ön işleme tabi tutmak için diğer yakma işlemlerinden çıkan düşük oranda oksijen bulunduran sıcak baca gazlarının kullanılmasının daha verimli ve ekonomik olacağı söylenebilir.

Yazarların Katkısı

Gizem Özer; deneysel çalışma ve makalenin yazılması, Neslihan Duranay; sonuçları yorumlanması ve makalenin yazılması aşamasında katkıda bulunmuştur. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır. Sunulan çalışmada Gizem Özer'in "Bağ Budama Artıklarından Torrefaksiyon ile Katı Yakıt Üretimi" isimli yüksek lisans tezindeki veriler kullanılmıştır. Gizem Özer, YÖK 100/2000 Doktora bursiyeridir.

Kaynaklar

- [1] Lund H. Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy* 2007;32:912-9.
- [2] Gonçaves da Silva C. Renewable energies: Choosing the best options. *Energy* 2010;35:3179-93.
- [3] Chen WH, Kuo PC. A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. *Energy* 2010;35:2580-6.
- [4] Fiaschi D, Carta R. CO₂ abatement by co-firing of natural gas and biomass derived gas in a gas turbine. *Energy* 2007;32:549-67.
- [5] Chen WH, Wu JS. An evaluation on rice husk and pulverized coal blends using a drop tube furnace and a thermogravimetric analyzer for application to a blast furnace. *Energy* 2009;34:1458-66.
- [6] Chew JJ, Doshi V. Recent advances in biomass pretreatment— torrefaction fundamentals and technology. *Renew Sust Energy Rev.* 2011;15:4212–22.
- [7] Das, O., Sarmah, A.K., Bhattacharyya, D., A novel approach in organic waste utilization through biochar addition in wood/polypropylene composites. *Waste Manag.* 2015; 38: 132–140.
- [8] Das, O., Sarmah, A.K., Bhattacharyya, D., Mechanism of waste biomass pyrolysis: Effect of physical and chemical pre-treatments. *Sci. Total Environ.* 2015; 537: 323–334.
- [9] Klass, D.L., *Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals.*, San Diego, California, USA: Academic Press 1998.
- [10] Patel M, Zhang X, Kumar A. Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;53:1486–99.
- [11] Cai J, He Y, Yu X, Banks SW, Yang Y, Zhang X, et al. Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;76:309–22.
- [12] Chen DY, Wang Y, Liu YX, Cen KH, Cao XB, Ma ZQ, et al. Comparative study on the pyrolysis behaviors of rice straw under different washing pretreatments of water, acid solution, and aqueous phase bio-oil by using TG-FTIR and Py-GC/MS. *Fuel* 2019;252:1–9.
- [13] Li K, Wang Z-x, Zhang G, Cui M-s, Lu Q, Yang Y-p. Selective production of monocyclic aromatic hydrocarbons from ex situ catalytic fast pyrolysis of pine over the HZSM-5 catalyst with calcium formate as a hydrogen source. *Sustain Energy Fuels* 2020;4:538–48.
- [14] Prins MJ, Ptasiński KJ, Janssen FJJG. More efficient biomass gasification via torrefaction. *Energy* 2006;31:3458–70.
- [15] Recari J, Berruero C, Puy N, Alier S, Bartroli J, Farriol X. Torrefaction of a solid recovered fuel (SRF) to improve the fuel properties for gasification processes. *Appl Energy* 2017;203:177–88.
- [16] Pimchuai A, Dutta A, Basu P. Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties. *Energy Fuels* 2010;24:4638–45.
- [17] Rousset P, Aguiar C, Labbe N, Commandre J-M. Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction. *Bioresour Technol* 2011;102:8225–31.
- [18] Nhuchhen, D. R., Basu, P., & Acharya, B. A comprehensive review on biomass torrefaction. *Int. J. Renew. Energy Biofuels*, 2014: 1-56.
- [19] Deng J, Wang GJ, Kuang JH, Zhang YL, Luo YH. Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via torrefaction. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 2009; 86: 331-7.
- [20] Chen, WH., Kuo, PC. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. *Energy*. 2011; 36: 803–11.
- [21] Chen WH, Peng J, Bi XT. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renew Sust Energy Rev.* 2015;44:847–66.
- [22] Basu P, Sadhukhan AK, Gupta P, Rao S, Dhungana A, Acharya B. An experimental and theoretical investigation on torrefaction of a large wet wood particle. *Bioresour Technol.* 2014;159:215–22.

- [23] Li H, Liu X, Legros R, Bi XT, Lim CJ, Sokhansanj S. Pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets. *Appl Energy* 2012;93:680–5.
- [24] Chen D, Cen K, Jing X, Gao J, Li C, Ma Z. An approach for upgrading biomass and pyrolysis product quality using a combination of aqueous phase bio-oil washing and torrefaction pretreatment. *Bioresour Technol* 2017;233:150–8.
- [25] Chen W-H, Peng J, Bi XT. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renew Sust Energy Rev* 2015;44:847–66.
- [26] Chen D, Gao A, Cen K, Zhang J, Cao X, Ma Z. Investigation of biomass torrefaction based on three major components: hemicellulose, cellulose, and lignin. *Energy Convers Manage* 2018;169:228–37.
- [27] Chen D, Li Y, Deng M, Wang J, Chen M, Yan B, et al. Effect of torrefaction pretreatment and catalytic pyrolysis on the pyrolysis poly-generation of pine wood. *Bioresour Technol* 2016;214:615–22.
- [28] Chen D, Mei J, Li H, Li Y, Lu M, Ma T, et al. Combined pretreatment with torrefaction and washing using torrefaction liquid products to yield upgraded biomass and pyrolysis products. *Bioresour Technol* 2017;228:62–8.
- [29] Hu Q, Yang H, Xu H, Wu Z, Lim CJ, Bi XT, et al. Thermal behavior and reaction kinetics analysis of pyrolysis and subsequent in-situ gasification of torrefied biomass pellets. *Energy Convers Manage* 2018;161:205–14.
- [30] Zhang H, Shao S, Ryabov G, Jiang Y, Xiao R. Functional group in situ evolution principles of produced solid and product distribution in biomass torrefaction process. *Energy Fuels* 2017;31:13639–46.
- [31] Su, Y., Zhang, S., Liu, L., Qi, P., Xu, D., Shi, L., ... & Zhu, S. Upgrading Biomass Fuels via Combination of CO₂-Leaching and Torrefaction. *Energy & Fuels* 2021; 35(6): 5006-5014.
- [32] Su, Y., Zhang, S., Liu, L., Xu, D., & Xiong, Y. Investigation of representative components of flue gas used as torrefaction pretreatment atmosphere and its effects on fast pyrolysis behaviors. *Bioresour. Technol*, 2018; 267: 584-590.
- [33] Xu, X., Li, Z., & Jiang, E., Torrefaction performance of camellia shell under pyrolysis gas atmosphere. *Bioresour. Technol* 2019; 284: 178-187.
- [34] Lu, K. M., Lee, W. J., Chen, W. H., Liu, S. H., & Lin, T. C., Torrefaction and low temperature carbonization of oil palm fiber and eucalyptus in nitrogen and air atmospheres. *Bioresour. Technol* 2012; 123: 98-105.
- [35] Wang, C., Peng, J., Li, H., Bi, X. T., Legros, R., Lim, C. J., Sokhansanj, S., Oxidative torrefaction of biomass residues and densification of torrefied sawdust to pellets. *Bioresour. Technol* 2013; 127: 318-325.
- [36] Chen, D., Chen, F., Cen, K., Cao, X., Zhang, J., Zhou, J., Upgrading rice husk via oxidative torrefaction: Characterization of solid, liquid, gaseous products and a comparison with non-oxidative torrefaction. *Fuel* 2020; 275: 117936.
- [37] Barskov, S., Zappi, M., Buchireddy, P., Dufreche, S., Guillory, J., Gang, D., Sharp, R., Torrefaction of biomass: A review of production methods for biocoal from cultured and waste lignocellulosic feedstocks. *Renewable Energy* 2019; 142: 624-642.
- [38] Cheng, W., Zhu, Y., Zhang, W., Jiang, H., Hu, J., Zhang, X., Chen, H., Effect of oxidative torrefaction on particulate matter emission from agricultural biomass pellet combustion in comparison with non-oxidative torrefaction. *Renewable Energy* 2022; 189: 39-51.
- [39] Chen, W.-H., Du, S.-W., Tsai, C.-H. & Wang, Z.-Y. (2012). "Torrefied Biomasses in a Drop Tube Furnace to Evaluate Their Utility in Blast Furnaces," . *Bioresour. Technol* 2012; 111: 433-438.
- [40] Niu, Y., Lv, Y., Lei, Y., Liu, S., Liang, Y., Wang, D., Biomass torrefaction: properties, applications, challenges, and economy. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2019; 115: 109395
- [41] Anonim, 2013. FAOSTAT İnternet Tarım İstatistikleri. www.fao.org (04.12.2015).
- [42] Anonim, 2014. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). www.tuik.gov.tr (28.01.2016).
- [43] Giorio, C., Pizzini, S., Marchiori, E., Piazza, R., Grigolato, S., Zanetti, M., Tapparo, A. Sustainability of using vineyard pruning residues as an energy source: Combustion performances and environmental impact. *Fuel* 2019; 243: 371-380.
- [44] Huang, S., Lei, C., Qin, J., Yi, C., Chen, T., Yao, L., Xia, M., Properties, kinetics and pyrolysis products distribution of oxidative torrefied camellia shell in different oxygen concentration. *Energy* 2022; 251: 123941.
- [45] Chen, W. H., Lu, K. M., Lee, W. J., Liu, S. H., & Lin, T. C., Non-oxidative and oxidative torrefaction characterization and SEM observations of fibrous and ligneous biomass. *Appl Energy* 2014; 114: 104-113.
- [46] Conag, A. T., Villahermosa, J. E. R., Cabatingan, L. K., & Go, A. W., Energy densification of sugarcane leaves through torrefaction under minimized oxidative atmosphere. *Energy Sustainable Dev* 2018; 42: 160-169.
- [47] Yılmaz, M., Duranay, N., Pehlivan, D., Torrefaction and combustion behaviour of beech wood pellets. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2019; 138(1): 819-826.
- [48] Vorobiev, N., Becker, A., Kruggel-Emden, H., Panahi, A., Levendis, Y. A., & Schiemann, M. Particle shape and Stefan flow effects on the burning rate of torrefied biomass. *Fuel* 2017; 210: 107-120.
- [49] Akinrinola, F. S., Ikechukwu, N., Darvell, L. I., Jones, J. M., & Williams, A. The potential use of torrefied Nigerian biomass for combustion applications. *Journal of the Energy Inst.* 2020; 93(4):1726-1736.
- [50] Riaza, J., Gibbins, J., Chalmers, H., Ignition and combustion of single particles of coal and biomass. *Fuel* 2017; 202: 650-655.
- [51] Chen, W.-H., Du, S.-W., Tsai, C.-H. & Wang, Z.-Y., Torrefied Biomasses in a Drop Tube Furnace to Evaluate Their Utility in Blast Furnaces, *Bioresour. Technol* 2012; 111: 433-438.
- [52] Duranay Deveci, N., Yılmaz, M., & Pehlivan, D., Co-combustion of pellets from Soma lignite and waste dusts of furniture works. *Int. J. Green Energy* 2008; 5(6): 456-465.

Alzheimer ve Parkinson Hastalıklarının Derin Öğrenme Teknikleri Kullanılarak Sınıflandırılması

Esra YÜZGEÇ^{1,2*}, Muhammed TALO³

¹ Yazılım Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bingöl, Türkiye

³ Yazılım Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Elazığ, Türkiye

*^{1,2} eyuzgec@firat.edu.tr, ³ mtalo@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 15/01/2023;

Kabul/Accepted: 16/05/2023)

Öz: Bilgisayar destekli cihazların ve sistemlerin sağlık alanında kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Bu cihaz ve sistemlerin hastalıkların daha hızlı ve erken teşhisine katkısı yüksekti. Özellikle Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI), Bilgisayarlı Tomografi (BT) gibi görüntüleme cihazları; erken teşhisin önemli olduğu hastalıklar özelinde oldukça büyük bir rol oynamaktadır. Nörolojik hastalıklarda da MR ve BT görüntülerinin derin öğrenme modellerinde girdi görüntüsü olarak kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada Kaggle sitesi üzerinden elde edilen Alzheimer ve Parkinson hastalıkları teşhisi için "Alzheimer Parkinson 3 Class Data Set" veri setindeki MRI görüntüleri kullanılmıştır. Bu veri seti içerisinde 2561 Alzheimer, 906 Parkinson ve 3010 adet Kontrol (Normal) olmak üzere üç sınıf bulunmaktadır. Bu çalışmada; Alzheimer, Parkinson ve Normal sınıfları, ResNet-18, VGG-16 ve ConvNext mimarisi ile eğitildiğinde sırasıyla %96,2, %95,4 ve %98,9 doğruluk oranı elde edilmiştir. Bunun yanında; Alzheimer ve Parkinson hastalıkları normal sınıfı üzerinde ikili sınıflandırıcılar ile test edilmiştir. Alzheimer- Normal ve Parkinson - Normal sınıfları için eğitilen modellerden ResNet-18 mimarisi sırası ile %82,0 ve %96,1, VGG-16 mimarisi sırası ile %95,4 ve %89,4, ConvNext mimarisi ise %99,4 ve %99,5 başarı oranlarına ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Alzheimer, Parkinson, Derin Öğrenme, Nörodejeneratif, Manyetik Rezonans

Classification of Alzheimer's and Parkinson's Diseases Using Deep Learning Techniques

Abstract: The use of computer-aided devices and systems in the field of health has become quite widespread. These devices and systems contributed to faster and earlier diagnosis of diseases. Especially imaging devices such as Magnetic Resonance Imaging (MRI) and Computed Tomography (CT) play a major role in diseases where early diagnosis is important. In neurological diseases, the use of MRI and CT images as input images in deep learning models is becoming increasingly common. In this study, MRI images from the "Alzheimer's Parkinson's 3 Class Data Set" dataset obtained from the Kaggle website were used to diagnose Alzheimer's and Parkinson's diseases. There are three classes in this data set: 2561 Alzheimer's, 906 Parkinson's and 3010 Control (Normal). In this study, when Alzheimer's Parkinson's and Normal classes were trained with ResNet-18, VGG-16 and ConvNext architecture, accuracy rates of 96.2%, 95.4% and 98.9% were obtained respectively. In addition, Alzheimer's and Parkinson's diseases were tested with binary classifiers on the normal class. Among the models trained for Alzheimer's - Normal and Parkinson's - Normal classes, ResNet-18 architecture achieved 82.0% and 96.1%, VGG-16 architecture achieved 95.4% and 89.4%, and ConvNext architecture achieved 99.4% and 99.5% success rates, respectively.

Key words: Alzheimer's, Parkinson's, Deep Learning, Neurodegenerative, Magnetic Resonance

1. Giriş

Sağlık alanında özellikle nörolojik hastalıklar üzerinde bilgisayar destekli sistemlerin kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Günümüzde hastanelerde ve birçok sağlık kuruluşunda hastalık tespiti veya süreç izlenmesi için MR ve BT gibi cihazların kullanımı kaçınılmazdır. Özellikle Nörolojik hastalıklar için de beyin MRI ve BT görüntüleri kullanılarak erken teşhise olanak sağlanmaktadır.

Nörolojik hastalıklarda erken teşhisin önemi hayati boyutta değerlendirilir. Bilhassa zamanla ilerlemeye devam eden Nörodejeneratif hastalıkların erken teşhisi hayati boyuttadır. Demans türleri olarak tanımlanan Alzheimer ve Parkinson hastalıkları; Nörodejeneratif olarak nitelendirilen hastalıklardır [1]. Her iki hastalığın da ilk belirtilerini göstermeden yıllar öncesinde ilerlemelerini sürdürerek beyinde ciddi tahribata yol açtığı tahmin edilmektedir [2].

* Sorumlu yazar: eyuzgec@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ^{1,2} 0000-0003-2914-2603, ³ 0000-0002-1595-5681

Parkinson hastalığının, beynin dopamin hormonu üretmekten sorumlu hücrelerinde meydana gelen hasar ile başladığı tanımlanır. Hücrelerde meydana gelen bu hasar; hastanın motor yeteneklerini etkileyen zihinsel fonksiyonlarına etki edecek kadar ilerler [3]. Beyinde gerçekleşen bu biyolojik hasar ciddi boyutlara ulaşmadığı sürece belirti göstermez ve bu sebeple hastalık teşhisi ciddi derecede güçleşir. Parkinson hastalığının ilerlemesinin ciddi boyuta gelmesi ile titreme, hareket etmede zorluk, depresif duygu durum bozukluğu gibi belirtiler ortaya çıkmaya başlar [4].

Parkinson hastalarının ilk belirtileri ortaya çıktıktan sonra, teşhis için genellikle motor becerilerinde meydana gelen hasarı ölçmek amacı ile tıbbi gözlemler yapılır. Hastalığın kesin teşhisi; zamana ve semptom yoğunluğuna bağlı klinik testler ile gerçekleştirilir [5]. İlk olarak kişinin temel motor becerileri ve hareket kısıtlılığına sebep olacak belirli semptomlar ile gözlenen hastalığın erken evresinde bu durumların yaşlılığa bağlı semptomlar olarak değerlendirilip göz ardı edilme ihtimali yüksektir. Bu durumda hastalık teşhisi zorlaşır ve hastanın yaşam kalitesi tamamıyla düşmeden tespit edilemez hale gelir [6].

Parkinson hastalığına benzer olarak Alzheimer hastalığı da geri döndürülebilir bir tedavisi bulunmayan Nörodejeneratif bir hastalık türüdür [7]. Alzheimer hastalığının erken teşhisi; hafıza bozuklukları, temel ve günlük hayat becerilerinde gerileme, konuşma güçlüğü gibi belirgin semptomlar ortaya çıkmadan gerçekleştirilememektedir [8].

Alzheimer hastalığının beyinde yol açtığı hasar içerisinde ilk olarak zarar gören nöronlar beynin hafıza, konuşma ve düşünme bölümlerinde gerçekleşmektedir. İlk hasar gören nöronların bulunduğu bu bilişsel işlevler hastalarda belirlenen ilk semptomların bu alanlarda olmasına sebebiyet verir. Belirtiler; hastada yeni fark edilmiş olsa da beyin üzerindeki tahribatin 20 yıl veya daha erken bir süre içerisinde başladığı tahmin edilmektedir [9].

2021 Alzheimer Disease International (ADI) raporunda klinik olarak Alzheimer tespiti üzerine çalışan birçok klinisyen, bunama hastaları ve hasta yakınları (bakıcılar) ile yapılan ankete göre; hastaların bir kısmı yerel bölgelerdeki uzman hekim eksikliği, hastalığın teşhisinin zorluğu, tedavi imkanının bulunmaması ve bunama tanısı koyulması endişesi ile teşhis güçlüğü yaşandığını ifade etmiştir [10]. Alzheimer hastalığının son aşamaya gelmeden semptom göstermemesinin yanında bu gibi insani faktörler de teşhisi giderek güçlendirmektedir. Bu gibi erken teşhis problemlerinin önüne geçmek, hastaların ve hasta yakınların yaşam kalitesini iyileştirmek ve alanda uzman sağlık çalışanlarına ikinci bir bakış açısı ile destek olmak amacı ile Bilgisayar Destekli Sistemler kullanılabilir.

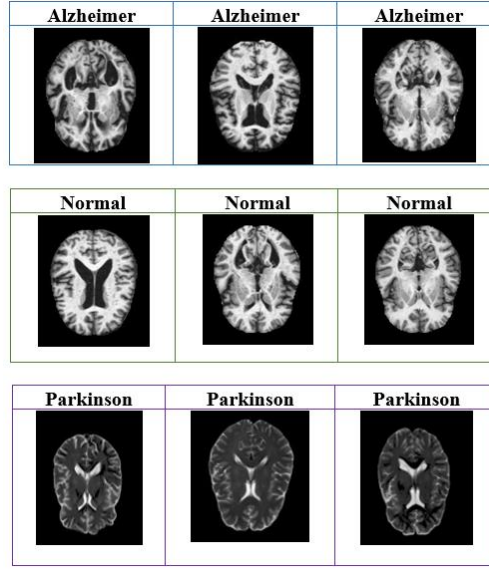
Dünyada robotik, endüstriyel çözümler, ses işleme-tanıma, güvenlik kontrolü, meteorolojik tahminler ve finansal çalışmalar gibi birçok alanda derin öğrenme teknolojileri kullanılmaktadır. Sağlık alanında da bu alanlara benzer olarak derin öğrenme ve görüntü işleme teknolojilerinden faydalanılması giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle meme kanseri, akciğer kanseri, diyabetik retinopati ve Alzheimer gibi erken teşhisin hayati olduğu hastalıklar üzerine yapılan çalışmalar bulunmaktadır [11]. Bu çalışmada da erken teşhisi oldukça güç demans türleri olan Alzheimer ve Parkinson hastalıklarının MRI görüntüleri üzerinden derin öğrenme teknikleri kullanılarak sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Her bir hastalığın normal sonuçlu kontrol hastaları ile sınıflandırılması işleminin yanında üç sınıflı olarak Alzheimer, Parkinson ve Normal grubu ile de çalışılarak Demans hastalıkları arasında bir sınıflandırma işlemi yapılmıştır.

Bu çalışmada, "Materyal ve Yöntem" bölümünde veri seti ve kullanılan modeller ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. "Bulgular ve Tartışma" bölümünde, elde edilen sonuçlar detaylı olarak sunulup, bulguların analizi gerçekleştirilmektedir. Son olarak, "Sonuç" bölümünde elde edilen sonuçlar özetlenmekte ve çalışmanın önemi vurgulanmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Veri Seti

Gokul Ramasamy tarafından Kaggle platformunda paylaşılan üç sınıflı bir veri seti kullanılmıştır [12]. Bu veri seti içerisinde Şekil 1'de gösterildiği gibi Alzheimer, Parkinson ve Normal sınıfı olmak üzere üç sınıf bulunmaktadır. Bu sınıflar ayrıca veri seti içerisinde "Eğitim" ve "Test" olmak üzere iki ayrı klasör olarak verilmiştir.



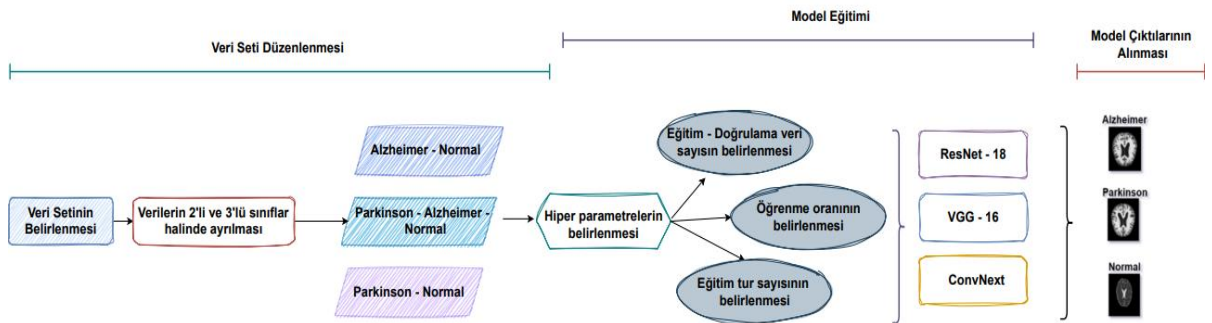
Şekil 1. Veri seti örnek görüntüleri.

Bu ayırım ile eğitilen modellerin, daha önce kullanılmayan hasta görüntüleri ile test edilmesi sağlanmıştır. Eğitim klasöründe Alzheimer, Parkinson ve Normal sınıfları için sırasıyla Tablo 1’de verildiği gibi 2561, 906 ve 3010 görüntü bulunmaktadır. Bu sayılar Test klasöründe sırasıyla 639, 61 ve 662 olarak bulunmaktadır.

Tablo 1. Veri seti görüntü sayıları

Sınıf Adı	Eğitim Görüntü Sayısı	Test Görüntü Sayısı
Alzheimer	2561	639
Parkinson	906	61
Normal	3010	662

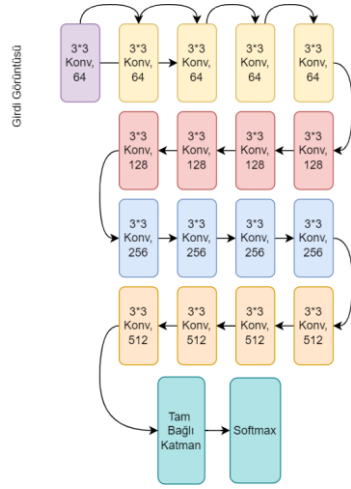
Elde edilen veri seti üç sınıflı olarak ResNet-18, VGG-16 ve ConvNext mimarileri ile eğitilmiş ve test görüntüleri üzerinde modellerin başarımları elde edilmiştir. Bu sayede hastalıkların ve hasta olmayan kişilerin kendi aralarında ayırımlarının bilgisayar destekli sistemler yardımı ile hangi doğrulukta başarı elde ettiği test edilmiştir. Bunun yanında Şekil 2’de gösterildiği gibi Alzheimer - Normal ve Parkinson - Normal sınıfları kendi aralarında ayrıştırılarak iki sınıflı problemler halinde ele alınmıştır. Bu sayede hastalık özelinde de Bilgisayar Destekli Sistemlerin doğruluk oranı test edilmiştir.



Şekil 2. Veri seti ayrıştırılması ve model eğitimi süreci

2.2 ResNet-18

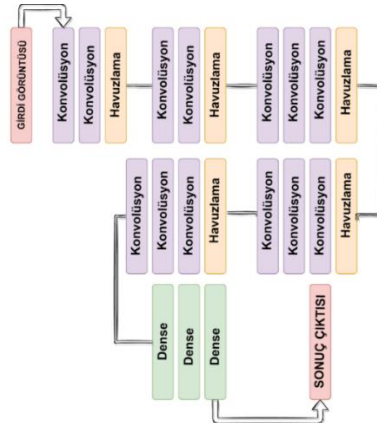
Eğitilen modeller için seçilen mimarilerden ilki ResNet – 18 mimarisidir. Artık Ağlar olarak isimlendirilen ResNet mimarisi ilk olarak 2015 yılında Kaiming He ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş bir sinir ağıdır. ResNet mimarisi; katılmış olduğu ILSVRC ve COCO2015 yarışmalarında birçok alanda birincilik elde edecek başarılarla ulaşmış bir sinir ağıdır [13]. Derin öğrenme mimarilerinin ortaya çıktığı yıllardan itibaren, bir sinir ağı ne kadar çok katmana sahipse o kadar başarılı olur, bakış açısı ile geliştirilmekteydi [14]. Ancak belirli bir süre sonra geliştirilen mimarilere bakıldığında katman sayısı arttıkça başarımın belirli bir seviyeye kadar artırılabilirdiği ve bu seviyeden sonra eğitilen modelin, gördüğü verileri ezberleyerek aşırı öğrenme gibi uyum problemlerine yol açtığı görüldü [15]. ResNet mimarisi bu problemlere çözüm olarak artık blok yapısı ortaya koymuştur. Artık blok yapısı; kısa yol bağlantılarının geliştirildiği bir modeldir. Geliştirilen kısa yol bağlantıları sayesinde bir veya birden fazla katman atlanarak eğitim gerçekleştirilmektedir. Bu sayede aşırı uyum problemlerinin giderilmesine olanak sağlanmaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışmada ResNet-18 mimarisi kullanılmıştır. ResNet-18 mimarisinin katman gösterimi Şekil 3’ de gösterildiği gibidir.



Şekil 3. ResNet-18 mimarisinin içeriği

2.3 VGG-16

VGG-16; en temel anlamı ile bir Evrişimli Sinir Ağı (ESA) olarak tanımlanır. 16 evrişim katmanından oluşan bu model; Şekil 4’te gösterildiği gibi kendi içerisinde beş adet havuzlama ve üç adet tam bağlı katmandan meydana gelmektedir. Modelin sahip olduğu her bir evrişim katmanının çıkışında farklı ağırlıklara sahip olan filtreler hesaplanır. Eklenen katman arttıkça filtreler ve ifade ettikleri derinlik değerleri de değişkenlik gösterir [16].



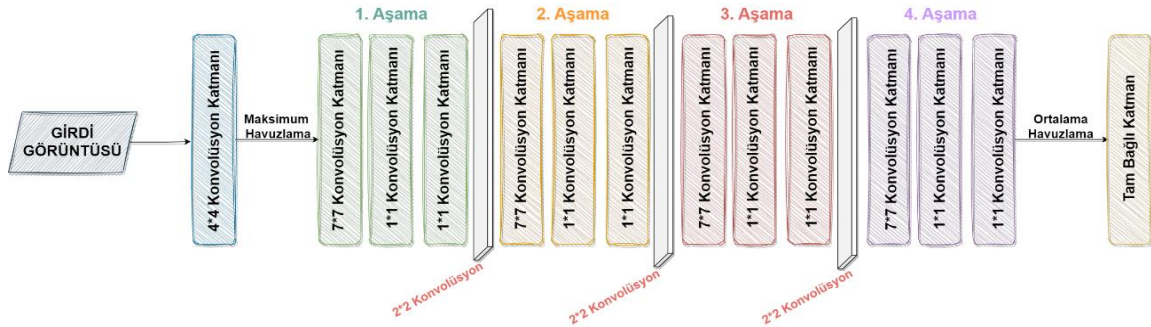
Şekil 4. VGG-16 mimarisinin katman yapısı.

VGG-16; "Büyük Ölçekli Görüntü Tanıma için Çok Derin Evrişimli Ağlar" isimli bir çalışmada yayınlamışlardır [17]. Bu makalede Oxford Üniversitesinden K. Simonyan ve A. Zisserman tarafından öne sürülen bir Evrişimsel Sinir Ağı modelidir. Bu model ImageNet isimli büyük ölçekli bir veri seti üzerinde test edilmiştir. Bu veri seti üzerinden gerçekleştirilen test sonucu %92,7 doğruluk oranına ulaşmışlardır. 14 milyondan fazla görüntü içeren ve 1000 sınıftan oluşan bir veri seti olan ImageNet ile yapılan Büyük Ölçekli Görsel Tanıma yarışmasının 2014 yılında sunulan en popüler modellerinden biri olarak VGG-16 modeli ortaya çıkmıştır [18].

2.4 ConvNext

Bu çalışmada kullanılan modellerden biri olan ConvNext modeli; Liu ve arkadaşlarının 2022 yılında ortaya çıkardıkları ve 2020'ler için bir ConvNext olarak yayınlanan bir çalışmada önerilen modeldir [19]. Önerilen modelin Vision Transformers (ViT) olarak bilinen mimari yapısından esinlenerek gerçekleştirildiği öne sürülmüştür [20]. Bu yapının ViT mimarilerinden daha başarılı sonuçlar elde ettiği çalışmada ConvNext saf bir ESA modeli olarak sınıflandırılmıştır. ConvNext modeli; mimari yapısı açısından ResNet modeli ile ViT mimari ailesinin tasarım ve teknikleri ile harmanlanarak geliştirilen ve çağdaştırılan biçimi olarak tanımlanmaktadır. Geliştirilen bir ESA modelinde doğrusallık sorununun önüne geçmek adına aktivasyon fonksiyonları kullanılır. Bu modelde geleneksel aktivasyon fonksiyonlarından olan ReLU aktivasyon fonksiyonu yerine GeLU (Gauss Hatası Doğrusal Birimi) kullanarak mimari açıdan bir güncellemeye gidilmiştir. Benzer şekilde ESA mimarilerinde kullanılan normalizasyon fonksiyonu olan Toplu Normalleştirme yerine Katman Normalleştirme kullanılarak mimari tasarımında özgün bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

ConvNext, mimari başarılarının ölçülmesinde etkili rol oynayan ImageNet-1K veri setini sınıflandırmada birçok güçlü mimari arasından birinci olmuştur [21]. Ayrıca COCO veri seti ile nesne algılama, ADE20K görüntü bölütleme (segmentasyon) çalışmalarında ise Swin Transformers mimarisini geride bırakmıştır [22]. Bu çalışmada da oldukça güçlü ve güncel bir model olan ConvNext mimarisi kullanılmıştır. ConvNext modeli mimari yapısı Şekil 5'te gösterildiği gibidir.



Şekil 5. ConvNext mimarisinin katman yapısı.

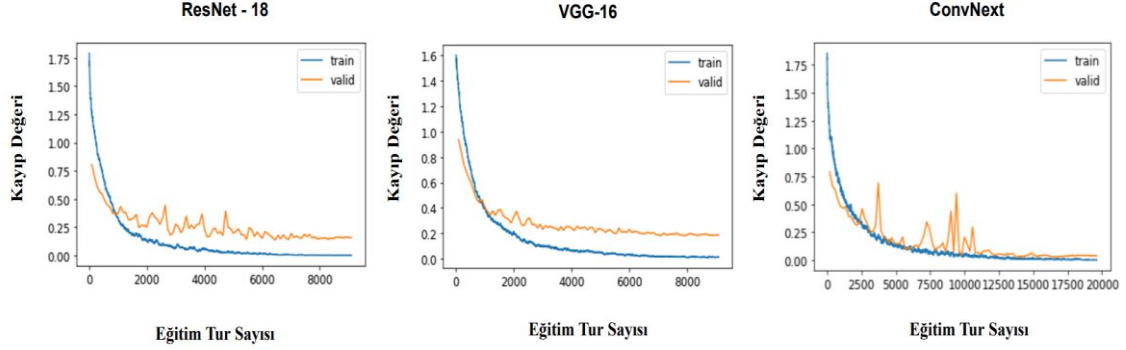
3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, üçlü sınıflandırma görevi için ResNet-18, VGG-16 ve ConvNext modelleri sırası ile %96,2, %95,4 ve %98,9 doğruluk, %97,0, %94,0, %98,0 hassasiyet ve %94,0, %92,0, %99,0 kesinlik oranlarına ulaşmışlardır. Bu oranların yanında, hata oranlarının sayısal olarak ifade edildiği Karmaşıklık Matrisleri Şekil 6'da gösterildiği gibidir.

VGG-16 Eğitim Sonucu Karmaşıklık Matrisi				ConvNext Eğitim Sonucu Karmaşıklık Matrisi				ResNet-18 Eğitim Sonucu Karmaşıklık Matrisi			
	Alzheimer	Normal	Parkinson		Alzheimer	Normal	Parkinson		Alzheimer	Normal	Parkinson
Alzheimer	223	18	0	Alzheimer	264	0	0	Alzheimer	259	5	0
Normal	20	296	8	Normal	0	284	2	Normal	4	286	13
Parkinson	0	1	81	Parkinson	0	3	94	Parkinson	0	2	78

Şekil 6. Üçlü sınıflandırma modellerinin doğrulama verileri karmaşıklık matrisi sonuçları.

Bunun yanında hatalı tahmin edilen doğrulama verilerinin, hata oranlarının temsil edildiği kayıp grafikleri Şekil 7’de olduğu gibi elde edilmiş ve incelendiğinde ResNet-18 ve VGG-16 modellerine oranla ConvNext mimarisi daha yüksek doğruluk göstermiştir.



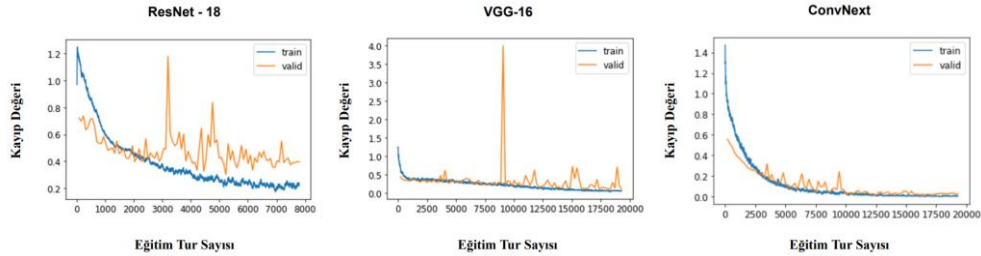
Şekil 7. Üçlü sınıflandırma modelleri doğrulama verileri için kayıp grafikleri.

Yukarıda verilen karmaşıklık matrisleri ve kayıp grafikleri üçlü sınıflandırma modellerinin eğitimi esnasında alınan sonuçlardır. Bu sonuçlar eğitim verilerinin %10’luk bir kısmının doğrulama verilerine dönüştürülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veri seti içerisinde Tablo 1’de gösterildiği gibi önceden ayrılmış bir test klasörü oluşturulmuştur. Eğitilen modeller daha önce görmediği test verileri üzerinde çalıştırıldığında, en başarılı test doğruluğu oranını %99,5 ile ConvNext mimarisi sağlamıştır. Bu mimarinin Test verilerine ait elde edilen Karmaşıklık matrisi Şekil 8 ‘de gösterildiği gibidir.

ConvNext Test Sonucu Karmaşıklık Matrisi			
	Alzheimer	Normal	Parkinson
Alzheimer	639	0	0
Normal	1	661	0
Parkinson	0	4	57

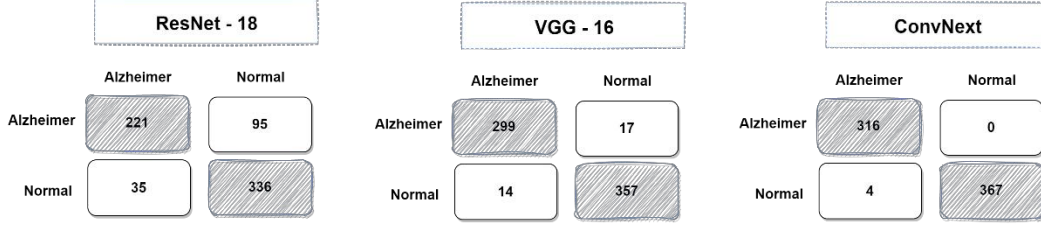
Şekil 8. ConvNext modelinin üçlü test verileri üzerindeki karmaşıklık matrisi.

Bu çalışmada; Alzheimer, Parkinson ve Normal sınıflarını temel alan modellerin yanında, hedef alınan hastalıkların Kontrol sınıfı ile ikili sınıflar olarak ele alındığında elde edilecek sonuçlar da incelenmiştir. Bu amaçla Alzheimer-Normal ve Parkinson – Normal olmak üzere iki ayrı veri seti daha oluşturulmuştur. Alzheimer – Normal sınıfında ResNet-18 ve VGG-16 ve ConvNext modelleri sırası ile %82,0, %95,4 ve %99,4 doğruluk, %72,0, %95,0, %99,0 hassasiyet %74,0, ve %95, %99 kesinlik oranına ulaşılmıştır. Bu modellere ait kayıp grafikleri Şekil 9’ da verilmiştir.



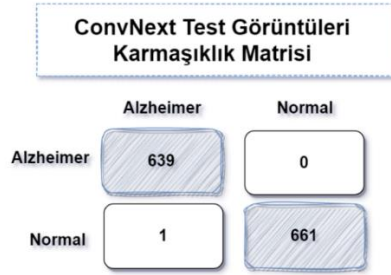
Şekil 9. Eğitilen modellerin Alzheimer-Normal sınıfları doğrulama verileri için kayıp grafikleri.

Şekil 10'daki; modellere ait karmaşıklık matrisleri de incelendiğinde ConvNext modelinin Alzheimer-Normal sınıfı için eğitilen mimariler arasında yalnızca 4 hatalı tahminde bulunarak daha doğru sonuç elde ettiği görülmüştür.



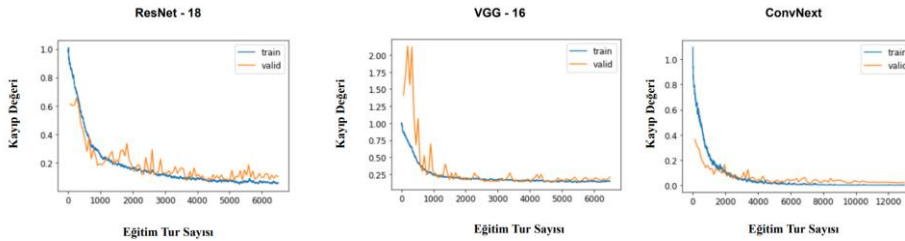
Şekil 10. Alzheimer-Normal modellerine ait karmaşıklık matrisleri.

Alzheimer – Kontrol sınıfı için gerçekleştirilen model eğitimlerinde ConvNext modeli orantılı şekilde azalan kayıp oranları ile herhangi bir aşırı uyum veya yetersiz uyum problemine uğramadan, yüksek doğruluk oranına ulaşmıştır. Bu doğruluk oranının gerçekliğinin ölçülebilmesi adına model; daha önce karşılaşmadığı 1301 hasta görüntüsü ile test edilmiştir. Gerçekleştirilen test işleminde görüntülerin %99,9 oranında doğru tahminde bulunmuştur. Bu test görüntüleri ile yapılan tahminlerden elde edilen karmaşıklık matrisi Şekil 11'te gösterildiği gibidir.



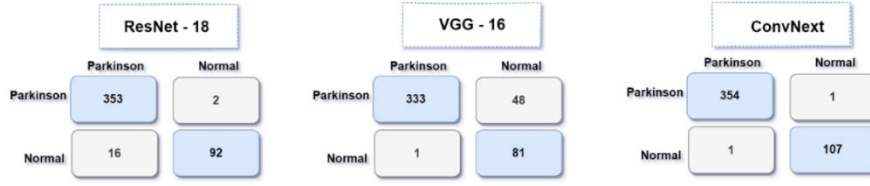
Şekil 11. ConvNext mimarisinin Alzheimer-Normal sınıfı test görüntüleri üzerindeki karmaşıklık matrisi.

Ayrıca, Parkinson-Normal sınıfı olarak elde edilen ek veri seti de benzer olarak VGG-16, ResNet-18 ve ConvNext modelleri ile eğitilmiştir. Eğitilen modellerden sırası ile %89,4, %96,1 ve %99,5 doğruluk, %81,0, %92,0, %99,0 hassasiyet ve %89,0, %97,0, %99,0 kesinlik oranlarına ulaşılmıştır. Eğitilen modellerin Şekil 12'de gösterilen kayıp grafikleri incelendiğinde bütün modeller için aşırı uyum veya yetersiz uyum problemi gözlenmemiştir.



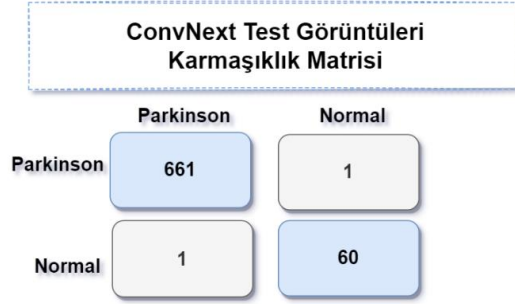
Şekil 12. Modellerin Parkinson-Normal sınıflarının doğrulama verileri için kayıp grafikleri.

Eğitilen modeller öncelikle Eğitim – Doğrulama verileri olmak üzere sırası ile %90 ve %10 oranında bölünerek eğitim aşaması gerçekleştirilmiştir. Her bir model için 463 adet doğrulama verisi kullanılan modellerin karmaşıklık matrisleri çıktı olarak elde edilmiştir. Elde edilen karmaşıklık matrisleri Şekil 13'te gösterildiği gibidir.



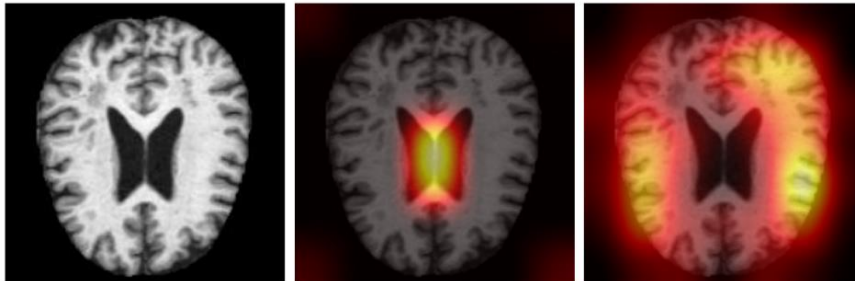
Şekil 13. Modellerin Parkinson-Normal sınıfları üzerindeki karmaşıklık matrisleri.

Parkinson – Kontrol sınıfları için eğitilen modellerden elde edilen karmaşıklık matrisleri ve kayıp grafikleri incelendiğinde ConvNext modelinin daha yüksek doğruluk ile çalıştığı görülmektedir. ResNet-18 modelinin doğruluk oranının test edilebilmesi için modelin daha önce karşılaşmadığı, 723 Parkinson-Kontrol sınıfı görüntü kullanılarak test işlemi gerçekleştirildi. ConvNext modeli bu görüntüler üzerinde %99,7 oranında doğru tahmin gerçekleştirmiştir. Bu sonuçlar ile elde edilen karmaşıklık matrisi Şekil 14’de gösterildiği gibidir.



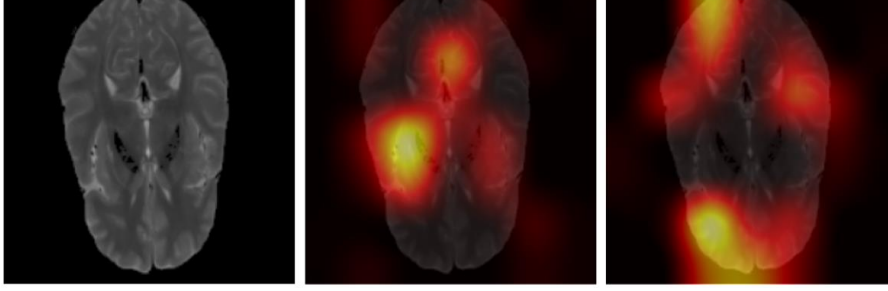
Şekil 14. ConvNext modelinin Parkinson-Normal test görüntüleri üzerindeki karmaşıklık matrisi.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde 2022 yılında ortaya çıkan ConvNext mimarisinin her üç veri seti için de daha yüksek doğruluk oranı gösterdiği görülmektedir. Bu çalışmada eğitilen derin öğrenme modellerinden elde edilen kayıp grafikleri incelendiğinde, özellikle yüksek başarı sergileyen ConvNext modelinde herhangi bir aşırı uyum veya yetersiz uyum problemi ile karşılaşmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca elde edilen eğitim doğruluklarının kanıtlanabilirliği adına, en başarılı test sonuçları sağlayan modellerin karmaşıklık matrislerine çalışmada yer verilmiştir. Bunun yanında açıklanabilir yapay zekâ tekniklerinden biri olarak nitelendirilen Isı Haritası (Gradcam) yöntemi kullanılarak Alzheimer ve Parkinson hastalıklarının beyin görüntü üzerinde, hangi bölgeler baz alınarak sınıflandırıldığına açıklanması mümkün kılınabilmektedir. ConvNext mimarisinin başarılı olarak sınıflandırdığı bir Alzheimer hastasından alınan test görüntünün ısı haritası Şekil 15’te verilmiştir. Şekilde verilen ilk görüntü, modele verilen test görüntüsüdür, ikinci görüntüde verilen ısı haritası modelin normal sınıfı için baktığı alanları temsil etmektedir, son görüntü ise ilgili hastalığın model tarafından teşhis edildiği bölgeleri belirtmektedir.



Şekil 15. Alzheimer etiketli test görüntüsünün ısı haritası.

Bunun yanında Alzheimer-Normal sınıfları için ayrılan veri seti kullanıldığında ConvNext mimarisi yüksek doğruluk oranına ulaşmıştır. Bu eğitim doğruluğunun kanıtlanabilmesi adına test görüntüleri ile sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiş ve modelin daha önce karşılaşmadığı görüntüler üzerinde %99.7 oranında doğruluk sağladığı görülmüştür. Bu model ile sınıflandırılan test görüntülerinin ısı haritası alınarak beyin görüntüsünün hangi bölgeleri temel alınarak bir sınıflandırma gerçekleştirdiği incelenmiştir. Şekil 16'da verilen görüntüler bir Parkinson hastasına ait olup eğitilen model tarafından doğru sınıflandırılmıştır.



Şekil 16. Parkinson etiketli test görüntüsünün ısı haritası.

4. Sonuç

Alzheimer ve Parkinson hastalığı insan hayatını önemli oranda etkileyen ve ölümle sonuçlanan nörolojik hastalıklardır. Bu hastalıkların tedavisi henüz bulunmamaktadır. Alzheimer ve Parkinson hastalıklarının beyinde yol açtıkları tahribat ile hastaların temel hayati ihtiyaçlarını yerine getirmeleri oldukça zor bir hal alır. Bu duruma bağlı olarak hastaların ve hasta yakınlarının hayat kalitelerini oldukça düşürmekte ve büyük oranda ölümle sonuçlanmaktadır. Alzheimer ve Parkinson hastalıklarının yol açtığı zorluklara engel olunabilmesi adına erken teşhis edilmesi ve hastalıkların ayrımı oldukça büyük önem taşımaktadır. Sonuç olarak elde edilen model sonuçları ve ısı haritaları incelendiğinde en yeni mimarilerden olan ConvNext'ten alınan sonuçların bütün sınıflar için daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Kaggle sitesinden alınan görüntüler üzerinde yapılan çalışmalarda elde edilen test sonuçları ileride yapılması hedeflenen çalışmalar için umut vericidir.

Model eğitimlerinin gerçekleştirilmesi aşamasında ikili ve üçlü sınıflar arasındaki bu sınıflandırma başarısının VGG16 ve ResNet18 sınıfları için farklı olduğu gözlenmektedir. Bu durum önünde bulundurulduğunda ikili sınıflandırmalarda ayrı ayrı kullanılan Alzheimer ve Parkinson görüntüleri üzerindeki hastalık farklarının daha yoğun ve ayırt edilebilir olması muhtemeldir. Bu sebeple üçlü sınıflandırma başarısının Alzheimer ve Parkinson hastalıklarının görüntüleri arasındaki farktan kaynaklı ikili sınıflandırmalardan daha yüksek olabileceği değerlendirilmiştir.

Çalışmada hazır bir veri seti olarak Kaggle sitesinden elde edilmiş ve veri dağılımları eğitim ve test olarak önerildiği hali kullanılmıştır. Veri seti içerisinde Parkinson sınıfı için kullanılan eğitim ve test verisinin, diğer sınıflara oranla az olması bir kısıt olarak kullanılmıştır. Bir sonraki çalışmada bu kısıtların ortadan kaldırılması ve Alzheimer ve Parkinson hastalıkları özelinde ADNI ve OASIS gibi büyük çaplı veri setlerinden alınan görüntüler ile çalışılması hedeflenmektedir [23, 24]. Hastalıkların teşhisi ve ayrımı için daha geniş çaplı bir çalışma ile umut verici sonuçlar elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Kalia, L. V., & Lang, A. E. (2015). Parkinson's disease. *The Lancet*, 386(9996), 896-912.
- [2] Wang, X., Zheng, W., Xie, J., & Wang, T. (2019). Neuroinflammation-mediated microglial activation in Alzheimer's disease and Parkinson's disease. *Progress in Neurobiology*, 179, 1-19.
- [3] Grover, S., Bhartia, S., Yadav, A., & Seeja, K. R. (2018). Predicting severity of Parkinson's disease using deep learning. *Procedia computer science*, 132, 1788-1794.
- [4] Wroge, T. J., Özkanca, Y., Demiroglu, C., Si, D., Atkins, D. C., & Ghomi, R. H. (2018, December). Parkinson's disease diagnosis using machine learning and voice. In *2018 IEEE signal processing in medicine and biology symposium (SPMB)* (pp. 1-7). IEEE.
- [5] Mei, J., Desrosiers, C., & Frasnelli, J. (2021). Machine learning for the diagnosis of Parkinson's disease: a review of literature. *Frontiers in aging neuroscience*, 13, 633752.

- [6] Caliskan, A., Badem, H., Basturk, A., & YUKSEL, M. (2017). Diagnosis of the parkinson disease by using deep neural network classifier. *IU-Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 17(2), 3311-3318.
- [7] Alzheimer's Disease Fact Sheet. (t.y.). National Institute on Aging. Geliş tarihi 31 Mart 2023, gönderen <https://www.nia.nih.gov/health/alzheimers-disease-fact-sheet>
- [8] Liu, S., Liu, S., Cai, W., Pujol, S., Kikinis, R., & Feng, D. (2014, April). Early diagnosis of Alzheimer's disease with deep learning. In 2014 IEEE 11th international symposium on biomedical imaging (ISBI) (pp. 1015-1018). IEEE.
- [9] Helaly, H. A., Badawy, M., & Haikal, A. Y. (2022). Deep learning approach for early detection of Alzheimer's disease. *Cognitive computation*, 14(5), 1711-1727.
- [10] (2022) Alzheimer's Disease International. [Online]. Available: <https://www.alzint.org/>
- [11] Demyanchuk, A., Pushkina, E., Russkikh, N., Shtokalo, D., & Mishinov, S. (2019). Hydrocephalus verification on brain magnetic resonance images with deep convolutional neural networks and" transfer learning" technique. arXiv preprint arXiv:1909.10473.
- [12] Gokul Ramasamy (2019). "Parkinson's Disease Detection". Kaggle. <https://www.kaggle.com/gokulramesh/parkinsons-disease-detection>
- [13] Yu, X., & Wang, S. H. (2019). Abnormality diagnosis in mammograms by transfer learning based on ResNet18. *Fundamenta Informaticae*, 168(2-4), 219-230.
- [14] Khan, H. A., Jue, W., Mushtaq, M., & Mushtaq, M. U. (2020). Brain tumor classification in MRI image using convolutional neural network. *Math. Biosci. Eng*, 17(5), 6203-6216.
- [15] He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2015). Deep residual learning. *Image Recognition*, 7.
- [16] Tammina, S. (2019). Transfer learning using vgg-16 with deep convolutional neural network for classifying images. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 9(10), 143-150.
- [17] Simonyan, K., & Zisserman, A. (2015). "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition". In *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
- [18] Sharma, S., Guleria, K., Tiwari, S., & Kumar, S. (2022). A deep learning based convolutional neural network model with VGG16 feature extractor for the detection of Alzheimer Disease using MRI scans. *Measurement: Sensors*, 24, 100506.
- [19] Liu, Z., Mao, H., Wu, C. Y., Feichtenhofer, C., Darrell, T., & Xie, S. (2022). A convnet for the 2020s. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 11976-11986).
- [20] Zhai, X., Kolesnikov, A., Hounsby, N., & Beyer, L. (2022). Scaling vision transformers. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 12104-12113).
- [21] Beyer, L., Zhai, X., & Kolesnikov, A. (2022). Better plain ViT baselines for ImageNet-1k. arXiv preprint arXiv:2205.01580.
- [22] Yang, Z., Qiu, Z., & Xie, H. (2022). An Image Classification Method Based on Self-attention ConvNeXt. In *International Conference on Computer Engineering and Networks* (pp. 657-666). Springer, Singapore.
- [23] "ADNI | Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative". Erişim 6 Ocak 2022. <https://adni.loni.usc.edu/>.
- [24] Marcus, Daniel S., Anthony F. Fotenos, John G. Csernansky, John C. Morris, ve Randy L. Buckner. "Open Access Series of Imaging Studies: Longitudinal MRI Data in Nondemented and Demented Older Adults". *Journal of Cognitive Neuroscience* 22, sy 12 (01 Aralık 2010): 2677-84. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21407>.

Ön Karışımli Model Bir Yakıcıda Propan Gazının Swirl Sayısı Değişimlerinde Yanma Karakteristiğinin Araştırılması

Caner SİPÇİK^{1*,3}, Murat TAŞTAN^{2,3}

¹ Uçak Gövde ve Motor Bakımı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye

² Uçak Gövde ve Motor Bakımı, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye

³ Yanma Araştırma Laboratuvarı, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye

*¹ caner.sipcik@gmail.com, ² mrt@erciyes.edu.tr

(Geliş/Received: 08/03/2023;

Kabul/Accepted: 29/05/2023)

Öz: Çalışmamızda swirl sayısı değişimlerine verdiği tepkileri incelemek için propan gazı 0,4/0,8/1,2/1,6 swirl sayılarında yakılmıştır. Yanma sonucu oluşan alevin sıcaklık değeri, baca gazı sıcaklık değeri, emisyon değerleri, ışık şiddeti ve dinamik basınç değişimleri incelenmiştir. En yüksek sıcaklık 0,8 swirl'de, en düşük sıcaklık ise 1,2 swirl'de ölçülmüştür. Eksenel mesafede ölçülen sıcaklık trendlerinde, 0,2-0,8 swirl sayıları arasında, swirl sayısı arttıkça sıcaklık düşmüş, ancak 1,2 ve 1,6 swirl sayıları arasında sıcaklık 1,6'da daha yüksek ölçülmüştür. Swirl sayısının değişimi baca gazı sıcaklık değerlerini büyük oranlarda değiştirmemiştir. Swirl sayısının artışı ile CO, CO₂ NO_x emisyonları azalmıştır. NO_x emisyonları için bu çalışmada kullanılan ölçü cihazının tolerans değerlerinde verimli sonuçlar elde edilememekle birlikte, yapılan çalışma ile, NO_x emisyonundaki değişimin, NO_x oluşum mekanizmalarıyla mı yoksa swirl sayısı değişim etkisinden mi kaynaklandığı net olarak açıklanamamıştır. Swirl sayısının artması, propan alevinin ışık şiddetini düşürdüğü ve belirli bir seviyede düşük tuttuğu gözlenmiştir ancak alevin dinamik basıncı üzerinde ciddi etki yaratmamıştır.

Anahtar kelimeler: Swirl sayısı, baca gazı sıcaklığı, emisyon, yanma, propan.

Investigation Of Combustion Characteristics Of Propane Gas At Swirl Number Variations In A Premixed Model Combustor

Abstract: In our study, propane gas was burned at 0.4/0.8/1.2/1.6 swirl numbers to examine reactions in swirl number changes. Temperature of flame, flue gas temperature, emission values, light intensity and dynamic pressure changes of flame were investigated. The highest temperature was measured at 0.8 swirl and the lowest temperature was measured at 1.2 swirl. In temperature trends measured in axial distance, between 0.2-0.8 swirl numbers, the temperature decreased as the swirl number increased, but the temperature was higher at 1.6 between 1.2 and 1.6 swirl numbers. The variation of the swirl number did not greatly change the flue gas temperature values. With the increase in the number of swirls, CO, CO₂ NO_x emissions decreased. Although efficient results could not be obtained in the tolerance values of the measuring device used in this study for NO_x emissions, it was not clear whether the change in NO_x emission was caused by the NO_x formation mechanisms or the swirl number change effect. It was observed that increasing the swirl number decreased the light intensity of the propane flame and kept it at a certain level, but did not have a serious effect on the dynamic pressure of the flame.

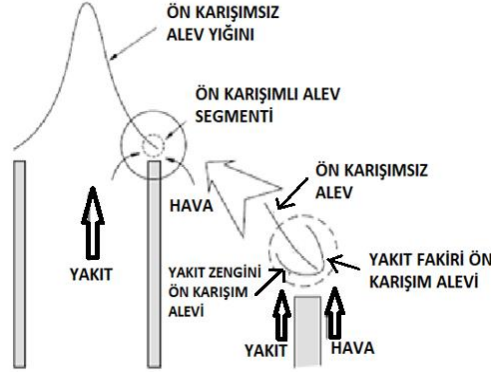
Key words: Swirl number, flue gas temperature, emission, combustion, propane.

1. Giriş

Yanma temel olarak, bir oksitleyici varlığında yakıtın yakıldığı kimyasal bir işlemdir. Isı ya da hem ısı hem de ışık üreten hızlı oksidasyon, nispeten az ısı ve ışısız eşlik eden yavaş oksidasyon olarak tanımlanabilir [1]. Yanma atomlar, moleküller ve katı sınırlar arasında moleküler düzeyde meydana gelen dinamik veya zamana bağlı olayların bir sonucudur [2]. Yanma olayı, alevli veya alevli olmayan şekillerde karşılık bulabilir ve alevli yanma olayları, ön karışım (önceden karıştırılmış) alevli veya difüzyon (önceden karıştırılmamış) alevli olarak sınıflandırılırlar [3]. Adlarından da anlaşılacağı gibi bu sınıflandırma, reaktanların karışıklık durumu ile ilgilidir [4]. Difüzyon alevlerinde yakıt ve oksijen bir araya gelerek yanıcı bir karışım oluşturur ve tutuşma meydana geldiğinde, bu karışımın oluşmasıyla birlikte yanma hemen başlar. Bu durumda alev, yakıt ve oksijen bölgeleri arasındaki sınırdan belirir [2]. Önceden karıştırılmış alev durumunda, yakıt ve oksitleyici yanma gerçekleşmeden önce moleküler düzeyde iyice karıştırılır [5]. Şekil 1'de her iki tür alev görselleştirilmiştir. Bu örnekte yakıt, yakıt nozulundan gelmekte, hava ise ayarlanabilir bir hava alığından alınmakta ve yakıt ile karıştırılmaktadır. Brülör çıkışında hava yakıt karışımının oluşturduğu alev, ön karışım alevidir. Hava akış oranının ayarlanabildiği

* Sorumlu yazar: caner.sipcik@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-1336-030X, ² 0000-0001-9988-2397

varsayılırsa, oluşan alev yakıt zengini veya yakıt fakiri olur. Eğer karışım zengin ise ön karışım alevini geçen fazla yakıt veya yakıt kaynaklı ara türler ortamda bulunan oksijenle tepkimeye girer ve difüzyon alevi oluşur [1].



Şekil 1. Önceden karıştırılmamış bir Bunsen alevinin, önceden karıştırılmış alev bölümü tarafından stabilizasyonunu

Yanma süreci içerisinde oluşan kararsızlıklar, sistemin kendi yapısı kaynaklı oluşan akustik dalgalardan ve alevin bulunduğu alandaki girdaplardan kaynaklanmaktadır [6]. Oluşan kararsızlık durumları, hız ve basınçta dalgalanmaları yani yanma ısısı salınım hızındaki salınımlarla ilişkili zarar verici basınç salınımlarını ve yanmanın gerçekleştiği alan duvarlarında termal gerilmeleri ortaya çıkarır. Nihayetinde bu süreç alevin geri tepmesine ve sönmesine sebep olur [7]. Kararsızlık mekanizmaları birkaç başlık altında incelenmiştir. Yakıt kompozisyonundaki bileşenlerin yoğunluk farklılıklarından dolayı düşük yoğunluğa sahip bileşen, yakıtın üzerinde kalarak daha önce yanmaya çalışır ve bu olay kütle kuvveti kararsızlıkları olarak adlandırılır. Yine ön karışımli alevlerin kendi yapısı gereği türbülanslı oluşu ve bu türbülansın yakıt içerisinde düzensizliğe yol açması hidrodinamik kararsızlık şeklinde kabul edilmiştir. Alevin kütlesi ve ısısı yanma boyunca birbiri içine geçerek yakıt karışımlarında ve alev hattında kararsızlığa yol açar. Difüzyiv-Termal kararsızlık olarak literatüre geçen bu olay alevin sönmesine sebep olan bir diğer etmendir [6]. Alevin akışında meydana gelen ısı üretimi yanma odası çeperlerinde titreşimlere ve akustik dalgalanmalara yol açar. Salınan sıcaklık dalgaları basıncın yukarıya kaymasına ve dinamik basınç değişimlerine yol açar. Termoakustik kararsızlık adı verilen bu davranış yanma odasına ve ünitelere ağır hasarlar verebilir [6]. Yanma boyunca kararsız olan alev, ses dalgaları üretmeye başlar ve bu dalgalar açık havada sönmüldükleri için bir sorun teşkil etmez fakat kapalı sistemlerde bu dalgalar yanma odası duvarları tarafından yansıtılır. Yansıyan ses dalgaları yanma odası geometrisine göre şekillenir ve basınç dalgalanmalarına yol açar. Bu da alevde kararsızlığa sebep olur [8]. Akustik ses dalgaları ile türbülanslı, önceden karıştırılmış alevlerin etkileşimini inceleyen L. Tim, türbülanslı alevlerin fazı kaydırıldığını ve alevin stabil kaldığı alanın genliğini azalttığını göstermiştir. Yani, stabil bir akustik etkinin sönmüleme kaynağı olarak hizmet ettiğini deneyimlemiştir. Sönmüleme kaynağı olan dalgalar, alev bozulmasının karakteristik ölçekleri düzeyinde veya ondan daha küçük olan bozulmalar için özellikle önemli olduğu sonucuna varmışlardır [14]. Alev kararsızlıklarına diğer bir bakış açısı, M. Fleifil et al tarafından, sistem akustiği ile kararsız ısı salınımı arasındaki bağlantı nedeniyle ortaya çıkan bir rezonans olgusu olarak tanımlanmıştır. Yaptıkları çalışmada, bir tüpün kenarında stabilize edilmiş laminer önceden karıştırılmış bir alevin hız salınımının dinamik tepkisini tanımlamak için analitik bir model oluşturmuşlardır. Bir boru akış hızı profili üzerine bindirilmiş üniform ve üniform olmayan hız bozulmalarını ele almışlardır. Bu modelin sonuçlarının deneysel gözlemlerle uyumlu olduğu ve tüm akustik kararsız modlar arasından yanma uyarılı modunun nasıl seçildiğini belirlemede faydalı olduğu gösterilmiştir [16]. Alev kararsızlıkları yakıt bileşeninde bulunan hidrojen miktarı ile de oldukça ilişkilidir. Yılmaz İ. et al. Hidrojen-kararsızlık ilişkisini incelemek için düşük girdaplı zayıf ön karışımli bir brülör için hidrojen-metan karışımını yakmışlardır ve yanma özelliklerinin hidrojen fraksiyonuna çok duyarlı olduğu bulunmuştur. Deney sonucunda, alevin, tüm koşullar için artan hidrojen konsantrasyonu ile alev tabanı bağlantısında ve alev sıkıştırmasında önemli artışlar gösterdiği, bu etkinin de rezonans olmayan frekanslarda alev tepkisini arttırırken, sadece minimum sıkıştırmayı indüklediği ve rezonans frekansında bağlantı yoğunluğunu azalttığını görmüşlerdir [17]. Hidrojen etkisini Propan ile deneyimleyen Chenglong T et al. deney sonucunda, Zeldovich sayısının hidrojen ilavesinin artmasıyla azaldığını ve bunun da karışımın aktivasyon sıcaklığını düşürdüğünü, Global Lewis sayısının, hidrojen fraksiyonunun artmasıyla azaldığını ve bunun ise hidrojen ilavesiyle tercihli difüzyon kararsızlıklarını arttırdığını gözlemlemişlerdir [13]. Sabit rezonans altında yapılan çalışmalara ek olarak Taştan M et al. Propan gazını akustik zorlama altında sabit denklik oranı (1.2), 7 kW termal güç, girdap sayısı (swirl sayısı = 1) ile yakmışlardır. Farklı dinamik basınç yaptırımı yapabilmek için yanma odası frekansı 110 Hz'den 330 Hz'e değiştirilmiş ve aynı zamanda

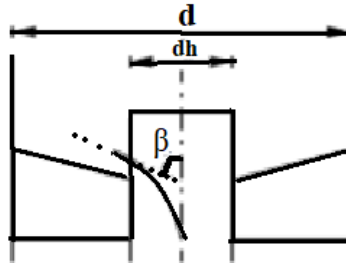
ışık şiddeti de kaydedilmiştir. 110Hz de hava ve saf propanın (%100 C₃H₈) yanması durumunda en yüksek ve en düşük dinamik basınç değerleri arasındaki dalgalanma yaklaşık 440 Pa olarak ölçülmüştür. 175 Hz akustik güç değerinde alev, 315 Pa, 330 Hz’de önceki rezonans değerinden daha düşük bir kuvvet etkisine sahip olduğundan burada genlik yaklaşık 130 Pa ölçülmüştür [12]. Deneysel çalışmalara ek olarak Propan yanmasına matematiksel model ile katkı sunan G.Russo et al. hidrojen ile zayıf propanın ön karışımı olarak yanmasını incelemiş ve saf propan, saf hidrojen ve ara karışımlar için kalış süresinin fonksiyonu olarak çatallanma diyagramları oluşturmuşlardır. Hidrojen-propan karışımlarının çatallanma diyagramları, saf yakıtların çatallanma diyagramlarının basit bir homotetik biçimlenmesi olarak görülemeyeceği, ancak yeni kararlılık özellikleri ortaya çıkacağını göstermiştir [9]. Kararsızlık çalışmalarında hidrojen etkisinin emisyon değerlerine etkisi de ayrıca merak konusu olmuştur. B. Alabas et al. çalışmasında önceden karıştırılmış ve girdap destekli bir sistemde akustik zorlama altında oksijenle zenginleştirilmiş yakıt karışımlarının kararsızlık değişimlerini incelemişlerdir. Yakıt olarak kullanılan metana farklı miktarlarda hidrojen (%0, %10, %20) eklenmiş ve hidrojen katkılı yakıt karışımlarında oksijen zenginleştirme işlemi (%21, %24, %26) uygulanmıştır. Yanma deneyleri sırasında alınan emisyon değerlerine göre oksijen ilavesi, artan adyabatik sıcaklık ve ani NO_x oluşumları nedeniyle NO_x emisyonlarını artırırken, CO emisyonlarının azalmasına katkıda bulunduğu sonucuna varmışlardır. Hidrojen ilavesi hava ile yanma durumunda NO_x emisyonlarını (%21 O) azaltsa da oksijen zenginleştirilmesi ile birleştiğinde kararsızlıkları tetiklediğinden CO emisyonlarını 2 ppm’den 13 ppm’ye çıkarmıştır [15]. Propan gazı emisyon değerleri için ise Oğuzhan B et al. deneysel araştırmalarında, karışımların emisyon değerlerini ve baca gazı değerlerini araştırmak ve belirlemek için hidrojenle zenginleştirilmiş propan kullanmışlardır. Karışım, sabit denklik oranı (1.2), girdap sayısı (1) ve 7kw termal enerji ile ön karışımı yanma odasında incelenmiştir. %10, %20 ve %30 hidrojen içeren karışımlar için, saf propanın hava ile yakılmasına kıyasla hidrojenle zenginleştirilmiş karışımların yanma kalorifik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Karışımında hidrojen miktarının artmasıyla birlikte CO miktarı yaklaşık %80 oranında azalmıştır. Hidrojenin ısı değerinden dolayı karışımlardaki hidrojen miktarının artması ile NO_x emisyonları artmıştır. Karışımlardaki hidrojen miktarı arttıkça yanma odası çıkışında baca merkezinden alınan sıcaklık değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir [12]. Hidrojen etkisi yanmanın kararsız hallerinde büyük rol üstlenirken, swirl (girdap) sayısının etkisini araştıran Harun Y et al. yakıt bileşimi, eşdeğerlik oranı ve girdap sayısının, önceden karıştırılmış %100 CNG, CNG-H₂, CNG-H₂-CO ve CNG-H₂-CO₂-CO karışımlarının akustik koşullar altında alev davranışı (dinamik ve statik) üzerindeki etkilerini laboratuvar ölçekli girdap stabilize bir yakıcıda deneysel olarak incelemiş ve girdap sayısının alev stabilitesi özellikleri üzerinde monoton bir etkisi olduğu sonucuna varmışlardır [10].

2. Girdap Üreteci (Swirl)

Hava ve yakıtın karışımının hızlı gerçekleşmesi ve yanmanın daha kararlı olabilmesi için girdap üreteçli yakıcılar tasarlanmıştır [18]. Tasarım şeması Şekil 2’de gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan girdap üreteçleri Şekil 3’de gösterilmiştir.

$$S = \frac{2}{3} \frac{1 - \left(\frac{dh}{d}\right)^3}{1 - \left(\frac{dh}{d}\right)^2} \tan\beta \quad (1)$$

Yukarıda bir girdap üretecinin formülize edilmiş hali verilmiştir. Burada S girdap sayısı, dh üretecin merkez çapı, d girdap üretecinin dış çapı, β girdap üretecinin çıkış açısıdır [19].



Şekil 2. Girdap üreteci tasarımı



Şekil 3. Girdap üreteçleri

Tablo 1’de bu çalışma için kullanılan girdap üreteçlerinin bazı özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Girdap numarası ve özellikleri

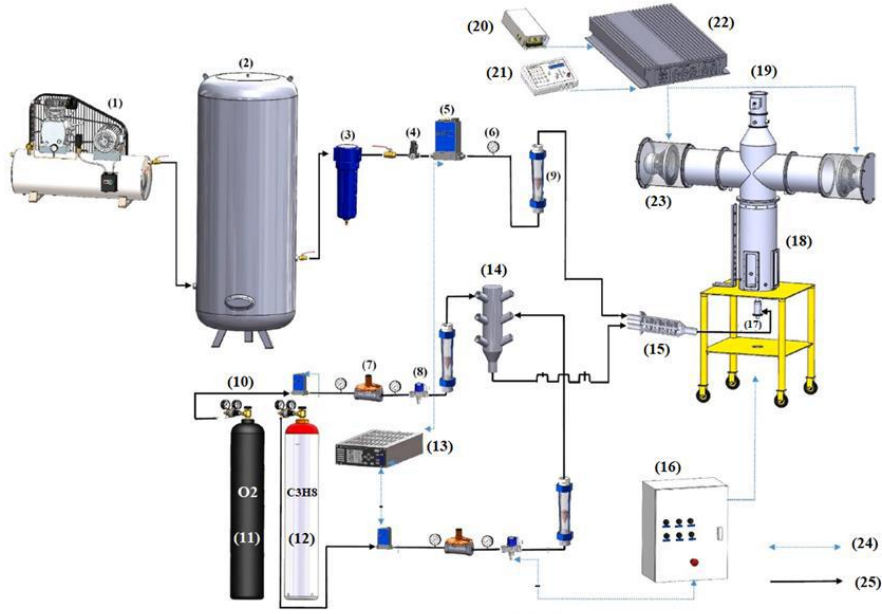
Girdap sayısı (S)	Çap oranı (d_h/d_0)	İç çap mm (d_h)	Dış çap mm (d_h)	Kanatçık açısı (α)
0.2	0.50	13.5	27	14,6°
0.4	0.50	13.5	27	28,1°
0.8	0.50	13.5	27	46,8°
1.2	0.50	13.5	27	58,1°
1.6	0.50	13.5	27	64,9°

3. Deney Sistemi

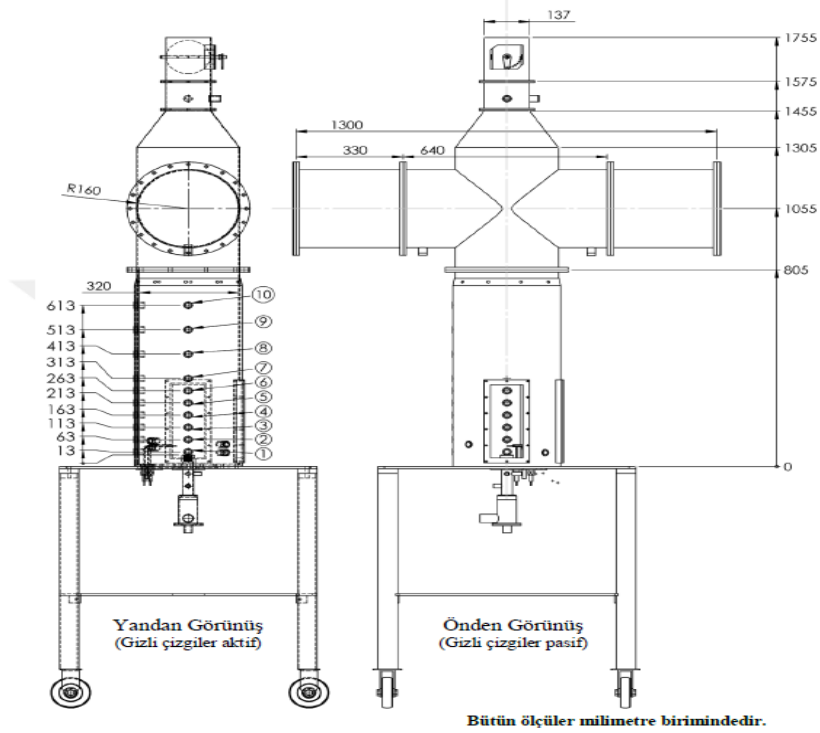
Bu çalışmada öncelikle propan gazının yanma davranışı, yanma stabilitesi ve swirl sayısı değişimlerinin yanmaya etkileri üzerine literatür araştırmaları sunuldu. Daha sonra gelişen yanma ve hidrojen bazlı motor teknolojileri ile beraber, modern hava araçları gaz türbin motorlarında propan gazının yakıt olarak kullanımının mümkün olup olmayacağı ve literatüre katkı sağlaması amacıyla bu çalışma yürütüldü. Çalışmanın üçüncü kısmında deney için kullanılan ekipmanlar ve deney düzeneği tanıtıldı. Dördüncü kısımda ise deneyin varyasyonları ve elde edilen veriler grafikler ile detaylıca sunuldu. Son olarak sonuç kısmında deneyden elde edilen bütün veriler açıklandı.

3.1. Yanma düzeneği

Çalışmada kullandığımız deney sisteminde (şekil 4), sisteme dahil edilecek gazlar, harici gaz silindirlerinde depolanır ve besleme miktarı altı kanallı bir vakum sistemi kontrolörü (MKS-946 Serisi) tarafından tam olarak kontrol edilen dijital kütle akış kontrolörü (MKS-GE50A) tarafından belirlenir. Vakum sistem kontrolörü, eşdeğerlik oranı ve termal güce göre, yakılacak gaz ve havanın miktarını manuel ayarlamaya yarar. Besleme hattındaki regülatörler gaz basıncını brülör çalışma aralıklarında (20 mbar) tutmak için kullanılır. Yanma havası kompresör tarafından sağlanır ve filtreden geçirilerek yağsız ve buharsız olarak kütle akış kontrolörü (MKS-1579A) üzerinden sisteme dahil edilir. Yanma gazları ve hava, ön karışım bölgesinde karıştırılarak yanma odasına yönlendirilir. Yanma odası (Şekil 5) içerisinde ateşleme sistemi ile yakılır. Yanma odasında alevin oluşmaması durumunda alev besleme hattında bulunan solenoid valfler aracılığıyla gaz akışı kesilir.



Şekil 4. Yanma düzeneği elemanları (1.Hava kompresörü(5.5 Hp ve 510 lt), 2.Harici hava tankı, 3.Filtre, 4.Basınç regülatörü, 5.Elektronik debi ölçer, 6.Manometre, 7.Basınç regülatörü, 8.Solenoid valf, 9.Yüzer tip debi ölçer, 10.Basınç regülatörü, 11.O2 tankı 12.C₃H₈ tankı, 13.Kontrol istasyonu, 14.Gaz kolektörü, 15. Hava/Yakıt ön karıştırıcısı 16.Kontrol istasyonu, , 17. Brülör,, 18. Yanma odası Kontrol paneli, 19. .Baca 20. Güç kaynağı, 21. Sinyal üretici, 22. Amplifikatör, 23. Hoparlör 24.Elektrik bağlantıları, 25.Gaz temin hatları)



Şekil 5. Yanma çalışmasında kullanılan deney düzeneği

Deney sırasında sistem basıncını ölçmek amacıyla basınç ölçerler kullanılır. Bu çalışmada 2 tür basınç ölçer kullanılmıştır. Bir tanesi piezo-dirençli 0-10 bar arası ölçüm yapabilen basınçölçer, diğeri ise sisteme akustik frekans ile müdahale edildiğinde değişen basıncı ölçebilen dinamik basınç ölçerdir. Sıcaklık ölçümleri seramik kaplı ısı çiftleri ile gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde bulunan K tipi ısı çiftleri (şekil 5/ 5-10) 1200 °C ye

kadar, B tipi ısıt çiftler (Şekil 5/ 1-5) 1800 °C'ye kadar ölçüm yapabilmektedir. Yanma sonucunda oluşan emisyon değerleri taşınabilir emisyon ölçüm cihazı ile ölçülür. Bu çalışmada kullanılan NOVO Plus RCU tipi taşınabilir emisyon cihazı tolerans değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Emisyon ölçüm cihazı tolerans aralıkları

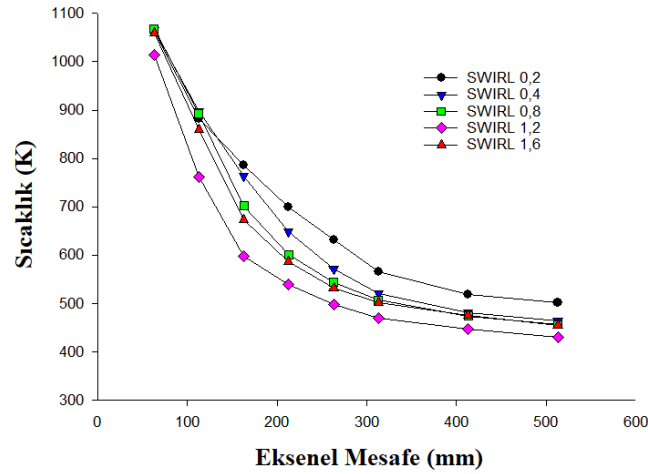
GAZLAR	ÖLÇÜM HATALARI	ÖLÇÜM ARALIĞI
O ₂	+/- %0.2	-
CO	+/- %5 yada +/- 5 ppm*	0-4000 ppm
CO	+/- %10	>4000 ppm
NO	+/- %5 yada +/- 10 ppm*	0-1000 ppm
NO	+/- %10	>1000
CO ₂	+/- %0.3	-

*Hangisi yüksek ise o kabul edilir.

3.2. Çalışma şartları

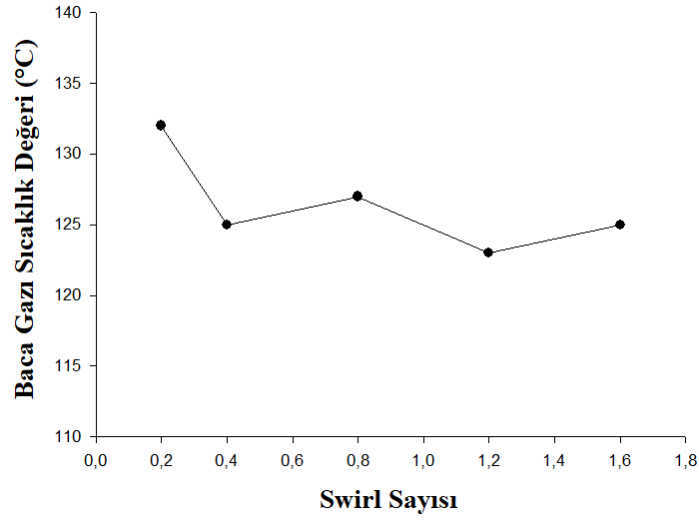
3.2.1. Swirl sayısının sıcaklık değerlerine etkisi

Propan gazı 5 kW ısıt güç ve 1,6 eşdeğerlik oranında, farklı swirl sayılarında yakılarak, oluşan alevin sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Şekil 6'da Propan gazının 0,2 / 0,4 / 0,8 / 1,2 / 1,6 swirl sayılarında eksenel mesafe boyunca sıcaklık dağılımındaki değişim gösterilmiştir.



Şekil 6. Eksenel mesafede swirl sayılarına göre sıcaklık dağılımı

Şekil 6'da görüldüğü üzere swirl sayısındaki artış, sıcaklık trendinde monoton bir artış göstermemiştir. Swirl sayısı 0,2-0,4-0,8 değerlerinde sırasıyla arttığında her eksenel mesafede ulaşılan ortalama sıcaklık değeri de sırasıyla düşmüştür. Ancak 1,2 ve 1,6 swirl sayılarında elde edilen ortalama sıcaklık değerlerinde aritmetik bir düşüş söz konusu olmamıştır. Aksine 1,6 swirl'de elde edilen sıcaklık değerleri 1,2'ye göre daha yüksektir. Bu da swirl sayısı ile alevin ulaştığı sıcaklık değerleri arasında doğru bir orantı olmadığını bize göstermiştir. Bu çalışmada ilk ısıt çiftten alınan en yüksek sıcaklık 0,8 swirlde 1067K, en düşük sıcaklık ise 1,2 swirl'de 1014K'dir. Propan gazı kullanılan bir yakıt bileşeni için çok yüksek sıcaklık istendiğinde 0,8 swirl kullanımı tercih edilebilir olduğu tespit edilmiştir. En ideal ve stabil yanma eğrisi ise 1.6 swirl sayısında gözlenmiş, alev kararsızlığının en optimum yakalandığı değer 1,6 swirl sayısı olmuştur. Yanmanın gerçekleştiği ve aleve en yakın noktadaki ısıt çiftlerden alınan değerler, alevin karakteristiği hakkında bilgiler sunarken, bir diğer parametre olan baca gazı sıcaklık değerleri de aynı şekilde alevin yanma karakteristiği hakkında bilgiler vermektedir. Şekil 7'de değişen swirl sayılarında propan alevinin yanması sonucu ölçülen baca gazı sıcaklık grafiği verilmiştir.

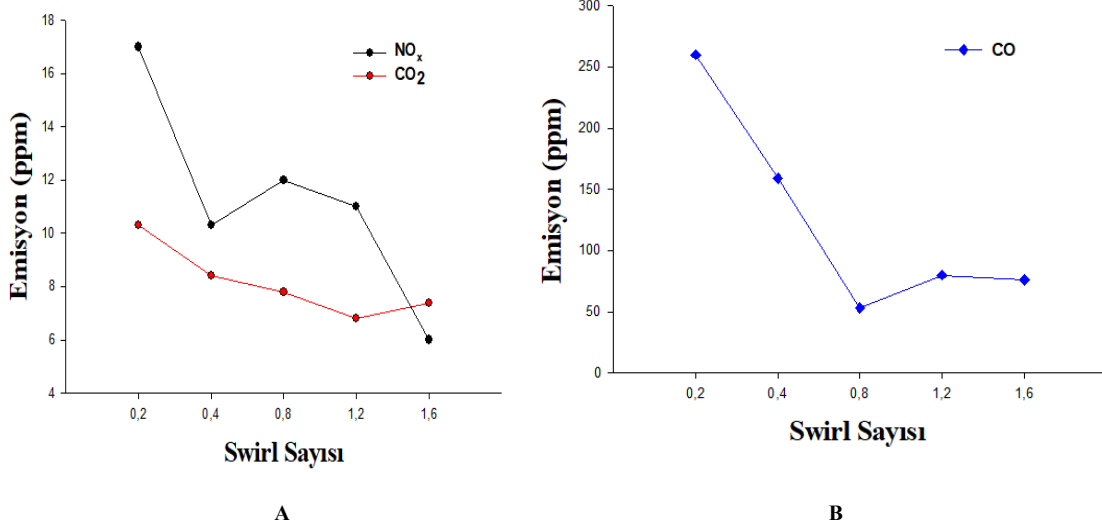


Şekil 7. Değişen swirl sayılarına göre ölçülen baca gazı sıcaklığı

Sönme limiti olarak belirlenen 0,2 swirl sayısında ölçülen baca gazı sıcaklık değeri 132 °C ile en yüksek seviyede gözlenmiştir. Daha sonra swirl sayısı 0,4-0,8-1,2-1,6 değerlerine kademeli olarak yükseltildiğinde elde edilen baca gazı sıcaklıkları daha düşük seviyelerde ölçülmüştür. 1,2 swirl'de 123 °C ile en düşük seviyesine gelen baca gazı sıcaklığı 0,4-0,8-1,6 swirl sayılarında sırasıyla 125,127,125 °C değerlerinde neredeyse aynı hesaplanmıştır. Swirl sayılarındaki değişime propan gazı alevi keskin tepkiler vermemiş, ölçülen değerler birbirine çok yakın olmuştur. Buradan hareketle, propan gazı yakıldığında, swirl sayısının baca gazı sıcaklıkları üzerindeki etkisi kayda değer bulunmamıştır.

3.2.3. Swirl sayısının emisyon değerlerine etkisi

Swirl sayısı değişiminin CO, CO₂ ve NO_x salınımlarına etkisi incelendiğinde Şekil 8'deki grafikler elde edilerek, propan alevinin çevre ve atmosfer üzerindeki kirletici etkisi değerlendirilmiştir.

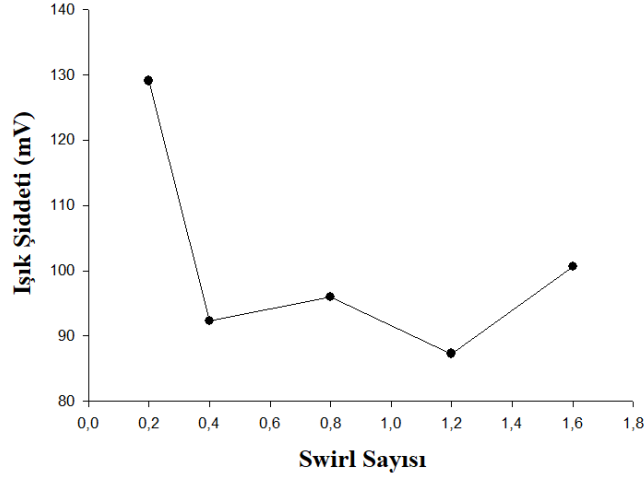
Şekil 8. Swirl sayısının emisyon değerlerine etkisi A) NO_x ve CO₂, B) CO

CO emisyonu bir yanma tepkimesi için istenmeyen bir üründür. Çünkü yakıt bileşeninde bulunan C atomlarının CO'ya dönüşmesi tepkimenin tam gerçekleşmediğini ve yanma veriminin düşük olduğunu göstermektedir. Bir yakıtın yanmasıyla elde edilen CO salınımının minimum seviyede olması beklenmektedir. Kullanılan swirl sayılarında (0,2-0,4-0,8-1,2-1,6), CO salınımları da sırasıyla 260-159-53-80-76 ppm değerlerinde gözlenmiştir. Bu verilere göre en yüksek CO salınımına propan gazının sönme limiti olan 0,2 swirl sayısında ulaşılmıştır. En düşük CO salınımı ise 0,8 swirl sayısında, alevde hiçbir akustik zorlama olmaksızın gözlenmiştir. Bu verilerden hareketle propan alevinin sönme alt ve üst limitleri içerisinde, swirl sayısının artışıyla CO emisyonu düşerek kirletici etkisi oldukça azalmıştır. Yanma tepkimelerinde bir diğer önemli parametre karbondioksit ürünüdür. CO₂ salınımının tam verimli bir yanmada maksimum seviyede olması beklenir. Çünkü yakıt bileşeninde bulunan C atomlarının tamamı yanma sonrasında CO₂ ye dönüşecek ve yanma tam olarak gerçekleşmiş olacaktır. Şekil 8'de görüldüğü gibi, kullanılan swirl sayılarında (0,2-0,4-0,8-1,2-1,6) CO₂ emisyonları da sırasıyla 10,3-8,4- 7,8- 6,8- 7,4 ppm değerinde gözlenmiştir. Propan gazının alt sönme limiti olan swirl 0,2 de CO₂ emisyonu en yüksek değerdedir. Bununla birlikte swirl sayısı arttırıldıkça CO₂ emisyonunda düşüş gözlenmiştir. Bu çalışmada yakıt olarak sadece propan gazı ve yakıcı olarak atmosfer havası kullanılmıştır. Yanmaya dahil edilen yakıt bileşeninde azot (N) bulunmamasına rağmen atmosfer havası içerisinde miktar, basınç, nem gibi parametreleri ölçülemeyen N₂ gazı bulunmaktadır. Deney sonucu elde edilen NO_x salınımları, emisyon cihazının tolerans değerlerinde net olarak ölçülememiştir. Bu sebeple çalışmamız NO_x oluşumunun hangi mekanizmalar ile gerçekleştiğini belirtmemekle birlikte sadece swirl sayısı etkisinde NO_x salınımının değişkenliğini gözler önüne sermiştir. Şekil 8'de belirtilen grafik incelendiğinde NO_x emisyonları swirl sayısının artışıyla sırasıyla 17- 10,5-12- 11- 6 ppm değerlerinde gözlenmiştir. 0,2 Swirl'de en yüksek değerini (17ppm) alan NO_x, 1,6 swirl sayısında minimum değerini (3ppm) almıştır. Propan gazının yakıt olarak kullanacak olan bir gaz türbin motorunda, aynı sıcaklık parametrelerinde olduğu gibi emisyon değerlerinde de 1,6 swirl sayısı kullanımı motor-yakıt performansı açısından oldukça verimli olacaktır.

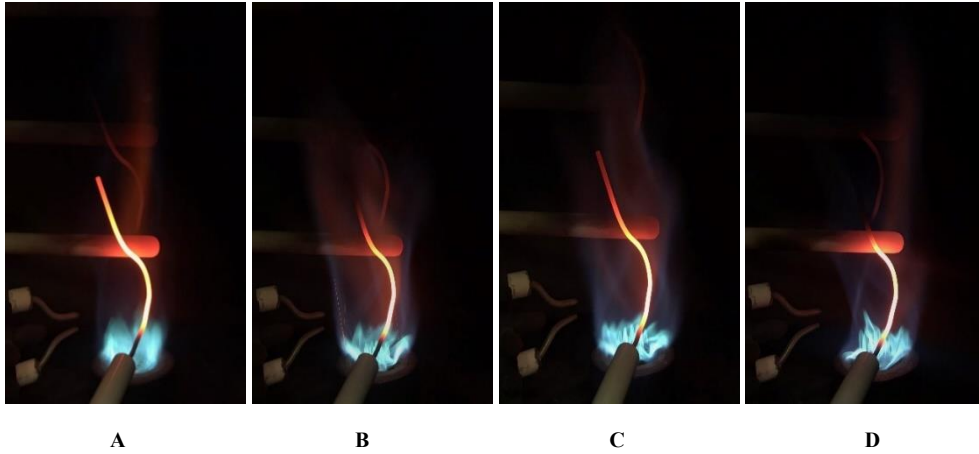
3.2.4. Swirl sayısının yanma karakteristiklerine etkisi

Girdaplı akışlar, alevi istenilen alanda sabit tutmak için kullanılan en etkili yöntemlerden biridir. Girdaplı akış, akışa teğet bileşen kazandırarak, eksenel-halka formunda girdap üreteçleri kullanarak, spiral biçimli kanatçıkları bulunan girdap üreteçleri kullanarak ya da mekanik akış çeviricileri kullanarak oluşturulabilir. Oluşturulan girdaplı akış, hava/yakıt kompozisyonunu homojenize eder ve böylece yakıt tüketimini ve yanma sonu zararlı ürünlerin salınımını azaltır. Girdap yoğunluğunun fazla olması durumunda ise alev boyunca eksenel akışın tersine dönerek akışın dışa doğru yayılmasına neden olur. Bu da ısı salınım oranında değişiklik yaratarak girdaplı akışın olumlu etkilerini tersine döndürebilir. Swirl sayısındaki değişiklikler, akış alanını, karışım bölgesinin boyutunu ve yerleşimini, alev sıcaklığını, tür konsantrasyon dağılımlarını, türbülans yoğunluğunu ve yanma karakteristiklerini etkiler. Bu etkilerden hangisinin baskın gelerek yanma özelliklerinde ne gibi değişiklikler meydana getireceği belli değildir. Bu sebeple bu çalışmada swirl sayısını değiştirerek propan gazı alevinin davranışı incelenmiştir.

Şekil 9'da, artan swirl sayıları boyunca dakikada 60.000 veriden elde edilen ışık şiddeti ölçümlerinin ortalama değerleri gösterilmiştir. Propan alevi 0,5 kW güçte 1,6 Eq oranında yakılmış ve elde edilen ışık şiddeti ölçümlerinde alevin 0,2 swirl'de (sönme limiti) daha yüksek ışık şiddeti oluşturduğu gözlenmiştir. Swirl sayısının 0,4 ve sırasıyla 0,8-1,2-1,6 değerlerine artırılmasıyla, grafikte açıkça görüldüğü gibi ışık şiddetinde 0,2'ye oranla keskin bir düşüş olduğu ancak 0,4 ve sonraki girdap değerlerinin artmasıyla ışık şiddetinin dalgalanma eğilimi göstermediği fark edilmiştir. Bunun sebebi alevin artan swirl sayılarında kararlı yanma alanına girmesidir. Propan alevinin kararlı yanma davranışı, alevin ışık şiddetinde radikal değişimlere meyletmesinin önüne geçmiştir. 0,2 swirl sayısında, yani alevin sönme limitinde, alevin kararsız hali ışık şiddetinde 129,1 mV değerlerinde gezerken, kararlı hale dönüşen alev, girdaplara adaptasyon sağlayarak 90-100 mV değerlerinde stabil sayılabilecek davranış sergilemiştir. Şekil 10'da farklı swirl sayılarında anlık alev görüntüleri verilmiştir.



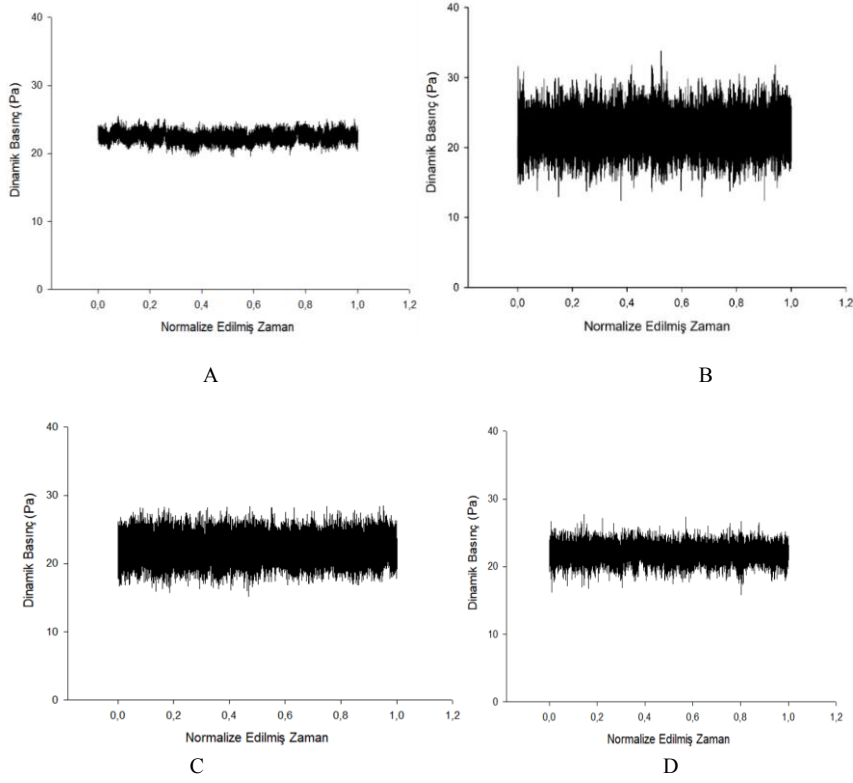
Şekil 9. Swirl sayılarına göre yayılan ışık şiddeti



Şekil 10. Farklı Swirl sayılarında anlık alev görüntüleri (Swirl sayısı; A: 0,4, B:0,8, C: 1,2, D: 1,6)

Yanma odası içerisinde yanan alev üzerinde, oda çeperlerinde oluşan frekanslar sebebiyle dinamik basınç dalgalanmaları yaşanmaktadır. Bu dalgalanmalar alevin kararsızlığını etkileyen bir diğer önemli faktördür. Propan gazının yakımı süresince değişen swirl sayılarında dinamik basınç dalgalanmaları ölçülerek, basınç dalga grafikleri Şekil 11’de sunulmuştur. Dalgalanmanın açık olarak propan alevi üzerindeki dinamik basıncın değişmesine sebep olduğu gözlenmiştir.

Propan alevinin, bir dakika boyunca ve dakikada 60.000 veri ile dinamik basınç ölçümleri yapılmıştır. Basınç dalgalanmaları 0,4 swirl sayısında yakılan propan alevi için 21 ve 24 Pa değerlerinde salınım yaparak, alevin dinamik basıncı 3 Pa olarak ölçülmüştür. 0,8 swirl sayısında basınç dalgalanmalarının 18 ve 25 Pa değerlerinde stabil kaldığı gözlenerek yaklaşık olarak 7 Pa dinamik basınç gözlenmiştir. 1,2 swirl sayısında bu değer 8 Pa olarak değerlendirilmiştir. 1,6 swirl sayısında ise 6 Pa dinamik basınç elde edilmiştir. Swirl sayısının 0,4 ten 0,8’e artışı ile dinamik basınç değeri artmış ancak 0,8’den sonraki swirl sayılarının artışı ile dinamik basıncın düştüğü gözlenmiştir. Buradan hareketle propan alevinin 0,8 swirl sayısından sonra yanma stabilitesinin arttığını ve daha kararlı geçtiği değerlendirilmiştir.



Şekil 11. Swirl sayısı değişimlerinde elde edilen basınç dalgalanmaları (Swirl sayısı; A: 0.4, B:0.8, C: 1.2, D: 1.6)

4. Sonuçlar

Bu çalışmada propan gazının 5 kW güç, 1,6 eşdeğerlik oranı ve değişen swirl sayılarına göre elde edilen sıcaklık, basınç, ışık şiddeti ve emisyon değerleri ön karışımli-girdap üreteçli, laboratuvar ölçekli bir yakıcıda araştırılmıştır. Yapılan ölçümlerde alevin yanma karakteristiği incelenmiş ve grafikler ile desteklenmiştir. Tim L. ve M.Fleifil'in çalışmalarında değindiği, türbülanslı akışın yanmanın dinamik etkilerini değiştirmesi ve alevde kararsızlığa sebep olması, bu çalışmada propan alevinin swirl sayısı artırılarak kuvvetlendirilmiştir. Swirl artışı ile türbülansı artan alevin dinamik basınç değişimleri 0,8 swirl sayısına kadar artarken, daha yüksek sayılarda alevin kararlılığını artırması ile dinamik basınç üzerindeki etki stabil kalmıştır. Artan swirl sayıları ile alevin ışık şiddeti giderek azalmış ve düşük seviyelerde seyretmiştir.

G.Russo, Yılmaz İ ve Chlong'un yakıt içerisindeki hidrojen miktarının alev davranışlarını etkilediğini bildirmeleri üzerine, yüksek hidrojen içerikli propan gazı (C_3H_8) yakıt olarak seçilmiş ve literatürdeki çalışmalara ek olarak yüksek hidrojenli bir yakıtın swirl sayısı etkisiyle sıcaklığı, alev en yakın noktada, 0,8 swirl sayısında en yüksek, 1,2 swirl sayısında en düşük değerde ölçülmüştür. Sıcaklık verilerine göre yüksek hidrojenli yakıtın kaarlı davranış sergilemede zorlandığı sonucuna varılmıştır. Propan gazının swirl sayısı değişimlerinde kararsızlığı incelendiğinde, Taştan M.'nin çalışmasına ek olarak literatür boşluğu doldurulmuş ve propan için akustik zorlama olmaksızın emisyon değerleri ölçülmüştür. Swirl sayısının artması ile CO, CO₂, NO_x emisyonunda azalma meydana gelmiştir. Baca gazı sıcaklığı için hidrojen ilavesinin sıcaklığı arttırdığı bilinmektedir. Oğuzhan B. çalışmasında bu görüşe yer verirken, artan sıcaklığın düşürülmesi yahut sabit tutulabilirliği incelendiğinde, swirl sayısının baca gazı sıcaklığına kayda değer bir etkisine rastlanılmamıştır.

Kaynaklar

- [1] Law C. Combustion Physics. Cambridge, Birleşik Krallık. Cambridge University Press. 2006.
- [2] F.Mahallawy, S. Habik. Fundamentals And Technology Of Combustion. Elsevier Science. 2002
- [3] Yılmaz H. Sentetik Gaz Yakıtların Yanma Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi. Kayseri. 2008.
- [4] Turns S. An Introduction To Combustion Concepts And Applications 2nd Edition. New York City,Amerika. McGraw-Hill Book Co. 2000
- [5] Mishra D. Experimental Combustion: An introduction. Florida,Amerika. CRC Press. 2014
- [6] Alabaş B. Oksijenle Zenginleştirilen Sentetik Gaz Yakıtların Yanma Kararsızlığının Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi. Kayseri. 2021.
- [7] Lieuwen T, McDonell V, Santavicca D, Sattelmayer T. Burner development and operability issues associated with steady flowing syngas fired combustors. Combustion Science and Technology. 2008. 180:1169–1192.
- [8] ÇAM Ö. Sentetik Yakıtların Yanma Kararsızlığının Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi. Kayseri. 2019
- [9] Benedetto A, Marra F, Russo G, Bifurcation analysis of lean premixed combustion of hydrogen/propane mixtures. United Kingdom. Combustion Science and Technology. 2005. 177:413–434.
- [10] Yılmaz H, Çam Ö, Yılmaz İ. Experimental investigation of flame instability in a premixed combustor, Netherlands .Fuel, 2018. 262:116594.
- [11] Mutlu K, Taştan M. Effect of acoustic enforcement on the instability of propane flame, 8th International Conference on Renewable Fuels, Combustion and Fire (FCE'21). 2021. Ankara, Türkiye. 191-196
- [12] Taştan M, Boztoprak O. Experimental investigation of hydrogen enriched propane in terms of emission values and flue gas temperature. 5th International Hydrogen Technologies Congress 2021. Niğde, Türkiye. 164-166
- [13] Tang C. Laminar burning velocities and combustion characteristics of propane-hydrogen-air premixed flames, United Kingdom. International Journal of Hydrogen Energy. 2008. 33:4906–4914.
- [14] Lieuwen T. Analysis of acoustic wave interactions with turbulent premixed flames. Amerika. Proceedings of the Combustion Institute. 2002 29:1817–1824.
- [15] Alabaş B, Tunç G, Taştan M, Yılmaz İ. Experimental investigation of the emission behaviour and flame stability of the oxygen and hydrogen enriched methane under acoustic enforcement. Netherlands .Fuel. 2020 290:120047.
- [16] Fleifil M, Annaswamy A, Ghoneim Z, Ghoniem A, Response of a laminar premixed flame to flow oscillations: A kinematic model and thermoacoustic instability results. Amerika. Combustion and Flame, 1996. 106:487–510.
- [17] Yılmaz İ, Ratner A, Ilbas M, Huang Y, Experimental investigation of thermoacoustic coupling using blended hydrogen-methane fuels in a low swirl burner, United Kingdom. International Journal of Hydrogen Energy. 2010 35: 329–336.
- [18] Spangelo Ø. Experimental and Theoretical Studies of a Low NOx Swirl Burner. Doktora Tezi. The Norwegian Üniversitesi.Trondheim/Norveç. 2004.
- [19] İlbaş M, Karyeyen S, Yılmaz İ, Effect of swirl number on combustion characteristics of hydrogen-containing fuels in a combustor, United Kingdom. International Journal of Hydrogen Energy, 2016. 41:7185–7191.

Çift Kabuk Cephe Sistemlerinin Sıcak ve Soğuk İklim Bölgeleri için Isıl Performanslarının İncelenmesi

Elif Nur YÜKSEL¹, Betül BEKTAŞ EKİCİ^{2*}

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Mimarlık ABD, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Mimarlık Bölümü, Mimarlık Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

¹ elifnuryksl23@gmail.com, ² bbektas@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 08/05/2023;

Kabul/Accepted: 29/05/2023)

Öz: Çift kabuk cepheler bina enerji performansı ve konfor koşullarının iyileştirilmesi için geliştirilmiş etkin sistemlerdir. Uygun bileşenlerle donatıldıkları, doğru yönlendirilip boyutlandırıldıkları takdirde bina ısı yüklerinin azaltılması, iç hava kalitesinin artırılması, gürültü ve güneş kontrolünün sağlanması noktasında önemli katkılar sağlamaktadırlar. Bu çalışmanın amacı son yıllarda kullanımı yaygınlaşan bu sistemlerinin sıcak ve soğuk iklim bölgeleri için performanslarının değerlendirilmesidir. Bu amaçla farklı derece gün bölgelerinde bulunan Adana (sıcak bölge) ve Erzurum (soğuk bölge) illerine ait coğrafi ve iklim koşullarında bir ofis binası örneği üzerinden simülasyonlar yapılmıştır. Çift kabuk cephelerin her bir bölge için 8 farklı yönelme ve boşluk genişliği ile oluşturulan alternatif durumlarına ait ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçları Design Builder yazılımı ile belirlenmiştir. Sonuç olarak sıcak iklim bölgesindeki Adana koşullarında ısı yükleri içinde %92.91 oranında önemli yer tutan soğutma yüklerinin azaltılması için en uygun yönelmenin kuzey, Erzurum için ise hem ısıtma hem de soğutma amaçlı ihtiyaç duyulan enerji miktarının optimize edilmesi için en uygun yönelmenin güney yönüne doğru olacağı belirlenmiştir. Çift kabuk performansını etkileyen önemli parametrelerden olan boşluk genişliğinin en uygun değerinin iki bölge için de 60 cm olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çift kabuk cephe sistemleri, ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacı, yönelme, güneş kazancı.

Investigation of Thermal Performance of Double Skin Facade Systems for Hot and Cold Climate Regions

Abstract: Double skin facades are effective systems developed to improve building energy performance and comfort conditions. If equipped with appropriate components, oriented and dimensioned correctly, they significantly reduce building thermal loads, and improve indoor air quality, noise and solar control. This study aims to evaluate the performance of these systems, which have been widely used in recent years, for hot and cold climate zones. For this purpose, simulations were carried out on an office building example in the geographical and climatic conditions of Adana (hot zone) and Erzurum (cold zone) provinces located in different degree day zones. The heating and cooling energy requirements of the alternative conditions of the double shell facades with 8 different orientations and gap widths for each region were determined by Design Builder software. As a result, it was determined that the most suitable orientation for reducing the cooling loads, which have an important place in 92.91% of the thermal loads in Adana conditions in the hot climate zone, would be towards the north, and for Erzurum, the most suitable orientation for optimizing the amount of energy needed for both heating and cooling would be towards the south. It was determined that the most appropriate value of the gap width, which is one of the important parameters affecting the double shell performance, is 60 cm for both regions.

Key words: Double skin facade systems, heating and cooling energy requirement, orientation, solar gain.

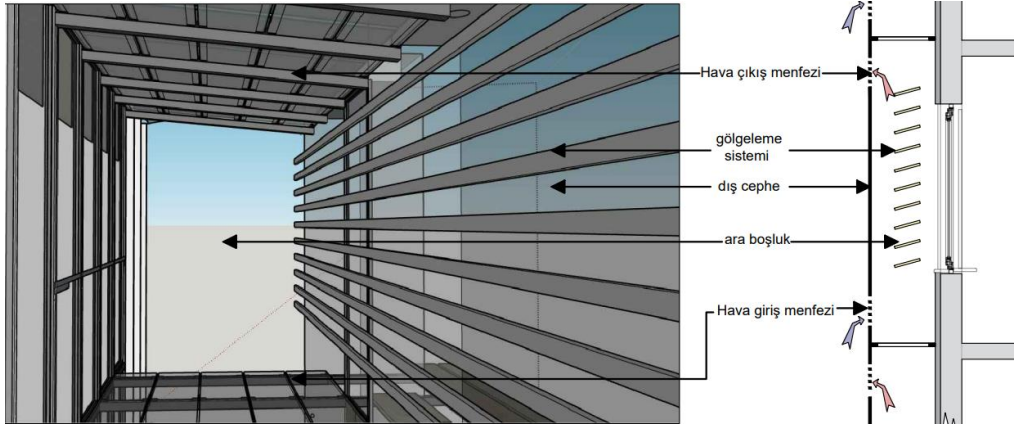
1. Giriş

Günümüzde hızla gelişen teknoloji, artan nüfus ve yoğun kentleşme enerji tüketimindeki artışın yanı sıra çevresel sorunlarında başlıca sebepleri arasında sayılmaktadır. Özellikle yapı sektörü, yapım ve kullanım aşamalarındaki yoğun enerji kullanımı nedeniyle bu artışta önemli bir rol oynamaktadır [1-2]. Bunun yanı sıra binalarda iklimlendirme, aydınlatma, su ısıtma vb. konfor koşullarının sağlanması için tüketilen enerji miktarı kullanılan enerjinin büyük bir bölümünün fosil yakıtlardan karşılanması karbondioksit emisyonları, iklim değişikliği, doğal kaynakların tükenmesi ve enerji maliyetlerinin artması gibi olumsuzlukları da beraberinde

* Sorumlu yazar: bbektas@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹0000-0001-8709-0210, ²0000-0003-0142-0587

getirmektedir [3-6]. İhtiyaç duyulan enerji miktarının toplam tüketim içinde önemli bir paya sahip olması, tüketim miktarlarının azaltılması ilgili çok sayıda araştırmanın yapılmasına da neden olmaktadır. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmalar genellikle bina tasarımı [7-8], HVAC (ısıtma, soğutma ve iklimlendirme) sistemleri [9-10], malzeme seçimi [11-12], enerji yönetimi [13] gibi başlıklar altında toplanabilir.

Yapı kabuğu bina içindeki sıcaklığın korunmasını, güneş ışınlarının etkisinin azaltılması ve dışarıdaki hava koşullarından kaynaklanan etkileri engellemesi gibi özelliklerinden ötürü enerji tüketimi kontrolünde önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle kabuk bileşen için binalarda enerji etkinliği arttıracak yenilikçi teknolojiler ve yöntemlerin kullanılması, enerji tüketimini azaltarak doğal kaynakların korunmasına, enerji maliyetlerinin düşürülmesine yardımcı olmaktadır. Bu uygulamalardan biri olan çift kabuk cam cephe sistemleri, sürdürülebilir bina tasarımında etkili ve popüler bir seçenek olarak tercih edilmektedir. Özellikle yüksek katlı yapı ve ofis binalarının tasarımında iç ortam konforuna olumlu katkıları nedeniyle de enerji etkin projelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. İç cam, ara boşluk ve dış camdan oluşan bu sistem (Şekil 1), kabuklar arasındaki boşluğu kullanarak iç ve dış ortam arasında tampon bölge oluşturur. Bu sayede çevresel değişkenlerin (ısı, gün ışığı, ses vb) etkisine karşı yalıtıcı bir işlev görebilir [14]. Çift kabuk cephe sistemleri, doğal havalandırma, aydınlatma ve kullanıcı kontrolüne de olanak sağlar. Bunun yanı sıra, şeffaflığı sayesinde binaya büyük miktarda gün ışığının girmesine izin verir ve masif kütlelerin etkisini hafifleterek, estetik bir cephe tasarımı fırsatı sunarlar [15].



Şekil 1. Çift Kabuk Cephe Bileşenleri

Çift kabuk cephe sistemlerinin binaların ısı performansları üzerindeki etkileri ile ilgili olarak gerçekleştirilmiş pek çok çalışma mevcuttur. Deneysel, simülasyon ve matematiksel tabanlı olarak literatürde yer alan çalışmalardan bazıları şunlardır. Hülagü vd. [16], tek ve çift kabuk cephe sistemlerinde gerçekleşen ısı transferinin matematiksel olarak modellenmesi için bölgesel analiz yöntemini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda çift kabuk cephe sistemlerin iç ortam konforuna katkıda bulunduğu bununla birlikte güneş kaynaklı ısı kazanımını %17 oranında azaltıldığına vurgu yapmışlardır. Göksal Özbalta ve Yıldız [17], çift kabuk cephe sistemlerinin sıcak-nemli iklim koşullarına sahip İzmir ilinde cam tipine bağlı olarak bina soğutma yüklerine etkisini deneysel ve simülasyon yolu ile incelemişlerdir. Kullanılan camların güneş ısı kazanç katsayısı (SHGC) değerlerine bağlı olarak soğutma yüklerinden elde edilebilecek tasarrufun % 7.1 ile % 30.4 arasında değiştiğini ifade etmişlerdir. Jankovic ve Goia [18], tek katlı bir cephe düzeneği üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada çift kabuklu cephelerin performansını belirlemede mekanik havalandırma ve gölgeleme amaçlı kullanılan jaluzilerin etkileşimini araştırmış ve havalandırma oranı ile akış hızının sistem performansını etkileyen başlıca parametreler olduğunu belirtmişlerdir. Solmaz [19], farklı iklim bölgeleri ve coğrafyalarda bulunan 4 farklı yüksek yapı örneği üzerinden çift kabuk cephe sistemlerinin iç ortam konfor koşullarına olan etkisini değerlendirmiştir. Sistemin doğal havalandırma özelliği ile binaların iç ortam hava kalitesine, günışığının bina içerisine kontrollü alınması ile görsel konfora, cidarlar arasındaki hava boşluğu ile de ısı ve akustik konfora katkıda bulunduğunu ifade etmiştir. Alqaed [20], Suudi Arabistan'ın farklı iklim bölgelerinde yüksek katlı ofis binalarında enerji tasarrufu sağlanması amacıyla basit, çift cidarlı ve çift cidar arası faz değiştiren malzeme kullanılan üç farklı cephe örneğinin performanslarını incelemiştir. Çalışmanın sonucunda özellikle soğuk bölgelerde faz değiştiren malzemelerin kullanıldığı cephelerin tropik bölgelerden çok daha az etkili olduğunu vurgulanmıştır. Kutluay vd. [21], çift kabuk cephelerin tasarım parametrelerini açıklayıp:

yönü, konumu, formu, yapı kabuğunun bileşenlerinin bulunduğu iklim bölgesine göre tasarlanması gerektiğini ve özellikle soğuk iklim bölgelerinde tercih edildiğini belirtmişlerdir.

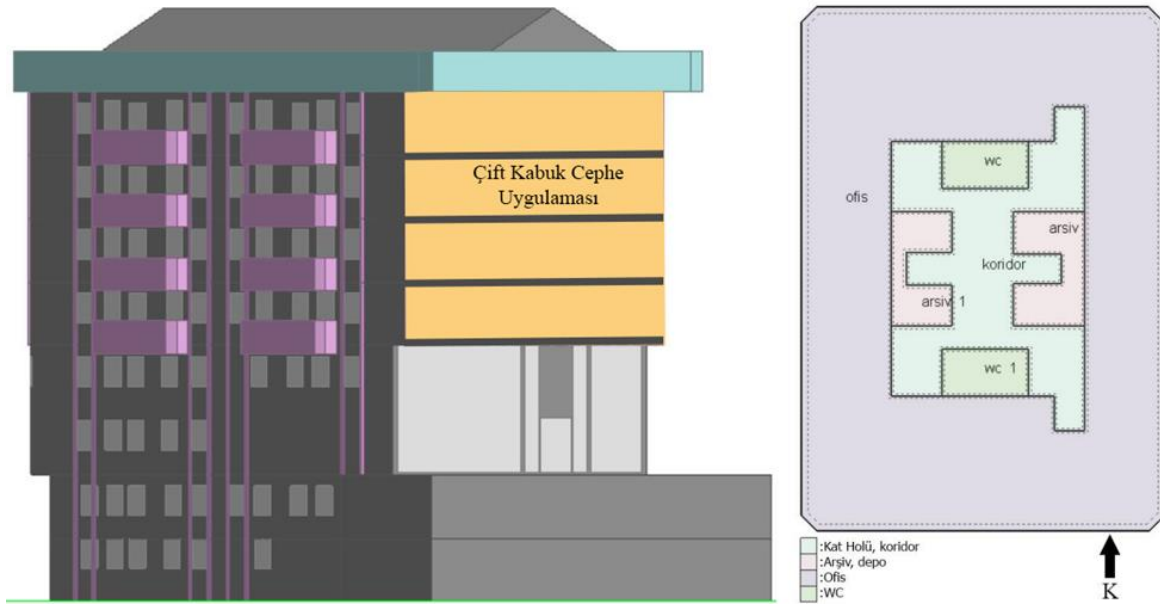
Bu çalışmada, sıcak ve soğuk iklim bölgelerinde bulunduğu kabul edilen bir ofis binasına ait çift kabuk cephe sisteminin farklı yönelme ve boşluk genişlikleri için ısı performansındaki değişim incelenmiştir. TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardında verilen farklı derece gün bölgeleri içerisinde sıcak bölgeleri temsilen Adana, soğuk bölgeleri temsilen ise Erzurum illeri seçilerek, simülasyonlarda bu bölgelere ait iklimsel ve coğrafi veriler kullanılmıştır. Örnek ofis yapılarının enerji performansları Design Builder programı kullanılarak simülasyon yolu ile hesaplanmış, uygulamanın doğrulaması için ise Revit 2021 yazılımı kullanılmıştır.

2. Materyal ve Metod

Tek ve çift kabuk cephe sistemlerinin sıcak ve soğuk iklim bölgelerindeki performanslarını değerlendirmek için Design Builder yazılımı ile farklı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra yapılan analizlerin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla Autodesk Revit ortamında doğrulama (validasyon) çalışması yapılmıştır. Tek kabuk cephe sistemi yerine farklı yönlere yönlendirilmiş ve farklı boşluk genişliklerine sahip çift kabuk cephelerin bina ısı performansları üzerindeki etkileri bir ofis binası örneği üzerinden değerlendirilmiştir.

2.1. Örnek Ofis Binasının Özellikleri ve Tanımlanan Değişkenler

Yapı türleri arasında konfor koşullarının sağlanması açısından ofis binaları yüksek aydınlatma, ısıtma ve soğutma yükleri ile enerji tüketimi açısından önemli bir paya sahiptir. Enerji etkin yapı kabuğu tasarımı ile enerji tüketimini azaltılabileceği gerçeğinden hareketle bu çalışmada gerçekleştirilen simülasyonlar için örnek yapı olarak 8 katlı açık planlı bir ofis binası belirlenmiştir. Örnek ofis yapısının yakın çevresinde herhangi bir bina olmadığı ve bitki örtüsü/topoğrafyadan kaynaklı bir gölgelemeye maruz kalmadığı varsayımı yapılmıştır. Toplam inşaat alanı 2400 m² olan binanın Design Builder Energyplus yazılımında oluşturulan üç boyutlu modeli ile açık planlı olarak tasarlanan normal kat planı Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Örnek ofis yapısının 3D modeli ve normal kat planı

Ofis yapısının betonarme taşıyıcı sisteme sahip olduğu dış ve iç duvarlarının gazbeton olarak üretildiği kabulü yapılmıştır. Çatısı geleneksel kırma çatı olarak oluşturulan binanın diğer bileşenlerine ait özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Bina modelinin oluşturulmasında kullanılan yapı malzemeleri ve fiziksel özellikleri

Yapı Elemanları	Katmanlar (dıştan içe)	Kalınlık (mm)	Isı İletkenlik (W/mK)	Yoğunluk (kg/m ³)	U Değeri (W/m ² K)
Duvar	Sıva	30	0.5	1300	0.557
	Taş Yünü	40	0.03	100	
	AAC Blok	200	0.11	2800	
	Alçı Sıva	20	0.4	1000	
Taban Döşeme	Döşeme Beton	200	1.4	2100	0.471
	Taş Yünü	50	0.03	100	
	Tesviye Beton	60	0.38	1200	
İç Mekan Döşeme	Kaplama Malzemesi	2.5	1.8	2560	0.420
	Döşeme Beton	200	1.4	2100	
Çatı	Kiremit	25	2.00	2243	0.285
	Su Yalıtımı	6	0.190	960	
	Kaplama Tahtası	20	1.340	1010	
	Eğim Beton	50	1.400	2100	
	Isı Yalıtımı	110	0.035	35	
	Su Yalıtımı	5	0.190	960	
	Betonarme D.	150	2.500	2400	
	Tavan Sıvası	25	0.510	1120	
Pencere	Cam	4	SHGC:0.780	2.9	
	Hava Boşluğu	12	Işık Geçirgenliği: 0.820		
	Cam	4			

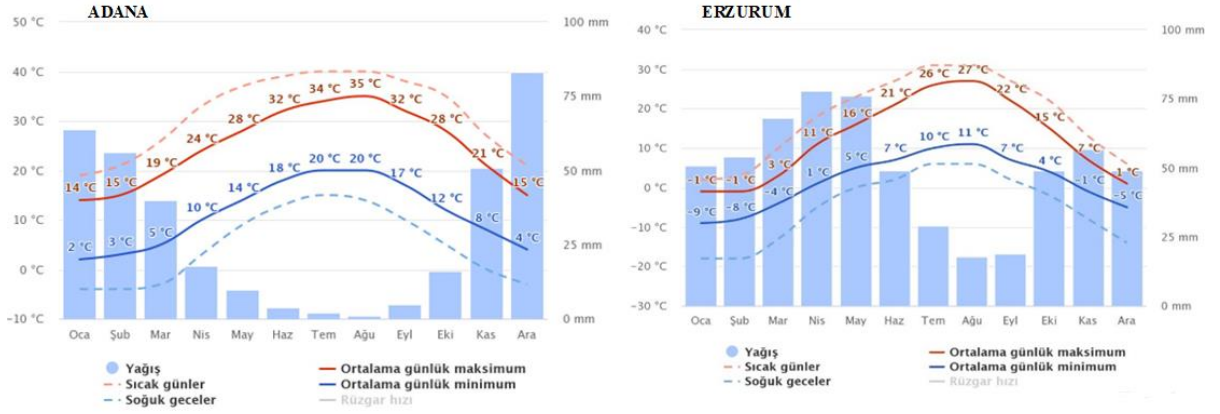
Simülasyonlarda HVAC (Isıtma, soğutma ve iklimlendirme) sistemleri için kullanılan değişkenlere ait değişkenlerden ısıtma sıcaklığı 22°C, soğutma sıcaklığı ise 24°C olarak kabul edilmiştir. Kişi başı dahili kazanç 100 W olarak belirlenirken, güneş kontrolü parametresi ise 400 lux olarak seçilmiştir. Örnek ofis yapısının her mahalinin ilgili fonksiyonlara göre; bina şablonu, kullanıcı yoğunluğu, tatil günleri, yapı kullanım saatleri ve ekipmanlardan iç kazanım Tablo 2’de verilmiştir. Yapının katları arasındaki ısı denge açısından birbirine etki etmemesi için örnek ofis yapısında kat yüksekliğinde çift kabuklu cephe sistemi tercih edilmiştir.

Tablo 2. Simülasyonlarda kullanılan örnek binaya ait özellikleri

Bina Şablonu	Açık Planlı Ofis
Kullanıcı Yoğunluğu	0.111 kişi/m ²
Kişi metabolizma hızı	0.9 (birimsiz)
Tatil günleri	Pazar günleri+15 gün
Ekipmanlardan iç kazanım	11.77 W/m ²
Yapı Kullanım Saatleri	Hafta içi mesai saatleri 8.00-18.00 arasındadır. Cumartesi 8.00-12.00 arasında mesai olup, Pazar tatil günüdür

2.2. Çalışma Alanı

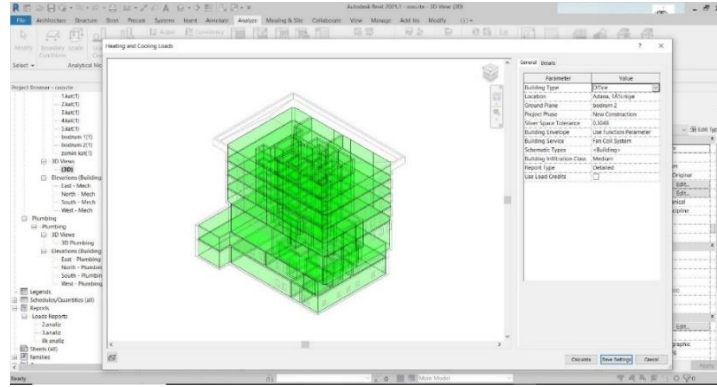
Çift kabuk cephe sistemlerinin özellikle sıcak ve soğuk iklim bölgelerindeki performanslarının değerlendirilmesi bu çalışmanın ana odağıdır. Bu nedenle çalışmada sıcak iklim bölgesini temsilen Adana ili seçilmiştir. 37° kuzey enlemi ile 35°.12' doğu boylamında yer alan şehrin deniz seviyesinden yüksekliği 23 m olarak kabul edilmiştir. Soğuk iklim bölgelerini temsilen seçilen Erzurum ili ise 39.9° kuzey enleminde ve 41°.27' doğu boylamında yer almaktadır. Şehir 1890 m rakım değerine sahiptir. Hesaplamalarda kullanılan bu illere ait son 30 yıllık iklimsel veriler Meteoblue [22]’dan temin edilmiştir. Adana ve Erzurum illeri için kullanılan ortalama iklimsel veriler Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. Adana ve Erzurum illerine ait hesaplamalarda kullanılan son 30 yıllık ortalama iklimsel veriler

2.3. Doğrulama (Validasyon) Çalışması

Design Builder ile gerçekleştirilen simülasyonların sonuçlarına dair bir doğrulamanın sağlanması için, binanın aynı örnek senaryosuna ait ısıtma ve soğutma yükleri Autodesk Revit 2021 programı ile de benzetimler yapılarak belirlenmiştir. Bu amaçla design builder ortamında oluşturulan model (Şekil 4), Revit ortamında da oluşturularak çevresel ve binaya ait parametreler tanımlanarak sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4. Doğrulama Çalışması için Revit 2021 ortamında hazırlanan bina modeli

Her bir simülasyon aracıyla elde edilen yıllık toplam ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçları ile bunlara ait farklar Tablo 3'te verilmiştir. Örnek binanın Design Builder programından elde edilen ısıtma yükü 19160 kWh iken Revit 2021 yazılımından elde edilen değer % 6.12 oranında bir farkla 17986 olarak hesaplanmıştır. Soğutma yükleri dikkate alındığı durumda ise programların hesaplamış olduğu değerler arasında % 2.09 oranında bir fark olduğu görülmektedir. Sonuç olarak kullanılan iki farklı yazılım ile hesaplanan ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçlarına ait sonuçların birbirine yakınsadığı ve Design Builder ile yapılan analizlerin kabul edilebilir olduğu görülmüştür [23].

Table 3. Design Builder ve Revit 2017 yazılımlarından elde edilen ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçları

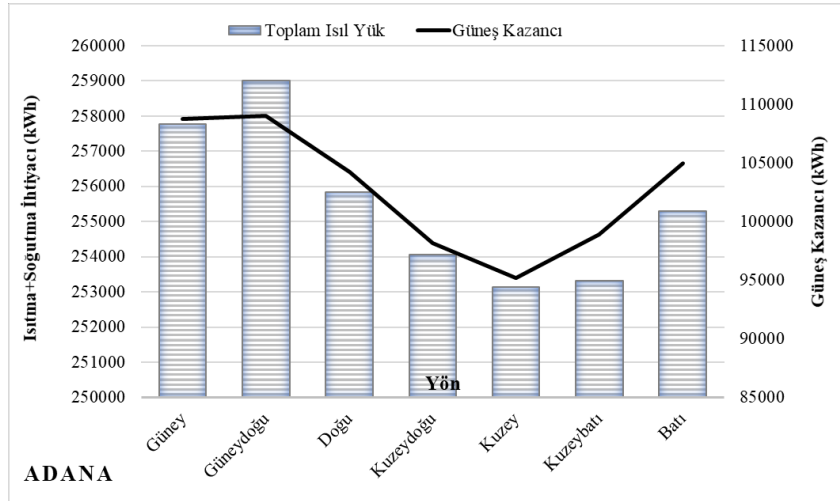
Benzetim programı	Isıtma Enerjisi İhtiyacı (kWh)	Soğutma Enerjisi İhtiyacı (kWh)
Design Builder	19160	231780
Revit 2017	17986	226925
Fark	%6.12	%2.09

3. Bulgular ve Değerlendirme

Çift kabuk cephe sistemlerinin sıcak ve soğuk iklim bölgelerindeki performanslarının değerlendirilmesinde çift kabuk cephesinin yönü ve boşluk genişliğinin etkisi ayrı olarak ele alınmıştır. Hem Adana hem de Erzurum için öncelikli olarak çift kabuk cephelerin yıllık toplam enerji gereksinimini (ısıtma+soğutma) minimum seviyeye indirecek yönlenme alternatifleri belirlenmiştir.

3.1. Çift Kabuk Cephe Sisteminin Yönlendirilmesinin Etkisi

Adana ili için örnek ofis binasının 8 farklı yönlenme durumu için ayrı ayrı simülasyonlar yapılarak bunlara ait sonuçlar Şekil 5'te verilmiştir. Oluşturulan bütün senaryolara ait elde edilen bulgular değerlendirildiğinde ısıtma yüklerinin toplam ısı yükleri içindeki oranlarına ait ortalama değerler % 7.11 olduğu belirlenmiştir. Örnek binaya ait en düşük ısıtma enerjisi ihtiyacının 16920 kWh olduğu ve binanın çift kabuk olarak tasarlanan cephesinin güneye doğru yönlendirildiği durumda elde edildiği görülmektedir. Buna karşılık en yüksek ısıtma enerjisi ihtiyacı ise çift kabuk cephenin ısıtmanın istendiği dönemde faydalı güneş kazançlarından istifade edemediği kuzeye yönlendirilmiş durumda (güneye yönlendirilmiş duruma göre % 17.96 daha fazla) 19960 kWh olarak elde edilmiştir.

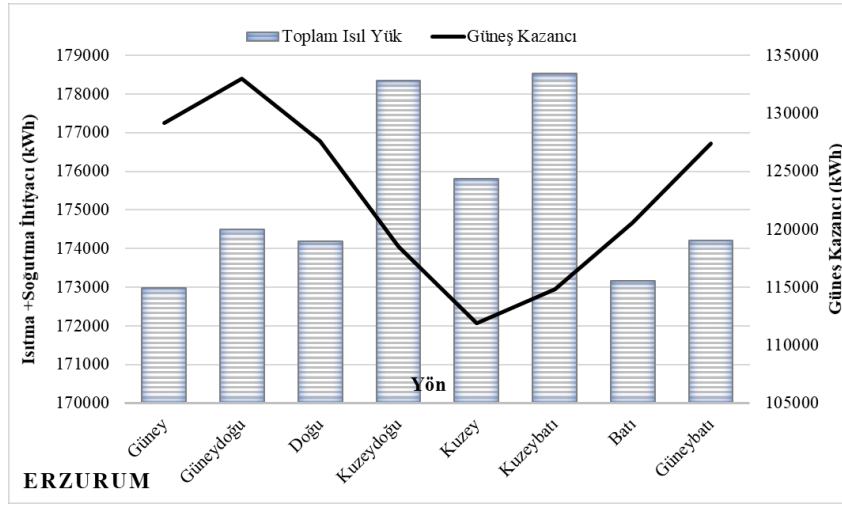


Şekil 5. Adana ili için toplam ısı yükü ve güneş kazançlarının yönlenmeye bağlı değişimi

Bununla birlikte özellikle sıcak iklim bölgesinde yer alan Adana'da en yüksek soğutma enerjisi ihtiyacının yıl boyunca sürekli güneş radyasyonuna maruz kalan cephelerden güneybatı yönünde ve 241650 kWh olarak elde edildiği görülmektedir. Binanın yıllık toplam güneş kazancının 109680 kWh seviyelerine ulaşmasına sebep olan bu yönlenme soğutma ihtiyacının da en önemli sebebidir. Isıtma ve soğutma amaçlı toplam enerji gereksiniminin ortalama olarak % 93'lük bölümünü oluşturan bu durum Adana gibi sıcak iklim bölgeleri için çift kabuk cephelerin güneş kazançlarının kontrol altına alınması için cephenin en az kazanç sağlayacak yön olan kuzeye doğru yönlendirilmesinin uygun olacağı sonucunu da beraberinde getirmektedir. Adana ili için yıllık güneş kazançlarının en düşük değeri (95190 kWh) aldığı kuzeye yönlendirilmiş olan çift kabuk cephe yönlenme alternatifi soğutma yükleri içerisinde 233180 kWh ile en düşük değeri sağlamakla birlikte yıllık toplam ısıtma enerji gereksinimleri arasında 253140 kWh ile yine minimum enerjiye ihtiyaç duyan alternatif olmaktadır. Sıcak iklim bölgelerinde çift kabuk cephe sistemlerinin kuzeye yönlendirilme durumunun mümkün olmayacağı koşullarda ise güneş kazançlarının güneş kontrol elemanları veya yapı kabuğunda alınabilecek önlemlerle sınırlandırılması uygun olacaktır.

Erzurum ili için çift kabuk sistemin uygulandığı bina cephesinin dört ana ve dört ara yöne olmak üzere toplam 8 farklı doğrultuda yönlendirildiği senaryolar için Design Builder programında hesaplanan yıllık toplam ısıtma enerji gereksinimleri ve güneş kazançları Şekil 6'da verilmiştir. Çift kabuk cephe yönlendirme alternatifleri arasında en

yüksek ısıtma enerjisi ihtiyacına (115710 kWh), güneş kazançlarının yıl boyunca düşük değerlerden birine (114830 kWh) sahip olduğu kuzeybatı yönlenmesinde rastlanmıştır. Çift kabuk cephe sisteminin güneşe yönlendirilmesi durumunda ise bu yönüne göre % 7.7 tasarruf sağlanması mümkün olmakla birlikte bu durumda ihtiyaç duyulan ısıtma enerjisi ihtiyacı ise 106800 kWh'tır. Yıl boyunca uzun güneşlenme süreleri ve buna bağlı olarak binaların güney açıklıklarından elde edilen pasif güneş kazançları diğer yönlere nazaran daha az enerjiye ihtiyaç duyulmasını sağlamaktadır. Erzurum koşullarında ofis yapısına ait senaryolarda ısıtma yüklerinin soğutma yüklerine oranı ortalama 1.70 olarak belirlenmiştir. Başka bir deyişle ısıtma yükleri toplam ısı enerji ihtiyacının ortalama % 63.05'lik bir bölümünü oluşturmaktadır. Farklı yönlendirme durumları için soğutma yüklerinin en yüksek aldığı değer çift kabuk sistemin güneydoğuya yönlendirildiği durumda 68690 kWh olarak belirlenmiştir. Bu soğutmanın en düşük olduğu kuzey yönlendirme durumuna göre % 12.93, güneşe göre ise % 3.8 daha fazla enerji ihtiyacı anlamına gelmektedir. Bu durumda Erzurum gibi soğuk iklim bölgelerinde ısıtma enerjisi ihtiyacının ısıtma dönemindeki faydalı kazançlarla azaltılacağı, aynı zamanda da yaz aylarında doğu ve batı yönlerindeki saydam yüzeylerin güneş radyasyonuna daha dik açılarla maruz kalması sonucu karşılaşılan yüksek soğutma yüklerinin önlenebileceği güneş yönlenmesi en uygun seçenek olmaktadır.

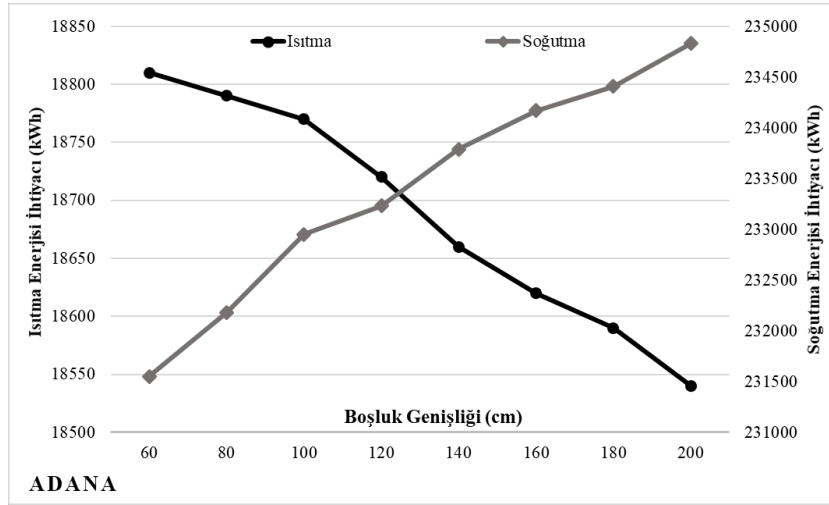


Şekil 6. Erzurum ili için toplam ısı yük ve güneş kazançlarının yönlenmeye bağlı değişimi

3.2. Boşluk Genişliğinin Çift Kabuk Cephe Sistemlerinin Performansına Etkisi

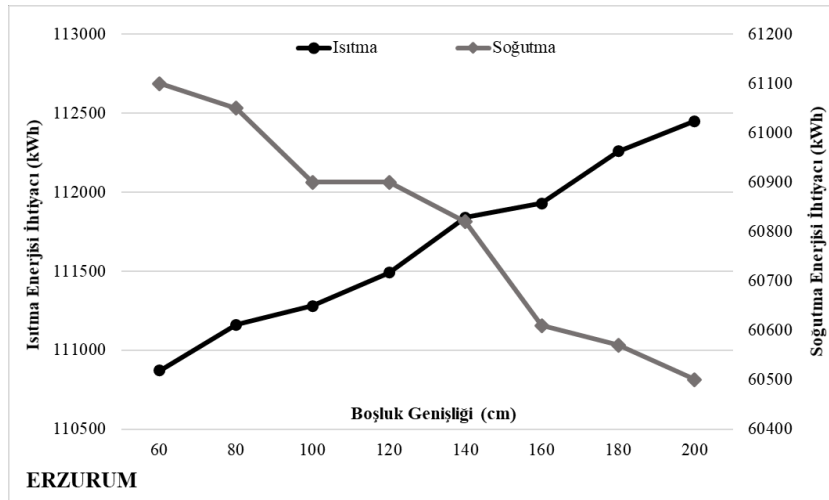
Boşluk genişliğinin çift kabuk cephe sistemlerinin ısı performanslarına etkisi değerlendirmek amacıyla örnek ofis yapısının Adana için optimum yön olarak belirlenen kuzey cephesine, U değeri 2.9 W/m²K olan koridor tipli çift kabuk cephe sisteminin farklı alternatifleri eklenmiştir. Boşluk genişliğinin 60 cm ile 200 cm arasındaki 8 farklı değeri için (her 20 cm'lik adım değeri için) hesaplamalar yapılarak en az enerji sarfiyatına sebebiyet verecek cephe alternatifleri belirlenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde boşluk genişliğinin artmasıyla çift kabuk cephelerden kaynaklı bina ısıtma enerjisi ihtiyaçlarının da kademeli olarak arttığı, bunun aksine soğutma yüklerinin ise azaldığı görülmektedir. Kuzey yönünde yönlendirilen ofis binasının boşluk genişliğinin her 20 cm'lik artışıyla ısıtma enerjisi ihtiyacı ortalama 38.57 kWh değerinde artarken, bunun tam tersi şekilde soğutma enerjisi ihtiyaçları da ortalama 468.57 kWh azalmaktadır. Çift kabuk cephe sisteminden kaynaklanan yapı kabuğunun farklı boşluk genişliğindeki durumlarına göre ısıtma, soğutma enerjisi ihtiyaçları ile güneş kazançlarının değişimi Şekil 7'de yer almaktadır.

Çift Kabuk Cephe Sistemlerinin Sıcak ve Soğuk İklim Bölgeleri için Isıl Performanslarının İncelenmesi



Şekil 7. Adana ili için ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacının boşluk genişliğine göre değişimi

Erzurum iklim koşulları için çift kabuk cephe sistemlerinin farklı boşluk genişlikleri için örnek binanın ısıtma ve soğutma yüklerinin değişimi Şekil 8’de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı üzere boşluk genişliğinin artması ısıtma yüklerinde bir artışa sebep olurken soğutma yüklerini de düşürmektedir. Bu tampon bölgedeki hava durgun halde iken ısı kaybı ve kazançlarına karşı bir yalıtkan işlevi görmektedir. Ancak boşluk miktarının artması tampon bölgedeki havanın hareketini hızlandırır. Hızlı hareket eden hava ısı kayıplarını artırıp ısıtma yüklerinde artmasına neden olurken, çift kabuğu oluşturan cam yüzeylerin de soğutulmasına fayda sağlamaktadır. Boşluk genişliğine bağlı olarak ısıtma enerjisi ihtiyaçları 90 kWh ile 350 kWh arasında değişen miktarlarda artış göstermektedir. Boşluk genişliğinin her 20 cm’lik artışı binanın soğutma ihtiyacında ortalama 85.71 kWh değerinde bir düşüşün sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Toplam ısıtma ve soğutma yükleri birlikte ele alındığında ise en uygun boşluk genişliği değeri Erzurum için de 60 cm olarak elde edilmiştir.



Şekil 8. Erzurum ili için ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacının boşluk genişliğine göre değişimi

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma çift kabuk cephe sistemlerinin sıcak ve soğuk iklim bölgelerindeki ısı performanslarını değerlendirmek üzere hazırlanmıştır. Çalışmada çift kabuk cephelerin yönlendirilmesi ve kabuklar arasındaki hava

boşluğunun etkisi bir ofis binası üzerinden oluşturulan farklı senaryolar çerçevesinde değerlendirilmiştir. Design Builder yazılımı ile simülasyon yoluyla gerçekleştirilen çalışmanın ana bulguları aşağıda sıralanmıştır.

- Farklı yönlenme durumlarına ait senaryolar değerlendirildiğinde Adana ili için ısıtma yüklerinin soğutma yüklerine oranının ortalama 7.6 olduğu görülmektedir. Güneş kazançlarının bina soğutma yüklerine etkisi değerlendirildiğinde aşırı ısınmaların önlenmesi amacıyla binaların ısıtma ihtiyaçlarının yüksek değerlere ulaşmadığı sıcak iklim bölgelerinde çift kabuk cephe sistemlerinin kuzeye yönlendirilmesi uygun olacaktır. Bu sayede yönlere göre değişmekle birlikte 5930 kWh'a kadar tasarruf sağlamak mümkün olacaktır.
- Erzurum ili için hesaplanan ısıtma enerjisi ihtiyaçları yıllık ısı yükleri içerisinde yönlenmeye göre değişmekle birlikte yaklaşık ortalama % 63'lük bir paya sahiptir. Bu durumda ısıtma ve soğutma amaçlı tüketilen enerjinin ve yıl boyunca elde edilecek güneş kazançlarının optimize edilmesi için en uygun yön güney olarak belirlenmiştir.
- Benzer çalışmalarda boşluk genişliğinin 80-100 cm arasında olduğuna [24] rastlanmakla birlikte binanın bulunduğu iklim koşulları dikkate alındığında bu çalışmada en düşük enerji sarfıyatı sıcak ve soğuk iklim bölgeleri için 60 cm boşluk bulunan uygulamalarda elde edilmiştir.
- Çift kabuk cephe sistemlerinin, sıcak iklim bölgeleri ile soğutma ihtiyaçlarının bina ısı yükleri içerisinde önemli seviyeler ulaştığı binalarda güneş kontrol elemanları ile birlikte tasarlanması bina soğutma yüklerini azaltacak alternatif bir uygulamadır. Bu sayede uygun yönlenme koşullarının sağlanamadığı durumlarda yüksek yoğunluklu güneş radyasyonunun engellenmesi mümkün olacaktır.
- Çift kabuk cephe uygulamalarında enerji tüketimini belirleyen dış kabuk cam türü seçimi enerji tüketim miktarlarını değiştirecek önemli bir parametredir. Uygun cam türü seçimi ile ısıtma, soğutma ve aydınlatma yükleri optimize edilebilir.

İleriki çalışmalarda çift kabuk cephe sistemlerinin farklı iklim bölgelerindeki binaların enerji gereksinimlerine olan etkisinin daha geniş perspektiften değerlendirmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla cam türü ve güneş kontrol elemanlarının kullanıldığı senaryolarda, bina aydınlatma yüklerinin de dikkate alınacağı uygulamalar planlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, B.B.E. danışmanlığında E.N.Y tarafından hazırlanan 'Çift Kabuk Cephe Sistemlerinin Binaların Isıtma ve Soğutma Yüklerine Etkisinin Farklı İklim Bölgeleri İçin İncelenmesi' başlıklı Yüksek Lisans Tezi kapsamında üretilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Labaran YH, Mathur VS, Farouq, MM. The carbon footprint of construction industry: a review of direct and indirect emission. *J Sustain Const Mater Technol* 2021; 6(3): 101-115.
- [2] Zainordin N, Zahra, DBF. Factors contributing to carbon emission in construction activity. *Aer-Adv Eng Res* (2020); 200: 176-182.
- [3] Yıldız Y. Impact of energy efficiency standard and climate change on summer thermal comfort conditions: a case study in apartment building. *GU J Sci* 2015; 27(3): 1005-1013.
- [4] Akpan UF, Akpan GE. The contribution of energy consumption to climate change: a feasible policy direction. *Int. J. Energy Econ. Policy* 2012; 2 (1): 21-33.
- [5] Aqilah N, Rijal HB, Zaki SA. A review of thermal comfort in residential buildings: comfort threads and energy saving potential. *Energies* 2022; 15(23): 9012.
- [6] Niemann P, Schmitz G. Impacts of occupancy on energy demand and thermal comfort for a large-sized administration building. *Build Environ* 2020; 182: 107027.
- [7] Abanda FH, Byers L. An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling). *Energy* 2016; 97: 517-527
- [8] Lapisa R. The effect of building geometric shape and orientation on its energy performance in various climate regions. *Int J GEOMATE* 2019; 16 (53): 113-119.
- [9] Martinopoulos G, Papakostas KT, Papadopoulos AM. A comparative review of heating systems in eu countries, based on efficiency and fuel cost. *Renew Sust Energ Rev* 2018; 90: 687-699.
- [10] Crespi G, Abba I, Corgnoti SP. Innovative metrics to evaluate HVAC systems performances for meeting contemporary loads in buildings. *Energy Reports* 2022; 8: 9221-9231.

- [11] Alwetaishi M. Impact of glazing to wall ratio in various climatic regions: a case study. *J King Saud Univ Eng Sci* 2019; 31: 6-18.
- [12] Malka L, Kuriqi A, Haxhimusa A. Optimum insulation thickness design of exterior walls and overhauling cost to enhance the energy efficiency of Albanian's buildings stock. *J Clean Prod* 2022; 381: 135160.
- [13] Ghilardi LMP, Castelli AF, Moretti L, Marini M. Co-optimization of multi-energy system operation, district heating/cooling network and thermal comfort management for buildings. *Appl Energ* 2021; 302: 117480.
- [14] Ahmed MMS, Abel-Rahman AK, Ali AHH, Suzuki M. Double skin façade: the state of art on building energy efficiency. *J Clean Energy Technol* 2016; 4(1): 84-89.
- [15] Preet S, Mathur J, Mathur S. (2022). Influence of geometric design parameters of double skin façade on its thermal and fluid dynamics behavior: A comprehensive review. *Sol Energy* 2022; 236: 249-279.
- [16] Hülügü S, Köksal Özbalta T, Başaran T. Çift kabuk cephe sisteminin bina ısıl performansına etkisinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi* 2021; 41(1): 119-132.
- [17] Göksal Özbalta T, Yıldız Y. Sıcak-nemli iklimde çift kabuk cephe enerji performansının incelenmesi. *Metu J Fac Archit* 2019; 36(1): 137-156.
- [18] Jankovic A, Goia F. Control of heat transfer in single-storey mechanically ventilated double skin facades. *Energ Buildings* 2022; 271: 112304.
- [19] Solmaz Z. Yüksek yapılarda çift cidarlı sistemlerin iç ortam konforuna etkisi, *International Journal of Mardin Studies (IJMS)* 2021; 2(2): 57-74.
- [20] Alqaed S. Effect of annual solar radiation on simple façade, double-skin facade and double-skin facade filled with phase change materials for saving energy, *Sustain Energy Technol Assess* 2022; 51:101928.
- [21] Kutluay P, İnan T, Ersoy U, Başaran T. (2015). Türkiye'den ve dünyadan örnekler ışığında çift cidarlı cephenin gelişimi. In: 12. Ulusal Tesisat mühendisliği Kongresi; 6-11 Nisan 2015; İzmir, Türkiye. *Bildiriler Kitabı*, 2249-2263.
- [22] https://www.meteoblue.com/tr/hava/hafta/erzurum_t%C3%BCrkiye_315368. Erişim Tarihi:16.02.2023
- [23] Kürekci NA, Kaplan S. Isıtma-soğutma yüklerinin hap ve revit Programlarıyla Hesaplanması. *Tesisat Mühendisliği Dergisi* 2014; 141: 5-15.
- [24] Safer N, Woloszyn M, Roux JJ. 2005. Three-dimensional simulation with a CFD tool of the air flow phenomena in single floor double-skin facade equipped with a venetian blind. *Sol Energy* 79; 79:193-203.

Dalgacık Paket Dönüşümü, ReliefF Özellik Seçimi ve Topluluk Öğrenme Algoritması Tabanlı Bir Kısmi Deşarj Arızası Tespit Yöntemi

Belkıs ERİŞTİ^{1*}

¹ Elektrik ve Enerji Bölümü, Teknik Bilimler MYO, Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye

*¹ beristi@mersin.edu.tr

(Geliş/Received: 17/04/2023;

Kabul/Accepted: 29/05/2023)

Öz: Enerji nakil hatlarında birçok arıza olayı meydana gelebilmektedir. Özellikle hatlarda faz iletkenlerinin çevresel bitki örtüleriyle ve birbirleriyle temas etmeleri sonucunda oluşan arızalar sıklıkla meydana gelir. Bu şekilde oluşabilecek arızaların önüne geçebilmek için özellikle enerji nakil hatlarında izolasyonlu iletkenler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak izolasyonlu iletkenlerin yalıtım malzemesinde meydana gelebilecek deformasyonlar bu iletkenlerde kısmi deşarj (KD) adı verilen olaylara sebep olabilirler. Oluşabilecek çok daha büyük arızaların önüne geçebilmek için KD'lerin hızlı bir şekilde tespit edilmesi gerekir. Bu çalışmada, iletim hatlarında meydana gelen KD'lerin tespiti için dalgacık paket dönüşümü (DPD), ReliefF özellik seçim yaklaşımı ve topluluk öğrenme algoritma sınıflandırıcı tabanlı etkili bir tespit yaklaşımı önerilmiştir. Bu yaklaşımın en önemli özelliği, KD verilerinin DPD kullanarak etkili frekans bantlarına dayanan özellikler elde edilmesi ve ReliefF yaklaşımı kullanılarak bu özellikler içerisinde tespit performansı yüksek özelliklerin seçilmesidir. Önerilen tespit sistemi VSB gerçek veri seti kullanılarak test edilmiş ve 89,22% doğruluk oranı elde edilmiştir. Literatürde VSB veri seti kullanan benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında başarımın oldukça yüksek olduğu ve önerilen yaklaşımın KD tespiti için etkili bir performans sergilediği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Kısmi deşarj, arıza tespiti, dalgacık paket dönüşümü, ReliefF, topluluk öğrenme algoritması.

A Partial Discharge Fault Detection Method Based on Wavelet Packet Transform, ReliefF Feature Selection and Ensemble Learning Algorithm

Abstract: Many faults can occur in power transmission lines. Especially in power transmission lines, faults occur frequently as a result of phase conductors coming into contact with environmental vegetation and each other. Insulated conductors are widely used, especially in power transmission lines, in order to prevent malfunctions that may occur in this way. However, deformations that may occur in the insulating material of insulated conductors may cause events called partial discharge (PD) in these conductors. PD need to be detected quickly in order to prevent much larger failures that may occur. In this paper, an effective detection approach based on wavelet packet transform (WPT), ReliefF feature selection approach and ensemble learning algorithm classifier is proposed for the detection of PD in the transmission line. The most important advantage of this approach is to obtain features based on effective frequency bands by using WPT of PD data and to select features with high detection performance among these features by using ReliefF approach. The proposed detection system is tested using the VSB real dataset and an accuracy rate of 89,22% is obtained. When compared with similar studies using VSB dataset in the literature, it has been seen that the performance is quite high and the proposed approach has an effective performance for PD detection.

Key words: Partial discharge, fault detection, wavelet packet transform, ReliefF, ensemble learning algorithm.

1. Giriş

Teknolojinin gelişmesiyle beraber günümüzde elektrik enerjisine olan talebin artması, elektrik güç şebekelerini sadece boyut olarak büyütmeyle kalmamış, aynı zamanda daha karmaşık bir hal almasına sebep olmuştur. Bu büyüme, elektrik enerjisi şebekelerinin üretimden başlayarak iletim ve dağıtımına kadar olan tüm bölümlerini kapsamaktadır [1]. Elektrik şebekelerinin uzun süreli olarak kararlı bir şekilde çalışması, ekonomik kayıpların önlenmesi, bakım maliyetlerinin düşürülmesi, ekipmanların zarar görmemesi gibi durumlar için sürekli araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır [2]. Ancak iletim hatlarında meydana gelen beklenmedik arızalar elektrik şebekelerinin kararsız çalışmasına sebep olur. Bitki örtüsünün enerji nakil hatlarıyla temas etmesi ve iletkenlerin birbirine çarpması gibi olaylardan kaynaklı çeşitli arıza ve yangınlar meydana gelebilmektedir. Bu olayların önüne geçebilmek için enerji hatlarında yaygın olarak izolasyonlu iletkenler kullanılır. Ancak bahsedilen bu çevresel olaylar, izolasyonlu iletkenlerin yalıtım sistemini bozarak KD'lere sebep olabilir. KD'ler iletim hatlarının izolasyon yapısında oldukça önemli tahribatlar oluşturabilir ve onarılmadan bırakılırsa çok büyük arızalara yol açabileceği gibi yangınlara da sebep olabilirler. KD, elektrik alan şiddetinin yalıtım malzemesinin

* Sorumlu yazar: beristi@mersin.edu.tr. Yazarın ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-1276-2347

kırılma gücünü aştığı durumlarda, yalıtım malzemesinin yüzeyinde meydana gelen küçük bir elektrik kıvılcımıdır. Dolayısıyla, iletim hatlarının oluşturabileceği elektrik kesintileri, orman yangınları gibi önemli problemlerin önlenmesi için KD'lerin tespit edilmesi ve KD'lerin oluşturduğu izolasyon arızalarını ortadan kaldırılması oldukça önemli bir iletim hattı koruma araştırma konusu olmuştur [3].

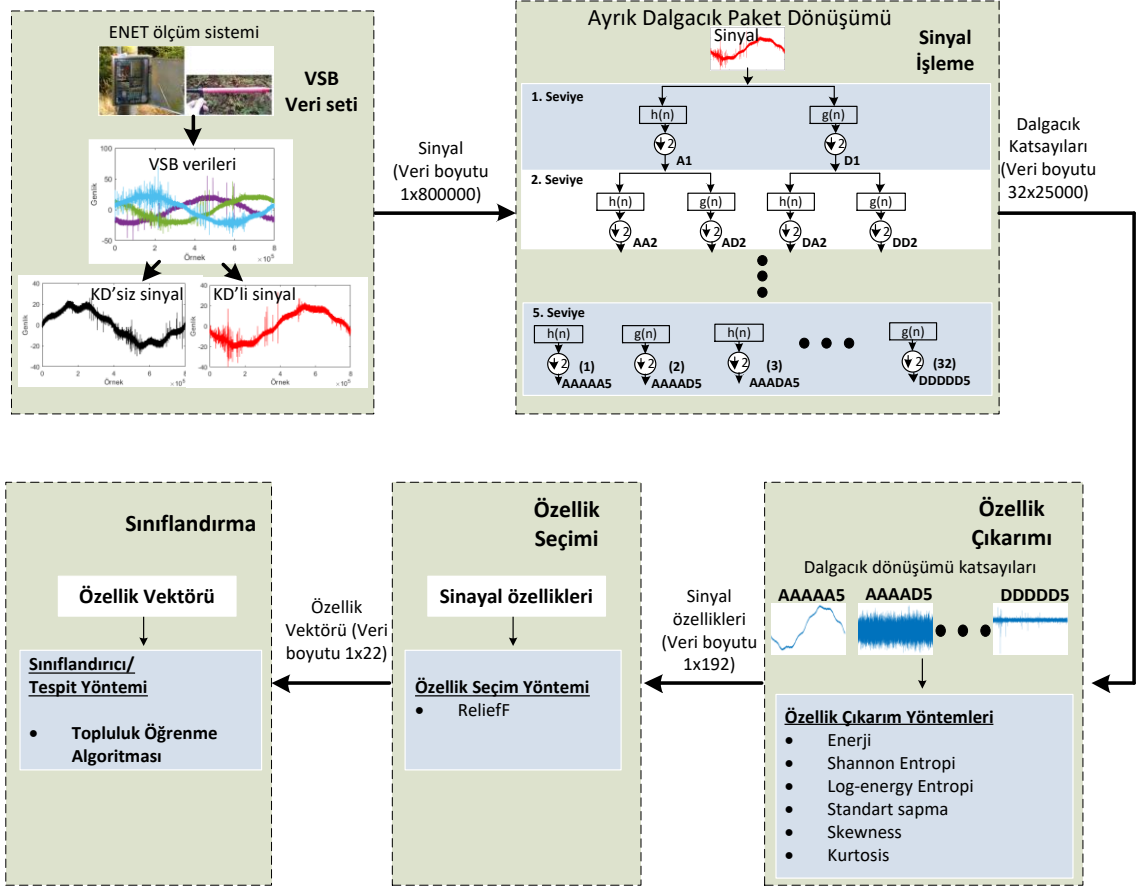
Literatürde enerji hatlarında KD tespiti için birçok çalışma sunulmuştur. [4]'de ölçüm gürültüsüyle bozulan büyük ölçekli verilerde KD tespiti için gürültüsü azaltılmış uzun kısa süreli bellek (long-short term memory-LSTM) tabanlı bir döngü optimizasyonu sınıflandırıcısı önerilmektedir. KD tespit sistemi gürültü azaltma, özellik çıkarma ve LSTM sinir ağı bir bütün olarak birleştirilmiştir. Sistem, havai elektrik hatlarından ölçülen büyük gerçek veriler kullanılarak doğrulanmıştır. [5]'de yapılan çalışmada yalıtılmış havai hat iletkenlerinde arıza tespiti ve sınıflandırması için üç faz sinyallerindeki gizli özellik bilgisinden daha iyi faydalanmak amacıyla çok kanallı evrimsel sinir ağı (convolutional neural network-CNN)-LSTM yapısını kullanmıştır. Üç faz gerilim sinyallerine hızlı Fourier dönüşümü (fast Fourier transform-FFT) uygulanmış, düşük ve yüksek frekans bileşenleri elde edilerek farklı filtre uzunluklarına sahip üç paralel CNN yapısı kullanılmıştır. Ayrıca farklı ölçekli özellikleri sırayla oluşturmak için LSTM yapısı kullanılarak önerilen bu yöntem test edilmiştir. [6]'da üç fazlı bir güç sisteminde KD tespiti için öğrenmeye dayalı çok ölçekli bir özellik mühendisliği yapısı geliştirilmiştir. [7]'de makine öğrenimi algoritmalarını kullanarak KD sinyali modellerini tespit etmeye ve bu potansiyel hataları azaltmaya yönelik bir yaklaşım sunulmuştur. [8]'de herhangi bir özellik çıkarımı yapılmadan güçlü KD tespiti sağlayan CNN'ye dayalı uçtan uca bir sistem önerilmiştir. [9]'da, KD tespiti için derin öğrenme tabanlı bir arıza tespiti yaklaşımı sunulmuştur. [3]'te, spektrogram özellik çıkarma ve CNN'nin avantajlarını birleştiren makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak KD tespiti için yüksek frekanslı gerilim sensörlerinden alınan ölçümler kullanılmıştır. [10]'da, yalıtılmış enerji nakil hatlarında arıza tespiti için derin öğrenme tabanlı bir KD model analizi sunulmuştur. Önerilen yöntemin LSTM ve destek vektör makine (DVM) tabanlı yöntem kullanılarak karşılaştırılmış ve karşılaştırma sonrasında LSTM yönteminin daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. [11]'de, yalıtılmış havai iletim hatlarında KD'lerin tespiti için CNN tabanlı arıza sınıflandırma algoritması önerilmiş olup, veri setindeki gerilim sinyallerine AlexNet, VGG16 ve ResNet gibi önceden eğitilmiş popüler CNN mimarileri uygulanmıştır. [12]'de, dalgacık dönüşümü (DD) kullanılarak gürültü filtreleme sonrasında KD sinyal özellikleri elde edilmiş ve LSTM kullanılarak KD hatası tespit edilmiştir. [13]'de klasik arıza tespiti yaklaşımlarının eksiklikleriyle başa çıkmak için ikili sınıflandırmaya dayalı otomatik bir KD arıza tespiti yaklaşımı önerilmiştir.

Literatürde gerçekleştirilen makaleler incelendiğinde KD arıza sinyallerinin tespit edilmesinin oldukça zorlu olduğu görülmektedir. Çalışmalarda çoğunlukla VSB veri seti kullanılarak tespit sistemlerinin performansı belirlenmektedir [14]. Bu literatür çalışmalarında genel olarak KD sinyallerine DD, FFT gibi sinyal işleme yaklaşımları uygulandıktan sonra DVM gibi geleneksel sınıflandırıcılar veya yenilikçi CNN, LSTM gibi derin öğrenme yaklaşımları uygulanarak tespit işlemi gerçekleştirilmektedir. Geleneksel sınıflandırıcılar kullanılarak gerçekleştirilen tespit işlemlerinde tespit doğruluğunun 70%-80% civarlarında olduğu görülmektedir. Yenilikçi derin öğrenme yaklaşımları kullanan tespit sistemlerinde ise başarımın 80%-90% aralığında olduğu hatta bazı çalışmalarda 90%'ın üzerinde başarımlar elde edilebildiği gözlemlenmiştir. Bununla beraber yenilikçi tespit yaklaşımları, başarımlarını arttırabilse bile özellikle karmaşık bir yapıya sahip olması, oldukça yüksek hesaplama yükü getirmesi ve yüksek grafik işlemcilerle ihtiyaç duyması gibi olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Bu makale çalışmasında ise KD sinyallerine 5-seviyeli DPD uygulanarak elde edilen 32 farklı frekans bandında bulunan DPD katsayılarına 6 farklı özellik çıkarımı uygulanarak ayırt edici özellikler çıkarılmıştır. Elde edilen 1×192 boyutundaki özellikler içerisinden tespit performansı yüksek özellikler, Relief özellik seçimi yaklaşımı ile belirlenmiştir. Böylece özellik seçimi işlemi sonucunda 1×22 düşük veri boyutuna sahip ve tespit performansı yüksek bir özellik vektörü elde edilmiştir. Son aşamada ise bu özellik vektörü, topluluk öğrenme algoritmasına (TÖA'na) giriş olarak sunulmuştur. Önerilen DPD, Relief ve TÖA tabanlı KD tespit sistemini test etmek için VSB gerçek veri seti kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde literatürde birçok derin öğrenme tabanlı tespit sistemlerinin doğruluk oranının bile üzerinde olan 89.22% tespit doğruluğuna sahip sonuç elde edilmiştir. Sonuç olarak bu makale çalışmasında doğruluk oranı yüksek, hesaplama yükü düşük ve yüksek tespit performansına sahip bir KD tespit sistemi sunulmuştur. Bu çalışmanın diğer bölümler ise şu şekildedir; önerilen çalışmanın algoritması ve VSB veri kümesi Bölüm 2'de verilmiştir. Bölüm 3'te ise önerilen tespit sistemine ilişkin testler, performans analizleri ve sonuçları verilmiştir. Son bölüm olan 4'de ise tartışma ve sonuçlar sunulmuştur.

2. Metodoloji

Bu çalışmada önerilen KD tespit sisteminin asıl görevi, enerji nakil hatlarında özellikle izoleli iletkenlerde meydana gelen KD arıza türünü tespit etmektir. Bu tespit sistemi, KD ile ilişkili anormal gerilim sinyalleri üzerine

gerçekleştirilen bir dizi analizlere dayanır. Ayrıca bu tespit sisteminde, normal gerilim sinyalleri üzerine de aynı analizler yapılarak ikili sınıf tabanlı bir tespit yaklaşımı oluşturulur. Şekil.1’de önerilen KD tabanlı sistemin genel yapısı gösterilmiştir. Önerilen KD tespit sistemi için gerçekleştirilen analizler genel olarak dört aşamadan oluşmaktadır. KD tespit sisteminde ilk olarak ham gerilim sinyallerine ayrık DPD tabanlı sinyal işleme yaklaşımı uygulanır. Daha sonra, ilk aşamada elde edilen DPD katsayılarına özellik çıkarımı işlemi gerçekleştirilir. Bir sonraki aşamada ise ReliefF özellik seçim algoritması kullanılarak elde edilen özelliklerin içerisinde ayırt edici özellikler seçilir. Son aşamada ise sonuç özellik vektörü TÖA sınıflandırıcıya uygulanarak KD tespit işlemi gerçekleştirilir.



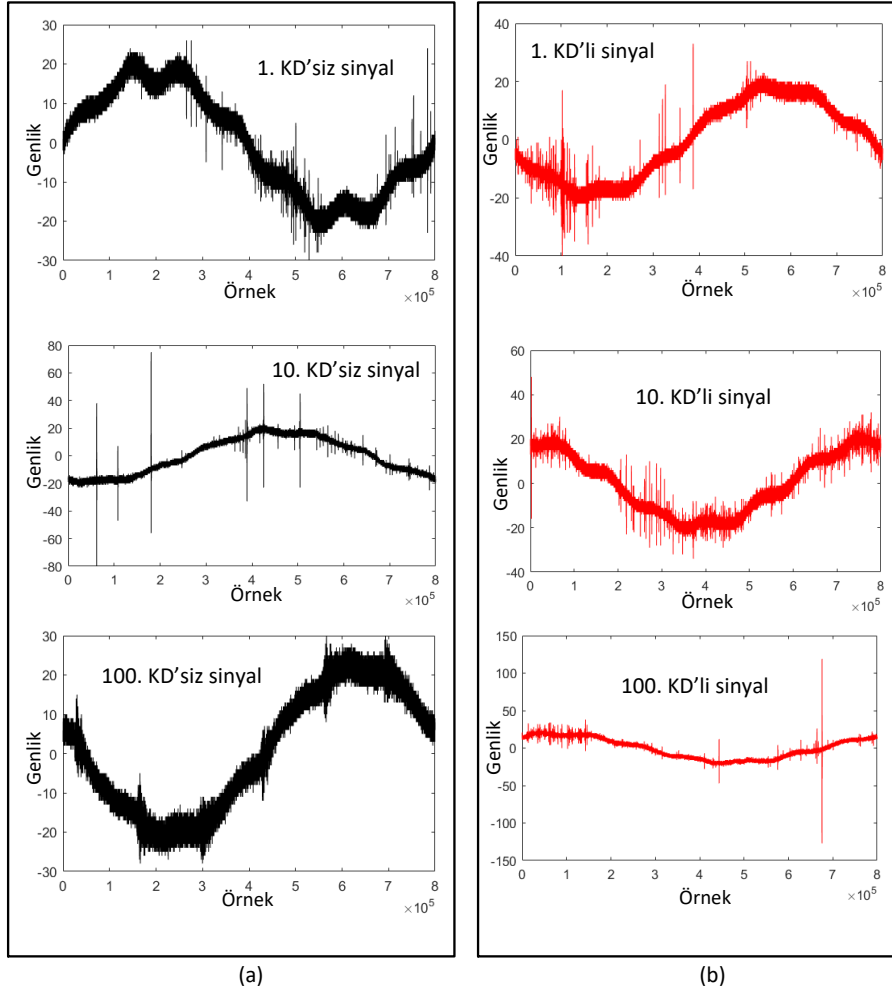
Şekil 1. Önerilen KD tespit algoritmasının genel yapısı.

Önerilen KD tespit sisteminin performansını belirlemek için Ostrava Teknik Üniversitesi ENET araştırma merkezi tarafından oluşturulan VSB veri seti kullanılmıştır. VSB veri seti, gerçek güç hatlarının gerilim sinyallerini yakalamak için yeni bir cihaz kullanarak Ostrava Teknik Üniversitesindeki ENET araştırma merkezi tarafından oluşturulduğu için gerçek zamanlı KD verilerinden oluşmaktadır [14, 15]. ENET araştırma merkezi KD’leri ölçmek için izoleli iletkenlerin üzerine takılabilen basit bir ölçüm cihazı geliştirmiştir. Şekil 2’de gösterildiği gibi yalıtılmış iletken boyunca KD voltaj sinyali elde etmek için izoleli iletken etrafına tek katmanlı bir bobin sarılmıştır. ENET’in ölçüm sistemi, KD ölçümü için geliştirilen diğer sistemlere kıyasla düşük maliyet ve yüksek güvenilirliğe sahiptir.

VSB veri seti, iki ayrı alt veri setinden oluşmaktadır. İlk veri setinde, 0 olarak etiketlenmiş KD’siz gerilim sinyali (8.186) ve 1 olarak etiketlenmiş KD’li gerilim sinyalinden (525) oluşan 8.711 veri bulunmaktadır. Her bir gerilim verisi, tek periyottan oluşan 40 MHz örnekleme frekansına sahip 800000 örnekten oluşmaktadır. Şekil 3’te, ilk veri seti içerisinde üç KD’li sinyal ve KD olmayan sinyal örnekleri (1., 10. ve 100. veri) gösterilmiştir. Genel olarak KD’li sinyal, KD’li olmayan sinyale göre daha büyük gürültü pik değerlerine sahiptir. Her iki sinyal arasında belirleyici bir eşik değeri bulunmaması ve gürültü etkisinin oldukça yüksek olması nedeniyle bu iki sinyal türünü herhangi bir analiz işlemi gerçekleştirilmeden birbirlerinden ayırt etmek oldukça zordur. İkinci veri setinde ise KD’nin varlığına ilişkin herhangi bir durum belirtmeyen 20037 veri bulunmaktadır.



Şekil 2. ENET ölçüm sistemi ve izoleli iletken yüzeyindeki tek katlı bobin.

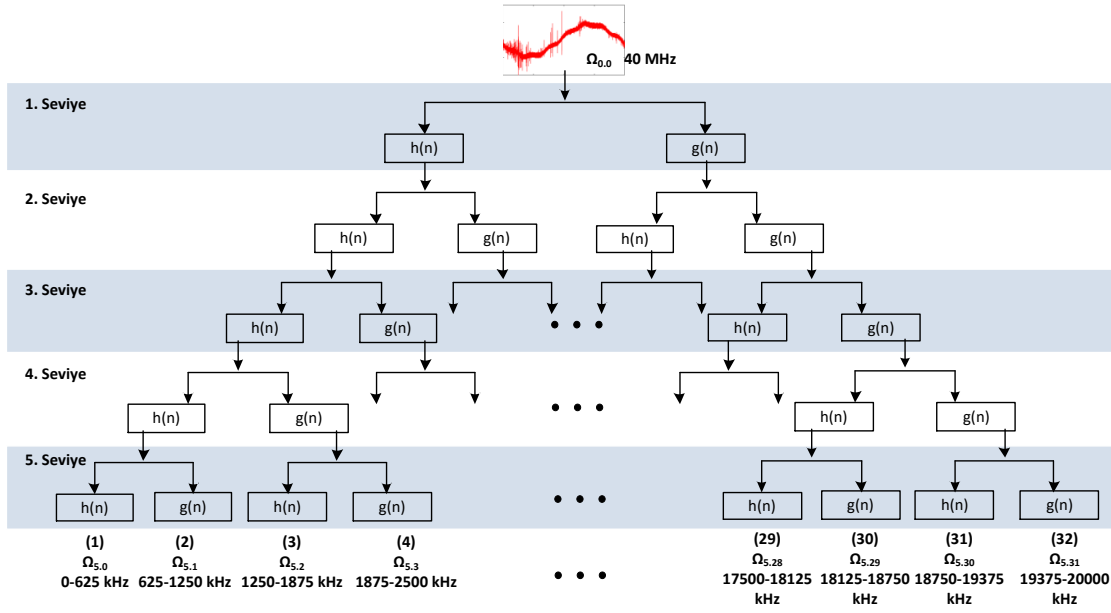


Şekil 3. VSB veri seti örnekleri, a) KD'siz normal sinyal ve b) KD'li sinyal.

2.1. Sinyal İşleme

İzoleli enerji hatlarında meydana gelen ve zaman-genlik bilgilerinden oluşan bir KD'yi tespit etmek oldukça zordur. VSB veri setinden de görülebileceği gibi her iki sinyal sınıfına ait ayırt edici bir genlik bilgisi yoktur. Ayrıca, sinyal verileri çok yüksek veri boyutuna sahiptir. Bu nedenle frekans bilgilerini analiz etmek oldukça etkin bir yaklaşım olacaktır. Bu çalışmada, DPD kullanılarak her iki sınıfın sinyalleri için farklı frekans bantlarında frekans bilgileri elde edilmiştir. Dönüşüm sonrasında her iki sınıf verileri için ayırt edici bilgiler elde edilmiş olup veri boyutu değişmemiştir. Veri boyutu indirgeme işlemi ise DPD katsayıları

kullanılarak bir sonraki özellik çıkarımı aşamasında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen DPD işleminde literatürde elektromanyetik geçici analizleri ve arıza analizleri için yaygın olarak tercih edilen Daubechies 4 (db4) ana dalgacı kullanılmıştır. Bu çalışmada KD verilerine 5-seviyeli DPD analiz işleminin en uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Analiz seviyesi azaltılırsa işlem yükü azalırken hassas frekans bant aralıkları elde edilmesinde zorluklarla karşılaşılabilir. Analiz seviyesi azaltılırsa hassas frekans bant aralığı elde edilirken işlem yükü problemi ve büyük veri boyutuna sahip özellik vektörü oluşturma problemi ortaya çıkacaktır. Özellik çıkarımı için kullanılan sinyale 5-seviyeli DPD analizi uygulanarak toplam 32 frekans alt bandı içerisinde DPD katsayıları elde edilmiştir. Böylece, bu frekans bantlarının her birinde sinyalin KD'li veya normal bir sinyal olduğunu ayırt edebilecek önemli frekans bilgileri bulunmaktadır. Şekil 4'de bu çalışmada gerçekleştirilen 5-seviyeli DPD dönüşümü sonucunda elde edilen alt uzay ağacı ve sonuç frekans bant aralıkları verilmiştir.



Şekil 4. 5-seviyeli DPD dönüşümü ile elde edilen 32 alt frekans bandı.

DD sinyal işleme tekniği, dalgacıklar kullanılarak özellikle durağan ve periyodik olmayan sinyallerin keskin yükselmelerinin ve süreksizliklerinin belirlenmesinde çok etkili bir yöntemdir [16]. Dalgacıklar kelimesinin tam anlamıyla sınırlı süreye ve sıfır ortalama değere sahip küçük dalgalar olarak tanımlanabilir. Bir işlevi veya bir veri kümesini hem zaman hem de frekansta yerleştirebilen matematiksel işlevlerdir. Dalgacıkların temeli, Haar'ın 1909'daki tezine dayanır [17]. Fourier dönüşümü ile sadece sinyalin frekans bilgisi elde edilir. DD, Fourier dönüşümüne göre sinyalin hem frekans bilgisini hem de konum bilgisini yakalar. Daha sonra sinyal, farklı frekans bantlarında sinyali analiz etmek için kullanılan yaklaşık ve detay bilgilerine ayrıştırılır. DPD, sinyalin DD kıyasla daha fazla filtreden geçirildiği bir tür DD'dir. DD'de her seviyede sadece yaklaşık katsayısı ayrıştırılır. DPD'de ise hem yaklaşık hem de detay katsayısı kendi detay ve yaklaşık katsayısını elde etmek için ayrıştırılır. DPD, DD ile karşılaştırıldığında sinyalin ayrıştırılması için frekans çözünürlüğü üzerinde daha iyi kontrol sağlar [18]. Şekil 4'de görüldüğü gibi DPD yöntemi, kök düğümü $\Omega_{0,0}$ (orijinal sinyal) olan bir alt uzay ağacı olarak düşünülür. Genel olarak, DPD ağaç alt uzayının kökü $\Omega_{j,k}$ ile temsil edilir, burada j ölçeği, k ise mevcut ölçek içindeki alt bant indeksini gösterir. Ayrıca, bu kök düğümü $\Omega_{0,0}$, yaklaşık uzayına ($\Omega_{j,k} \rightarrow \Omega_{j+1,2k}$) ve detay uzayına ($\Omega_{j,k} \rightarrow \Omega_{j+1,2k+1}$) ayrıştırılır. Bu, $\Omega_{j,k}$ 'nin $\{\phi_j(t - 2^j)\}_{k \in \mathbb{Z}}$ ortogonal tabanlarını, $\Omega_{j+1,2k}$ 'nin $\{\phi_{j+1}(t - 2^{j+1})\}_{k \in \mathbb{Z}}$ ve $\{\psi_{j+1}(t - 2^{j+1})\}_{k \in \mathbb{Z}}$ iki ortogonal tabanına bölerek gerçekleştirilir. Aşağıdaki denklemlerde gösterildiği gibi ϕ ve ψ sırasıyla ölçekleme ve dalgacık fonksiyonlarıdır [19]:

$$\phi(k) = \sqrt{2} \sum_n h(n) \phi(2k - n) \quad (1)$$

$$\psi(k) = \sqrt{2} \sum_n g(n) \phi(2k - n) \quad (2)$$

Burada n örnek sayısını, h düşük geçiren filtreyi ve g yüksek geçiren filtreyi temsil eder. Alçak geçiren filtreler yaklaşık katsayılarını (A) oluştururken, yüksek geçiren filtre çıkışında ise detay katsayıları (D) elde edilir. Bu durum aşağıdaki denklemler ile tanımlanır.

$$A_{j+1}(k) = \sum_n h(n - 2k) A_j(n) \quad (3)$$

$$D_{j+1}(k) = \sum_n g(n - 2k) A_j(n) \quad (4)$$

2.2. Özellik Çıkarımı

Bu aşamada, sinyal işleme sonucunda elde edilen ve 32 frekans bant aralığında bulunan DPD katsayılarına özellik çıkarım yaklaşımları uygulanarak KD verilerini temsil eden ayırt edici özellikler çıkarılır. Bu amaç için literatürde yaygın olarak kullanılan 6 farklı özellik çıkarım yaklaşımı DPD katsayılarına uygulanmıştır. Bu özellik çıkarım yaklaşımları: Enerji (Öz1), Shannon entropi (Öz2), Log-enerji entropi (Öz3), Standart sapma (Öz4), Skewness (Öz5) ve Kurtosis (Öz6)'dir. Aşağıda verilen bu tekniklere ait eşitlikler kullanılarak DPD katsayılarından her bir frekans bandını temsil eden bir özellik vektörü elde edilir.

$$\text{Öz1 } E = \sum_{j=1}^N |C_{ij}|^2 \quad (5)$$

$$\text{Öz2 } SE = - \sum_{j=1}^N C_{ij}^2 \log(C_{ij}^2) \quad (6)$$

$$\text{Öz3 } LEE = \sum_{j=1}^N \log(C_{ij}^2) \quad (7)$$

$$\text{Öz4 } \sigma = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (C_{ij} - \mu_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$\text{Öz5 } Sk = \sqrt{\frac{1}{6N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{C_{ij} - \mu_i}{\sigma_i} \right)^3} \quad (9)$$

$$\text{Öz6 } Kr = \sqrt{\frac{N}{24} \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{C_{ij} - \mu_i}{\sigma_i} \right)^4 - 3 \right)} \quad (10)$$

Bu denklemlerde C_{ij} dalgacık katsayılarıdır ve μ ise dalgacık katsayılarının ortalama değeridir. Bu aşama sonucunda her bir özellik çıkarım yaklaşımı için 32 ayrı özellik elde edilir. 6 özellik çıkarımı yaklaşımı sonucundan elde edilen özellikler sırasıyla eklenerek 1×192 boyutunda sonuç özellik vektörü elde edilir. Böylece özellik çıkarma aşaması sayesinde hem ayırt edici özellikler elde edilir hem de özellik uzayının boyutsallığı azaltılır.

2.3. Özellik Seçimi

Özellik seçimi, sınıflandırma problemlerinde giriş veri kümesi içerisinde sonucu olumsuz yönde etkilemeyen verilerin çıkarılması olarak tanımlanabilir. Bunun yanı sıra özellik seçimi işlemi kullanılarak sınıflandırıcı başarımının artırılması beklenilir. Böylece, sınıflandırıcı başarımı artırılırken sınıflandırıcının işlem yükü azaltılır ve sınıflandırma hızı da artırılmış olunur. Bu çalışmada, özellik çıkarımı aşamasında elde edilen 1×192 boyutunda sonuç özellik vektörünün veri boyutunu azaltarak sınıflandırıcı performansını arttırmak için ReliefF özellik seçimi yöntemi kullanılmıştır. Özellik seçimi algoritmalarının en başarılılarından biri olan ReliefF algoritması, 1992

yılında Kira ve Rendell tarafından tanıtılmıştır [20]. 1994 yılında bu algoritma, Kononenko tarafından çok sınıflı problemler için yeniden geliştirilmiştir [21]. ReliefF algoritması, farklı kategorilerdeki her örnekten en yakın komşu örnekleri seçerek birden çok problem sınıfını çözmeyi amaçlar. Algoritma bu işi yaparken, aynı sınıfın komşularına farklı değerler veren öngörücüleri cezalandırırken farklı sınıfların komşularına farklı değerler verenleri ise ödüllendirir [22]. Özellik seçimini başarılı bir şekilde tamamlayabilen bu algoritma aynı zamanda veri türlerinin özelliklerini sınırlamaksızın yüksek verimlilikler sunar. ReliefF aşağıda verilen eşitlik ile tanımlanır.

$$W_f^{i+1} = W_f^i + \sum_{c \neq \text{class}(x)} \frac{\frac{p(x)}{1 - p(\text{class}(x))} \sum_{j=1}^k \text{diff}_f(x, M_j(x))}{m * k} - \sum_{j=1}^k \text{diff}_f(x, H_j(x)) / (m * k) \quad (11)$$

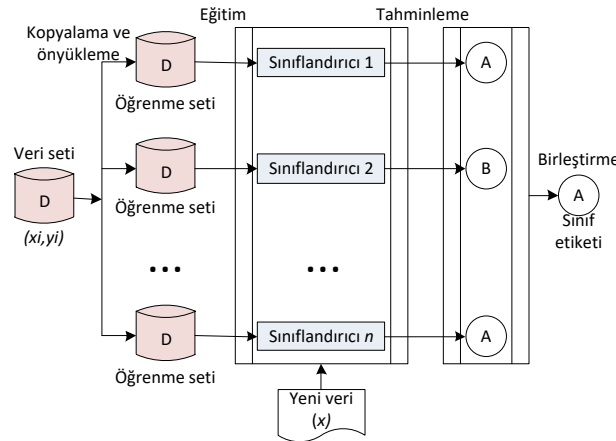
Burada; diff iki örnek arasındaki özellik mesafesini, H_jx örneğinden komşu örnekleri, M_j farklı sınıfların komşularından komşu örnekleri ve p ise sınıfın olasılığını temsil eder [23].

2.4. Sınıflandırma ve Değerlendirme Metrikleri

Önerilen KD tespit sisteminin son aşaması ikili sınıflandırmaya dayalı tespit aşamasıdır. Bu aşamada sınıflandırıcı ve parametrelerinin seçimi doğrudan tespit sisteminin başarımını belirleyecektir. Bu nedenle özellikle son yıllarda ikili sınıflandırma yaklaşımı işlemlerinde oldukça yaygın olarak kullanılan TÖA sınıflandırıcı olarak belirlenmiştir.

Tek bir öğrenme algoritmasına dayalı karar verme süreçleri, kullanılan öğrenme modelinin sınırlamaları nedeniyle hatalı çıktılar üretebilir. Örneğin yüksek boyutlu verilerle uğraşırken, fazla/yetersiz uydurma sorunları ortaya çıkabileceği gibi özellikle birçok girdinin etkili olduğu saha uygulamalarında girdi değişkenlerinde meydana gelen küçük değişimlerin çıktığı önemli ölçüde etkilemesi ile yanlış tahminlere neden olabilir [24]. Bu gibi sınırlamaların üstesinden gelebilmek için Dietterich, tek bir öğrenme algoritmasının kararlılığını ve tahmin doğruluğunu artırmak amacıyla sınıflandırma, kümeleme ve regresyon problemlerinde topluluk öğrenme kavramını tanıtmıştır [25].

Topluluk öğrenimi, daha doğru ve istikrarlı sonuçlar için birleşik bir bütünlük öğrenme modeli elde etmek üzere birden fazla tekli öğrenme modelini birleştirebilir. Bu tek öğrenme modellerinin her birine "zayıf öğrenen", en sonunda tek tip olarak oluşturulan entegre modele de "güçlü öğrenen" denir [26]. Literatürdeki mevcut birçok çalışmada [27-29], TÖA yaklaşımının, klasik tek sınıflandırıcının kullanıldığı makine öğrenmesi yöntemlerine göre daha yüksek doğruluk oranına sahip sınıflandırma performansı gösterdiği görülmüştür. Şekil 5'de TÖA sınıflandırıcının genel yapısı gösterilmiştir.



Şekil 5. TÖA sınıflandırıcının genel yapısı.

TÖA sınıflandırıcı kendi içerisinde torbalama (bagging), yükseltme (boosting), yığılma (stacking) ve oylama (voting) gruplarına ayrılmaktadır [30]. Torbalama yöntemi en çok bilinen TÖA yaklaşımlarından biridir. Bu yöntemde, önyükleme (bootstrap) denilen yöntem ile tüm veri seti içerisinde rastgele ve tekrarlayabilen örnekler seçilerek farklı eğitim setleri elde edilir. Her bir sınıflandırıcı farklı bir eğitim verisi ile eğitilir. Yeni bir veri sınıflandırılırken, her sınıflandırıcıdan ayrı ayrı sonuçlar elde edilir. Elde edilen sonuçlar arasından oylama yoluyla nihai sınıf etiketi belirlenir. Yükseltme yönteminde öncelikle temel bir öğrenme algoritması seçilir. Seçilen

algoritma, başlangıçta her biri eşit ağırlığa sahip bir örnek alt kümesi üzerinde çalıştırılır ve ortaya çıkan model, örnekleri sınıflandırır. Algoritma, bir önceki sınıflandırma işleminde hatalı sınıflandırılan örneklerin ağırlıkları artırılarak güncellenen eğitim veri setinden yeniden çekilerek oluşturulan yeni bir örnek alt kümesi üzerinde tekrar çalıştırılır. Bu şekilde, aynı temel algoritma tekrar tekrar çalıştırılır. Yinelemeli bir süreç olarak, model sayısında veya doğrulukta bir sınıra ulaşılan kadar öğrenici eklemeye devam edilir. Sonuç olarak, nispeten zayıf bir algoritma güçlendirilmiş olur.

$$H_m(x) = \sum_{m=1}^M y_m h_m(x) \quad [m = 1, \dots, M] \quad (12)$$

Burada y_m , m. hedef değerini, $h_m(x)$, her aşamada kayıp fonksiyonunu en aza indirmek için seçilen temel öğreniciyi temsil eder [31]. Yığılma yönteminde birden fazla sınıflandırma algoritması aynı eğitim seti ile eğitilerek birden fazla sınıflandırma modeli elde edilmiş olur. Her bir modelden elde edilen çıktılar, ara bir katmandaki meta sınıflandırıcıya girdi olarak gönderilir ve elde edilen çıktı sınıf etiketi olarak belirlenir. Oylama yönteminde, birden çok model oluşturulur. Daha sonra bu modeller daha iyi sonuçlar elde etmek için birleştirilir. Bu yöntemde, tek bir veri seti üzerinde birden fazla öğrenme algoritması uygulanabildiği gibi tek bir algoritma yine aynı veri seti üzerinde farklı parametreler ile de kullanılabilir [30].

TÖA sınıflandırıcı çıkışında elde edilen başarımların değerlendirme metrik değerleri elde edilerek önerilen KD tespit yaklaşımının performansı belirlenmiştir. Bu çalışmada literatürde yaygın olarak kullanılan Doğruluk (Accuracy, ACC), Duyarlılık (Sensitivity, SEN), Özgülük (Specificity, SPE), Kesinlik (Precision, PRE) ve F1-skor (F1-score) metrik değerleri elde edilmiştir. Bu değerlendirme metrikleri, bir sınıflandırma sürecinden elde edilen dört ana sonuç kullanılarak belirlenir: Doğru Pozitif (True Positive, TP), Doğru Negatif (True Negative, TN), Yanlış Pozitif (False Positive, FP) ve Yanlış Negatif (False Negative, FN)'dir. [32]'de belirtildiği gibi bu beş metrik aşağıdaki eşitlikler kullanılarak elde edilir.

$$ACC = \frac{TP+TN}{TP+FN+TN+FP} \quad (13)$$

$$SEN = \frac{TP}{TP+FN} \quad (14)$$

$$SPE = \frac{TN}{TN+FP} \quad (15)$$

$$PRE = \frac{TP}{TP+FP} \quad (16)$$

$$F1-score = \frac{2 \times TP}{2 \times TP + FN + FP} \quad (17)$$

3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

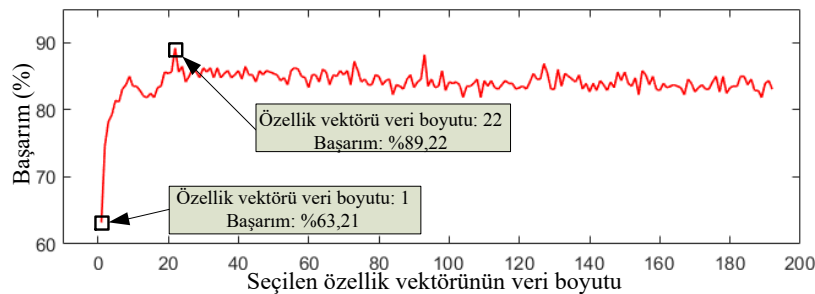
Önerilen yaklaşımda KD tespit sistemi olarak tanımlansa da test aşamasının sonucu ikili sınıflandırma şeklindedir. Bu sınıflandırma işleminde '0' normal sinyal ve '1' KD'li sinyal olarak etiketlenmiştir. Tespit sisteminin eğitim ve test işlemlerinde VSB veri seti kullanılmıştır. VSB test veri seti herhangi bir temel sınıf bilgisi içermediğinden daha detaylı bir analiz gerçekleştirilememektedir. Bu nedenle, 8711 veri boyutuna sahip eğitim veri seti, önerilen algoritmanın eğitim ve test aşamalarında kullanılmıştır. VSB eğitim veri seti içerisinde de normal sinyal verileri ve KD'li sinyal veri sayıları arasında ciddi oranda bir fark bulunup KD'li veri sayısı, normal veri sayısından oldukça azdır. Yapılan bu çalışmada ise dengesiz veri seti durumu oluşturmamak için KD'li verilerin tamamı (525) ve normal verilerin ilk 1050 tanesi (KD'li verilerin 2 katı) alınarak sınıflandırma işleminde kullanılmıştır. Alınan bu veri kümesinin % 70'i eğitim, % 30'u test aşamasında kullanılmıştır. Literatürde sınıflandırma işlemlerinde en uygun veri setini oluşturabilmek için KD'li verilere veri parçalama ve yapay veri üretme gibi farklı bazı yöntemler uygulanmaktadır [33,34].

Çalışma kapsamında kullanılan TÖA mimarisi; DVM, C4.5, k-en yakın komşu ve karar ağacı yöntemlerine dayalı dört temel makine öğrenmesi sınıflandırıcısından oluşmaktadır. TÖA yöntemi olarak analizlerde en iyi performans gösteren yükseltme topluluk öğrenmesi yöntemi kullanılmıştır. Önerilen tespit sistemi için gerçekleştirilen ilk analizde TÖA sınıflandırıcı girişine uygun etkili özellik vektörü elde edilmiştir. Bunun için her bir VSB veri seti örneği için DPD katsayıları elde edilerek bu katsayılara özellik çıkarımı işlemi uygulanmıştır. 6 farklı özellik çıkarım tekniği sonucunda her bir veri için toplam 192 örneğe sahip özellik vektörü elde edilmiştir. Bu özellik vektörüne ReliefF özellik seçimi işlemi uygulanarak ayırt etme performansı yüksek özellikler sıralanmıştır. Böylece ilk analiz sonucunda yüksek sınıflandırma performansına sahip özellikler sıralanmıştır. Tablo 1’de en etkili ilk 22 özelliğe ait bilgiler verilmiştir. Tablo 1’den de görülebileceği gibi ilk sıralardaki etkili özellikler Log-enerji entropi ve standart sapma özellikleridir. Gerçekleştirilen DPD analiz işleminde temel frekans içerden 0-625 kHz bant aralığına ait özellikler 1., 33., 65., 97., 129. ve 161. özelliklerdir. Temel frekans bandının bir üzerindeki bant aralığı ise 625-1250 kHz olup bu bant aralığını temsil eden özellikler ise 2., 34., 66., 98., 130. ve 162. özelliklerdir. Tablo 1’den de görülebileceği gibi seçilen 22 ayırt edici özellik içerisinde bu iki bant aralığındaki özellikler bulunmamaktadır. Seçilen 22 özellik 1,25 MHz üzerindeki yüksek frekanslara ait özelliklerdir.

Tablo 1. ReliefF özellik seçimi sonrasında elde edilen ilk 20 özelliğin sınıf ve frekans bant bilgileri

Sırası	No’su	Sınıfı	Sırası	No’su	Sınıfı
1	81	Log-enerji entropi	12	99	Standart sapma
2	103	Standart sapma	13	3	Enerji
3	92	Log-enerji entropi	14	121	Standart sapma
4	71	Log-enerji entropi	15	4	Enerji
5	90	Log-enerji entropi	16	39	Shannon entropi
6	76	Log-enerji entropi	17	181	Kurtosis
7	104	Standart sapma	18	100	Standart sapma
8	68	Log-enerji entropi	19	82	Log-enerji entropi
9	35	Shannon entropi	20	96	Log-enerji entropi
10	36	Shannon entropi	21	67	Log-enerji entropi
11	7	Enerji	22	105	Standart sapma

İkinci analizde ise ilk analizde sıralama yapılan özelliklerin sınıflandırma performansı tespit edilir. Böylece bu analiz sonucunda önerilen tespit sisteminin TÖA sınıflandırıcı girişindeki özellik kümesi belirlenir. Bu analiz işleminde ilk olarak TÖA sınıflandırıcı girişine sadece birinci özellik giriş olarak uygulanmış sınıflandırma performansı elde edilmiştir. Daha sonrasında bu özelliğe ikinci sıradaki özellik eklenerek sınıflandırma sonucu elde edilmiştir. Böylece ardışık olarak son sıradaki özelliğe kadar sırasıyla özellikler eklenerek özellik vektörü oluşturulur ve oluşturulan özellik vektörlerinin sınıflandırma performansları belirlenir. Şekil 6’da, ikinci analiz sonucunda elde edilen sınıflandırma sonuçlarının değişimi gösterilmiştir. Bu sonuçlardan da görülebileceği gibi en iyi başarımla, ReliefF özellik seçimi sonucunda belirlenen ilk 22 özellikten oluşturulan özellik vektörü ile elde edilmiştir. Ayrıca sadece ilk sıradaki Log-enerji entropi özelliği ile sınıflandırma işlemi yapıldığında bile oldukça iyi bir başarımla elde edilmiştir.



Şekil 6. ReliefF özellik seçiminden elde edilen özelliklerin TÖA ile sınıflandırma sonuçları.

Üçüncü analiz çalışmasında ise önerilen KD tespit sisteminin başarımına yer verilmiştir. Ayrıca özellik seçimi olmadan bütün özellik çıkarım yöntemleri için başarımlar elde edilmiştir. Şekil 7’de önerilen KD tespit yaklaşımının başarımına ait karar matrisi gösterilmiştir. Bu karar matrisinden görülebileceği gibi önerilen 22 özellik kullanılarak elde edilen doğruluk değeri %89,22’dir. Tablo 2’de ise bu analiz aşamasında elde edilen tüm sonuçlara yer verilmiştir. Değerlendirme metrik değerlerine göre doğruluk değeri en yüksek özellik çıkarım yaklaşımı enerji yöntemidir. Duyarlılık değeri en yüksek olan yöntem ise Log-enerji entropi yöntemidir. İkinci analiz çalışmasında da görülebileceği gibi en etkili özellikler duyarlılık performansı yüksek olan Log-enerji entropi yöntemidir. Ayrıca, bütün özellik çıkarım yöntemlerinden elde edilen özellik vektörünün doğruluk değeri, her bir yöntemin doğruluk değerine göre oldukça yüksektir. Bu analiz sonuçlarından da görülebileceği gibi önerilen özellik seçimi tabanlı KD tespit sistemi, sınıflandırıcı girişinde daha düşük veri boyutuna sahipken başarımların değeri ise bütün yöntemlere göre daha etkilidir.

Tablo 2. Önerilen KD tespit sistemi değerlendirme metrik sonuçları

Model	Veri boyutu	Değerlendirme metrikleri				
		ACC	SEN	SPE	PRE	F1-score
Öz1+TÖA	1×32	0,8487	0,9024	0,7241	0,8810	0,8916
Öz2+TÖA	1×32	0,7294	0,9665	0,1931	0,7304	0,8320
Öz3+TÖA	1×32	0,7082	0,8384	0,4138	0,7639	0,7994
Öz4+TÖA	1×32	0,6786	0,7805	0,4483	0,7619	0,7711
Öz5+TÖA	1×32	0,6829	0,9512	0,0759	0,6996	0,8062
Öz6+TÖA	1×32	0,6490	0,7744	0,3655	0,7341	0,7537
Öz1+ Öz2+ Öz3+ Öz4+ Öz5+ Öz6+TÖA	1×192	0,8647	0,9543	0,6621	0,8646	0,9072
ReliefF+TÖA (Önerilen tespit sistemi)	1×22	0,8922	0,9390	0,7862	0,9086	0,9235

	Normal	KD’li sinyal	Doğruluk oranı	Hata oranı
Normal	308	20	%93,9	%6,1
KD’li sinyal	31	114	%78,62	%21,38
Doğruluk			%89,22	

Şekil 7. ReliefF özellik seçiminden elde edilen 22 özellik için elde edilen başarımların sonuçları

Tablo 3. Literatürde önerilen KD tespit sistemleri ile karşılaştırma

Makale	Yöntem	Veri sayısı	Veri oranı (%) (Eğitim/Test)	ACC
[6]	Tekrarlayan sinir ağı	8711	60/20 (20% doğrulama)	0.8820
[34]	Uzun kısa süreli bellek	8711	80/20	0.7876
[35]	Anomali tabanlı teknik + Destek vektör makine	8711	82/18	0.7984
[35]	Anomali tabanlı teknik + Temel bileşenler analizi	8711	82/18	0.7928
[36]	Rastgele orman	8711	75/25	0.8920
[37]	Çift yönlü kısa süreli bellek	8500	76/24	0.8880
[37]	Konvolüsyonel sinir ağı + Çift yönlü uzun kısa süreli bellek	8500	76/24	0.9389
Bu çalışma	DPD + ReliefF + TÖA	1575	70/30	0.8922

Son analiz çalışmasında ise bu makalede elde edilen KD tespit doğruluk sonuçları ile literatürde VSB veri seti kullanılarak elde edilen benzer çalışmalarda elde edilen doğruluk sonuçları karşılaştırılmıştır. Tablo 3’te, gerçekleştirilen karşılaştırma işlemi sonuçlarına yer verilmiştir. Karşılaştırma sonuçlarından da görülebileceği gibi bu çalışmada sunulan KD tespit sistemi, son yıllarda yapılan birçok çalışmaya göre oldukça yüksek bir başarımlara sahiptir. Bu çalışmalar içerisinde işlem yükü ve karmaşıklığı yüksek olan derin öğrenme yaklaşımları da

bulunmaktadır. Önerilen KD tespit sistemi, derin öğrenme yaklaşımlarına göre işlem karmaşıklığı açısından oldukça sade bir yapıya sahip olup doğruluk değeri de yüksektir. Bunun yanı sıra son yıllarda literatürde doğruluk oranı 0,90'ın üzerinde sonuçlara sahip bazı çalışmaların yer aldığı görülmektedir. Bu çalışmalar incelendiğinde özellikle işlem yükü ve karmaşıklığı olan ileri sinyal işleme ve derin öğrenme yaklaşımlarının kullanıldığı gözlemlenmiştir. İlerleyen çalışmalarda ise DD tabanlı derin öğrenme yaklaşımları kullanılarak KD tespit sisteminin geliştirilmesi de planlanmaktadır.

4. Sonuçlar

Bu makale, enerji iletim hatlarında meydana gelen KD arıza tespiti alanındaki araştırma boşlukları konusunda araştırmacılara ufuk açıcı bilgiler sunmaktadır. Elektrik enerjisi endüstrisinde hızlı ve etkili arıza tespiti, ekonomik kayıpların en aza indirilmesinin yanı sıra hizmet kalitesinin en üst düzeye çıkarılmasına yol açacaktır. Böylece bu makalede tespit performansı yüksek ve birçok makalede sunulan sonuçlardan daha etkili bir yapıya sahip DPD, ReliefF ve TÖA yöntemlerine dayalı bir KD tespit sistemi önerilmiştir. Önerilen KD tespit yaklaşımı, sinyal işleme, özellik çıkarımı, özellik seçimi ve sınıflandırma olmak üzere dört aşamadan oluşur. Sunulan yaklaşımda sistemin tanıma performansının yüksek olması için her bir aşamada oldukça önemli yöntemler ve çalışmalar yürütülmüştür. DPD yöntemi ile ham KD verileri içerisinde eşit ve 625'er Hz artan 32 bant aralığında normal ve KD'li verileri birbirinden ayırt edebilecek frekans bileşenlerine ait DPD katsayıları elde edilmiştir. Elde edilen bu katsayılara ise literatürde yaygın kullanılan 6 farklı özellik çıkarım yöntemi uygulanarak veri boyutu 1/4167 oranında indirgenmiş ve KD verilerini tespit eden 1×192 veri boyutuna sahip etkili bir özellik vektörü elde edilmiştir. ReliefF yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen özellik seçimi aşamasında ise önerilen sistemin başarımını daha da arttıracak işlemler gerçekleştirilmiştir. Veri boyutu 1×22 ye düşürülerek bir özellik vektörü oluşturulmuştur. Bu özellik vektörü ise önerilen sistemin işlem yükünün azaltılmasında ve tespit performansının artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Son aşamada ise TÖA dayalı sınıflandırma işlemi gerçekleştirilerek tespit sonuçları elde edilmiştir. Önerilen KD tespit sisteminin performansını test etmek için VSB veri seti kullanılmış ve 89,22% doğruluk oranı ile yüksek bir tespit başarımına ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre önerilen yaklaşım etkili bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Elmasry, W., Wadi, M. EDLA-EFDS: A novel ensemble deep learning approach for electrical fault detection systems. *Electric Power Systems Research* 2022; 207: 107834.
- [2] Elmasry, W., Wadi, M. Detection of faults in electrical power grids using an enhanced anomaly-based method. *Arabian Journal for Science and Engineering* 2022; 47(11): 14899–14914.
- [3] Wang, W., Yu, N. Partial discharge detection with convolutional neural networks. In 2020 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS) August 2020; IEEE. pp. 1–6.
- [4] Xu, N., Gooi, H. B., Wang, L., Zheng, Y., Wang, W., Yang, J. Loop Optimization Noise-Reduced LSTM Based Classifier for PD Detection, *IEEE Transactions on Industry Applications* 2023; 59(1): 392–402.
- [5] Xi, Y., Tang, X., Li, Z., Shen, Y., Zeng, X. Fault detection and classification on insulated overhead conductors based on MCNN-LSTM. *IET Renewable Power Generation* 2022; 16(7): 1425–1433.
- [6] Huang, C., Ding, S., Li, S., Liu, R. LMFE: Learning-Based Multiscale Feature Engineering in Partial Discharge Detection. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* 2022; doi: 10.1109/TNNLS.2022.3222671.
- [7] Bajwa, B., Butani, C., Patel, C. A novel approach towards predicting faults in power systems using machine learning. *Electrical Engineering* 2022; 104: 363–368.
- [8] Michau, G., Hsu, C. C., Fink, O. Interpretable detection of partial discharge in power lines with deep learning. *Sensors* 2021; 21(6): 2154.
- [9] Tehrani, P., Levorato, M. Frequency-based multi task learning with attention mechanism for fault detection in power systems. In 2020 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm) November, 2020; IEEE. pp. 1–6.
- [10] Ahmad, D., Wang, S., Alam, M. Long short term memory based deep learning method for fault power line detection in a MV overhead lines with covered conductors. In 2020 21st National Power Systems Conference (NPSC) December 2020; IEEE. pp. 1–4.
- [11] Kalanidhi, K., Baskar, D., Kumar, V. Transmission Power Line Fault Detection using Convolutional Neural Networks. In Proceedings of the First International Conference on Computing, Communication and Control System, I3CAC 2021, 7-8 June 2021; Bharath University, Chennai, India.
- [12] Qu, N., Li, Z., Zuo, J., Chen, J. Fault detection on insulated overhead conductors based on DWT-LSTM and partial discharge. *IEEE Access* 2020; 8: 87060–87070.

- [13] Wadi, M. Fault detection in power grids based on improved supervised machine learning binary classification. *Journal of Electrical Engineering* 2021;72(5): 315–322.
- [14] VSB Power Line Fault Detection, Kaggle, 2018, (<https://www.kaggle.com/c/vsb-power-line-fault-detection/data>).
- [15] ENET Centre, VSB, 2020, (<https://cenet.vsb.cz/en/>).
- [16] Chui, C. K.. An introduction to wavelets (Vol. 1). Academic press, 1992.
- [17] Daubechies, I. Ten lectures on wavelets. Society for industrial and applied mathematics, 1992.
- [18] Desai, R., Porob, P., Rebelo, P., Edla, D. R., Bablani, A. EEG data classification for mental state analysis using wavelet packet transform and Gaussian process classifier. *Wireless Personal Communications* 2020;115(3): 2149–2169.
- [19] Khushaba, R. N., Kodagoda, S., Lal, S., Dissanayake, G. Driver drowsiness classification using fuzzy wavelet-packet-based feature-extraction algorithm. *IEEE transactions on biomedical engineering* 2010; 58(1): 121–131.
- [20] Kira, K., Rendell, L. A. (1992, July). The feature selection problem: Traditional methods and a new algorithm. In *Aaii* 1992: 2(1992a); 129–134.
- [21] Kononenko, I. Estimating attributes: Analysis and extensions of RELIEF. In *ECML*, April 1994: 94, pp. 171–182.
- [22] Tuncer, T., Ertam, F. Neighborhood component analysis and reliefF based survival recognition methods for Hepatocellular carcinoma. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 2020; 540: 123143.
- [23] Özyurt, F. Efficient deep feature selection for remote sensing image recognition with fused deep learning architectures. *The Journal of Supercomputing* 2020; 76(11) : 8413–8431.
- [24] Kapucu, C., Cubukcu, M. A supervised ensemble learning method for fault diagnosis in photovoltaic strings. *Energy* 2021; 227: 120463.
- [25] Dietterich, T. G. Ensemble methods in machine learning. In *Multiple Classifier Systems: First International Workshop 2000, MCS 2000 Cagliari, Italy, June 21–23*, pp. 1–15.
- [26] He, L., Cheng, Y., Li, Y., Li, F., Fan, K., Li, Y. An improved method for soil moisture monitoring with ensemble learning methods over the Tibetan plateau. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 2021; 14: 2833–2844.
- [27] Yu, L., Wang, S., Lai, K. K. Credit risk assessment with a multistage neural network ensemble learning approach. *Expert systems with applications* 2008; 34(2) : 1434–1444.
- [28] Yu, Z., Chen, H., You, J., Wong, H. S., Liu, J., Li, L., Han, G. Double selection based semi-supervised clustering ensemble for tumor clustering from gene expression profiles. *IEEE/ACM transactions on computational biology and bioinformatics* 2014; 11(4) : 727–740.
- [29] Wang, H., Ma, J., Wang G., Hao J., Ma J., Jiang H. A comparative assessment of ensemble learning for credit scoring. *Expert Systems with Applications* 2011; 38(1) : 223–230.
- [30] Akram, V. K., Taşer, P. Y. Telsiz Duyurga Ağlarda Bizans Saldırılarının Topluluk Öğrenme-tabanlı Tespiti. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 2020; 22(6) : 905–918.
- [31] Akcan, F., Sertbaş, A. Topluluk Öğrenmesi Yöntemleri ile Göğüs Kanseri Teşhisi. *Electronic Turkish Studies*(2021; 16(2): 511–528.
- [32] Hossin, M., Sulaiman, M. N. A review on evaluation metrics for data classification evaluations. *International journal of data mining & knowledge management process* 2015; 5(2) : 1–11.
- [33] N. V. Chawla, N. Japkowicz and A. Kotcz. Special issue on learning from imbalanced data sets. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter* 2004; 6(1): 1–6.
- [34] Dong, M., Sun, J. Partial discharge detection on aerial covered conductors using time-series decomposition and long short-term memory network. *Electric Power Systems Research* 2020; 184: 106318.
- [35] Wadi, M., Elmasry, W. An anomaly-based technique for fault detection in power system networks. In *2021 International Conference on Electric Power Engineering–Palestine (ICEPE–P) 2021*; IEEE. pp. 1–6.
- [36] Vantuch, T., Prilepok, M., Fulneček, J., Hrbáč, R., Mišák, S. Towards the text compression based feature extraction in high impedance fault detection. *Energies* 2019;12(11): 2148.
- [37] Li, Z., Qu, N., Li, X., Zuo, J., Yin, Y. Partial discharge detection of insulated conductors based on CNN-LSTM of attention mechanisms. *Journal of Power Electronics* 2021; 21: 1030–1040.

Hastaların Elektronik Sağlık Kayıt (ESK) Sistemleri için Güvenli Blok Zincir Destekli Bulut Sistemi

Hamit MIZRAK¹, Serpil ASLAN^{2*}

¹ Enformatik, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye

² Yazılım Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye

¹ hamit.mizrak@ozal.edu.tr, ² serpil.aslan@ozal.edu.tr

(Geliş/Received: 29/04/2023;

Kabul/Accepted: 31/05/2023)

Öz: Dünyada birçok işlemler artık dijitalleştiğinden dolayı veri güvenliliği, veri paylaşımı, veriye hızlı erişim, verilerin bütünlüğünü korumak önemli görülmüştür. Her geçen gün, günlük yaşantımızda bilgisayara bağımlılığımız ve bu bağılığa paralel olarak verilerin oluşması tamamen doğal bütünün bir parçasıdır. Oluşan bu büyük veri topluluğu beraberinde veri güvenliğinin önemini de arttırmıştır. Veri güvenli konusunda son zamanlarda en çok duyulan kelime blok zinciri kelimesidir. Blok zincir, güvenli veri paylaşımını sağlamak ve merkezi olmayan veri işlem bütünlüğünü korumak amacıyla tasarlanmış birçok bilgisayardaki işlemleri kaydeden ve daha sonra hiçbir şekilde geriye dönük olarak değiştirilemeyen halka açık dijital defterlerdir. Son yıllarda bulut tabanlı Elektronik Sağlık Kayıtları (ESK), hasta verilerine uzaktan erişim için birçok araştırmacının ilgi odağı haline gelmiştir. Hasta verilerinin doğruluğu ve gizliliği, sağlık sektöründe önemli bir endişe kaynağıdır. Bu çalışmada, ESK kayıtları için veri erişim kontrolü ve denetimi sağlarken bulut servis sağlayıcıları arasında sağlık verilerinin paylaşılması için blok zincir destekli yeni bir çözüm önerilmiştir. Önerilen yöntemle, hastanın elektronik sağlık kayıtlarının sağlık sektörü tarafından yönetilmesinden ve kontrol edilmesinden, hastaların verilerinin kontrolünde olduğu hasta merkezli bir uygulamaya geçiş hedeflenmektedir.

Anahtar kelimeler: Blok zincir, elektronik sağlık kayıtları, bulut hizmeti sağlayıcısı.

Secure Blockchain-Supported Cloud System for Patients' Electronic Health Record (EHR) Systems

Abstract: Since many transactions worldwide are now digitalized, data security, data sharing, fast access to data, and protecting data integrity have been considered necessary. With each passing day, our dependence on computers in our daily lives and data formation in parallel with this dependence is a part of the natural whole. This large data community has also increased the importance of data security. The word that has been heard most recently about data security is blockchain. Blockchain is a public digital ledger that records transactions across multiple computers, designed to ensure secure data sharing and maintain decentralized data transaction integrity, and cannot be changed retrospectively afterward. In recent years, cloud-based Electronic Health Records (ESK) have become the focus of attention of many researchers for remote access to patient data. The accuracy and confidentiality of patient data is a significant concern in the healthcare industry. This study proposes a new blockchain-supported solution for sharing health data between cloud service providers while providing access control and control for IHC records. The proposed method aims to transition from the management and control of the patient's electronic health records by the health sector to a patient-centered application where the patients' data are in control.

Key words: Blockchain, electronic health record (EHR), cloud service provider.

1. Giriş

Dünyada birçok işlemler artık dijitalleştiğinden veri güvenliliği, veri paylaşımı, veriye hızlı erişim, veri bütünlüğünü korumak son derece önemli görülmüştür. Her geçen gün, günlük yaşantımızda bilgisayara olan bağımlılığımız ve bu bağılığa paralel olarak yeni verilerin oluşması kaçınılmazdır. Oluşan bu verilerin güvenli bir şekilde paylaşımı her geçen gün önemi artmaktadır. Bu verilerin güvenliliğini korumak, muhafaza etmek son derece değerlidir. Veri güvenliliği konusunda son zamanlarda en çok duyduğumuz kelime olan blok zinciri kelimesidir. Blok zinciri, güvenli veri paylaşımını, veri bütünlüğünü korumakla görevli, merkezi olmayan dijital kayıt defteri olarak tanımlanır. Blok zinciri verileri tek yönlü olarak kaydeden, tersine mühendisliğin imkânsız olan ve paylaşımlarını şeffaflık ilkesine göre veri tabanına verileri gönderir. Blok zincirinde kaydedilen bu verilerin ortak veri paylaşımına olanak sağlayan teknolojiler toplamıdır.

Elektronik Sağlık Kayıtları (ESK), hastaların geleneksel kâğıt üzerindeki tıbbi kayıtlarına elektronik erişim imkânı sağlayan sağlık kaydı depolama sistemidir [1]. Verilerin kâğıt formda kaydedilmesi ve arşivlenmesi ekstra

* Sorumlu yazar: serpil.aslan@ozal.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0009-0009-7394-7469, ² 0000-0001-8009-063X

insan gücüne ihtiyaç duyulmasına sebep olduğu gibi veri giriş hatalarına da sebep olabilir. Bu gibi hatalar tıbbi kararlarda hatalara yol açıp hastaların testlerinin tekrarlanmasına da sebep olacağı için maliyetli olabilir [2,3]. Hastalar tedavi süreçlerinde farklı hastaneleri ziyaret etmek zorunda kalabilirler. Hastalar sağlık kayıtlarını yaşam süreleri boyunca farklı hastanelere dağıtırken önceki sağlık kayıtlarına erişmekte zorlanırlar. Aynı zamanda parçalanmış sağlık veri kayıtlarının kötü yönetilmesine de sebep olabilir. Tüm bu nedenlerden dolayı tıbbi verilerin dijitalleştirilmesi, elektronik olarak depolanması ve profesyoneller tarafından uzaktan erişilebilir olması kaçınılmazdır [4]. Elektronik kayıtlar, hasta ziyaretlerinden sonra hastaneler tarafından oluşturulur ve böylece hastalar elektronik tıbbi kayıtların tek sahibi olur. Hastaların tıbbi bilgilerinin saklanması ve izinsiz kişilerce ele geçmesi hastaya veya hastaneye ciddi zararlar verebilmektedir. ESK hastayla ilgili olarak bütün bilgilerinin tutulduğu ortam olmasından dolayı güvenli bir şekilde saklanması son derece önemlidir. Hasta bilgilerinin doktorlara doğru zamanda ulaşması son derece önemlidir. Günümüzde, sağlık alanı önceki zamanlara göre daha dijitaldir; Örneğin, manyetik rezonans görüntüleme (MRG) ve X-ışınlarından bilgisayarlı tomografiye (BT) ve ultrason taramalarından elektronik tıbbi belgelere kadar büyümektedir.

Bulut hizmetlerinin artan popülaritesi ile sağlık kayıtlarının bulut tabanlı platformlara taşınması sağlık ve araştırma kurumları arasında paylaşılmasını daha önce hiç olmadığı kadar kolaylaştırarak daha hızlı ve verimli bir şekilde bilgi alışverişine olanak sağlamıştır [5]. Bulut hizmeti sağlayıcıları, depolarındaki sağlık kayıtlarının kontrolü ve esnek paylaşımı ile yükümlüdür. Etkileşimli işbirliğini kolaylaştıran bulut tabanlı sistemlerin, tedaviler hakkında yeni bilgilerin araştırılması, analiz edilmesi ve nüfus sağlığının daha iyi yönetilmesi gibi avantajları olduğu gibi çeşitli zorlukları da beraberinde getireceği göz ardı edilmemelidir. Örneğin, yüksek boyutlu verilerin depolanması sağlık sektöründe veri yönetimi için büyük bir zorluktur. Sağlık kayıtlarının güvence altına alınması, uzaktan erişim ve doğrulanması sağlık sektöründe ki bir diğer büyük zorluktur [6]. Bu zorlukların üstesinden gelirken sağlık kayıtlarının bütünlüğünü, güvenilirliğini ve gizliliğini sağlamak esastır. Bu nedenle güvenli ve verimli veri yönetimi en önemli gerekliliktir [7]. Veri sahipleri ve emanetçileri için toplanan verilerin kötü amaçlı kullanıcıların elinde savunmasız olma riski vardır. Bu tür risklerden dolayı hizmet sağlayıcılara karşı güvensizlik atmosferi ortaya çıkmaktadır. Tüm engellerin üstesinden gelmek için verimli depolama ve hızlı geri alma, güvenli veri paylaşımı ve ESK kayıtlarının güvenliğini hedef alan yeni kayıt sistemleri oluşturulmuştur [8,9].

Sağlık verilerinin paylaşılması durumunda ortaya çıkacak riskleri ele almak amacıyla çeşitli kriptografik yöntemler önerilmiştir [10,11]. Önerilen yöntemler her ne kadar tüm riskleri ele almaya çalışsa da yetersiz kalmıştır [12]. Tam olarak bu noktada Blok zincir teknolojisi ihtiyaç duyulan tüm hizmetleri sunabilme potansiyeliyle ortaya çıkmıştır. Blok zincir, güvenli veri paylaşımını sağlamak ve merkezi olmayan veri işlem bütünlüğünü korumak amacıyla tasarlanmış birçok bilgisayardaki işlemleri kaydeden ve daha sonra hiçbir şekilde geriye dönük olarak değiştirilemeyen halka açık dijital defterlerdir. Blok zincirler birbirine bağlı zincirlerden oluşur, yeni eklenen zincir bir önceki bloğa bağlanır ve bu şekilde uzun bir zincir meydana gelir. Sonuç olarak, Blok zincir artık kaydın adıdır. Blok zinciri kelimesi bir ağda yapılan işlemlerin blok ve blokların ardı ardına zincirlenmesi ifadesinden dolayı blok zinciri adını almıştır. Blok zincirde veriler üzerinde işlem yapılırken her bir işlem halka açık olarak kaydedilip kontrol edildiğinden dolayı diğer yöntemlere kıyasla yüksek bir hesap verilebilirlik sağlar. Blok zincire girildiğinde hiç kimse önceden eklenen tüm bilgileri değiştiremez. Diğer bir deyişle verilerin gerçek ve değişmemiş olduğunu gösteren yeni bir teknolojidir [13]. Blok zincirde veriler, merkezi bir veri tabanı yerine ağlarda depolanır. Bu sayede, sistemin kararlılığı artar ve saldırıya uğradığı anda göreceği zarar minimize edilir.

Kripto para birimlerinde başarısını kanıtlamış blok zincir teknolojisi bu risklerin üstesinden gelmek amacıyla kullanılacak en güçlü teknolojidir. Blok zincirler sağlık hizmetlerinde ciddi veri gizliliği, güvenlik ve bütünlük sorunlarını çözebilecek stratejilere sahiptir. Örneğin, sağlık sektöründe, blok zincir teknolojileri sayesinde hasta kayıtlarının gizliliği kaydedilebilir, aynı zamanda hastaların tıbbi geçmişleri blok zincir teknolojisi kullanılarak saklandığında değiştirilemez. Bu teknoloji sağlık sektörü için büyük bir temel sağlar ve âdemi merkeziyetçilik, değişmezlik yeteneği ve birlikte çalışabilirlik sunar [14]. Bu çalışmada, ESK kayıtları için veri erişim kontrolü ve denetimi sağlarken bulut servis sağlayıcıları arasında sağlık verilerinin paylaşılması için blok zincir destekli yeni bir çözüm önerilmiştir. Önerilen yöntemle, hastanın elektronik sağlık kayıtlarının sağlık sektörü tarafından yönetilmesinden ve kontrol edilmesinden, hastaların verilerinin kontrolünde olduğu hasta merkezli bir uygulamaya geçiş hedeflenmektedir.

2. İlgili Çalışmalar

Ying ve ark. [15] çalışmalarında, ESK için kriptografik teknikleri kullanan şifreli metin politikası öznetiliğine dayalı şifreleme CP-ABE şifreleme tekniği önerdiler. Yazarlar önerilen yöntemin gelir gider maliyetine karşı büyük oranda ESK kayıtlarını koruduğunu iddia etmektedir. Azarm ve ark. [16] çalışmalarında işbirliğini arttırmak

amacıyla ESK sistemlerinde paylaşılan verileri denetlemek için bulut tabanlı bir uygulama ve web hizmeti API önerdiler. Önerilen çerçeve, topluluk bakımından alınan karşılaştırmalı bir kullanım senaryosu kullanılarak test edilmiştir. Sistem, hastaneyi veya sağlık merkezlerini ESK sistemi ile yönetmek için Sağlık Bakanlığı tarafından kontrol edilmektedir. Yue ve ark. [17] çalışmalarında, sağlık veri paylaşım sistemleri için erişim kontrolü yönetimi için tek merkezli erişim kontrol modeli önerdiler. Çalışmada veri kullanıcıları, (1) ham verileri okumaya çalışan kullanıcılar ve (2) verileri okumaya ve sonuçlarını almaya çalışan kullanıcılar olmak üzere iki türe ayrıştırılmıştır. Önerilen modelde her bir veri talebi için, bir işlem amaçlarına bağlı olarak belirli bir kategorideki verilere sınırlı bir süre tanımlanır. Samarin ve ark. [18] çalışmalarında bulutta özel olarak depolanan ve yalnızca hasta tarafından erişime açık olan sağlık kayıtlarını ele almıştır. Çalışma, sağlık verilerinin sağlık hizmeti sağlayıcıları gibi birden fazla kuruluşla paylaşma ihtiyacını göz artırmaktadır.

Xia ve ark. [19] çalışmalarında blok zincirin değişmezliği özelliğini kullanarak bulutta depolanan ESK verilerinin erişim kontrolü zorluklarını ele alan blok zincir tabanlı bir veri paylaşım modeli önerdiler. Önerilen modelde güvenli şifreleme teknikleri kullanılarak izin verilen bir blok zincir ile veri havuzlarına verimli erişim kontrolü sağlanması ve paylaşılması hedeflenmiştir. Wang ve ark. [20] çalışmalarında, ESK sistemleri için öznelik tabanlı kriptografi ve blok zincir teknolojisini birlikte kullanarak güvenli bir BBDS ismini verdikleri yeni bir şema önerdiler. Önerilen model hibrit bir modeldir. Önerilen modelde, tıbbi verileri şifrelemek amacıyla nitelik tabanlı şifreleme kullanılırken dijital imzaları uygulamak içinde birleşik öznelik tabanlı/kimlik tabanlı şifreleme ve imza (C-AB/IB-ES) adı verilen yeni bir kriptografik yöntem sunulmuştur. Ayrıca çalışmada tıbbi verilerin bütünlüğünü ve erişilebilirliğini sağlamak amacıyla da blok zincir teknikleri kullanılmıştır. Ferdous ve ark. [21] çalışmalarında, tıbbi verilerin bütünlüğünü, güvenilirliğini ve paylaşımını sağlamak için DRAMs olarak adlandırdıkları blok zincir tabanlı yeni bir sistem önerdiler. Önerilen yöntem temelinde iyi tanımlanmış bir tehdit modeli varsayımına dayandırılarak dağıtık erişim kontrolüne olanak sağlayan merkezi olmayan bir mimaridir. Ramani ve ark. [22] çalışmalarında, ESK sistemleri için blok zincir tabanlı işbirliği şeması önerdiler. Önerilen model, bir sağlık hizmeti ortamında doktor-hasta blok zincirine dayanan güvenli ve etkili bilgi erişim modelidir. Yazarlar önerilen modeli deneysel sonuçlarla desteklemişlerdir. Deneysel sonuçlar önerilen modelin bütünlüğü koruduğunu ve literatürde bilinen saldırılara karşı direnebildiğini kanıtlamaktadır. Azaria ve ark. [23], büyük ölçekli ESK sistemleri için yeni bir merkezi olmayan MedRec modeli önerdiler. Çalışmada, tıbbi verilerin gizliliği, kimlik doğrulaması ve denetimler blok zincir tekniği kullanan MedRec modeli kullanılarak kapsamlı bir günlük aracılığıyla tutulmuştur.

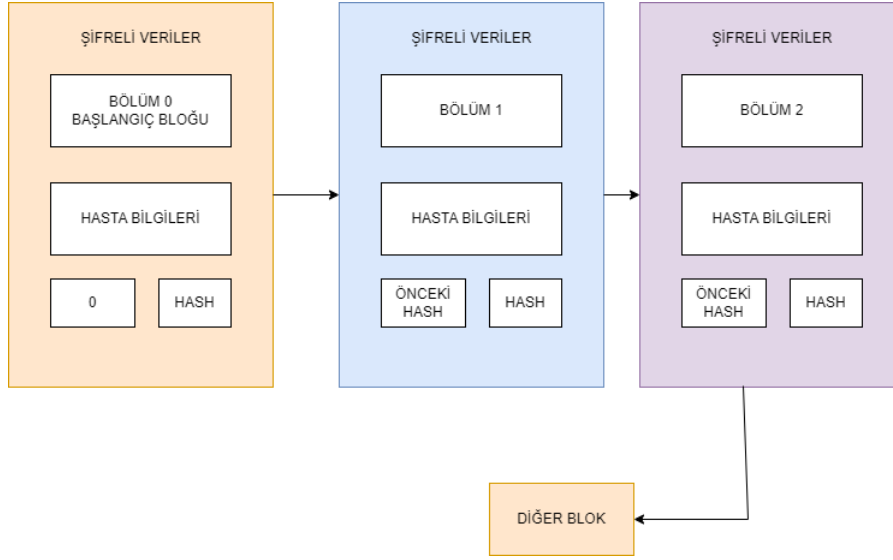
3. Materyal ve Yöntem

3.1. Blok zincir

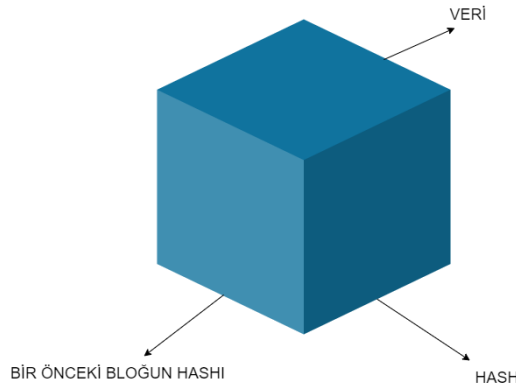
Blok zinciri merkezi sistemi olmayan uçtan uca bağımlı kullanıcılar arasında dinamikleşerek veri paylaşımını sağlayan dağıtık mimari teknolojisidir [13]. Blok zinciri kelimesi, bir ağda yapılan işlemlerin blok ve blokların arka arkaya zincirlenerek bağlanması olayına dayanmaktadır. Blok zinciri için veri güvenliği birinci önceliktir. Ağda doğrulanmış yöntemlerin listesi bir zincirin sonuna yeni bir veri bloğu eklenmesiyle devam ederek blok zincirini oluşturur. Şekil 1, hasta verilerinin bloklar halinde zincirlenerek ve şifrelenerek art arda bloklar halinde sıralanmasını temsil etmektedir.

Blok zincir yöntemlerinde bilinmesi gereken önemli kavramlar bulunmaktadır:

- Veri (Data): İşlenmemiş, ham bilgilere denir.
- Jeton (Token): Jeton bir platformun tüm yetkilerinden faydalanılmasına olanak sağlayan yapıdır.
- Doğrulama (Hash): Her bir blok ve bütün bloklar kendi içinde benzersizdir. Bu bloklar parmak izi gibi eşsiz ve benzersizdir. Herhangi bir blokta en küçük bir değişiklik meydana gelirse tekrardan hesaplanır ve sistemin çalışmamasını sağlar. "Hash Of Previous" anlamı önceki bloğun karması anlamına gelmektedir: Her blok önceki bloğun karmasını içerir ve her bloğun bir önceki bloğa işaret etmesine yardımcı olması için bir blok zinciri oluşturulur. İlk blok, blok zincirindeki ilk blok olduğu için bir önceki bloğa işaret edemez ve ilk bloğa "Genesis Block" adı verilir. Buradaki blokta herhangi bir değişiklik meydana geldiğinde bütün karma da değişmektedir. Bir sonraki blok değişmesi zincirleme olarak diğer bütün blokları etkiler ve artık eşleşmeyen bloklara dönüşür ve tüm blokların hash kodu değişmiş olur. Şekil 2, bir blok zincirinin öz niteliklerini temsil etmektedir.



Şekil 1. Blok zincir ile şifrelenmiş hasta verileri.



Şekil 2. Blok zincirindeki her bir blok.

3.2. Blok zincir türleri

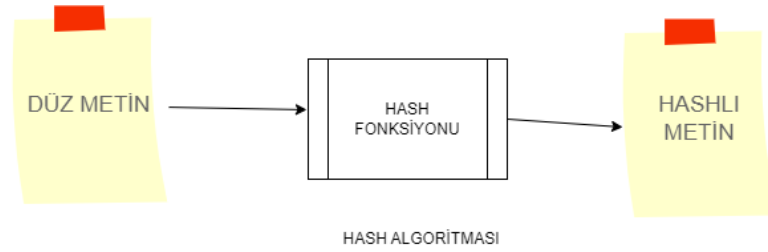
Blok zinciri mimarisi izinli blok zinciri ve izinsiz blok zinciri olmak üzere ikiye ayrılır. İzinsiz blok zinciri mimarisinde; kullanıcının kimliği kontrol edilmeden yani gerçek kişinin kimliği olup olmasına bakılmadan alınmasına denir. İzinli blok zinciri kullanıcının kimlik kontrolü incelenerek gerçek kişi olmasına dikkat edilerek işleme alınmasına denir.

İzinsiz blok zinciri mimarisi Şekil 3'te gösterildiği gibidir. Mimaride, blok zincir uygulama sağlayıcı hizmeti ile hasta kullanıcı veri tabanı hizmeti birbirine bağlıdır. Üretilen her bir veri, sağlayıcı uygulaması üzerinden bir API aracılığıyla blok zincire eklenmektedir. Eklenen bu blok yine API üzerinden hasta kullanıcı uygulamasına veri sağlayarak döngüyü oluşturmaktadır.

kullanıcısı B kullanıcıya dijital imzalı bir mesaj göndermek istemektedir. İmzalama aşamasında, A kullanıcı verilerini özel anahtarı ile şifreler ve B kullanıcıya şifrelenmiş mesajı ve orijinal verileri gönderir. Doğrulama aşamasında B kullanıcı, eline geçen mesajı A kullanıcısının genel anahtarı ile doğrular. Böylelikle, B kullanıcı verilerin tahrif edilip edilmediğini kolayca kontrol edebilir.

3.4. Hash fonksiyonları

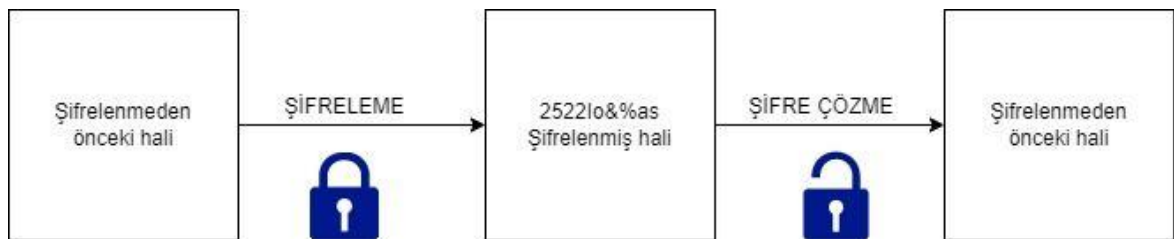
Farklı boyuttaki verilerden sabit boyutta çıktı oluşturan matematiksel süreçlere denir. Hash fonksiyonları kriptografi kullanımında önemli bir yere sahiptir. Hash fonksiyonları sayesinde blok zinciri, dağıtık sistemlerde veri bütünlüğü ve güvenliği elde etmiştir. Hash fonksiyonları deterministik fonksiyonlardır. Diğer bir deyişle hash fonksiyonları farklı büyüklükte bitlere sahiptir ve her bir algoritmada her zaman aynı girdi için aynı çıktı alınmaktadır. Veri güvenliğini sağlamak adına hashing fonksiyonları özellikle kripto paralarda tek yönlü fonksiyonlar olarak kullanılır ki tersine çalışma olmasın ve güvenlik sağlanmış olsun. Hashing kaba kuvvet saldırılarına karşı dayanıklıdır. Şekil 5'te, hash algoritmalarının çalışma şemasını temsil eder. Şifreleme algoritmaları çift yönlü olarak kullanılmaktadır.



Şekil 5. Hash algoritmalarının şeması.

Hash algoritmalarına örnek olarak MD5, SHA, RİPED-D algoritmaları verilebilir. MD5 algoritmasının güvensizlik problemi nedeniyle SHA çok daha kullanışlıdır. MD5 128 bit uzunluğunda çıktı oluşturmaktadır. MD6 256 bit uzunluğundadır. SHA(Secure Hash Algoritma) Türkçesi "güvenli hash algoritması anlamına" gelir. NSA(National Security Agency) tarafından geliştirilmiştir. Örneğin: SHA-1 her zaman 160 bit özet oluştururken, SHA-256 algoritması 256 bit özet meydana getirir. SHA-2 ve SHA-3 daha güvenlidir. SHA-0 ve SHA-1 farklı girdiler ile aynı hash'in üretilmesi durumunda çakışma meydana gelir. SHA-0 ve SHA-1 çakışmalar meydana geldiğinde güvenli değildir.

Hash fonksiyonları kriptografik hash fonksiyonlarında dijital parmak izi, bilgi güvenliği, mesaj doğrulama, DNA dizilerinde benzer dizilimleri bulmak, veri güvenliği uygulamalarında, veri tabanlarında veri aramayı hızlandırmak, e-ticaret uygulamalarında, güvenli giriş uygulamalarında kullanılır. Şekil 6'da Hash algoritma şeması görülmektedir.



Şekil 6. Hash algoritmalarının şeması.

3.5. Blok zincir uzlaşma (konsensüs) algoritmaları

Uzlaşma algoritmaları, var olan grup içindeki bireylerin geri kalanlar arasında en iyisi olduğuna karar veren fikir birliği algoritmalarıdır. Dağıtık sistemlerde güvenliği sağlayan yapıdır. Ağ güvenliğini sağlar ve etkili iletişim için gerekli alt yapıyı sunar. Merkezi bir sistem özelliğine sahiptir. Ağ üzerinde bütün veriye erişim yetkisi vardır. Böylelikle bütün verilere erişim vardır. Blok zincirinde eşitlik ve başarıyı sağlamak için kullanılır. Uzlaşma

algoritmalarında herhangi bir en küçük hata toleransında düğümler anlaşmazlığa gider. Ağ içindeki düğümlerin birbirine olan güveni söz konusu değildir önemli olan toplu bir karar vermektir. Merkezi yapıyla ilgili problemler olduğu durumlarda kolaylıkla bilgi sahibi olunabilir. Merkezi olmayan teknolojilerde art arda birbirine bağlanarak blok zincirini meydana getirmektedir ve merkezi olmayan veya dağıtık defter yapı sistemlerinde uzlaşma algoritmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Uzlaşma algoritmalarının birden fazla çeşidi bulunmaktadır. En önemli iki algoritma:

- İş Kanıtı (Proof of Work (PoW)): Bitcoin kurucusu Satoshi Nakamoto [24] tarafından blok zincir ağında işlemleri onaylamak ve zincirde yeni bloklar oluşturmak için önerilmiş uzlaşma algoritmasıdır. PoW, bir kripto para biriminin blok zincirine yeni işlem blokları eklemenin bir şeklidir. Bu durumda iş, mevcut blok için hedef karma ile eşleşen bir karma (uzun bir karakter dizisi) üretir. Bunu yapan kripto madencisi, o bloğu blok zincirine ekleyerek ödül alma hakkını kazanır. PoW, Bitcoin için SHA-256, Litecoin Scrypt, Ethereum ise Equihash kullanmaktadır.
- Hisse Kanıtı (Proof of Stake (PoS)): Bir blok zincirin güvenliğini ve sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla oluşturulmuş bir uzlaşma mekanizmasıdır. Karmaşık çözümler yerine var olanla yetinmeye çalışır. PoS algoritmasında her bir bloğun doğru doğrulayıcılar tarafından yapılmaktadır. PoW mekanizmasına alternatif olarak geliştirilen PoS, hesaplama gücünü değil sermaye gücünü ön plana çıkarmaktadır.

Bu algoritma türleri dışında Proof of Burn, Proof-of-Activity, Proof-of-Capacity, Proof of Elapsed Time, Delegated, Proof of Stake, Proof of Authority, Hibrit Pow/PoS türleri de mevcuttur.

3.6. JavaEE ve spring boot teknolojileri

Java yüksek seviyeli bir programlama dilidir. Java üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım JavaSE (Java Standart Edition) JAVA'nın temel bileşenlerini oluşturmaktadır. İkinci kısım JavaME (Java Micro Edition) JAVA'nın gömülü sistem kodlamaları için kullanılır. Üçüncü kısım ise JavaEE (Java Enterprise Editon) kurumsal projelerde kullanılan teknolojinin adıdır. Bu makalede JavaEE kullanımında son teknoloji olan Spring Boot teknolojisi kullanılmıştır. Spring Boot teknolojisi, Spring Framework üzerine kurulmuş konfigürasyon teknolojisi olup, Spring Framework'un aksine kodlama kolaylıkları sağlamaktadır. Makalede önerilen yöntemde, veri yapıları sistemleri için JavaSE kullanılmıştır. Farklı cihazlarda veri paylaşımı için Spring Boot API (Application Programming Interface) sisteminden yararlanılmıştır. API kısa uygulama ara yüzüdür. Farklı cihazlarda veri alış verişini sağlayan teknolojinin genel adıdır. Hasta bilgilerinin kaydedilmesinde veri tabanı olarak gömülü veri tabanı olan H2DB kullanılmıştır. H2DB sistem üzerinde çalışabilen gömülü bir veri tabanı sistemidir. Java'da veri güvenliği içinde Spring Security kullanılmıştır. Sisteme kötü niyetli istekler geldiğinde filtreden geçiren ve sistem içinde olmayan kullanıcıları engellemek için kullanılır.

3.7. Önerilen yöntem

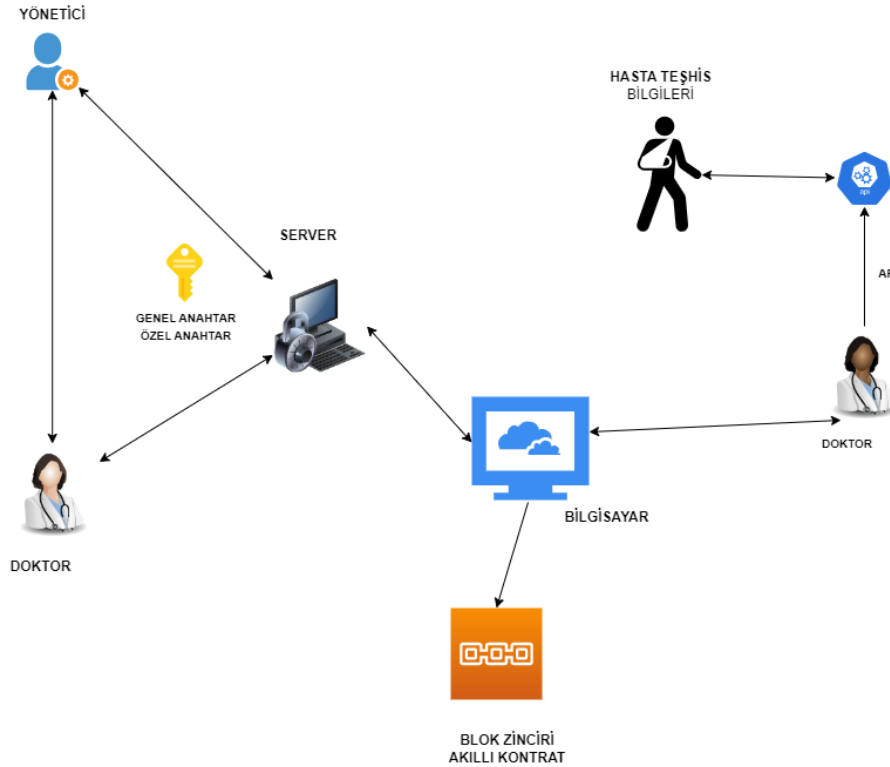
Önerilen yöntemle sağlık alanında veri taşınma hızı, veri güvenliği, veri şeffaflığı ve klasik veri tabanı saklama, sistem kullanıcı girişinin veri tabanı, oturum (session) yöntemi yerine dağıtık veri tabanı olan blok zincir teknolojisi kullanılmıştır. Blok zincirini kullanarak bulut servis sağlayıcıları arasında bir veri paylaşım modeline ek olarak sisteme güvenli giriş sağlamak ve akıllı sözleşmelerin erişim kontrol mekanizmalarının kullanılması daha yüksek düzeyde veri denetimi sağlayacaktır. Katmanlı mimari yapısıyla tasarlanan sistemde bulut hizmeti sağlayıcıları arasında veri paylaşımına yönelik mevcut son teknolojiler kullanılmıştır. Bulut hizmet sağlayıcılarının daha hızlı bilgi alış verişini sağlayabilecek bir model oluşturduk. Veri gizliliği konusunda bilinen klasik yöntemlere kıyasla daha risksizdir. Ayrıca, sistemde ki yetkilendirme ile hasta bilgi mahremiyetine önem verilmiştir.

Bu çalışmada ESK için blok zincir ve bulut bilişim kullanılarak önerilen sistemin genel çerçevesi Şekil 7'de gösterildiği gibidir. Önerilen yöntem ile sistem merkezsizleştirilerek tek bir başarısızlık noktası önlenir ve hastalara kendi verilerine sahip olma ve bunlara erişim hakkı verilir. Önerilen sistem ile tüm sağlık hizmeti verilerine erişmek her zamankinden daha kolay olacaktır. Ayrıca veriler güvence altına alınır ve dağıtılır. Blok zincir verilerinde yapılan herhangi bir yasadışı değişiklik kolayca tespit edilebilir ve tanımlanabilir. Önerilen sistemde, hangi blok zincir madencilerine ne tür bilgilerin görüneceğine dikkat eden onay gerçekleştirilir.

Önerilen sistemde, blok zinciri otomasyon sistemine giriş yapılmadan öncesinde kullanıcı eğer kayıt olmamışsa öncelikle kayıt olmalı ve daha sonra sisteme giriş yapabilmektedir. Doktor veya hastanın sisteme giriş yapabilmesi için öncelikle sisteme kayıt olmaları gerekmektedir. Sisteme kayıt olduktan sonra hastane veya yönetici admin tarafından onay verildikten sonra sisteme giriş yapabilirler. Sisteme giriş yapmış bir doktor hasta

bilgilerini sisteme ekleyebilmektedir. Blok zincirine gönderilmeden öncesinde değişiklik yapabilmektedir ancak blok zincirine gönderildikten sonra artık hasta bilgilerini değiştirmesi mümkün değildir. Hasta bilgileri bloklar halinde hash fonksiyonu ile bit dizisine dönüştürülerek blok zincirine eklenmektedir. Her bir hasta için ayrı bir blok zinciri vardır. Eğer bu hasta bilgilerinden bir tanesi bile değişirse blok zincirinin kimliği tamamen değişecektir. Hasta giriş yaptıktan sonra bilgileri şifrelenmiş bir şekilde saklanmakta ve kendisiyle alakalı teşhis bilgilerini görebilmekte ancak bilgileri değiştirememektedir. Admin günlük olarak eklenen hasta bilgilerini görmek ve hasta bilgilerini değiştirildiğinde veri tabanı üzerinde veya log dosyasında takip edebilmektedir. Doktor hastasının teşhis bilgilerini ekledikten sonra blok zincirine gönderebilmektedir.

Hastaların tıbbi kayıt bilgilerin çalınması, değiştirilmesi hastaların mahremiyeti için çeşitli riskler doğurmaktadır. Bu bilgilerin kötü amaçlı kişilerin vereceği zarar hem hastaya hem de finanse eden kuruma ciddi zararlar vermektedir. Bundan dolayı bulut tabanlı Elektronik Sağlık Kayıtları (ESK), hasta verilerine uzaktan erişim birçok araştırmacının ilgi odağı haline gelmiştir. Hasta verilerinin saklanması, veri doğruluğu, veri gizliliği, veriyi bulut sisteminde hızlı iletilmesi sağlamak sağlık sektöründe önemli bir endişe kaynağıdır. Bu makalede, ESK kayıtları için veri erişim kontrolü ve denetimi sağlarken, bulut servis sağlayıcıları yardımıyla sağlık verilerinin paylaşılması için blok zincire ek olarak katmanlı mimari yapısı, API (Uygulama Ara Yüzü) ile hasta bilgilerini özet fonksiyonu (Hashing) uygulamak destekleyici yeni ek çözümler önerilmiştir. Önerilen bu yöntemlerle, hastanın elektronik sağlık kayıtlarının sağlık sektörü tarafından yönetilmesinden ve kontrol edilmesinde kullanılacaktır. Bu nedenle blok zinciri platformunda kullanılan bu teknolojilerle önerilen yöntem daha güvenli yeni modeller geliştirilmesine imkân sağlayacaktır.



Şekil 7. Önerilen blok zincirli ESK sistemi.

- Yönetici Modülü (Super Admin Modülü): Bu modülde güvenli giriş sistemi spring güvenlik modülü ile yapılmaktadır. Admin bütün modüllere erişim sağlayabilmektedir. Hastanede çalışan doktorların güncellenmesi, sistem bakım işlemlerinde sorumlu ve sistemde meydana gelebilecek sorunları izlemek ve çözümlenmekte sorumlu modüldür. Sisteme izinsiz giriş yapmaya çalışan kişilerin listesi loglama yöntemiyle tespit edilir. Sistem kullanıcılarında doktor, hastane veya hasta kullanıcı girişindeki sisteme şüpheli girişler tespit edilirse bu kullanıcılar kilitlenir. Bu kilitlenmeyi yönetici modülü sağlamaktadır. Veri tabanı verilerine erişim sağlayabilmesi için uygulama özelliklerine eklediği kullanıcı adı ve şifre ile

erişim sağlayabilmektedir. Sistemin yedeğini almakla sorumludur. Sistemin olası saldırılarına karşı serveri kapatma yetkisi bulunmaktadır.

- Hastane Modülü (Admin): Bu modülde kendisine daha önceden verilmiş kullanıcı adı ve şifre ile spring güvenlik aracılığıyla sisteme giriş yapar. Hastanede çalışan sağlık çalışanların sisteme eklendiği ve hasta bilgilerinin yönetildiği modüldür. Doktor veya hastanın şüpheli giriş işlemlerinde ilgili kullanıcıların sisteme girişini kilitleyebilir. Kilitlenen kullanıcı modülü sadece yönetici modülü tekrardan aktifleştirebilir. Doktor ve hastanın bilgilerine erişim sağlayabilmekte ve çıktısını alabilmektedir. Hastanesinde ayrılacak sağlık çalışanın bilgisini sisteme eklemekle sorumludur. Sağlık çalışanların sisteme eklediği bilgileri ve hastaya konulan teşhisi görebilmektedir. Şüpheli doktor veya hasta için kullanıcı bilgilerini askıya alabilen modüldür.
- Doktor Modülü: Bu modülde kendisine daha önceden verilmiş kullanıcı adı ve şifre ile sisteme spring güvenlik aracılığıyla giriş yapar. Hasta bilgilerini, teşhisini sisteme kayıt etmekle sorumlu modüldür. Hastanedeki hasta bilgisine erişim sağlayabilmektedir. Blok zincirine göndermeden önce değişiklikler yapabilmektedir. Blok zincirine kayıt edildiğinde herhangi bir değişiklik yapamamaktadır. Doktorlar hastaların bilgilerine hızlı ve güvenli erişimi hasta teşhisinde önemli bir rol oynamaktadır.
- Hasta Modülü: Bu modülde kendisine daha önceden verilmiş kullanıcı adı ve şifre ile sisteme spring güvenlik aracılığıyla sisteme giriş yapar. Bu modülde doktor tarafından sorulan bilgileri cevaplayacak modüldür. Hasta kendi bilgilerini okuyabileceği ancak değiştiremeyeceği bu modülde bütün bilgileri saklanacaktır.

4. Sonuç

Blok zinciri, birden fazla blokların ortaklaşa birbirine bağlanarak verilerin güvenli bir şekilde saklanması olayıdır. Blok zincir, bulut bilişimde veri depolama ve paylaşımının diğer merkezi güvenlik çözümlerinin tüm zorluklarına bir cevaptır. İnternetteki veri belgelerinin yeni bir paradigmasıdır. Bu teknoloji kullanarak hasta bilgilerinin gizliliğini sağlamak ve uzaktaki bir hastanedeki hastanın bilgisine güvenli bir şekilde erişimin yolları araştırılmış ve blok zincirinin mantığı çerçevesinde uygulama yapılmıştır. Sağlıkta veri transferi, veri güvenliği, verinin dağıtık bir sistemde yönetilme süreci önemli olduğundan bu problemin blok zinciriyle yapılması son derece önemlidir. Blok zincirin birçok uygulama alanında başarıyla kullanılması sağlık alanında da veri paylaşımının ve güvenlik sorunlarını çözebilecek nitelikte olduğunu kanıtlar. Blok zincirin sağlık alanında bulut teknolojisiyle birlikte kullanılmasının veriyi doğru işleme, veri paylaşımını sağlama, verilerde oynama yapılmasını engelleme ve kötü niyetli kimselerin eline geçmeden paylaşılma gibi birçok avantaj sağladığı gözlemlenmiştir. Blok zincirinde önemli olan veri şifrelemede hashing algoritmaları kullanarak veri paylaşımını güvenli olacak şekilde işlenmesidir. Verileri bloklar halinde şifreleyerek bir sonraki düğüme bağlanarak düğümleri oluşturmaktadır. Bu blok süreci ve etkileşim ile tüm veriler entegre hale gelmekte ve verileri bütünlük ilkesini gereği değişen en ufak bir bilginin bozulmasıyla silsile grubunda diğer düğümleri etkileyeceğinden dolayı diğer düğümlerin çalışmamasına bağlı olacaktır. Bu çalışmada JavaEE Spring Boot teknolojisinden yararlanılarak veri kaydetme, veri paylaşımının API üzerinden sağlanmasını sağlamak için Spring rest, veri güvenliğini sağlamak için Spring Security kullanılmıştır. Blok zincirinin en önemli özelliği güvenilmeyen taraflar arasında güven köprüsünü kurmaktır.

Blok zinciri yeni olduğu için gelecek vaat ediyor ve şimdiden birçok alanda kullanımı söz konusudur. Özellikle sağlık ve dijital alanda yerini almıştır. Blok zinciri birçok teknolojiyle eşzamanlı olarak çalışmaktadır. Bu teknolojilerden hashing ve uzlaşma algoritmaları yardımıyla güvenli veri paylaşımı sağlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, H.M.'nin Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Enformatik Anabilim Dalı bünyesinde ki "Blok Zinciri ve Sağlık Uygulamaları" başlıklı yüksek lisans tezinin bir parçasıdır. H.M. fikir sahibi ve uygulamayı gerçekleştirdi. S.A. yöntemi yorumladı, yol gösterdi ve düzeltmeleri gerçekleştirdi. H.M. makaleyi yazdı.

Kaynaklar

- [1] Sun, Y., & Zhang, D. (2019). Diagnosis and analysis of diabetic retinopathy based on electronic health records. *Ieee Access*, 7, 86115-86120.
- [2] Raghupathi, W., & Raghupathi, V. (2014). Big data analytics in healthcare: promise and potential. *Health information science and systems*, 2, 1-10.
- [3] Krumholz, H. M., & Waldstreicher, J. (2016). The Yale Open Data Access (YODA) project--a mechanism for data sharing. *The New England journal of medicine*, 375(5), 403-405.
- [4] Taichman, D. B., Backus, J., Baethge, C., Bauchner, H., De Leeuw, P. W., Drazen, J. M., ... & Wu, S. (2016). Sharing clinical trial data: a proposal from the International Committee of Medical Journal Editors. *Annals of internal medicine*, 164(7), 505-506.
- [5] Longo, D. L., & Drazen, J. M. (2016). Data sharing. *New England Journal of Medicine*, 374(3), 276-277.
- [6] Fernandes, L. M., O'Connor, M., & Weaver, V. (2012). Big data, bigger outcomes. *Journal of AHIMA*, 83(10), 38-43.
- [7] Grozev, N., & Buyya, R. (2014). Inter-Cloud architectures and application brokering: taxonomy and survey. *Software: Practice and Experience*, 44(3), 369-390.
- [8] UNC (2013) Healthcare relies on "Analytics to better manage medical data and improve patient care" IBM.
- [9] Burghard, C. (2012). Big data and analytics key to accountable care success. *IDC health insights*, 1, 1-9.
- [10] Thilakanathan, D., Chen, S., Nepal, S., Calvo, R. A., Liu, D., & Zic, J. (2014, June). Secure multiparty data sharing in the cloud using hardware-based TPM devices. In *2014 IEEE 7th International Conference on Cloud Computing* (pp. 224-231). IEEE.
- [11] Yang, J. J., Li, J. Q., & Niu, Y. (2015). A hybrid solution for privacy preserving medical data sharing in the cloud environment. *Future Generation computer systems*, 43, 74-86.
- [12] Dong, X., Yu, J., Luo, Y., Chen, Y., Xue, G., & Li, M. (2014). Achieving an effective, scalable and privacy-preserving data sharing service in cloud computing. *Computers & security*, 42, 151-164.
- [13] Khezr, S., Moniruzzaman, M., Yassine, A., & Benlamri, R. (2019). Blockchain technology in healthcare: A comprehensive review and directions for future research. *Applied sciences*, 9(9), 1736.
- [14] Begoyan, A. (2007). An overview of interoperability standards for electronic health records. USA: society for design and process science.
- [15] Ying, Z., Wei, L., Li, Q., Liu, X., & Cui, J. (2018). A lightweight policy preserving EHR sharing scheme in the cloud. *IEEE Access*, 6, 53698-53708.
- [16] Azarm, M., Backman, C., Kuziemy, C., & Peyton, L. (2017). Breaking the healthcare interoperability barrier by empowering and engaging actors in the healthcare system. *Procedia computer science*, 113, 326-333.
- [17] Yue, X., Wang, H., Jin, D., Li, M., & Jiang, W. (2016). Healthcare data gateways: found healthcare intelligence on blockchain with novel privacy risk control. *Journal of medical systems*, 40, 1-8.
- [18] Fatokun, T., Nag, A., & Sharma, S. (2021). Towards a blockchain assisted patient owned system for electronic health records. *Electronics*, 10(5), 580.
- [19] Xia, Q., Sifah, E. B., Smahi, A., Amofa, S., & Zhang, X. (2017). BBDS: Blockchain-based data sharing for electronic medical records in cloud environments. *Information*, 8(2), 44.
- [20] Wang, H., & Song, Y. (2018). Secure cloud-based EHR system using attribute-based cryptosystem and blockchain. *Journal of medical systems*, 42(8), 152.
- [21] Ferdous, M. S., Margheri, A., Paci, F., Yang, M., & Sassone, V. (2017, June). Decentralised runtime monitoring for access control systems in cloud federations. In *2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)* (pp. 2632-2633). IEEE.
- [22] Ramani, V., Kumar, T., Bracken, A., Liyanage, M., & Ylianttila, M. (2018, December). Secure and efficient data accessibility in blockchain based healthcare systems. In *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)* (pp. 206-212). IEEE.
- [23] Azaria, A., Ekblaw, A., Vieira, T., & Lippman, A. (2016, August). Medrec: Using blockchain for medical data access and permission management. In *2016 2nd international conference on open and big data (OBD)* (pp. 25-30). IEEE.
- [24] Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. *Decentralized business review*, 21260.

Kuantum Devrelerinde Kapı ve Giriş Tespiti için YOLO Tabanlı Bir Yöntem

Reyhan YILMAZ¹, Orhan YAMAN^{2*}, Mehmet KARAKÖSE³

^{1,2} Adli Bilişim Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

³ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

¹ ryrehanyilmaz@gmail.com, ² orhanyaman@firat.edu.tr, ³ mkarakose@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 22/03/2023;

Kabul/Accepted: 12/06/2023)

Öz: Tersinir kuantum devreleri farklı türde ve sayıdaki kuantum kapıları kullanılarak oluşturulmaktadır. Kuantum devreleri oluşturulurken kullanılacak kapı sayısının optimize edilmesi maliyeti ve karmaşıklığı azaltmaktadır. Tersinir kuantum devrelerinde durum tablolarının elde edilmesi ve optimizasyonu için giriş sayısı, çıkış sayısı ve kapı sayılarının bilinmesi önemlidir. Ayrıca bu parametreler kuantum devrelerinde oluşabilecek arızaların tespit edilmesinde de kullanılmaktadır. Literatürde kuantum devreleri için giriş, çıkış ve kapı sayılarının tespitinde eksiklik vardır. Ayrıca, literatürde yapılan uygulamaların test edilebilmesi için sınırlı sayıdaki standart kuantum devreleri kullanılmaktadır. Bu kapsamda kullanılacak veri setlerinin çok az olduğu tespit edilmiştir. Literatürdeki bu eksikliklerin giderilmesi çalışmamızın amacını, önerilen yöntem ise çalışmamızın özgünlüğünü oluşturmaktadır. Bu çalışmada Yolo (You Only Look Once) tabanlı yöntemler kullanılarak kapı sayısı ve giriş sayısı tespit edilmiştir. "MATLAB" ve "RCViewer+" programları kullanılarak CNOT, Feynman ve Toffoli kapılarından oluşan büyük bir veri seti oluşturulmuştur. Bu çalışmada, 1-8 kapı sayısına ve 3-7 giriş sayısına sahip toplamda 5000 adet kuantum devre oluşturulmuştur. Elde edilen veri setleri üzerinde kapılar ve girişler etiketlenmiştir. Etiketlenen veri setleri üzerinde 80:20 eğitim ve test oranı ile YoloV4, YoloV7 ve YoloV7x yöntemleri uygulanmıştır. YoloV4, YoloV7 ve YoloV7x yöntemleri için sırasıyla %87.1, %89.7 ve %89.3 mAP hesaplanmıştır. Önerilen yöntem 2800 iterasyon çalıştırılmış ve en iyi sonuç YoloV7 algoritması ile elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kuantum, kuantum devresi, derin öğrenme, kapı tespiti, YoloV4, YoloV7.

A YOLO-Based Method for Detection of Gate and Input in Quantum Circuits

Abstract: Reversible quantum circuits are constructed using different types and numbers of quantum gates. Optimizing the number of gates to be used while creating quantum circuits reduces the cost and complexity. It is important to know the number of inputs, outputs, and gates for obtaining and optimizing state tables in reversible quantum circuits. In addition, these parameters are also used to detect faults that may occur in quantum circuits. There is a lack of determination of the input, output, and gate numbers for quantum circuits in the literature. In addition, a limited number of standard quantum circuits are used to test the applications made in the literature. It has been determined that there are very few datasets that can be used in this context. Elimination of these deficiencies in the literature constitutes the aim of our study, and the proposed method constitutes the originality of our study. In this study, the number of gates and inputs were determined by using Yolo (You Only Look Once) based methods. A large dataset consisting of CNOT, Feynman, and Toffoli gates was created using the "MATLAB" and "RCViewer+" programs. In this study, a total of 5000 quantum circuits with 1-8 gate numbers and 3-7 input numbers were created. Gates and inputs are labeled on the obtained datasets. YoloV4, YoloV7, and YoloV7x methods were applied to the tagged datasets with a training and testing ratio of 80:20. 87.1%, 89.7% and 89.3% mAP were calculated for the YoloV4, YoloV7 and YoloV7x methods, respectively. The proposed method was run for 2800 iterations and the best result was obtained with the YoloV7 algorithm.

Key words: Quantum, quantum circuit, deep learning, gate detection, YoloV4, YoloV7.

1. Giriş

Modern bilgisayarların gelişmesi ile birlikte çözülebilmesi zor veya zaman alabilen problemler çok daha hızlı bir şekilde çözülebilmektedir. Fakat daha hızlı çözülmesi gereken problemlerde klasik fizik ile açıklanan bu bilgisayarların yeterli gelmeyeceği bilinmektedir. Bu durumda kuantum fizik ile açıklanabilen kuantum bilgisayarlar ortaya çıkmıştır. Kuantum fizik ve klasik fizik birbirinden farklı iki çalışma alanıdır. Kuantum mekaniği ise klasik fiziğin bir alt kümesi olarak tanımlanabilir. Kuantum mekaniği, atomların, moleküllerin ve parçacıkların davranışlarını açıklamak için kullanılmaktadır. Klasik fizik makroskobik sistemlerin davranışlarını açıklarken kuantum mekaniği mikroskobik sistemlerin davranışlarını açıklamaktadır. Kuantum mekaniği,

* Sorumlu yazar: orhanyaman@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-5899-0957, ² 0000-0001-9623-2284, ³ 0000-0002-3276-3788

doğadaki bazı yönlerin rastgele olduğunu açıklamaktadır. Bir sistemin belirli özelliğinin ölçülebilmesi için o özelliğin belirli bir olasılık dağılımına sahip olduğunu belirtmektedir. Bu olasılık durumu dalga fonksiyonu olarak ifade edilmektedir [1]. Kuantum mekaniği alanındaki gelişmeler kuantum bilgisayarların ortaya çıkmasına katkı sağlamıştır. Kuantum bilgisayarlar henüz başlangıç aşamasında olsa bile, bu teknolojinin gelişmesi için birçok çalışma yapılmaktadır. Gelecekte kuantum teknolojisinin gelişmesi ile birlikte çok daha hızlı kuantum bilgisayarları ortaya çıkacaktır. Sınırlı teknolojiye sahip klasik bilgisayarların yerini kuantum bilgisayarların alması ön görülmektedir. Günümüzde kuantum bilgisayarlar için özel olarak tasarlanmış algoritmalar mevcuttur [2]. Genetik algoritmalar [3], Back Tracking algoritması [4], derin öğrenme [5], kenar çıkarım algoritması [6], ve sinyal işleme [7] gibi algoritmalar geliştirilmiştir.

Kuantum bilgisayarlar ile klasik bilgisayarların çalışma mimarisi ve programlanması aralarındaki temel farkı oluşturmaktadır. Klasik bilgisayarlarda çalışma mimarisi ve programlama "bit" denilen ikili sayı sistemine göre yapılmaktadır. Her bir bit 0 veya 1 değerini alabilmektedir [8–11]. Bu durum klasik fizik ile açıklanabilmektedir. Fakat kuantum bilgisayarların temeli "kubit" yapısına dayanmaktadır. Kubitlerin yapısı ve davranış şekilleri kuantum mekaniği ile açıklanmaktadır [8–11]. Klasik bilgisayar teknolojisinde her bir bit fiziksel olarak ya 0 yada 1 durumunda olabilir. Yani klasik bilgisayarların çalışma yapısında bir kesinlik söz konusudur. Kuantum bilgisayarlar ise nesnelere kuantum durumlarını örnek almaktadır. Kuantum teknolojisine göre bir kubit aynı anda ve farklı oranlarda hem 0 hem de 1 değeri alabilmektedir [12]. Bu duruma "süperpozisyon" denilmektedir. Ayrıca, kuantum bitler arasında karmaşık etkileşimler denilen belirli bir bağlantı türü kurulabilir. Bu, kuantum bilgisayarların geleneksel bilgisayarlardan farklı hesaplama ve veri işleme yeteneklerine sahip olmasını sağlamaktadır [5].

Kuantum bilgisayarda hesaplama işlemleri kubit denilen kuantum bitleri ile yapılmaktadır. Sıradan bir bilgisayarda veriler 0 veya 1 değeriyle depolanmaktadır. Üç bit ile 8 farklı veri kombinasyonu oluşturulabilir (000, 001, 010, vb.) ve klasik bilgisayar aynı anda bunlardan sadece biri üzerinde çalışabilir. Kubitler ise aynı anda hem 0 hem de 1 değerlerine sahip olabilir ve süperpozisyon denilen bu durumda, bilgisayar 8 veri kombinasyonu üzerinde aynı anda işlem yapabilmektedir. Kuantum bilgisayarlarda eklenen her bir kubit ile bilgi işlem gücü katlanarak artmaktadır. Araştırmacılara göre 300 kubitlik bir kuantum bilgisayar, aynı anda evrendeki atomlardan daha fazla hesaplama yapabileceği öngörülmektedir [13]. Tek kubitlik ve çok kubitlik kuantum kapıları ve sembolleri Tablo 1'de gösterilmiştir [12,14–16].

Kuantum bilgisayarda hesaplama işlemleri kubit denilen kuantum bitleri ile yapılmaktadır. Sıradan bir bilgisayarda veriler 0 veya 1 değeriyle depolanmaktadır. Üç bit ile 8 farklı veri kombinasyonu oluşturulabilir (000, 001, 010, vb.) ve klasik bilgisayar aynı anda bunlardan sadece biri üzerinde çalışabilir. Kubitler ise aynı anda hem 0 hem de 1 değerlerine sahip olabilir ve süperpozisyon denilen bu durumda, bilgisayar 8 veri kombinasyonu üzerinde aynı anda işlem yapabilmektedir. Kuantum bilgisayarlarda eklenen her bir kubit ile bilgi işlem gücü katlanarak artmaktadır. Araştırmacılara göre 300 kubitlik bir kuantum bilgisayar, aynı anda evrendeki atomlardan daha fazla hesaplama yapabileceği öngörülmektedir [13]. Tek kubitlik ve çok kubitlik kuantum kapıları ve sembolleri Tablo 1'de gösterilmiştir [12,14–16].

1.1. Kuantum Kapıların Programlanmasında Kullanılan Araçlar


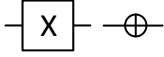






Herhangi bir kuantum devresi tasarlamak için temel tersinir kapılara, programlama bilgisine ve tasarım görüşüne ihtiyaç vardır. Kuantum bilgisayarlarında kubitleri tasarlamak ve hesaplamak için Qiskit (IBM), pyQuil (Google), ProjectQ (ETH), Revkit ve RCViewer + gibi simülatör araçları vardır [17].

- **Qiskit:** Kuantum devrelerinin sentezlenmesinde simülasyonunda kullanılan açık kaynaklı bir araçtır. Aynı zamanda, kuantum devre hata analizi olarak kullanılabilir. IBM tarafından geliştirilen bu araçta, standart kapılar, Boole mantık devreleri kapıları, birçok genelleştirilmiş kapı, birçok aritmetik devre, toplayıcı, karşılaştırıcı ve veri kodlama devreleri işlemler gerçekleştirilebilmektedir [17].
- **pyQuil:** python platformunu kullanarak kuantum programlama için geliştirilmiştir. Bu pyQuil aracı ile; kuantum kapıları ve işlemleri için program geliştirme, python'da quil programlarını derlemek ve simüle etmek ve bir kuantum işlemcisi gibi bir quil programı oluşturabilmektedir [17].
- **ProjectQ:** kuantum hesaplama devrelerini analiz etmek için geliştirilen açık kaynaklı bir araçtır [17]. Python'da kuantum programları aracılığıyla kuantum devresini sentezleyebilmektedir.
- **Revkit:** Tersinir devrelerin sentezi, optimizasyonu ve doğrulanmasında kullanılan açık kaynaklı bir araçtır [18].
- **RCViewer +:** Tersinir devrelerin tasarlanmasında ve parametre çıkarımında kullanılan bir araçtır. Bu

aracın avantajı, .tfc dosyamız varsa, .tfc dosyasını kullanarak kuantum devresini oluşturabilmektedir. Oluşturulan kuantum devreleri bitmap formatında kaydedilebilmektedir [18]. Ayrıca RCViewer+'da bir optimizasyon özelliği vardır. Optimizasyon özelliği sayesinde, bazı kuantum kapılarını ve optimal devre formunu birleştirebilmektedir. Optimal bir devrenin avantajı, performans parametrelerinin kuantum maliyeti gibi iyi olmasıdır. Daha az kuantum maliyetinin faydası, kuantum devrelerinde daha az sayıda kuantum kapısına ihtiyaç duymasındır [17].

Kuantum kapılarının tasarlanmasında kullanılan araçların özellikleri incelendiğinde veri seti oluşturmak için "RCViewer +" programı tercih edilmiştir. Bu programın tercih edilmesinin nedeni, veri seti oluştururken üretilen .tfc dosyalarının kuantum devrelerine dönüştürülebilmesidir. Aynı zamanda üretilen kuantum devrelerinin bitmap formatında görüntü olarak kaydedilebilmektedir.

Tablo 1. Tek kubitlik ve çok kubitlik kuantum kapılar [12,14–16].

	Kapı Adı	Sembolü	Açıklama
Tek kubitlik kuantum kapılar	Hadamard		Hadamard kapısı, kubitleri süperpozisyona sokmaktadır. Süperpozisyon, kuantum mekaniğindeki önemli bir kavramdır ve bir kubitin birden fazla durumda olabilmesine izin vermektedir.
	Pauli-X, NOT		Pauli X veya NOT kapısı olarak adlandırılan bu kuantum kapısı verilen kubit değerini tersine çeviren bir girişli ve bir çıkışlı kapıdır.
	Pauli-Y		Pauli Y kapısı, Pauli X kapısına benzer şekilde Bloch küresi üzerinde döndürme yapar. Pauli X kapısı X ekseninde döndürme yaparken Pauli Y kapısı ise Y ekseninde döndürme yapar.
	Pauli-Z		Pauli Z kapısı ise Bloch küresi üzerinde Z ekseninde döndürme işlemi yapmaktadır.
Çok kubitlik kuantum kapılar	CNOT (controlled-NOT) (2 kubit)		Kontrollü NOT kapısı 2 girişli ve 2 çıkışlı kubit bulunan terslenebilir bir kuantum kapısıdır. CNOT kapısında ilk kubit 1 olunca, ikinci kubit tersine çevrilmektedir.
	Swap (2 kubit)		2 girişli ve 2 çıkışlı bir kuantum kapısıdır. Swap kapısı girişindeki kubitleri yer değiştirmektedir.
	controlled-Z (2 kubit)		Kontrollü Z kapısı iki girişli ve bir çıkışlı kuantum kapısıdır. İlk kubit 1 olması durumunda hedef kubitte Z kapısı uygulanmaktadır.
	Toffoli (3 kubit)		3 girişli ve 3 çıkışlı bir kuantum kapısıdır. Toffoli kapısı, CNOT kapısına bir kontrol girişi daha eklenmesi ile oluşmaktadır. CCNOT kapısı olarak adlandırılabilir. İlk iki kubit 1 olması durumunda üçüncü kubit tersine çevrilmektedir.

Tablo 1'de verilen tek kubitlik ve çok kubitlik kuantum kapıları kullanılarak kuantum devreleri oluşturulmaktadır.

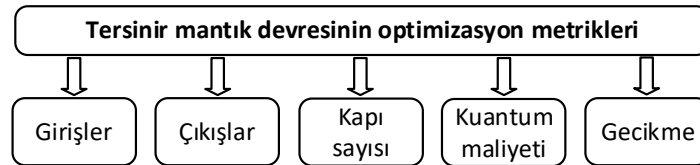
1.2. İlgili Çalışmalar

Kuantum devrelerinde oluşabilecek arıza modelleri için literatürde çalışmalar mevcuttur [5,19–24]. Kheirandish vd. [12] kuantum devrelerinde doğruluk ve geçerliliği sağlamak için arıza tespitinin önemli olduğunu vurgulamışlardır. Tersinebilir kuantum devrelerin test edilebilirliğini elde etmek için kuantum maliyeti ve hata kapsama oranı açısından geliştirilmiş iki teknik sunmuşlardır. Bu yönü göz önüne alındığında, bu tekniklerin ana odak noktası, arızaların %100 doğrulukla verimli bir şekilde tespit edilmesi ve konumlandırılmasıdır. Tersinebilir devre tasarımında arıza tespitine yönelik bu teknikler, doğru çıkışları üretebilmenin yanı sıra, hâlihazırda daha yüksek bir maliyetle yapılmış olan arıza yeri tespiti için de bilgi sağlayabilmektedir. Önerdikleri yaklaşım ile tüm SMGF, MMGF, PMGF, RGF ve SBF türleri için başarıyla test etmişlerdir. Önerilen şemanın işlevsel doğruluğunu sağlamak için tersinir bir tam toplayıcı devresi üzerinde de test etmişlerdir. Kheirandish vd. [15] herhangi bir flip-flops olmadan doğrudan geri besleme tekniğinin optimize edilmiş bir versiyonunu önermiştir ve sayaçlar ve kaydırma yazmaçları gibi birkaç tersinir devre tasarımı örneği üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Doğrudan teknikteki kısmi değişikliklerle, kuantum maliyetinin ve diğer maliyet ölçümlerinin iyileştirildiği gösterilmiştir. Aynı zamanda, düşük maliyetli tasarımına sahip tersinir paralelden seriye dönüştürücünün bazı verimli tasarımlarını da

sergilemiştir. Analiz ve karşılaştırma, önerilen tüm yeni tasarımların, kuantum maliyeti, T kapı sayısı ve devrenin T derinliği dâhil olmak üzere performans değişkenleri açısından mevcut çalışmaları optimize edildiğini göstermiştir. Handique vd. [16] NOT, CNOT, Toffoli kapıları (NCT kütüphanesi) ile tasarlanmış tersinir bir devrede köprüleme arızalarını tespit etmişlerdir. Kuantum devrelerindeki hataları tespit etmek için Otomatik Test Modeli Oluşturma (ATPG) yöntemi önermişlerdir. Deneysel sonuçların analizi, önerilen yöntemin %100 hata kapsamına sahip olduğunu ve test seti boyutunun mevcut yöntemlerden daha küçük olduğunu göstermişlerdir. Pathak vd. [17], Qiskit (IBM), pyQuil (Google), ProjectQ (ETH), Revkit ve RCViewer+ gibi süper pozisyon, dolaşıklık ve kuantum programlama araçları gibi kuantum özellikleri hakkında temel bilgiler sunmuşlardır. Kuantum devresini ve Toffoli, Fredkin, Peres gibi kapıların ayrıştırılmış devresini ve yeni hata toleranslarını hesaplamışlardır. Ayrıca, algoritmayı, doğrulamaya dayalı olarak genişletilmiş kuantum devresine dönüşüm kaskadı olarak önermişlerdir. Klasik bilgisayar kapıları ile kuantum kapılarının özelliklerini karşılaştırmışlardır. Literatürde kullanılan kuantum simülasyon araçları hakkında bilgi vermişlerdir.

Gaur vd. [19] tersine çevrilebilir mantık devrelerinde farklı arıza modellerinin tanımlanması için çeşitli test metodolojileri önermişlerdir. Çeşitli performans parametrelerine göre ölçeklendirmiştir. Tüm alanı verimli bir şekilde keşfederek optimuma yakın bir çözüm elde etmeyi amaçlayan literatürden arıza modellerine, performans parametrelerine ve çevrimdışı test yaklaşımlarına ilişkin toplu bilgileri getirmiştir. Makale, araştırmacılar tarafından bildirilen ve otomatik test modeli oluşturma (ATPG) ve test edilebilirlik için tasarım (DFT) metodolojileri olmak üzere iki geniş sınıflandırmada sunulan bir dizi test stratejisini eleştirel bir şekilde analiz etmiştir. Lukac vd. [25] kuantum devrelerinde oluşabilecek arıza modellerini açıklamıştır. Arıza türlerini; “Stuck-at”, “Delay”, “Missing Gate”, “Wrong Gate” ve “Bridging” arızaları olarak vermiştir. Perkowski vd. [26] kuantum devrelerinde arıza oluşturma ve arızaların konumlarının tespiti için bir çalışma yapmışlardır. Genel olarak standart devrelerin testinde kullanılan yöntemleri takip edilse de iki önemli fark vardır: (1) arızaları tespit etmek için hem deterministik hem de olasılıksal testleri kullanılmaktadır, (2) dâhili durumları belirlemek için özel ölçüm kapıları kullanılmaktadır. Olasılık bilgilerini içeren bir Hata Tablosu oluşturulur. Daha sonra standart devrelerde bilinenleri genelleştiren “olasılıksal küme kaplama” ve “olasılık uyarlanabilir ağaçlar” kullanılır [26]. Kızılırmak tez çalışmasında [27] kuantum hata düzeltme yöntemlerinin temelleri, işleyiş mekanizmaları ve bu mekanizmaların kuantum geçitler yoluyla hayata geçirilmesi ve kuantum devrelere uygulanması incelenmiştir.

Thakral vd. [28] tersine çevrilebilir (tersinir) mantık kapılarının kuantum maliyetini hesaplamak için RCViewer+aracı kullanarak kuantum uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Önerilen kuantum uygulama yöntemi, R kapısına uygulanmış ve kuantum maliyetini doğrulamak için RCViewer+ aracı kullanılarak test edilmiştir. Literatürde geliştirilen birçok kapının kuantum uygulaması ve ilgili kuantum maliyeti, literatürde hala bilinmemektedir. Kuantum devrelerinin geliştirilebilmesi için kuantum kapılarının maliyetinin bilinmesi önemlidir. Tersinir mantık devresinin optimizasyon metriklerini Şekil 1’de özetlemiştir [28].



Şekil 1. Thakral vd. [28] tarafından verilen tersinir mantık devresinin optimizasyon metrikleri.

Şekil 1’de görülebildiği gibi tersinir kuantum devrelerinin optimizasyonu için girişler, çıkışlar, kapı sayısı, kuantum maliyeti ve gecikme verileri önemlidir. Thakral vd. [28], kuantum devrelerinin maliyetini hesaplamışlardır. Kuantum maliyetini hesaplamak için RCViewer+ aracı kullanılarak Toffoli kapıları üzerinden uygulama yapmışlardır. Thakral vd. [18,29,30] tarafından kuantum devrelerinin optimizasyonu ve uygulamaları için birçok çalışma geliştirmişlerdir. Thabah vd. [31] tersinir ikili kodlu ondalık toplayıcıyı tasarlamak için bir yaklaşım önerilmişlerdir. Paralel uygulama ile kapıların uygun seçimi ve düzenlemeleri, önerilen tasarımın tersine çevrilebilir performans parametrelerinde iyileştirmeler göstermesini sağlamışlardır. Önerdikleri tasarım, literatürde bulunan mevcut emsallerine kıyasla kuantum maliyetinde en az %10 iyileştirme ile en verimli tasarımı göstermektedir. Ayrıca önerilen tasarım, RCViewer+ aracı kullanılarak kuantum devre ile test etmişlerdir. Kamaraj vd. [32] temel tersinir kapılar ve bazı mevcut kapılar için fonksiyonel kuantum kapıları ve Kontrollü-V ve V + kapı yapısı kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Kuantum devresinin kubit kapısı indirgeme prosedürü kullanılarak, fonksiyonel ifadenin kuantum maliyeti ve ilkel kapılarının sayılarını çıkarmışlardır. Kuantum maliyeti, kapı sayısı, çıkışlar ve girişler sentezlendikten sonra optimize edilmemiş devre ile karşılaştırmışlardır. Kuantum devresi ve kontrollü V ve V+ yapısı, .tfc (“Toffoli-Fredkin Cascade”) kodu kullanılarak RCViewer+

aracında gerçekleştirmişlerdir. Sultana v.d. [33] dört giriş ve dört çıkışa sahip Toffoli kapılar kullanarak örnek kuantum devreler üzerinde optimizasyon geliştirmiştir. 16 adet kuantum devresi üzerinde optimizasyon işlemi yaparak kuantum maliyeti, kapı sayıları ve iki kubitli kapı sayıları hesaplanmıştır. Bu parametreler optimizasyon sonucu ile karşılaştırılmış ve karmaşıklıkları verilmiştir. Kalantari vd. [34] tersinir senkron sıralı devrelerin doğrudan ve kompakt bir tasarım önermişlerdir. Ardışık mantık devrelerinin kuantum maliyetini azaltmak için EXOR of Products of EXOR (EPOE) ifadelerini uygulamışlardır. Durum makineleri, sayaçlar ve kaydırma yazmaçları gibi bazı pratik sıralı devreler için tasarımları sunmuşlardır. Önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için, pratik bir sıralı sistem tasarlamak için tersinebilir kuantum kapılar ve kendi kendini kontrol eden toplayıcılar tasarlamışlardır. Tasarımları performans maliyeti faktörlerini önemli ölçüde azaltmıştır.

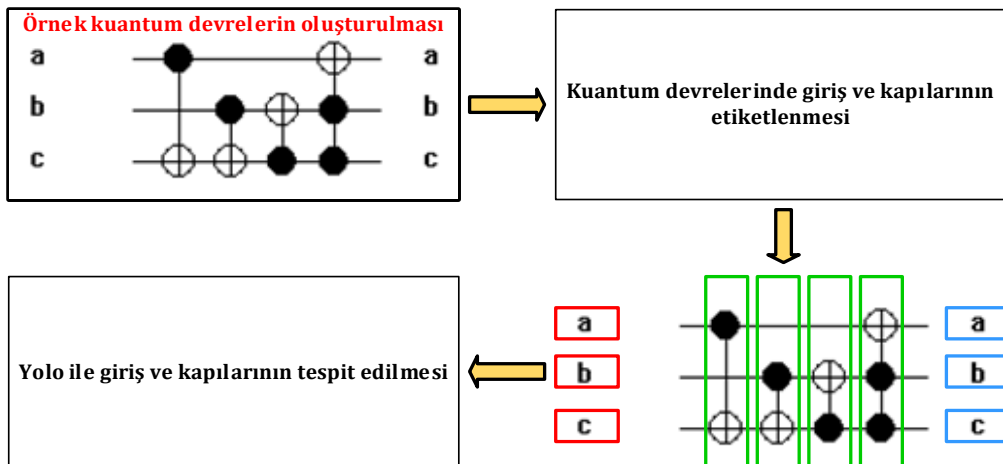
Literatürdeki güncel çalışmalar incelendiğinde, genellikle kuantum devrelerinde arıza tespiti, doğruluk tablolarının oluşturulması ve optimizasyon için yöntemler geliştirilmiştir. Kuantum devrelerinde kapı arızaları, doğruluk tablolarının oluşturulması ve optimum devrelerin üretilmesi için giriş sayıları, çıkış sayıları, kapı sayıları ve maliyetinin hesaplanabilir olması gerekmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda sınırlı sayıda kuantum devreleri kullanılmıştır. Literatürde kuantum devrelerinin sınırlı olması veya bu alanda büyük veri setlerinin olmaması çalışmaları kısıtlamaktadır.

1.3. Motivasyon

Literatürde tersinir kuantum devreleri ile ilgili yapılan çalışmalarda, kuantum devrelerinin optimizasyonu için giriş, çıkış ve kapı sayılarının bilinmesinin önemli olduğu görülmektedir [28]. Kuantum devrelerinde giriş, çıkış ve kapı sayılarının otomatik olarak tespit edilebilmesi için literatürde eksiklik olduğu tespit edilmiştir. Literatürdeki bu eksiklik çalışmamızın ana motivasyonunu oluşturmuştur. Aynı zamanda literatürdeki yapılan çalışmalar incelendiğinde, yapılan uygulamaların test edilebilmesi için sınırlı sayıdaki standart kuantum devreleri kullanılmaktadır. Bu kapsamda kullanılacak veri setlerinin çok az olduğu tespit edilmiştir. Kuantum kapıları ile ilgili yapılacak çalışmalarda kullanılacak veri setlerinin yetersiz olması çalışmamızın bir diğer motivasyonudur. Bu çalışmada, CNOT, Feynman ve Toffoli kapılarından oluşan büyük bir veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan veri setine ait hem “.tfc” dosyaları hem de “.bmp” görüntüleri mevcuttur. Kuantum devrelerine ait “.bmp” görüntüleri üzerinden giriş ve kapı sayılarının hızlı ve yüksek doğruluk ile tespit edilebilmesi çalışmamızın diğer motivasyonudur. Bu çalışmada CNOT, Feynman ve Toffoli kapılarından oluşan veri seti için YOLO tabanlı bir yöntem önerilmiştir.

2. Materyal Metot

Bu çalışmada (1-8) kapılı kuantum devreler oluşturulmuştur. Bu devreleri bilgisayar ortamında MATLAB ve “RCViewer+” programları kullanılmış ve 5000 tane farklı giriş ve kapı sayısına sahip kuantum devreleri üretilmiştir. Bu veri setlerini oluşturmamızdaki amaç bu devrelerin giriş-çıkış devre kapı sayılarını öğrenip bu veri setinin durum tablosunu çıkarmak ve istediğimiz durum tablosuyla hatalı devredeki durum tablosunu karşılaştırıp bu devrede hata olup olmadığını tespit edebilmektir. Bu çalışmada önerilen yöntemin grafiksel özeti Şekil 2’de gösterilmiştir.

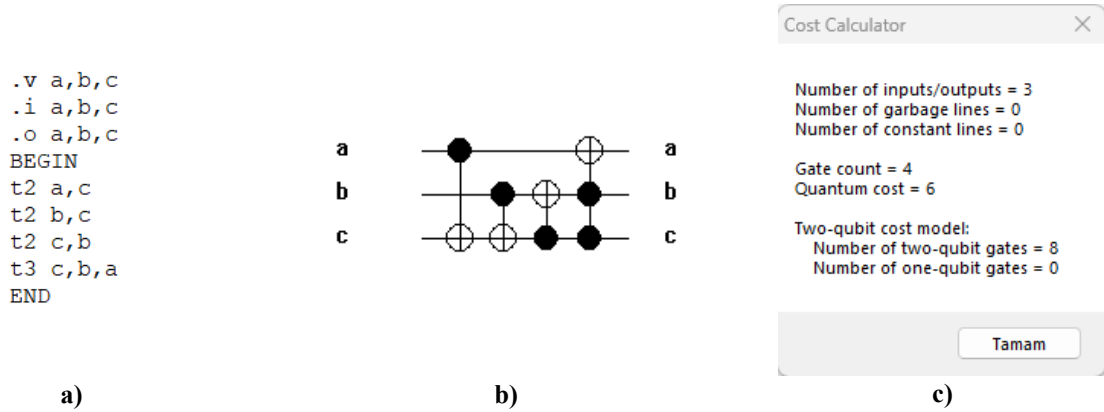


Şekil 2. Kuantum devre ve giriş sayılarının tespiti için önerilen yöntemin grafiksel özeti.

Şekil 2’de görülebileceği gibi ilk olarak klasik bilgisayarlar üzerine kurulan “RCViewer+” kuantum simülatörleri kullanılarak veri seti toplanması amaçlanmıştır. Toplanan veri seti üzerinde giriş ve kapı elemanlarının tespiti için Yolo algoritması kullanılmıştır.

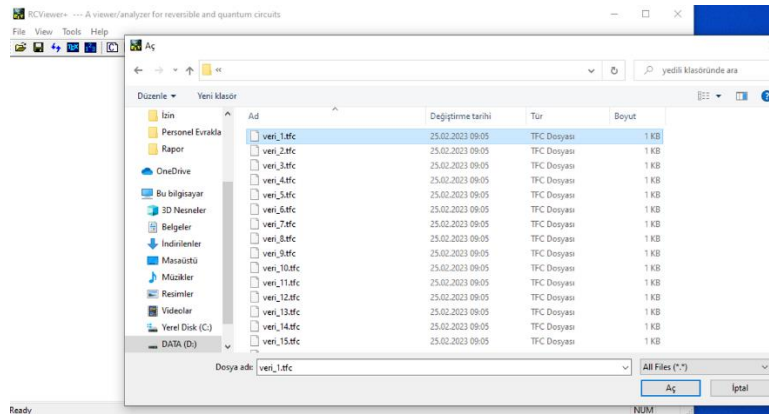
2.1. Veri Seti

Önerilen yöntemde ilk aşama olarak örnek kuantum devreleri oluşturulmuştur. Kuantum devreleri oluşturulurken MATLAB programı kullanılmış ve paket program geliştirilmiştir. Bu paket programında “.tfc” dosyaları oluşturulmuştur. “RCViewer+” kuantum simülatörleri kullanılarak “.tfc” dosyaları kuantum devrelerine dönüştürülmüştür. Şekil 3’te 3 girişli/çıkışlı ve dört kapılı örnek kuantum devresine ait kaynak kod (.tfc dosyası) ve kuantum devresi verilmiştir.



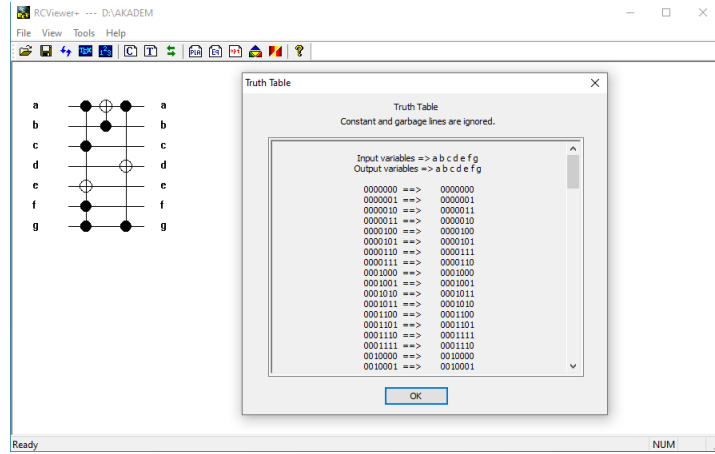
Şekil 3. Veri setinin toplanmasında kullanılacak örnek kuantum devresi; a) kaynak kod, b) kuantum devresinin devre şeması c) Kuantum devresine ait maliyet bilgileri.

Veri setinin toplanması aşamasında öncelikle Şekil 3.a’da verilen “.tfc” dosyası oluşturulmuştur. 3-7 girişli/çıkışlı ve farklı kapı sayılarına sahip 5000 “.tfc” dosyası elde edilmiştir. Bu “.tfc” dosyaları örnek kuantum devresinin kaynak kodunu oluşturmaktadır. “.tfc” dosyalarını oluşturmak için MATLAB 2020A programı kullanılarak bir paket program geliştirilmiştir. “RCViewer+” programı ile “.tfc” dosyalarının açılması Şekil 4’te görülmektedir.



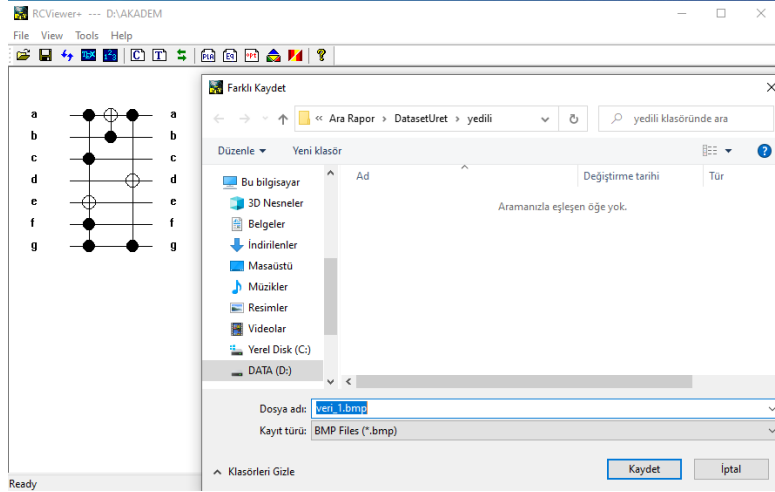
Şekil 4. “RCViewer+” programı ile “.tfc” dosyalarının açılması.

Şekil 4’te görüldüğü gibi “RCViewer” programı “.tfc” dosyalarını desteklemektedir. Girilen “.tfc” dosyalarını kullanarak kuantum devrelerini şekilleri elde edilebilmektedir. Aynı zamanda oluşturulan kuantum devrelerin doğruluk tabloları da oluşturulabilmektedir. Şekil 5’te örnek “.tfc” dosyasından elde edilen kuantum devre şeması ve doğruluk tablosu verilmiştir.



Şekil 5. Örnek “.tfc” dosyasından elde edilen kuantum devre şeması ve doğruluk tablosu.

Şekil 5’te oluşturulan kuantum devre şemaları “.bmp” formatında resim olarak kaydedilebilmektedir. “RCViewer+” programı ile örnek kuantum şemasının “.bmp” formatında kaydedilmesi Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. “RCViewer” programı ile örnek kuantum şemasının “.bmp” formatında kaydedilmesi.

Bu çalışmada verilen örnek kuantum devre oluşturma adımları ile 5000 adet kapı ve giriş devrelerine sahip “.tfc” dosyası için tekrarlanarak veri seti oluşturulmuştur. Kapı sayılarına göre oluşturulan veri setine ait kuantum örnek devre görüntüleri Şekil 7’de verilmiştir.

Şekil 7 ve Şekil 8’de verilen örnek devrelerden oluşan veri setleri Şekil 9’daki gibi etiketlenmiştir. Etiketleme adımı için “labelImg” programı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında toplanan 5000 adet örnek kuantum devresi manuel olarak etiketlenmiştir.

Önerilen yöntemde toplanan veri seti eğitim ve test olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Veri setinin %80’i eğitim ve %20’si test verisi olacak belirlenmiştir. Şekil 9’da görülebileceği gibi görüntü içerisindeki ilgili alan bir çerçeve içerisinde alınıp, “kapı” ve “giriş” olmak üzere iki farklı sınıf olarak etiketleri oluşturulmuştur.

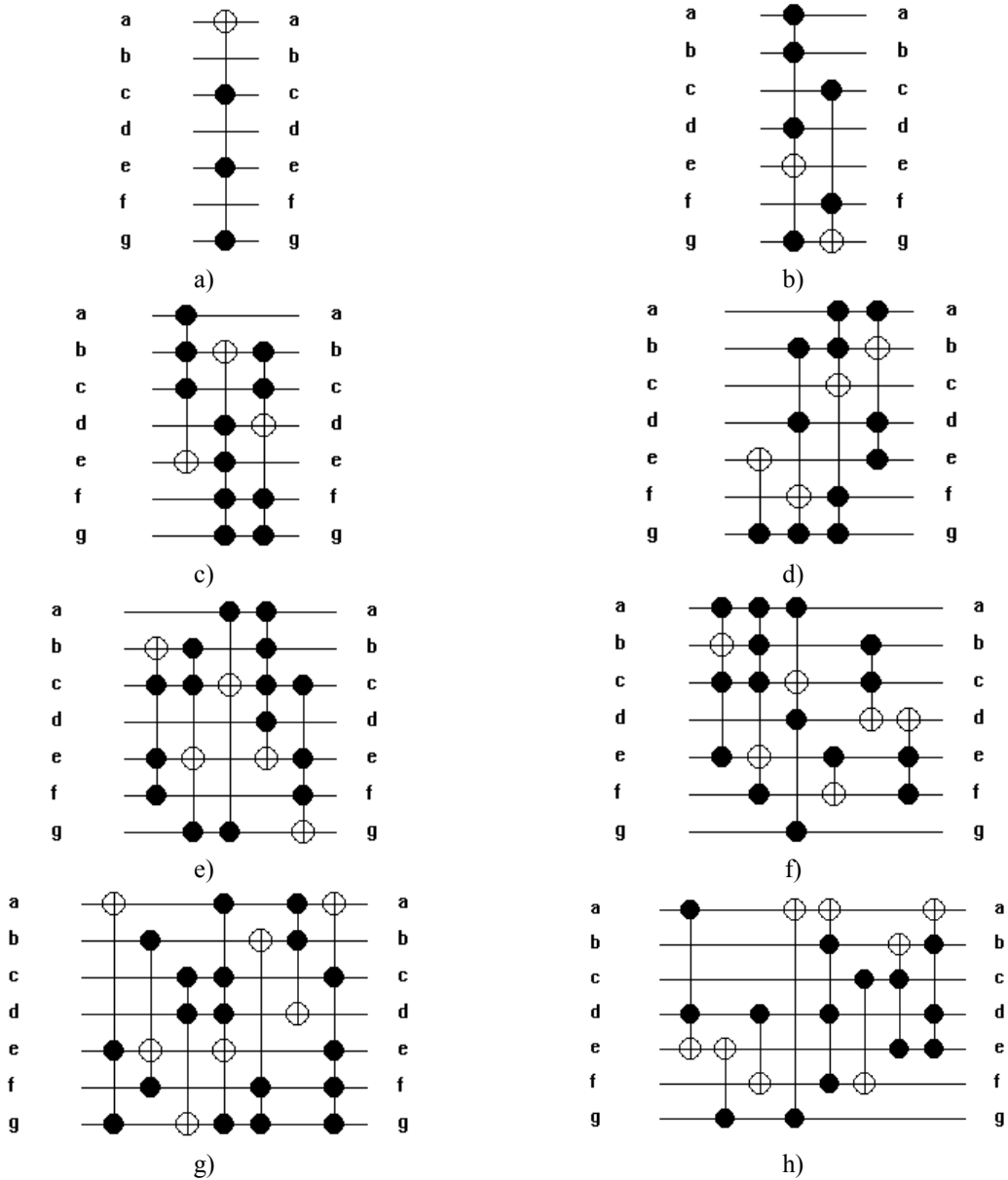
Her kuantum devresi için bir “.txt” dosyası oluşturulmaktadır. Bu dosyalarda kapı ve girişlerin x ve y koordinatlarının yükseklik ve genişliğini içeren veriler bulunmaktadır. Bu işlem veri setindeki tüm kuantum devreler için tekrarlanmış ve etiketli bir veri seti oluşturulmuştur. Etiketlenen görüntülerin eğitilmesi için Yolo algoritması kullanılmıştır. Yolo (You Only Look Once) algoritması modeli yüksek işleme hızından dolayı daha net sonuçlar vermektedir [35–37].

Yolo algoritmasının yaygın kullanılmasının sebebi, bu algoritmanın nesne tespitini oldukça hızlı bir şekilde ve tek seferde yapabiliyor olmasıdır. Yolo algoritmasının diğer algoritmalarından daha hızlı olmasının sebebi resmin

tamamını tek seferde nöral bir ağdan geçiriyor olmasıdır. Yolo algoritması görüntüler üzerinde tespit ettiği nesnelerin çevresini "bounding box" ile çerçevelemektedir.

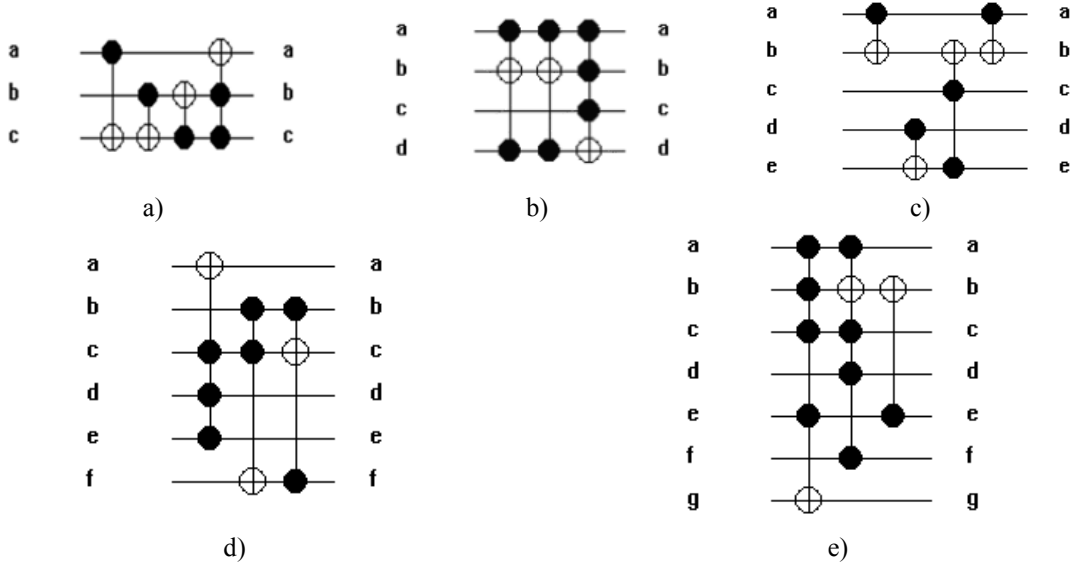
Yolo kendisine girdi olarak verilen görüntüyü $N \times N$ ızgaralara bölmektedir. Bu ızgaralar 5×5 , 9×9 , 17×17 olabilir. Her ızgara kendi içerisinde nesne olup olmadığını ve nesne var olduğunu düşünüyorsa merkez noktasının kendi alanında olup olmadığını düşünür. Nesnenin Merkez noktasına sahip olduğuna karar veren ızgara o nesnenin sınıfını, yüksekliğini ve genişliğini bulup o nesnenin çevresine bounding box çizmektedir.

Birden fazla ızgara, nesnenin kendi içerisinde olduğunu düşünebilir. Bu durumda ekranda gereksiz bounding boxlar oluşur. Bütün bounding boxların güven skoru vardır. Non-max Suppression algoritması görüntü üzerinde tespit edilen nesneler için çizilen bounding boxlardan güven değeri en yüksek olanı ekrana çizer. YOLO algoritmasının tercih edilme sebebi gerçek zamanlı nesne takibi yapabilen mAP(ortalama hassasiyet) değeri en ideal algoritma olmasıdır.

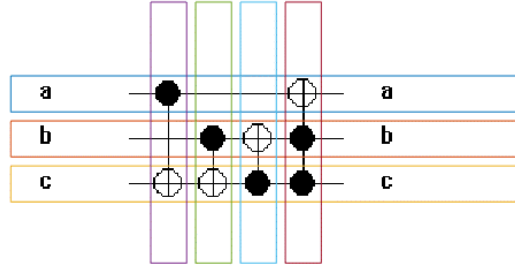


Şekil 7. Kapı sayılarına göre oluşturulan veri setine ait kuantum örnek devre görüntüleri; a) 1 Kapılı kuantum devresi, b) 2 Kapılı kuantum devresi, c) 3 Kapılı kuantum devresi, d) 4 Kapılı kuantum devresi, e) 5 Kapılı kuantum devresi, f) 6 Kapılı kuantum devresi, g) 7 Kapılı kuantum devresi, h) 8 Kapılı kuantum devresi.

Giriş sayılarına göre oluşturulan veri setine ait kuantum örnek devre görüntüleri Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Farklı giriş sayısına sahip örnek kuantum devreleri a) 3 giriş sayısına sahip kuantum devresi, b) 4 giriş sayısına sahip kuantum devresi, c) 5 giriş sayısına sahip kuantum devresi, d) 6 giriş sayısına sahip kuantum devresi, e) 7 giriş sayısına sahip kuantum devresi.



Şekil 9. Etiketlenmiş veri seti

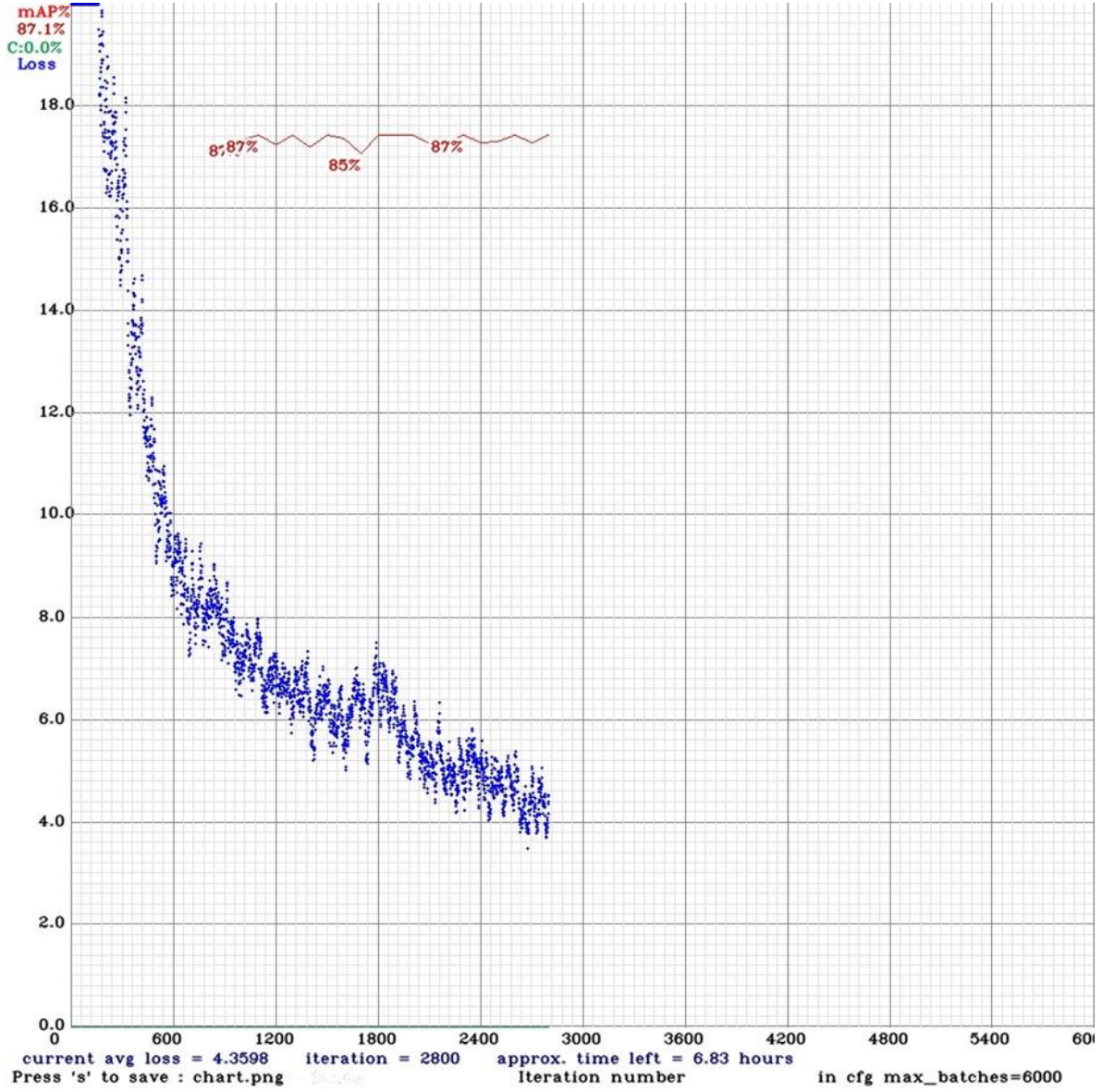
3. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada veri setinin toplanması için üretilen “.tfc” dosyaları MATLAB programında geliştirilmiştir. Üretilen “.tfc” dosyaları “RCViewer+” programında açılmış ve ortaya çıkan kuantum devre “.bmp” olarak kaydedilmiştir. Bu işlem 5000 adet örnek kuantum devre için tekrarlanmıştır. Veri seti etiketleme adımından sonra Python ile Yolo uygulama sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmada, uygulamalar geliştirmek için Pycharm ve Visual Studio kullanılmıştır. Python için Pycharm ve Visual Studio arayüzü kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada kullanılan kütüphaneler, paketler ve donanım özellikleri Tablo 2’de listelenmiştir.

Tablo 2. Bu çalışmada kullanılan kütüphaneler ve donanımların özellikleri

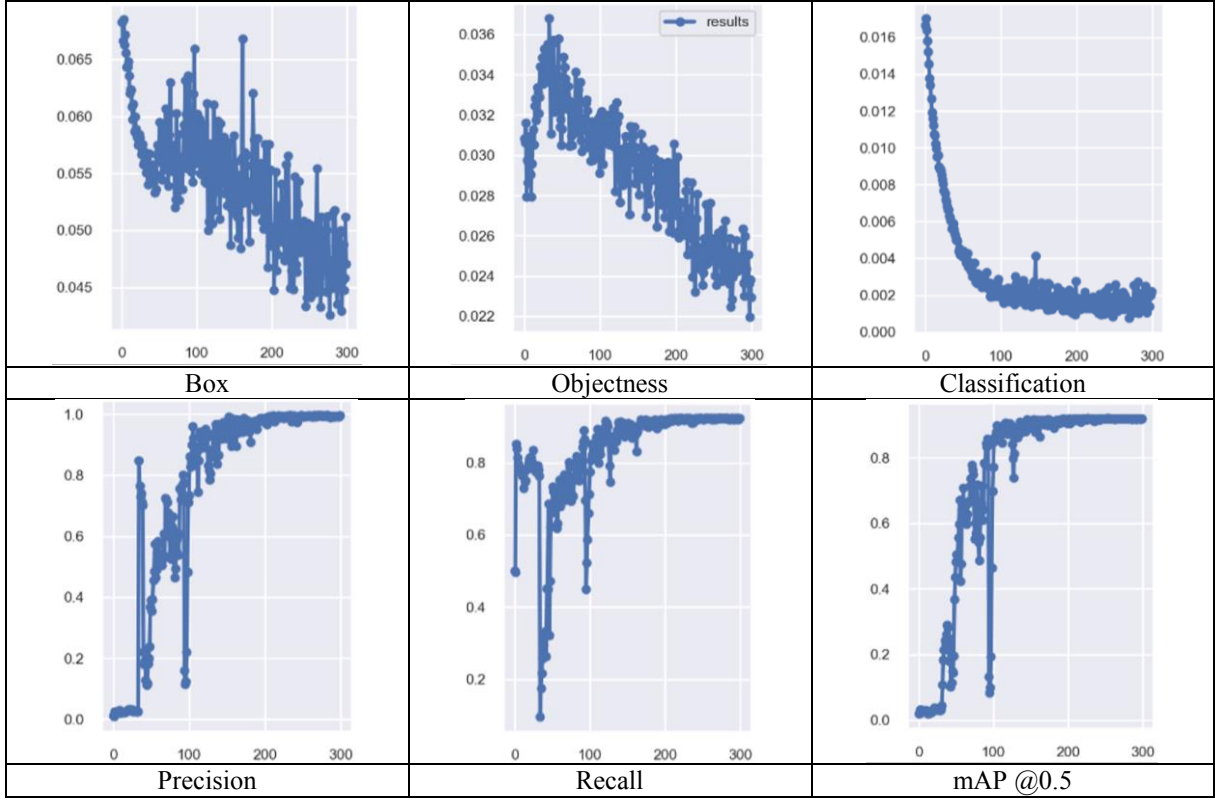
Yazılım ve Kütüphaneler	Değerler
Python	3.11.2
OpenCv	4.7.0
Numpy	1.24.2
PyCharm	2022.3.2
Visual Studio	1.76.0
System	AMD Ryzen 7
CPU	4.3 GHz

Bu çalışmada toplanan veri seti için YoloV4, YoloV7 ve YoloV7x uygulanmış ve performans sonuçları hesaplanmıştır. YoloV4 algoritmasının performans sonuçları Şekil 10'da gösterilmiştir.

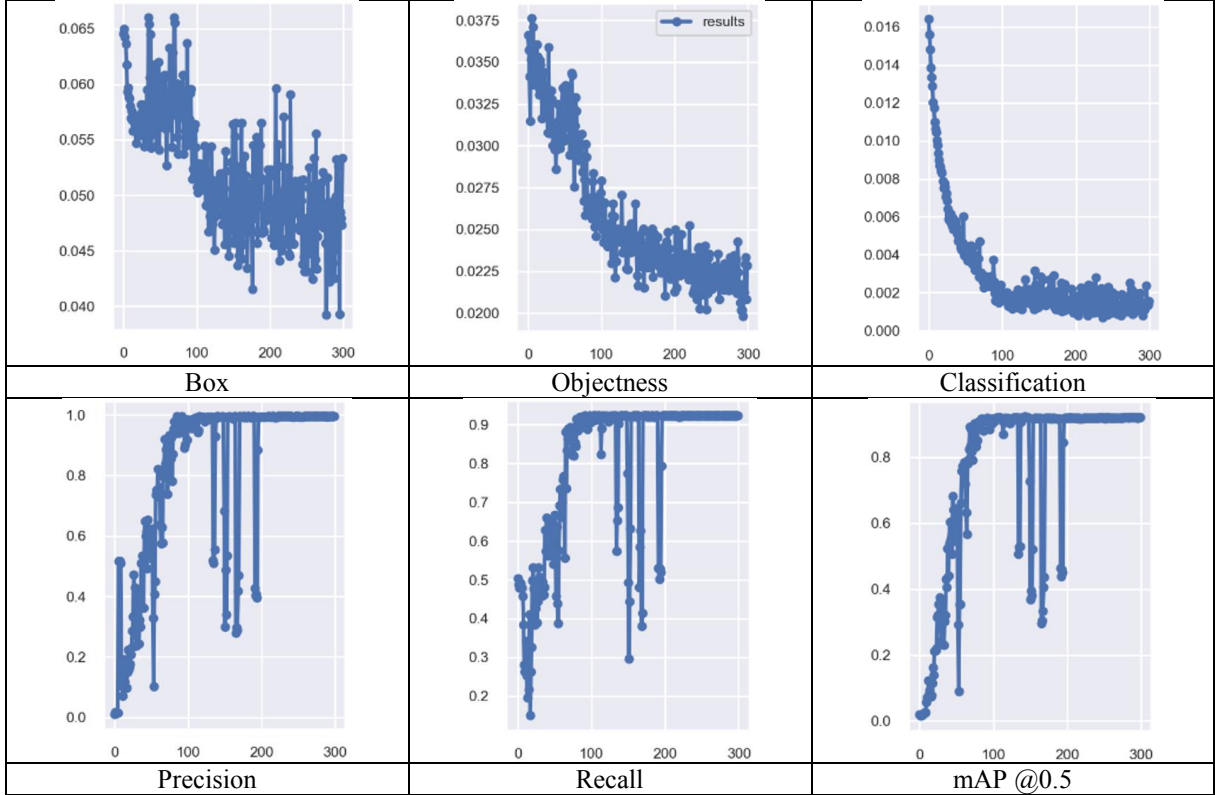


Şekil 10. YoloV4 yöntemin 80:20 mAP ve Loss grafikleri

Şekil 10'da görülebildiği gibi YoloV4 algoritması 2800 iterasyon çalıştırılmıştır. 5000 kuantum devre görüntüsü için YoloV4 algoritmasının çalıştırılması yaklaşık 6.83 saat hesaplanmıştır. Ayrıca avg loss değeri 4.3598 ve mAP değeri %87.1 olarak elde edilmiştir. Önerilen yöntemin sonuçlarını karşılaştırmak için YoloV7 ve YoloV7x sonuçları hesaplanmıştır. YoloV4 algoritması YoloV3 algoritmasının gelişmiş bir versiyonudur. Bu algoritma YoloV3 algoritmasına göre performans ve doğruluğu arttırmak için yenilik içermektedir. YoloV7 algoritması ise, Yolo mimarisine kıyasla daha hafif bir versiyondur. Özellikle model eğitiminin hızlı olması için daha basit bir optimizasyon yöntemi kullanılmaktadır. YoloV7 algoritması daha küçük boyuttaki görüntülerde ve daha az parametre ile çalışan hafif bir modeldir. Önerilen yöntemde YoloV4'ün yanı sıra YoloV7 ve YoloV7x uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir. 300 iterasyon boyunca YoloV7 ve YoloV7x için elde edilen grafikler Şekil 11 ve Şekil 12'de sunulmuştur.

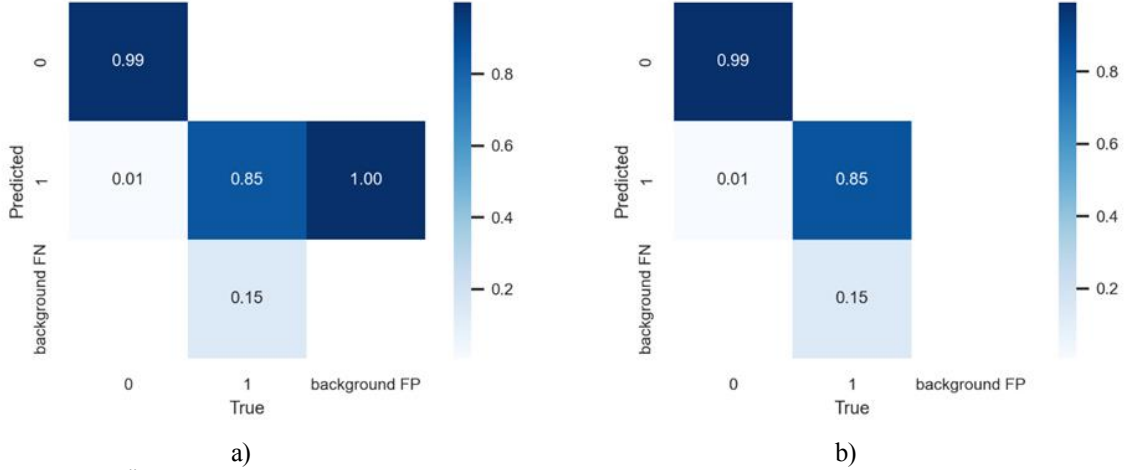


Şekil 11. YoloV7 yöntemin performans grafikleri



Şekil 12. YoloV7x yöntemin 80:20 performans grafikleri

Şekil 11 ve Şekil 12’de sırasıyla YoloV7 ve YoloV7x algoritmalarının Box, Objectness, Classification, Precision, Recall, ve mAP sonuçları hesaplanmıştır. Önerilen yönteme ait Confusion Matrix (Hata Matrisi) değerleri Şekil 13’te sunulmuştur. Önerilen yöntemin performans sonuçları Tablo 3’ te gösterilmiştir.

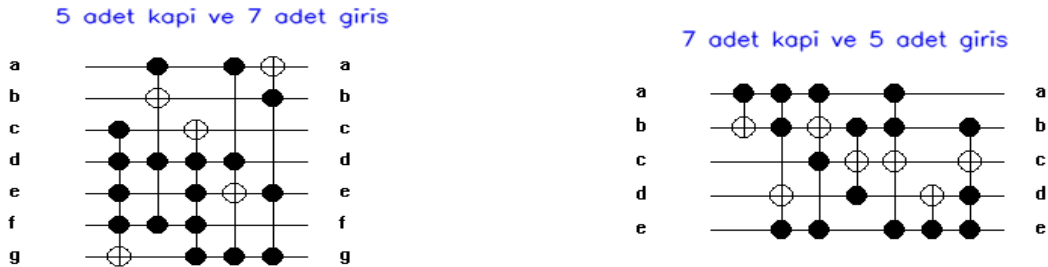


Şekil 13. Önerilen yönteme ait Confusion Matrix (80:20) sonuçları a) YoloV7 sonuçları b) YoloV7x sonuçları

Tablo 3. Uygulanan Yolo algoritmalarının performans sonuçları

Yolo Modelleri	Parametreler	Sonuçlar (80:20)
YoloV4	mAP	%87.1
	Ortalama loss	4.3588
	İterasyon	2800
	Zaman	6.83 saat
YoloV7	mAP	%89.7
	Ortalama loss	0.04706
	İterasyon	300
	Zaman	1.30
YoloV7x	mAP	%89.3
	Ortalama loss	0.05334
	İterasyon	300
	Zaman	1.30

Tablo 3’te görülebileceği gibi 80:20 eğitim test verisi sonuçlarında YoloV4 için %87.1 mAP , YoloV7 için %89.7, YoloV7x için %89.3 olarak hesaplanmıştır. Şekil 14’te örnek test sonuçlarına ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 14. Test edilmiş devreler

Deneysel sonuçlarda görülebildiği gibi YoloV7 algoritması için %89.7 mAP ve 0.04706 ortalama loss değeri hesaplanmıştır. Tablo 3’de ki sonuçlar incelendiğinde önerilen YoloV7 modelinin kuantum kapı ve giriş tespiti için başarılı olduğu görülmektedir. Tespit edilen kapı ve giriş tespitleri sayesinde kuantum devrelerin analizi, durum tablolarının elde edilmesi, kuantum devrelerinde optimizasyon ve arıza tespiti işlemlerine öncülük edecektir. Bu çalışmanın ana katkısı “MATLAB” ve “RCViewer+” programları kullanılarak CNOT, Feynman ve Toffoli kapılarından oluşan büyük bir veri seti elde edilmesidir. Aynı zamanda kuantum alanında yapılabilecek birçok çalışma için ön çalışma niteliğindedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada kuantum devrelerin kapı ve giriş sayılarının tespiti için Yolo algoritması uygulanmıştır. Çalışma kapsamında 5000 adet farklı giriş ve kapı sayılarına sahip kuantum devreleri üretilmiştir. Üretilen kuantum devrelerindeki kapı ve girişler etiketlenerek veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti üzerinde YoloV4, YoloV7 ve YoloV7x algoritmaları uygulanarak sırasıyla %87.1, %89.7 ve %89.3 mAP sonuçlar elde edilmiştir. Önerilen yöntem ile bir kuantum devresindeki kapı ve girişler tespit edilebilmektedir. Böylece kuantum devresindeki durum tablosu elde edilebilecektir. Gelecek çalışmalarda mevcut veri seti üzerinde her kuantum devresinin durum tabloları elde edilecektir. Kuantum devreleri üzerinde yapay arızalar oluşturularak durum tabloları mevcut durum tabloları ile karşılaştırılacak ve arıza tespiti için yeni yöntemler geliştirilecektir. Literatürde yapılan çalışmalar genellikle kuantum devreler kullanılarak algoritma tasarımı yapılabilmektedir. Bu çalışmada ise yeni bir veri seti toplanarak literatüre katkı sağlanmıştır. Ayrıca kuantum devrelerindeki devre elemanlarının analizi için kapı ve giriş sayıları elde edilmiştir. Önerilen yöntemin kuantum alanında yapılan özgün bir çalışma olduğu ve bu çalışmanın gelecek çalışmalara katkı sağlayacağı ön görülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma TUBİTAK tarafından desteklenmiştir. Proje No: 121E439. M.K. fikir sahibi, O.Y. ve M.K. veri setini oluşturdu, R.Y. uygulamayı gerçekleştirdi, M.K. sonuçları yorumladı, R.Y. ve O.Y. makaleyi yazdı.

Kaynaklar

- [1] Zeilinger A. Experiment and the foundations of quantum physics. *Rev Mod Phys* 1999;71.
- [2] Yetis H, Karakose M. Optimization of Mass Customization Process using. *IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, 2020.
- [3] Kubodera M, Awai H. Automatic Quantum Circuit Generator by Genetic Programming and Three-qubit Superdense Coding to Transmit Three Classical Bit Codes n.d.
- [4] Khalfaoi K, Boudjedaa T, Kerkouche EH. Automatic design of quantum circuits: Generation of quantum teleportation protocols. *Quantum Inf Process* 2021;20:283. <https://doi.org/10.1007/s11128-021-03208-8>.
- [5] Yetiş H, Karaköse M. A New Framework Containing Convolution and Pooling Circuits for Image Processing and Deep Learning Applications with Quantum Computing Implementation. *TS* 2022;39:501–12. <https://doi.org/10.18280/ts.390212>.
- [6] Yuan S, Venegas-Andraca SE, Wang Y, Luo Y, Mao X. Quantum Image Edge Detection Algorithm. *Int J Theor Phys* 2019;58:2823–33. <https://doi.org/10.1007/s10773-019-04166-9>.
- [7] Nagamani AN, Prasad HV, Hathwar RS, Agrawal VK. Design of optimized reversible multiplier for high speed DSP application. 2015 10th International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS), Singapore: IEEE; 2015, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICICS.2015.7459869>.
- [8] Steane A. Quantum Computing. *Rep Prog Phys* 1998;61:117–73. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/61/2/002>.
- [9] Shor PW. Fault-Tolerant Quantum Computation n.d.
- [10] Short PW. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer 2023.
- [11] Shor PW. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring 2002:124–34. <https://doi.org/10.1109/sfcs.1994.365700>.
- [12] Kheirandish D, Haghparast M, Reshadi M, Hosseinzadeh M. Efficient techniques for fault detection and location of multiple controlled Toffoli-based reversible circuit. *Quantum Information Processing* 2021;20:1–31. <https://doi.org/10.1007/s11128-021-03292-w>.
- [13] Kuantum bilgisayar nedir, nasıl çalışır ve nasıl yapılır? 2019.
- [14] Mohammed FMA. Yüksek Performanslı Kuantum Hesaplama Simülasyonları. Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2019.
- [15] Kheirandish D, Haghparast M, Reshadi M, Hosseinzadeh M. Efficient designs of reversible sequential circuits. *J Supercomput* 2021;77:13828–62. <https://doi.org/10.1007/s11227-021-03735-2>.

- [16] Handique M, Biswas S, Deka JK. Test Generation for Bridging Faults in Reversible Circuits Using Path-Level Expressions. *J Electron Test* 2019;35:441–57. <https://doi.org/10.1007/s10836-019-05811-1>.
- [17] Pathak N, Misra NK, Bhoi BK, Kumar S. Concept and Algorithm of Quantum Computing During Pandemic Situation of COVID-19. In: Somani AK, Mundra A, Doss R, Bhattacharya S, editors. *Smart Systems: Innovations in Computing*, vol. 235, Singapore: Springer Singapore; 2022, p. 523–35. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2877-1_48.
- [18] Thakral S, Bansal D. A Quick Guide to Implement Reversible Logic. 2018 4th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA), Greater Noida, India: IEEE; 2018, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/CCAA.2018.8777469>.
- [19] Gaur HM, Singh AK, Ghanekar U. Offline Testing of Reversible Logic Circuits: An Analysis. *Integration* 2018;62:50–67. <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2018.01.004>.
- [20] Hüseyin Ulucan. Süperiletken kubitli kuantum bilgisayarlar ve kuantum hesaplama. İstanbul Gelişim Üniversitesi, 2017.
- [21] Yetiş H, Karaköse M. The Usage of Quantum Computer and Computing for High Performance in Machine Learning Methods. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri Ve Mühendisliği Dergisi* 2021;47–56.
- [22] Soeken M, Frehse S, Wille R, Drechsler R. Revkit: A toolkit for reversible circuit design. *Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing* 2012;18:55–65.
- [23] Yetiş H, Karaköse M. Binary Pooling Circuits for Quantum Computing. 2021 International Conference on Decision Aid Sciences and Application, DASA 2021 2021:161–4. <https://doi.org/10.1109/DASA53625.2021.9682243>.
- [24] Susam Ö, Altun M. An efficient algorithm to synthesize quantum circuits and optimization. 2014 21st IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, ICECS 2014 2014:570–3. <https://doi.org/10.1109/ICECS.2014.7050049>.
- [25] Lukac M, Kameyama M, Perkowski M, Kerntopf P, Moraga C. Fault Models in Reversible and Quantum Circuits 2017:475–93. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33924-5_19.
- [26] Perkowski M, Biamonte J, Lukac M. Test generation and fault localization for quantum circuits. *Proceedings of The International Symposium on Multiple-Valued Logic* 2005:62–8. <https://doi.org/10.1109/ismvl.2005.46>.
- [27] Haydar Kızıllırmak. Kuantum Hata Düzeltme. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [28] Thakral S, Manhas P, Verma J. Quantum Implementation of Reversible Logic Gates Using RCViewer+ Tool. In: Dutta P, Chakrabarti S, Bhattacharya A, Dutta S, Piuri V, editors. *Emerging Technologies in Data Mining and Information Security*, vol. 491, Singapore: Springer Nature Singapore; 2023, p. 409–18. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4193-1_39.
- [29] Thakral S, Bansal D. Optimized Quantum Implementation Approach. 2019 5th International Conference On Computing, Communication, Control And Automation (ICCUBEA), Pune, India: IEEE; 2019, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCUBEA47591.2019.9128728>.
- [30] Thakral S, Bansal D. A Novel Reversible DSG Gate and Its Quantum Implementation. In: Singh Tomar G, Chaudhari NS, Barbosa JLV, Aghwariya MK, editors. *International Conference on Intelligent Computing and Smart Communication* 2019, Singapore: Springer Singapore; 2020, p. 1443–50. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0633-8_142.
- [31] Thabab SD, Saha P. Low Quantum Cost Realization of Reversible Binary-Coded-Decimal Adder. *Procedia Computer Science* 2020;167:1437–43. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.354>.
- [32] Kamaraj A, Marichamy P, Kaviyashri KP. Realization and Optimization of Quantum Equivalent Circuits of Reversible Combinational Circuits. *J Comput Theor Nanosci* 2020;17:2080–4. <https://doi.org/10.1166/jctn.2020.8852>.
- [33] Sultana M, Prasad M, Roy P, Sarkar S, Das S, Chaudhuri A. Comprehensive quantum analysis of existing four variable reversible gates. 2017 Devices for Integrated Circuit (DevIC), Kalyani, India: IEEE; 2017, p. 116–20. <https://doi.org/10.1109/DEVIC.2017.8073918>.
- [34] Kalantari Z, Eshghi M, Mohammadi M, Jassbi S. Low-cost and compact design method for reversible sequential circuits. *J Supercomput* 2019;75:7497–519. <https://doi.org/10.1007/s11227-019-02912-8>.
- [35] Du Y, Pan N, Xu Z, Deng F, Shen Y, Kang H. Pavement distress detection and classification based on YOLO network. *International Journal of Pavement Engineering* 2020;0:1–14. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1714047>.
- [36] Chen J, Liu H, Zhang Y, Zhang D, Ouyang H, Chen X. A Multiscale Lightweight and Efficient Model Based on YOLOv7: Applied to Citrus Orchard. *Plants* 2022;11:3260. <https://doi.org/10.3390/plants11233260>.
- [37] Demir K, Yaman O. Su Altı Çöp Tespiti İçin YOLOv4 Tabanlı Bir Yöntem. *International Informatics Congress (IIC2022)*, Batman, Türkiye: 2022.

İki Girişli İki Çıkışlı Sistemlerde Ayrık Zamanda PI-PR² Kontrolör Tasarımı

Ayşe DUMAN MAMMADOV^{1*}, Emre DİNCEL², Mehmet Turan SÖYLEMEZ³

^{1,2,3} Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, Elektrik-Elektronik Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

*¹ dumana@itu.edu.tr, ² dincele@itu.edu.tr, ³ soylemez@itu.edu.tr

(Geliş/Received: 10/02/2023;

Kabul/Accepted: 12/06/2023)

Öz: Bu çalışmada, iki giriş iki çıkışlı sistemler için ayrık zaman düzleminde oransal-integral oransal-çift gecikmeli (PI-PR²) kontrolör yapısı önerilmiştir. Tasarım yöntemi olarak kontrol sistemlerinde sıkça karşılaşılan baskın kutup atama yaklaşımı kullanılmıştır. İki giriş iki çıkışlı sistem bir ayrıştırıcı ile iki alt sisteme bölünmüş ve her bir alt sistem için PIR² kontrolör tasarlanmıştır. Baskın kutuplar istenilen kapalı çevrim sistemin performans özelliklerine göre yerleştirilmiş ve kalan kutupların sınırı baskınlık katsayısı yardımıyla bir çember bölgesi olarak belirlenmiştir. Bu sınır bölgesi, parametre düzlemine aktarılmış ve ilgili kontrolör çözüm kümesi elde edilmiştir. Kontrolör sıfırının konumunun belirlenmesi avantajından yararlanmak için elde edilen PIR² kontrolör PI-PR² kontrolör yapısına çevrilmiştir. Önerilen tasarım yöntemi, bir benzetim çalışması üzerinden anlatılmış ve literatürdeki bazı kontrol yöntemleriyle karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: PI-PR² kontrolör tasarımı, PIR kontrolör, PID kontrolör, baskın kutup atama, ayrık zaman düzlemi.

Discrete PI-PR² Controller Design for Two Input Two Output Systems

Abstract: In this study, a proportional integral double retarded (PI-PR²) controller structure is proposed for two-inputs two-outputs systems in discrete time domain. The dominant pole assignment approach, which is frequently encountered in control systems, is used as the primary design method. The two input two output system is divided into two subsystems by a decoupler and the PIR² controller is designed for each subsystem. Dominant poles are placed according to the desired performance characteristics of the closed-loop system and the boundary of the remaining poles is determined as a circle with the help of the dominance coefficient. This boundary is transferred to the parameter plane and the corresponding controller solution set is obtained. In order to take advantage of determining the location of the controller zero, the obtained PIR² controller is converted to the PI-PR² controller structure. The proposed design method is explained through a simulation study and compared with some control methods in the literature.

Key words: PI-PR² controller design, PIR controller, PID controller, dominant pole placement, discrete time domain.

1. Giriş

Kutup atama yaklaşımı, basit tasarım prosedürü ve kapalı çevrim sistemin performans özelliklerini genel olarak sağlamasından dolayı kontrol sistem tasarımında sıklıkla kullanılmaktadır [1]. Bu yaklaşımın temeli kapalı çevrim sistemin kutuplarını belirlenen noktalara atanmasıdır [2]; fakat, yüksek mertebeli sistemlerde kutupları yerleştirmek zorlaşmaktadır. Bu problemin önüne geçmek için baskın kutup atama yaklaşımı önerilmiştir [3], [4]. Bu yöntemde, kapalı çevrim sistemin performans özellikleri baskın kutuplar tarafından belirlenir ve kalan kutupların baskın kutuplardan yeterince uzakta konumlanması istenir [5].

Zaman gecikmesi olan sistemlerde kapalı çevrim sistemde gecikme teriminden kaynaklı s-düzleminde sonsuz kutup ortaya çıkmaktadır. Bu da baskın kutup atama yaklaşımının uygulanmasını oldukça güçleştirmektedir. Hem bu sebepten hem de günümüzde bilgisayar tabanlı cihazlar kullanıldığından ayrık düzlemde tasarım avantajlı olmaktadır [4], [6]. Bu sebepten, önerilen yöntemde kontrolör tasarımı ayrık düzlemde yapılmıştır.

Oransal integral türev (PID) kontrolör, basit yapıya sahip olması, kolay uygulama sağlaması ve dayanıklılığından dolayı endüstride sıkça tercih edilmektedir. Fakat, türev parametresi yüksek frekansta ölçüm gürültülerine sebep olabilmektedir [7]. Diğer yandan, zaman gecikmesi teriminin bir kontrol stratejisi olarak kullanıldığı çalışmalara rastlanmaktadır [8], [9]. Buradan yola çıkarak, oransal integral gecikmeli (PIR) kontrolör yapısı [10]'da önerilmiştir. PIR kontrolör ile hem türev teriminin olumsuz etkilerinden kaçınılmış hem de bozucu bastırılmış ve sürekli hal hatası giderilmiştir [11], [12]. [13]'de ise PI-PR kontrolör yapısı önerilmiş olup kutup

* Sorumlu yazar: dumana@itu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-3949-2607, ² 0000-0003-2442-4169, ³ 0000-0002-7600-0707

atama yaklaşımında kullanılmıştır. Bu yapı sayesinde PIR kontrolörün kapalı çevrim sistemdeki sıfırlarının olası olumsuz etkileri önlenmiştir.

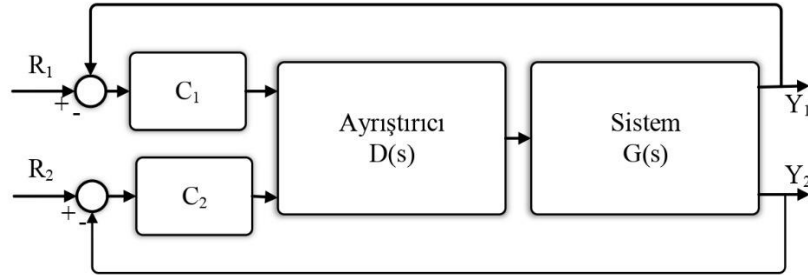
İki giriş iki çıkışlı sistemler endüstrideki çok giriş çok çıkışlı sistemlerin en yaygın türü olmasının yanında çok giriş çok çıkış sistem iki giriş iki çıkış olarak ayrıştırılabilmektedir [14]. Bu sistemlerde baskın kutup atama yaklaşımını uygulamadan önce bir ayrıştırma yöntemi ile kontrol çevrimleri arasındaki etkileşimin kesilmesi sıklıkla uygulanan bir yöntemdir [15]–[18].

Bu çalışmada, iki giriş iki çıkışlı sistemler için ayırık zaman düzleminde baskın kutup atama yaklaşımı kullanılarak yeni bir kontrolör yapısı olan PI-PR² önerilmiştir. Bu yapı ile hem PIR kontrolörün avantajlarından yararlanılmış hem de iki farklı zaman gecikmesi alınmasının kontrolör parametre kümesindeki etkisi incelenmiştir. Bununla birlikte, PI-PR² kontrolör sıfırının konumu belirlenerek PIR² kontrolörün kapalı çevrim sistemdeki sıfırlarının olumsuz etkilerinden kaçınılmıştır. Önerilen yöntem ile, neredeyse sıfır aşım ve minimum yerleşme zamanı bu kontrolör ile sağlanmıştır. Bunun yanında, PIR kontrolör ile sağlanamayan yerleşme zamanı sağlanabilmiştir.

Makale şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümde iki giriş iki çıkışlı sistemler için bir ayrıştırma yöntemi verilmiştir. Daha sonra, üçüncü bölümde baskın kutup atama yaklaşımı ile ayırık zamanda PIR² kontrolör tasarımı anlatılmıştır. Burada, ayırık PIR² kontrolör tanımı verilmiş ve baskın kutup atama ile kontrolör parametre kümesi bulunması anlatılmıştır. Dördüncü bölümde benzetim çalışması yapılmış ve beşinci bölümde çalışmanın sonuçları verilmiştir.

2. İki Girişli İki Çıkışlı Sistemler için Ayrıştırma Yöntemi

İki girişli iki çıkışlı geribeslemeli sistemin bir ayrıştırıcı ile kontrol yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde, $G(s)$ sistemini ayrıştırarak teoride iki adet tek-giriş tek-çıkışlı sisteme dönüştürecek olan $D(s)$ ayrıştırıcı matrisinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Böylelikle, sonraki bölümde tanıtılacak olan kontrolör tasarım yöntemi için açık çevrim sistem $(G(s)D(s))$ uygun hale getirilecektir.

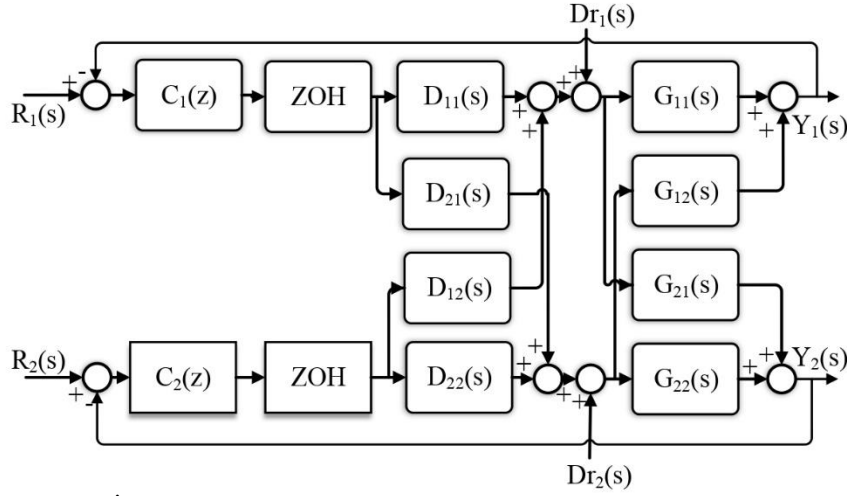


Şekil 1. İki girişli iki çıkışlı sistemin bir ayrıştırıcı ile blok şeması.

İki girişli iki çıkışlı sistemin transfer fonksiyon matrisi aşağıda verilmiştir.

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada, $G_{i,j}(s) = g_{i,j}(s)e^{-L_{i,j}s} \in \{1,2\}$ olarak ifade edilir. Denklem 1'de verilen sistem Şekil 2'de gösterildiği gibi bir ayrıştırıcı yardımıyla ayrıştırılarak her bir çıkışın mümkün olduğunca bir giriş tarafından etkilenmesi hedeflenmiştir. Burada, R , Y ve D sırasıyla girişler, çıkışlar ve bozucu girişlerini temsil etmektedir. Ayrıştırıcı matrisi aşağıda verilen iki durum göz önüne alınarak tasarlanmaktadır.



Şekil 2. İki girişli iki çıkışlı sistemin ayrıştırıcı matris ile kontrol yapısı.

Durum 1: $G(s)$ 'nin köşegen olmayan elemanlarında sağ yarı düzlemde (SYD) kutup ve köşegen elemanlarında SYD'de sıfır yok ise, [19]'da anlatılan ayrıştırıcı matris ($D(s)$) aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$v_1(s) := \begin{cases} 1 & L_{21} \geq L_{22} \\ e^{(L_{21}-L_{22})s} & L_{21} < L_{22} \end{cases} \quad (2)$$

$$v_2(s) := \begin{cases} 1 & L_{12} \geq L_{11} \\ e^{(L_{12}-L_{11})s} & L_{12} < L_{11} \end{cases} \quad (3)$$

$$d_{12}(s) := -\frac{g_{12}(s)}{g_{11}(s)} e^{-(L_{12}-L_{11})s} \quad (4)$$

$$d_{21}(s) := -\frac{g_{21}(s)}{g_{22}(s)} e^{-(L_{21}-L_{22})s} \quad (5)$$

ise

$$D(s) = \begin{bmatrix} v_1(s) & d_{12}(s)v_2(s) \\ d_{21}(s)v_1(s) & v_2(s) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Durum 2: $G(s)$ 'nin köşegen elemanlarında sağ yarı düzlemde (SYD) kutup ve köşegen olmayan elemanlarında SYD'de sıfır yok ise, $D(s)$ aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$v_3(s) := \begin{cases} 1 & L_{22} \geq L_{21} \\ e^{(L_{22}-L_{21})s} & L_{22} < L_{21} \end{cases} \quad (7)$$

$$v_4(s) := \begin{cases} 1 & L_{11} \geq L_{12} \\ e^{(L_{11}-L_{12})s} & L_{11} < L_{12} \end{cases} \quad (8)$$

$$d_{11}(s) := -\frac{g_{22}(s)}{g_{21}(s)} e^{-(L_{22}-L_{21})s} \quad (9)$$

$$d_{22}(s) := -\frac{g_{11}(s)}{g_{12}(s)} e^{-(L_{11}-L_{12})s} \quad (10)$$

ise

$$D(s) = \begin{bmatrix} d_{11}(s)v_3(s) & v_3(s) \\ v_4(s) & d_{22}(s)v_4(s) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Böylelikle, ayrıştırılmış köşegen matrisi $H(s)$ Denklem 12'deki gibi elde edilir.

$$H(s) = G(s)D(s) = \begin{bmatrix} h_{11}(s) & 0 \\ 0 & h_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$H(s)$ 'in köşegen olmayan elemanları sıfır iken, köşegen elemanları alt sistem transfer fonksiyonlarıdır ve merkezi olmayan kontrolörler (C_1 ve C_2) ile kontrol edilebilirler. Bu alt sistem transfer fonksiyonları çoklu zaman gecikmesine sahip olabilirler. Çoklu zaman gecikmesi içeren sistemler için doğrudan tasarım yapılması güç olabilmektedir. Bu sebepten, $h_{11}(s)$ ve $h_{22}(s)$ 'nin uygun bir örnekleme zamanı ile ayrık zaman düzlemine aktarılması ve kontrolör tasarımının bu düzlemde yapılması önerilmektedir.

3. Baskın Kutup Atama Yöntemi ile Ayrık Zamanda PIR² Kontrolör Tasarımı

3.1. Ayrık zamanda PIR² kontrolör

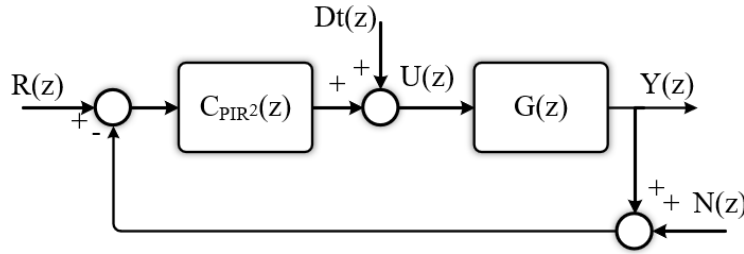
PIR² kontrolörün ayrık zamandaki ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$C_{\text{PIR}^2} = \frac{n_G(z)}{d_C(z)} = K_p + K_i \frac{z}{z-1} - K_{r_1} z^{-h_1} - K_{r_2} z^{-h_2} \quad (13)$$

Burada, $h_1, h_2 \in \mathbb{Z}^+$ ve $K_p, K_i, K_{r_1}, K_{r_2} \in \mathbb{R}$. Bir sistem ayrık zaman düzleminde $m \leq n$ olmak üzere,

$$G(z) = \frac{n_G(z)}{d_G(z)} = \frac{b_m z^m + b_{m-1} z^{m-1} + \dots + b_1 z + b_0}{z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0} \quad (14)$$

şeklinde ifade edilir. $G(z)$ 'nin ölü zamana da sahip olabileceği unutulmamalıdır. Birim geribeslemeli sistemin ayrık PIR² kontrolör ile standart blok şeması Şekil 3'de gösterilmiştir. $Dt(z)$ ve $N(z)$ sırasıyla sisteme giren bozucu ve ölçme gürültüsünü sembolize etmektedir. Şekil 3'e göre kapalı çevrim sistemin karakteristik polinomu Denklem 15'deki gibi yazılır.



Şekil 3. Ayrık PIR² kontrolör ile kapalı çevrim sistem kontrol şeması.

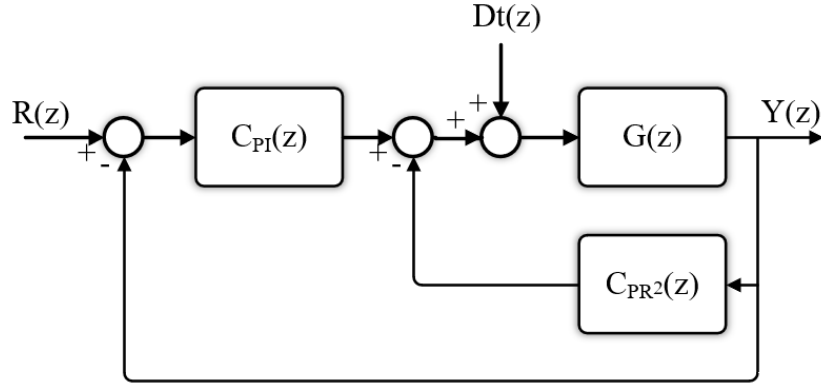
$$P_c(z)_{\text{PIR}^2} = 1 + C_{\text{PIR}^2}(z)G(z) \quad (15)$$

Kapalı çevrim sistemin transfer fonksiyonu ise Denklem 16'da verilmiştir.

$$T(z)_{\text{PIR}^2} = \frac{C_{\text{PIR}^2}(z)G(z)}{P_c(z)_{\text{PIR}^2}} = \frac{n_G(K_{r_2}(z-1)z^{h_1} + z^{h_2}(K_{r_1}(z-1) + z^{h_1}(K_p - K_i z - K_p z)))}{K_{r_2} n_G(z-1)z^{h_1} + z^{h_2}(K_{r_1} n_G(z-1) + z^{h_1}(d_G - d_G z + n_G(K_p - K_i z - K_p z)))} \quad (16)$$

3.2. Ayrık zamanda PI-PR² kontrolör yapısı

PI-PR² kontrolör yapısında, Şekil 4'de gösterildiği gibi PR² kontrolör kontrol şemasının iç geribesleme yoluna PI kontrolör ise dış ileri yoluna yerleştirilir.



Şekil 4. Ayırık PI-PR² kontrolör ile kapalı çevrim sistem kontrol şeması.

PIR² kontrolör yerine PI-PR² kontrolör kullanılarak, kontrolör sıfırının ayırık düzlemde konumu belirlenebilir, bu nedenle kapalı çevrim sistemdeki kontrolör sıfırlarının olumsuz etkilerinden kaçınılır. Ek olarak, kapalı çevrim sistemde istenmeyen bir gerçek kutbu varsa, PI-PR² kontrolör sıfırı ile ortadan kaldırılabilir. Ayırık PI ve PR² kontrolörlerin transfer fonksiyonları Denklem 17 ve 18'de verilmiştir.

$$C_{PI}(z) = K_{pi} + K_i \frac{z}{z-1} \quad (17)$$

$$C_{PR^2}(z) = K_{pr^2} - K_{r1}z^{-h_1} - K_{r2}z^{-h_2} \quad (18)$$

Kapalı çevrim sistemin karakteristik polinomu

$$P_c(z)_{PI-PR^2} = 1 + (C_{PI}(z) + C_{PR^2}(z))G(z) \quad (19)$$

olarak yazılır. Kapalı çevrim sistemin transfer fonksiyonu Denklem 20'deki gibidir.

$$T(z)_{PI-PR^2} = \frac{C_{PI}(z)G(z)}{P_c(z)_{PI-PR^2}} = \frac{n_G z^{h_1+h_2}(K_{pi}(1-z) - K_i z)}{K_{r2}n_G(z-1)z^{h_1+z^{h_2}}(K_{r1}n_G(z-1)+z^{h_1}(d_G-d_Gz+n_G(K_p-K_i z-K_p z)))} \quad (20)$$

Ayırık PI-PR² ve ayırık PIR² kontrolörleri arasında bir ilişki vardır. Denklem 16 ve 20'deki kapalı çevrim transfer fonksiyonları incelendiğinde, her iki kapalı döngü sisteminin kutupları aynıysa aşağıdaki eşitlik sağlanır.

$$K_{pr^2} + K_{pi} = K_p \quad (21)$$

Burada, K_{pr^2} ve K_{pi} sırasıyla oransal-çift gecikmeli kazanç ve oransal-integral kazançlarıdır. Böylelikle, ayırık PIR² kontrolör parametreleri kolaylıkla PI-PR² parametrelerine çevrilebilir. Kapalı çevrim sistemin sıfırları PIR² kontrol yapısı için baskın bölgede veya kararsızlık bölgesinde yer alabilse de ayırık PI-PR² kontrolör yapısında bir sıfır Denklem 22 tarafından verilen noktada ve diğer sıfırlar $z = 0$ noktasında yer almaktadır.

$$z = \frac{K_{pi}}{K_i + K_{pi}} \quad (22)$$

K_{pi} parametresi Denklem 22'de serbestçe seçilir, böylece kontrolör sıfırının konumu keyfi olarak belirlenebilir. K_{pi} seçiminden sonra, Denklem 21 kullanılarak K_{pr^2} bulunur.

3.3. Baskın kutup atama yaklaşımı ile ayırık PIR² kontrolörün parametre kümesinin bulunması

İstenilen kapalı çevrim sistem performans özelliklerine (bu çalışma için, aşım ve yerleşme zamanı) göre belirlenen kutup çifti $z_{1,2} = \sigma \pm j\omega$ olarak ifade edilsin. İlk olarak, bu kutup çiftini baskın bölgeye atayan parametre kümesinin bulunması gerekmektedir. Bunun için, bu kutuplardan biri Denklem 15'de yerine yazılır.

$$P_c(z) = 1 + C_{\text{PIR}^2}(\sigma \pm j\omega)G(\sigma \pm j\omega) = n_c(\sigma \pm j\omega)n_G(\sigma \pm j\omega) + d_c(\sigma \pm j\omega)d_G(\sigma \pm j\omega) = 0 \quad (23)$$

PIR² kontrolörün parametreleri h_1 ve h_2 zaman gecikmesini ifade ettikleri için pozitif tamsayı olarak seçilirler. h_1 ve h_2 'nin değerleri belirlendikten sonra, Denklem 23 reel ve sanal kısımlarına ayrılır.

$$\text{Re}[P_c(z)] = 0 \quad (24)$$

$$\text{Im}[P_c(z)] = 0 \quad (25)$$

Denklem 24 ve 25 birlikte çözdürüldüğünde, PIR² kontrolörün K_p ve K_i parametreleri kontrolörün diğer parametreleri K_{r_1} ve K_{r_2} cinsinden fonksiyon olarak yazılır.

$$K_p = f_p(K_{r_1}, K_{r_2}) = \alpha_0 + \alpha_1 K_{r_1} + \alpha_2 K_{r_2} \quad (26)$$

$$K_i = f_i(K_{r_1}, K_{r_2}) = \beta_0 + \beta_1 K_{r_1} + \beta_2 K_{r_2} \quad (27)$$

Burada, α_k ve β_k ($k = 0, 1$ ve 2 için) sistem parametrelerine ve sistem yapısına bağlı olan sabit sayılardır. Böylelikle, Denklem 23'de bilinmeyen terimler sadece K_{r_1} ve K_{r_2} olmuş ve istenilen performans kriterlerine göre belirlenen kutup çifti baskın bölgeye yerleştirilmiş olur.

Bu tarz bir kontrolör yapısında, çeşitli incelemeler yapılmış olup $h_1 = 1$ ve $h_2 = 2$ için en geniş çözüm kümesi elde edildiği görülmüştür. $h_1 = 1$ ve $h_2 = 2$ için,

$$Q = z[-(d_G + \alpha_0 n_G)z^2 + (d_G + \alpha_0 n_G + \beta_0 n_G)z^3] \quad (28)$$

$$P = zn_G[z - (1 + \alpha_1)z^2 + (\alpha_1 + \beta_1)z^3] \quad (29)$$

$$R = n_G[1 - z - \alpha_2 z^2 + (\alpha_2 + \beta_2)z^3] \quad (30)$$

ise, yeni karakteristik polinom

$$\tilde{P}_c(z) = Q + K_{r_1}P + K_{r_2}R \quad (31)$$

olarak yazılabilir.

Önerilen tasarım yönteminin bir sonraki adımı, baskın kutuplar dışında kalan kutupları yerleştirmektir. Bunun için, ilk olarak kalan kutupların baskın kutuplardan kaç kat uzağa yerleştirileceği belirlenir. Baskın kutuplar ve orijin arasındaki uzaklık $r = \sqrt{\sigma^2 + \omega^2}$ ve baskınlık katsayısı m (tipik değeri 3-5 arası) ile sembolize edilirse, kalan kutupların yarıçapı r^m olan çemberin içinde konumlanması istenir. Belirlenen çember bölgesi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\tilde{D} = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq r^m, r \in \mathbb{R}^+\} \quad (32)$$

Daha sonra, Denklem 31'de verilen yeni karakteristik polinom $\tilde{P}_c(r^m z)$ olarak yeniden yazılır ve frekans düzlemine $z = e^{j\gamma}$ ifadesi ile aktarılır ($\tilde{P}_c(r^m e^{j\gamma})$). Frekans düzlemindeki yeni karakteristik denklem reel ve sanal kısımlarına ayrılır.

$$\text{Re}[\tilde{P}_c(r^m e^{j\gamma})] = 0 \quad (33)$$

$$\text{Im}[\tilde{P}_c(r^m e^{j\gamma})] = 0 \quad (34)$$

Denklem 33 ve 34 ortak çözümlerse, ayrık PIR² kontrolör parametrelerinden K_{r_1} ve K_{r_2} , γ parametresine göre elde edilir ($K_{r_1}(\gamma)$ ve $K_{r_2}(\gamma)$). Daha sonra, γ parametresi $0 - 2\pi$ aralığında (daireesel bölge) ızgaralama (gridding) yöntemi kullanılarak taranır ve bu bölge $K_{r_1} - K_{r_2}$ düzlemine aktarılır. Böylelikle, karmaşık kök geçiş sınırları hesaplanmış olur. Gerçek kök geçiş sınırını bulmak için ise,

$$\tilde{P}_c(r^m) = 0 \quad (35)$$

eşitliği çözümlenerek elde edilen doğru denklemi $K_{r_1} - K_{r_2}$ düzlemine aktarılır. Sonuç olarak, $K_{r_1} - K_{r_2}$ düzlemi bazı alt bölgelere (en az bir adet) ayrılmış olur. Bu alt bölgelerden istenilen performans kriterlerini sağlayan, diğer bir deyişle belirlenen kutupları baskın bölgeye kalan kutupları da r^m yarıçaplı çemberin içine atayan bölge(ler) kontrolörün parametre çözüm kümesidir.

Çözüm kümesinin boş çıkabileceği unutulmamalıdır. Bu durumda, amaçlanan tasarım özellikleri ve/veya baskınlık katsayısı değiştirilmelidir.

4. Benzetim Çalışmaları

4.1. Örnek 1:

Önerilen tasarım yöntem prosedürünü anlatmak için, Vinante ve Luyben (VL) sütun transfer fonksiyonu kullanılmıştır.

$$G(s) = \begin{bmatrix} -\frac{2.2}{7s+1}e^{-s} & \frac{1.3}{7s+1}e^{-0.3s} \\ -\frac{2.8}{9.5s+1}e^{-1.8s} & \frac{4.3}{9.2s+1}e^{-0.35s} \end{bmatrix}$$

Sistemin kontrol döngüleri arasındaki etkileşim ayrıştırma yöntemi ile kesilebilir. Ayrıştırma yöntemindeki iki durum da bu sistem için uygulanabileceğine göre, ilk durum seçilebilir. Ayrıştırıcı matris $D(s)$ aşağıdaki gibi elde edilir.

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0.5909 \\ \frac{0.6512(9.2s+1)}{9.5s+1}e^{-1.45s} & e^{-0.7s} \end{bmatrix}$$

$D(s)$ yardımıyla, ayrıştırılmış sistem matrisi;

$$H(s) = G(s)D(s) = \begin{bmatrix} h_{11}(s) & 0 \\ 0 & h_{22}(s) \end{bmatrix}$$

olarak elde edilir. Burada, ayrıştırılmış alt sistem transfer fonksiyonları;

$$h_{11}(s) = \frac{0.8465(9.2s+1)}{(7s+1)(9.5s+1)}e^{-1.75s} - \frac{2.2}{7s+1}e^{-s}$$

$$h_{22}(s) = \frac{4.3}{9.2s+1}e^{-1.05s} - \frac{1.6546}{9.5s+1}e^{-1.8s}$$

şekindedir. Görüldüğü üzere, $h_{11}(s)$ ve $h_{22}(s)$ çoklu zaman gecikmesine sahip sistemlerdir ve bu tip sistemler için seçilen bir örnekleme zamanı ile ayrık zaman düzleminde kontrolörler tasarlanması çok daha avantajlıdır. Örnekleme zamanı t_s Nyquist-Shannon örnekleme teoremine göre 1 saniye olarak seçilmiştir. Birinci köşegen elemanı ($h_{11}(s)$)'nin ayrık zamandaki transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$h_{11}(z) = \frac{n_{h_{11}}(z)}{d_{h_{11}}(z)}$$

Burada,

$$n_{h_{11}}(z) = -0.002z^{11} - 0.27z^{10} + 0.439z^9 - 0.11z^8 - 0.077z^7 + 0.014z^6 + 0.004z^5 - 0.0003z^4 - 0.00002z^3 + 1.37 \times 10^{-6}z^2 + 7.63 \times 10^{-17}z + 8.49 \times 10^{-18}$$

$$d_{h_{11}}(z) = z^3(z^9 - 2.09z^8 + 0.92z^7 + 0.453z^6 - 0.23z^5 - 0.06z^4 + 0.007z^3 + 0.001z^2 - 0.0001z + 4.07 \times 10^{-6})$$

şeklinde. Kapalı-çevrim sistemde performans kriterleri %0.1 aşım ve 11 saniye yerleşme zamanı olarak istenmiştir. Bu kriterlere karşı gelen ayrık zaman düzlemindeki baskın kutuplar aşağıdaki gibi hesaplanır.

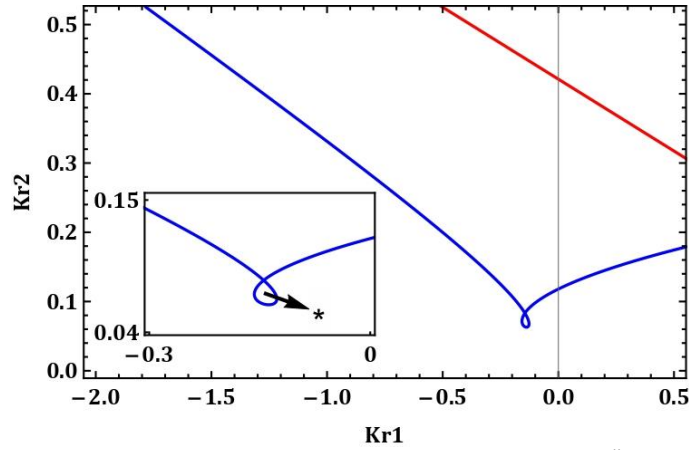
$$z_{1,2} = \sigma \pm j\omega = 0.6857 \pm j0.1144$$

Ayrık PIR² kontrolör gecikme parametreleri $h_1 = 1$ ve $h_2 = 2$ için, baskın kutuplar kullanılarak diğer kontrolör parametreleri K_p ve K_i , K_{r_1} ve K_{r_2} cinsinden bulunur.

$$K_p = -1.6972 + 1.8379K_{r_1} + 3.1461K_{r_2}$$

$$K_i = -0.4712 + 0.2316K_{r_1} + 0.6572K_{r_2}$$

K_p ve K_i parametreleri karakteristik polinomda yerine yazılır ve denklem yeniden düzenlenir ($\tilde{P}_c(z)$). Daha sonra, baskın kutuplar ve orijin arasındaki uzaklık $r = 0.6951$ ile baskınlık katsayısı $m = 3$ için, kalan kutupların yarıçapı $r^m = 0.3359$ olan çemberin içinde konumlanması beklenir. Bunun için, karakteristik polinom düzenlenerek frekans düzlemine aktarılır ve $\tilde{P}_c(0.3359e^{j\gamma})$ reel ve sanal kısımlarına ayrılır. Daha sonra, bu denklemler birlikte çözdürülür ve ayrık PIR² kontrolör parametreleri $K_{r_1}(\gamma)$ ve $K_{r_2}(\gamma)$ şeklinde bulunur. γ ızgaralanarak 0.8071 yarıçaplı çember $K_{r_1} - K_{r_2}$ düzlemine aktarılır (mavi ile gösterilen eğri). Son olarak, $\tilde{P}_c(0.3359) = 0$ da $K_{r_1} - K_{r_2}$ düzlemine aktarılır (kırmızı ile gösterilen doğru).



Şekil 5. h_{11} için, $K_{r_1} - K_{r_2}$ düzlemindeki ilgili alt bölge (Örnek 1).

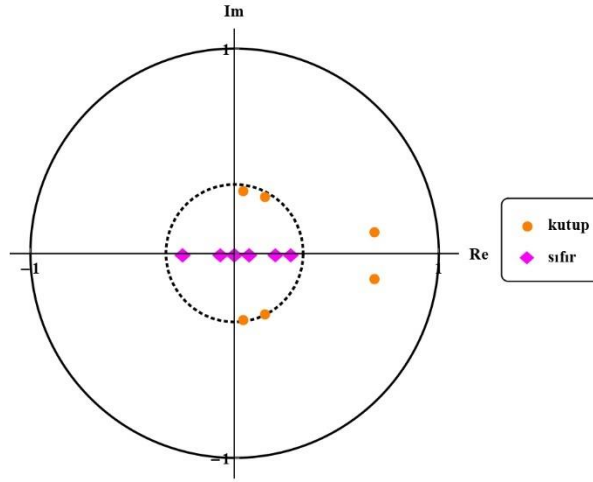
Şekil 5'ten görüldüğü üzere çeşitli bölgeler ortaya çıkmaktadır. Bu bölgelerden * ile gösterilen çözüm bölgesi her bir bölgeden örnek test noktaları seçilip istenilen konfigürasyonun sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilerek bulunur. Diğer bir deyişle, ayrık PIR² kontrolör parametreleri bu bölgeden seçilirse, kapalı çevrim sistemin performans özelliklerine göre belirlenen iki kutup baskın bölgeye atanırken, kalan kutuplar yarıçapı $r^m = 0.3359$ olan çemberin içinde konumlanır. Bu bölge içinden, $K_{r_1} = -0.143$ ve $K_{r_2} = 0.068$ olarak seçilirse, kapalı çevrim sistemin kutupları ve sıfırları incelendiğinde, bir sıfırın konumlandığı görülmektedir. Baskın bölgedeki sıfırın

kapalı çevrim sistemin geçici hal yanıtındaki olumsuz etkisinin önüne geçebilmek için, ayırık PI-PR² kontrolör yapısına geçilebilir. PI-PR² yapısı ile kontrolörün sıfırının konumu belirlenebilir. Kontrolörün sıfırını $z = 0.2$ noktasında seçerek K_{pi} parametresi -0.1149 olarak bulunur. Önerilen ayırık PI-PR² kontrolör

$$C_{PI}(z) = \frac{-0.5744z - 0.1149}{z - 1}$$

$$C_{PR^2}(z) = \frac{-1.6304z^2 + 0.1427z - 0.068}{z^2}$$

şeklinde elde edilir. Kapalı çevrim sistemin kutupları ve sıfırları tasarlanan kontrolör ile ayırık düzlemde Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. h_{11} için, kapalı çevrim sistemin ayırık PI-PR² ile kutup-sıfır dağılımı (Örnek 1).

Şekil 6'da görüldüğü üzere, kapalı çevrim sistemin kutupları istenildiği gibi yerleştirilmiştir. Bir sonraki aşamada, ayrıştırılmış matrisin ikinci köşegen elemanı h_{22} için de önerilen tasarım prosedürü uygulanır. $t_s = 1$ saniye örnekleme zamanı ile

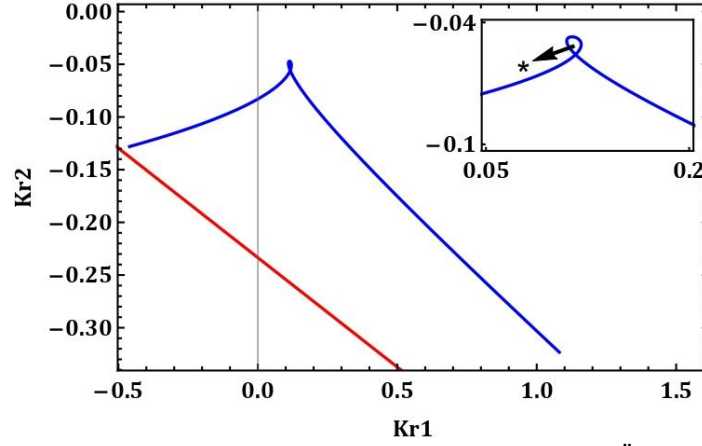
$$h_{22}(z) = \frac{0.0083z^4 + 0.4252z^3 - 0.4773z^2 + 0.088z + 0.0024}{z^5 - 1.6786z^4 + 0.576z^3 + 0.1293z^2 - 0.0156z + 0.0003}$$

yazılabilir. Kapalı çevrim sistem için istenilen performans özellikleri %0.1 aşım ve 11 saniye yerleşme zamanıdır. Baskın bölgedeki kutup çifti $z_{1,2} = 0.6857 \pm j0.1144$ olarak hesaplanır. $h_1 = 1$ ve $h_2 = 2$ için, K_p ve K_i parametreleri

$$K_p = 1.1758 + 1.8379K_{r_1} + 3.1461K_{r_2}$$

$$K_i = 0.2962 + 0.2316K_{r_1} + 0.6572K_{r_2}$$

şeklinde elde edilir. $m = 3$ için, kompleks kök geçiş $\tilde{P}_c(0.3359e^{j\gamma})$ ve reel kök geçiş $\tilde{P}_c(0.3359)$ sınırları sırasıyla $K_{r_1} - K_{r_2}$ düzlemine aktarılır.



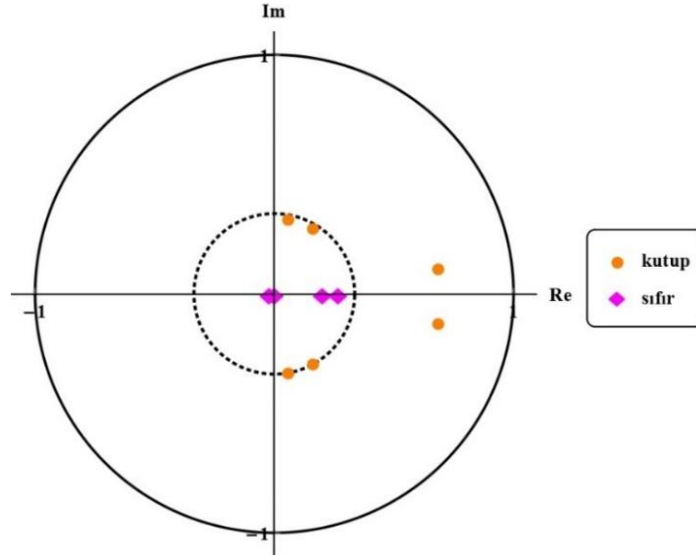
Şekil 7. h_{22} için, $K_{r_1} - K_{r_2}$ düzlemindeki ilgili alt bölge (Örnek 1).

Şekil 7'deki * ile gösterilen bölge parametre çözüm kümesidir. Bu bölge içinden, $K_{r_1} = 0.116$ ve $K_{r_2} = -0.05$ olarak seçilirse, kapalı çevrim sistemin kutupları ve sıfırları incelendiğinde, baskın bölgede kontrolörün sıfırının konumlandığı görülmektedir. Bu sıfırın olumsuz etkilerinden kurtulmak için ayrık PI-PR² yapısına geçilmiştir. Kontrolörün sıfırı $z = 0.2$ noktasında seçildiğinde, $K_{pi} = 0.07248$ ile tasarlanan kontrolör

$$C_{PI}(z) = \frac{0.3624z - 0.0715}{z - 1}$$

$$C_{PR^2}(z) = \frac{1.1576z^2 - 0.1157z + 0.0503}{z^2}$$

olarak hesaplanmıştır. Kapalı çevrim sistemin kutupları ve sıfırları ayrık PI-PR² kontrolör ile ayrık düzlemde Şekil 8'de gösterilmiştir.



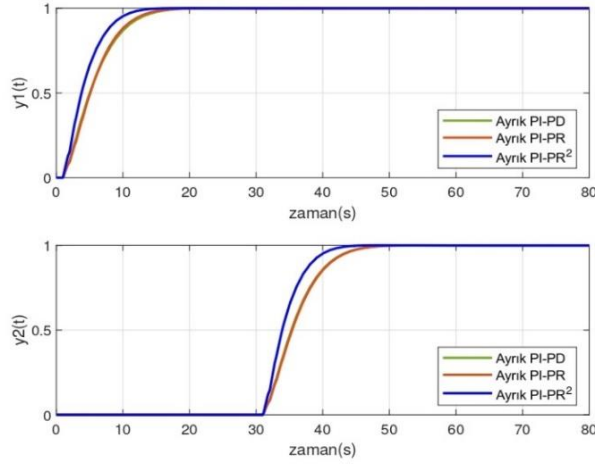
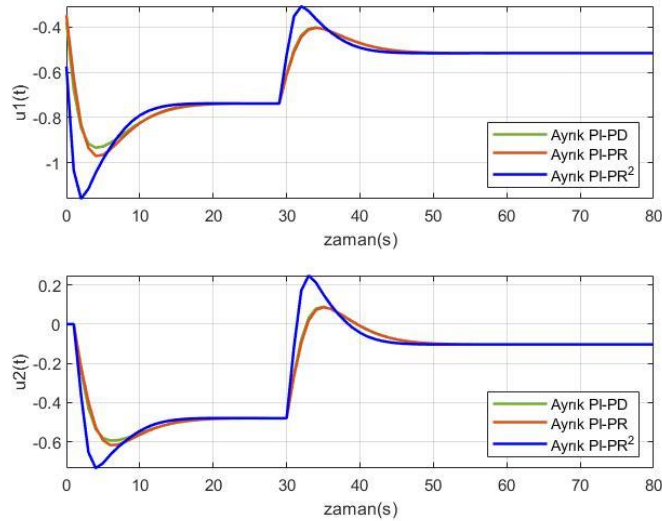
Şekil 8. h_{22} için, kapalı çevrim sistemin ayrık PI-PR² ile kutup-sıfır dağılımı (Örnek 1).

Ayrıştırılmış sistem matrisinin köşegen elemanları için ayrık PI-PR² kontrolör tasarımları tamamlandıktan sonra, bu kontrolörler iki giriş iki çıkışlı sisteme ayrıştırıcı yardımıyla uygulanabilir. Önerilen tasarım yöntemi ayrık PI-PD ve PI-PR kontrolörler ile karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler ile bulunan kontrolörler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kontrolör parametreleri (Örnek 1).

Yöntem	Kontrolörler
Ayrık PI-PD	$C_{PI}(z) = \frac{-0.3769z+0.0754}{z-1}$ ve $C_{PD}(z) = \frac{-0.961z-0.2137}{z}$
	$C_{PI}(z) = \frac{0.2229z-0.0446}{z-1}$ ve $C_{PD}(z) = \frac{0.5526z+0.2361}{z}$
Ayrık PI-PR	$C_{PI}(z) = \frac{-0.3473z+0.0695}{z-1}$ ve $C_{PR}(z) = \frac{-0.4305z-0.5793}{z}$
	$C_{PI}(z) = \frac{0.2131z-0.0426}{z-1}$ ve $C_{PR}(z) = \frac{0.4574z+0.2954}{z}$

Kapalı çevrim sistemin basamak yanıtları ve kontrol işaretleri Şekil 9 ve 10'da verilmiştir. Sistem yanıtlarını daha iyi inceleyebilmek için, 0. saniyede birinci basamak girişi 30. saniyede ise ikinci basamak girişi sisteme girilmiştir.

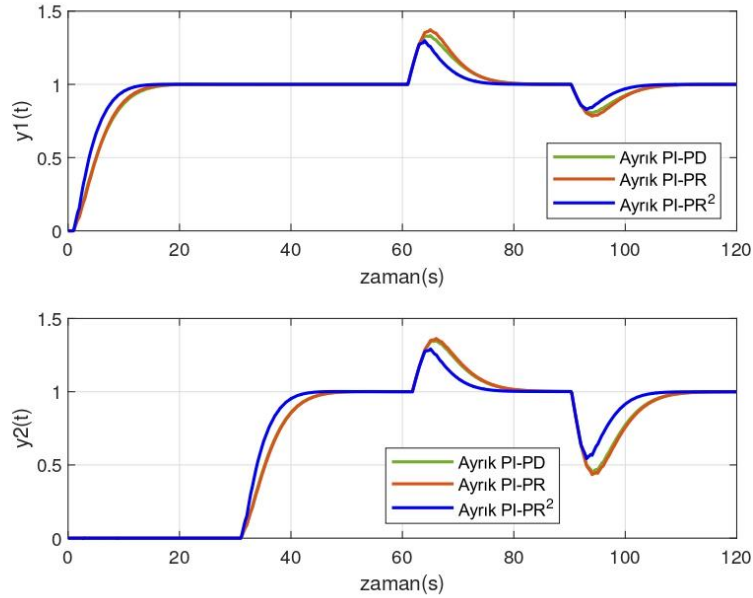
**Şekil 9.** Kapalı çevrim sistem basamak yanıtları (Örnek 1).**Şekil 10.** Kapalı çevrim sistem kontrol işaretleri (Örnek 1).

Şekil 9'da görülebileceği üzere, birinci çevrimde %0.07 aşım ve 11.74 saniye yerleşme zamanı, ve ikinci çevrimde %0.1 aşım ve 11.73 saniye yerleşme zamanı sağlanmaktadır. Böylece, istenilen performans özelliklerinin sağlandığı söylenebilir. Ek olarak, diğer kontrolörlere göre önerilen kontrolörün kontrol işareti bir miktar yüksek görünse de kabul edilen sınırlar içindedir. Verilen kontrolörler için, kapalı çevrim sistemdeki bazı performans özellikleri '(1)' birinci çevrimi '(2)' ise ikinci çevrimi temsil etmek üzere Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Kapalı çevrim sistemdeki performans özellikleri (Örnek 1).

	yz (s)	aşım (%)	ISE
Ayrık PI-PD (1)	15.27	0.05	3.88
Ayrık PI-PD (2)	15.39	0.1	4.08
Ayrık PI-PR (1)	14.64	0.04	3.92
Ayrık PI-PR (2)	15.52	0.1	4.16
Ayrık PI-PR ² (1)	11.74	0.07	3.02
Ayrık PI-PR ² (2)	11.73	0.1	3.12

Önerilen tasarım yöntemini diğer kontrolörlere göre en düşük yerleşme zamanlarının yanında en küçük ISE değerlerine sahiptir. Bozucu bastırma performansını incelemek için 60. ve 90. saniyelerde -0.5 genlikli basamak bozucu sırasıyla birinci ve ikinci bozucu girişlerinden uygulanmıştır. Basamak bozucular ile kapalı çevrim basamak yanıtları Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 11'de görüldüğü üzere, önerilen tasarım yöntemi en iyi bozucu bastırma performansına sahiptir.



Şekil 11. 60. ve 90. saniyelerde bozucu giriş ile kapalı çevrim sistem basamak yanıtları (Örnek 1).

4.2. Örnek 2:

Önerilen tasarım yönteminin etkinliğini göstermek için, [20]'de verilen endüstriyel ölçekli bir polimerizasyon (ISP) reaktörü kullanılmıştır. ISP reaktörünün transfer fonksiyon matrisi aşağıda tanımlanmıştır.

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{22.89}{4.572s + 1} e^{-0.2s} & -\frac{11.4}{1.807s + 1} e^{-0.4s} \\ \frac{4.689}{2.174s + 1} e^{-0.2s} & \frac{5.8}{1.801s + 1} e^{-0.4s} \end{bmatrix}$$

Baskın kutup atama yöntemini uygulayabilmek için, öncelikle kontrol çevrimleri arasındaki etkileşimin ayrıştırma yöntemi ile kesilmesi gerçekleştirilmiştir. Verilen sistem için ayrıştırıcı matrisi aşağıdaki gibi bulunur.

$$D(s) = \begin{bmatrix} e^{-0.2s} & 0.5909 \\ \frac{0.6512(9.2s + 1)}{9.5s + 1} e^{-1.45s} & 1 \end{bmatrix}$$

Sistemin kontrol döngüleri arasındaki etkileşim ayrıştırma yöntemi ile kesilebilir. Ayrıştırma yöntemindeki iki durum da bu sistem için uygulanabileceğine göre, ilk durum seçilebilir. Ayrıştırıcı matris $D(s)$ aşağıdaki gibi elde edilir.

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{0.498(4.572s + 1)}{1.807s + 1} e^{-0.2s} \\ -\frac{0.8085(1.801s + 1)}{2.174s + 1} & e^{-0.7s} \end{bmatrix}$$

$D(s)$ yardımıyla, ayrıştırılmış alt sistem transfer fonksiyonları

$$h_{11}(s) = \frac{9.2163(1.801s + 1)}{(1.807s + 1)(2.174s + 1)} e^{-0.4s} + \frac{22.89}{4.572s + 1} e^{-0.4s}$$

$$h_{22}(s) = \frac{2.3353(4.572s + 1)}{(1.807s + 1)(2.174s + 1)} e^{-0.4s} + \frac{5.8}{1.801s + 1} e^{-0.4s}$$

şeklinde hesaplanır. Bu noktadan sonra, her bir alt sistem transfer fonksiyonu için ayrı ayrı kontrolör tasarımı yapılır. Birinci köşegen eleman ($h_{11}(s)$) için, $t_s = 0.05$ saniye örnekleme zamanı ile ilgili ayrık transfer fonksiyonu hesaplanır.

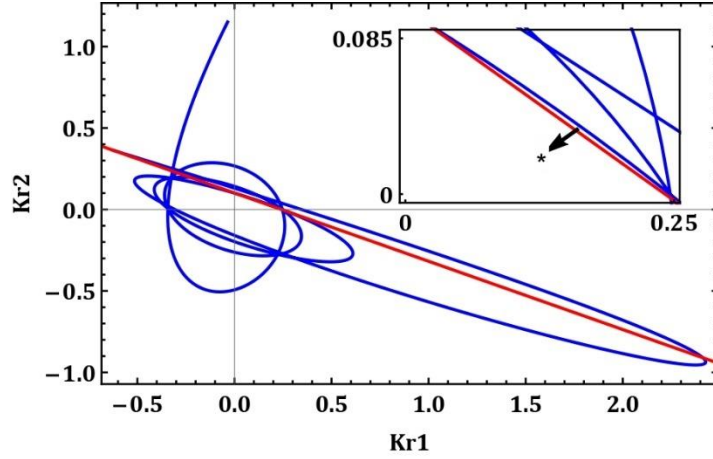
$$h_{11}(z) = \frac{0.4578z^2 - 0.8952z + 0.4376}{z^8(z^3 - 2.9391z^2 + 2.8794z - 0.9403)}$$

Kapalı çevrim sistem için istenilen performans özellikleri %0.1 aşım ve 2.8 saniye yerleşme zamanı amaçlanmaktadır. Baskın bölgedeki kutup çifti seçilen örnekleme zamanı ve performans kriterlerine göre $z = 0.9306 \pm j0.0302$ olarak bulunur. $h_1 = 1$ ve $h_2 = 2$ için, kontrolörün K_p ve K_i parametreleri K_{r_1} ve K_{r_2} cinsinden elde edilir.

$$K_p = 0.114 + 1.147K_{r_1} + 1.3089K_{r_2}$$

$$K_i = 0.0037 + 0.0066K_{r_1} + 0.0142K_{r_2}$$

$r = 0.9311$ ile $m = 3$ için, kalan kutupların yarıçapı $r^m = 0.8071$ olan çemberin içinde konumlanması beklenir. Bunun için, gerekli adımlar takip edilerek karmaşık (mavi) ve gerçel (kırmızı) kök geçiş sınırları $K_{r_1} - K_{r_2}$ düzlemine aktarılır.



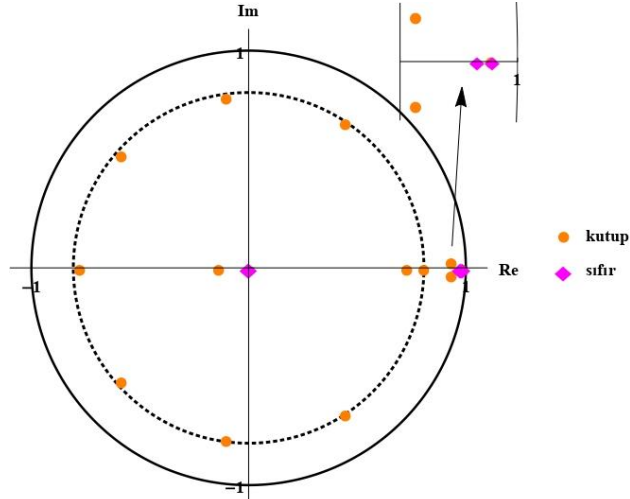
Şekil 12. h_{11} için, $K_{r1} - K_{r2}$ düzlemindeki çözüm kümesi (Örnek 2).

Şekil 12'deki * ile gösterilen bölge istenilen çözüm bölgesidir. Kontrolör parametreleri bu bölgeden $K_{r1} = 0.17$ ve $K_{r2} = 0.03$ olarak seçilirse, baskın bölgede fazladan bir kutbun ve bir sıfırın konumlandığı görülmektedir. Baskın bölgede kalan fazladan kutup için, ayrık PI-PR² yapısı ile kontrolörün sıfırlarının konumu belirlenebilir. Burada, kontrolörün bütün parametreleri yerine konularak $z = 0.9823$ kutbunu iptal edecek K_{pi} parametresi 0.2927 olarak seçilir. Önerilen ayrık PI-PR² kontrolör

$$C_{PI}(z) = \frac{0.298z - 0.2927}{z - 1}$$

$$C_{PR^2}(z) = \frac{0.0555z^2 - 0.17z + 0.03}{z^2}$$

şeklinde elde edilir. Tasarlanan kontrolör ile kapalı çevrim sistemin kutup-sıfır dağılımı Şekil 13'de gösterilmiştir.



Şekil 13. h_{11} için, kapalı çevrim sistemin ayrık PI-PR² ile kutup-sıfır dağılımı (Örnek 2).

Şekil 13'de görüldüğü üzere, kapalı çevrim sistemin kutupları istenildiği gibi yerleştirilmiştir. Fakat, baskın bölgedeki sistemin sıfırının $z = 0.9827$ kapalı çevrim geçici hal yanıtında olumsuz etkisi (yüksek miktarda aşım) vardır. Bunun önüne geçmek için, bir ön filtre (G_f) kullanılmıştır.

$$G_f(z) = \frac{0.0173}{z - 0.9827}$$

Bir sonraki aşamada, ayrıştırılmış matrisin ikinci köşegen elemanı (h_{22}) için de önerilen tasarım prosedürü %0.1 aşım ve 2.65 saniye yerleşme zamanı kriterleri için uygulanır. $t_s = 0.05$ saniye örnekleme zamanı ile

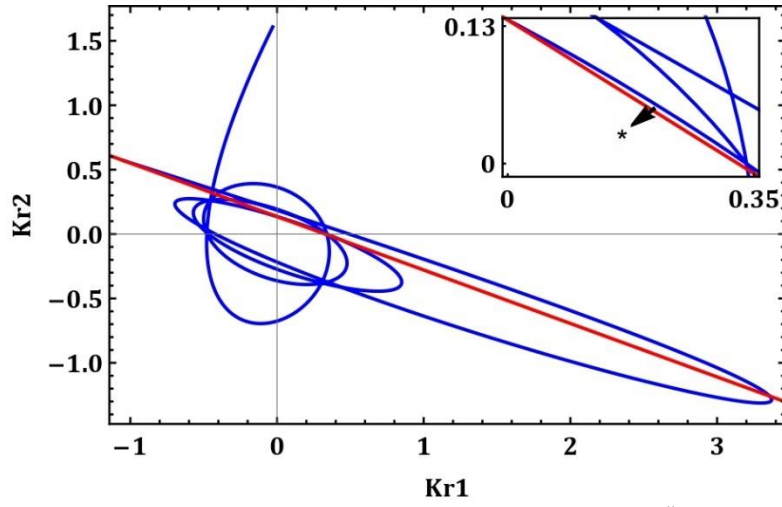
$$h_{22}(z) = \frac{0.292z^2 - 0.571z + 0.2791}{z^8(z^3 - 2.9226z^2 + 2.8472z - 0.9246)}$$

yazılabilir. $h_1 = 1$ ve $h_2 = 2$ için, K_p ve K_i parametreleri

$$K_p = 0.1652 + 1.1555K_{r_1} + 1.3278K_{r_2}$$

$$K_i = 0.0072 + 0.0074K_{r_1} + 0.016K_{r_2}$$

$m = 3$ için, karmaşık ve gerçel kök geçiş sınırları sırasıyla $K_{r_1} - K_{r_2}$ düzlemine aktarılır.



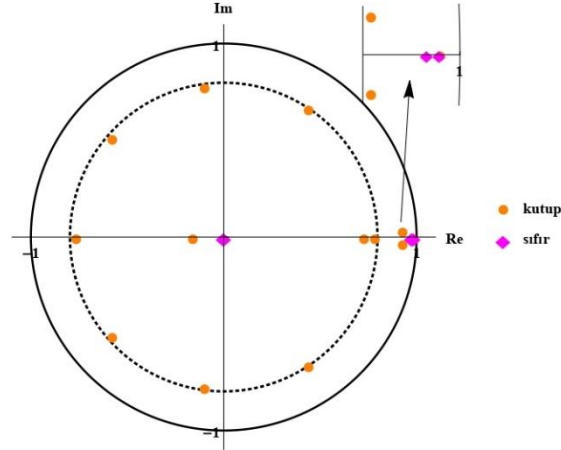
Şekil 14. h_{22} için, $K_{r_1} - K_{r_2}$ düzlemindeki çözüm kümesi (Örnek 2).

Şekil 14'deki * ile gösterilen bölge parametre çözüm kümesidir. Bu bölge içinden, $K_{r_1} = 0.22$ ve $K_{r_2} = 0.048$ olarak seçilirse, aynı şekilde baskın bölgede fazladan bir kutbun ve bir sıfırın konumlandığı görülmektedir. Baskın bölgede kalan fazladan kutup $z = 0.9832$ için, yine ayrık PI-PR² yapısı kullanılabilir. $K_{pi} = 0.5599$ ile tasarlanan kontrolör

$$C_{PI}(z) = \frac{0.5695z - 0.5599}{z - 1}$$

$$C_{PR^2}(z) = \frac{-0.0768z^2 - 0.22z - 0.048}{z^2}$$

olarak hesaplanmıştır. Kapalı çevrim sistemin kutup-sıfır dağılımları Şekil 15'de gösterilmiştir.

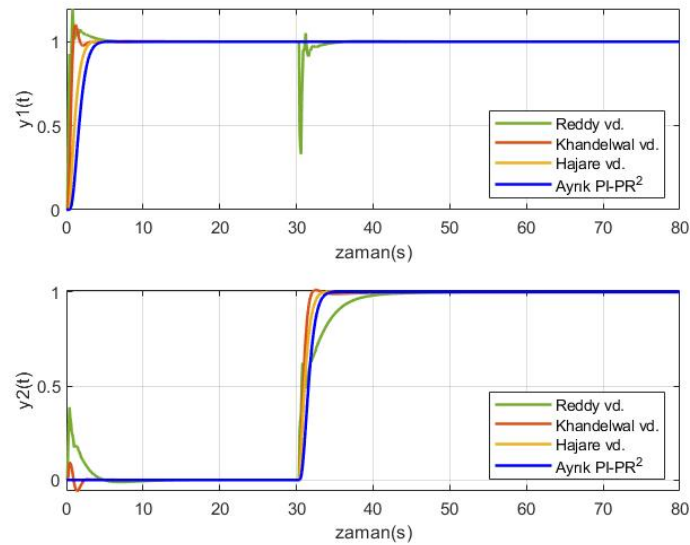


Şekil 15. h_{22} için, kapalı çevrim sistemin ayırık PI-PR² ile kutup-sıfır dağılımı (Örnek 2).

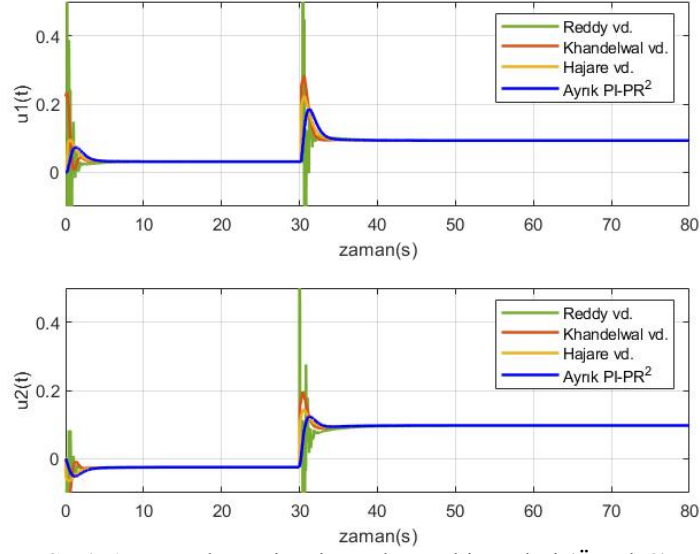
Baskın bölgedeki sistemin sıfırının $z = 0.9827$ da kapalı çevrim geçici hal yanıtında olumsuz etkisini ortadan kaldırmak için, h_{11} için kullanılan ön filtre kullanılmıştır. Önerilen tasarım yöntemi [21]–[23]'de verilen yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler ile bulunan kontrolörler Tablo 3'de verilmiştir. 0. saniyede birinci basamak girişi 30. saniyede ise ikinci basamak girişi için kapalı çevrim sistemin basamak yanıtları ve kontrol işaretleri Şekil 16 ve 17'de verilmiştir.

Tablo 3. Kontrolör parametreleri (Örnek 2).

Yöntem	Kontrolörler
Reddy vd.	$C_{PID}(s) = 0.53 + \frac{0.2199}{s} + 0.08s$
	$C_{PID}(s) = 0.1158 + \frac{0.0571}{s} + 0.09s$
Khan. vd.	$C_{PI}(s) = 0.222 + \frac{0.0628}{s}$
	$C_{PI}(s) = 0.172 + \frac{0.1235}{s}$
Hajare vd.	$C_{PID}(s) = 0.0248 + \frac{0.0044}{s} + 0.0257s$
	$C_{PID}(s) = 0.0248 + \frac{0.0044}{s} + 0.0257s$



Şekil 16. Kapalı çevrim sistem basamak yanıtları (Örnek 2).



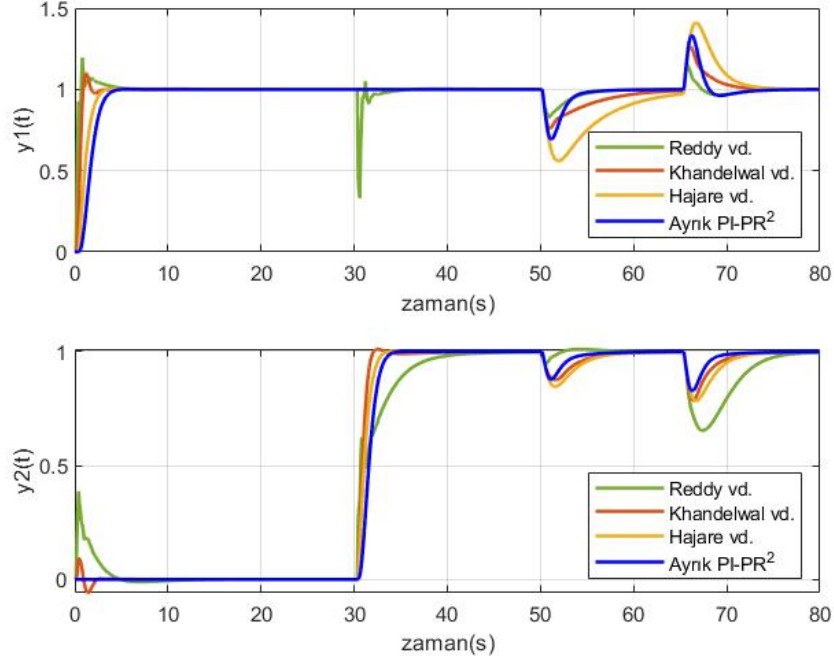
Şekil 17. Kapalı çevrim sistem kontrol işaretleri (Örnek 2).

Şekil 15'de görülebileceği üzere, birinci çevrimde %0.03 aşım ve 3.3 saniye yerleşme zamanı ve ikinci çevrimde %0.05 aşım ve 3.08 saniye yerleşme zamanı sağlanmaktadır. Böylece, istenilen performans özelliklerinin büyük ölçüde sağlandığı söylenebilir. İstenilen kriterlerle sağlanan özellikler arasındaki küçük farkın sebebi tasarımda sıfır aşım istenmesidir. Verilen kontrolörler için, kapalı çevrim sistemdeki bazı performans özellikleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Kapalı çevrim sistemdeki performans özellikleri (Örnek 2).

	yz (s)	aşım (%)	ISE
Reddy vd. (1)	3.654	19.648	0.355
Reddy vd. (2)	9.12	0	1.059
Khan. vd. (1)	2.129	9.87	0.445
Khan. vd. (2)	1.465	0.97	0.72
Hajare vd. (1)	2.443	0.327	0.871
Hajare vd. (2)	2.446	0.293	0.871
Ayrık PI-PR² (1)	3.35	0.03	0.236
Ayrık PI-PR² (2)	3.13	0.05	0.263

Önerilen tasarım yöntemi diğer kontrolörlere göre yeterince az yerleşme zamanının yanında en düşük aşım ve en iyi ISE değerine sahiptir. 50. ve 65. saniyelerde -0.1 genlikli basamak bozucu sırasıyla birinci ve ikinci bozucu girişlerinden uygulanmış ve Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 18. 50 ve 65. saniyelerde bozucu giriş ile kapalı çevrim sistem basamak yanıtları (Örnek 2).

Şekil 18'de görüldüğü üzere, önerilen tasarım yönteminin bozucu bastırma performansı yeterlidir. Bununla birlikte, bu sistem için benzetim çalışmasında belirtilen performans özelliklerine göre PIR kontrolör tasarlanmaya çalışıldığında elde edilen kontrolör kümesinin boş olduğu görülmüştür. h_{11} için, 2.9 saniye ve h_{22} için, 2.7 saniye yerleşme zamanları seçildiğinde bir kontrolör parametre kümesi elde edilebilmiştir. Bulunan K_r parametre kümesi aralıkları ise sırasıyla (0.373,0.4187) ve (0.5273,0.5746) olarak elde edilmiştir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, iki giriş iki çıkışlı sistemler için merkezi olmayan yapıda ayrık zamanda PI-PR² kontrolör tasarımı önerilmiştir. Tasarımda, baskın kutup atama yöntemi kullanılmıştır. Kontrol çevrimleri arasındaki etkileşim bir ayrıştırıcı yöntemi ile kesilmiş ve her bir alt sistem transfer fonksiyonu için parametre çözüm kümesi elde edilmiştir. Bunun için, ilk olarak istenilen kapalı çevrim sistemin performans özelliklerine göre bir kutup çifti baskın bölgeye yerleştirilmiş, kalan kutuplar için ise konumlanmaları istenen çemberin yarıçapı belirlenmiştir. Daha sonra, belirlenen çember bölgesi parametre düzlemine aktarılarak ilgili çözüm kümesi bulunmuştur.

Önerilen tasarım yöntemi, iki benzetim çalışması üzerinden incelenmiştir. İlk örnekte, önerilen kontrolör PI-PD ve PI-PR kontrolörler ile karşılaştırılmış ve avantajları gösterilmiştir. İkinci örnekte ise literatürdeki bazı kontrol yöntemleri ile karşılaştırılmış ve performans özelliklerini karşıladığı gösterilmiştir (neredeyse sıfır aşım ve minimum yerleşme zamanı). PIR² kontrolör yapısı ile PIR kontrolöre kıyasla daha geniş çözüm kümesi bulunabilmiştir. Bununla birlikte, PIR kontrolör ile sağlanamayan yerleşme zamanı sağlanabilmiştir.

Baskın bölgede kalan kutup için, PI-PR² yapısı önerilmiştir; böylece, hem bu kutbun olumsuz etkilerinden kurtulmuş hem de kontrolör sıfırının konumu istenilen şekilde belirlenebilmiştir. Baskın bölgede kalan sistemin sıfırı için ise, bir ön-filtre kullanılması önerilmiş ve istenmeyen geçici hal yanıtından kaçınılmıştır. Bu tasarım yöntemi ile elde edilen çözüm kümesinin boş çıkabileceği unutulmamalıdır. Eğer, parametre seti boş bulunursa, uygun bir çözüm kümesi bulunana kadar tasarım kriterleri ve/veya baskınlık katsayısı değiştirilmelidir.

Gelecek çalışma olarak, PIR² kontrolörün sürekli zaman düzleminde tasarımı düşünülebilir. Ek olarak, bu tasarım yönteminin çok giriş çok çıkışlı sistemler için genişletilmesi için çalışmalar yapılabilir.

Kaynaklar

- [1] Åström KJ, Murray RM. Feedback systems: An introduction for scientists and engineers. New Jersey, USA, Princeton University, 2010.
- [2] Ackermann J, Bartlett A, Kaesbauer D, Sienel W, Steinhauser R, Robust control: Systems with uncertain physical parameters. London, Springer, 1993.
- [3] Halder K, Das S, Gupta A, Time delay handling in dominant pole placement with PID controllers to obtain stability regions using random sampling, *International Journal of Control*, 2020, 94(12), 3384-3405.
- [4] Wang H, Han QL, Liu J, He D, Discrete-time filter proportional–integral–derivative controller design for linear time-invariant systems, *Automatica*, 2020, 116, 1-15.
- [5] Wang QG, Zhang Z, Åström KJ, Zhang Y, Zhang Y, Guaranteed dominant pole placement with PID controllers, *IFAC Proceedings Volumes*, 2008, 41(2), 5842–5845.
- [6] Dincel E, Söylemez MT, Guaranteed dominant pole placement with discrete-PID controllers: a modified Nyquist plot approach, *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, 47(3), 3122–3127.
- [7] Åström KJ, Hägglund T, The future of PID control, *Control Engineering Practice*, 2001, 9(11), 1163–1175.
- [8] Kharitonov VL, Niculescu SI, Moreno J, Michiels W, Static output feedback stabilization: Necessary conditions for multiple delay controllers, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(1), 82-86.
- [9] Niculescu SI, Michiels W, Stabilizing a chain of integrators using multiple delays, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(5), 802-807.
- [10] Ramírez A, Mondié S, Garrido R, Sipahi R, Design of proportional-integral-retarded (PIR) controllers for second-order LTI systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 61(6), 1688–1693.
- [11] López K, Mondié S, Garrido R, A tuning procedure for the Cascade Proportional Integral Retarded Controller, *IFAC-PapersOnLine*, 2018, 51(14), 61-65.
- [12] Ramirez A, Sipahi R, Fast Consensus Against Noise in a Large-Scale Multi-Agent System with Distributed Proportional-Retarded (PR) Controllers, 2018 Annual American Control Conference (ACC), 2018, Milwaukee, WI, USA, 3666-3671.
- [13] Mammadov AD, Dincel E, Söylemez MT, Analytical design of discrete PI–PR controllers via dominant pole assignment, *ISA Transactions*, 2022, 123, pp. 312–322, 2022.
- [14] Hu Z, Li D, Wang J, Xue F, Analytical Design of PID Decoupling Control for TITO Processes with Time Delays, *Journal of Computers*, 2011, 6(6), 1064-1070.
- [15] Noeding M, Martensen J, Lemke N, Tegethoff W, Koehler J, Selection of decoupling control methods suited for automated design for uncertain TITO processes, 2018 IEEE 14th International Conference on Control and Automation (ICCA), 2018, Anchorage, AK, USA, 498–505.
- [16] Wutthithanyawat C, Wangnippamto S, Design of Decentralized PID Controller with Coefficient Diagram Method Based on Inverted Decoupling for TITO System, 2018 International Electrical Engineering Congress (IEECON), 2018, Krabi, Thailand, 1–4.
- [17] Lakshmanprabu SK, Elhoseny M, Shankar K, Optimal tuning of decentralized fractional order PID controllers for TITO process using equivalent transfer function, *Cognitive Systems Research*, 2019, 58, 292–303.
- [18] Mammadov AD, Dincel E, Söylemez MT, Design of decentralized proportional–integral proportional–retarded controllers in discrete-time domain for two-input two-output processes, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2023, 45(3), 427-439.
- [19] Maghade DK, Patre BM, Decentralized PI/PID controllers based on gain and phase margin specifications for TITO processes, *ISA Transactions*, 2012, 51(4), 550–558.
- [20] Chien IL, Huang HP, Yang JC, A simple multiloop tuning method for PID controllers with no proportional kick, *Industrial & engineering chemistry research*, 1999, 38(4), 1456-1468.
- [21] Reddy MDL, Padhy PK, Ansari IA, Auto-tuning method for decentralized PID controller of TITO systems using firefly algorithm, 2019 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICCS), 2019, Madurai, India, 683–688.
- [22] Khandelwal S, Aldhandi S, Detroja KP, Decoupling control with etf based gpm tuning for multivariable processes, 2019 Fifth Indian Control Conference (ICC), 2019, New Delhi, India, 63–67.
- [23] Hajare VD, Patre BM, Khandekar AA, Malwatkar GM, Decentralized PID controller design for TITO processes with experimental validation, *International Journal of Dynamics and Control*, 2017, 5(3), 583–595.

Feature Selection From MagFace Face Recognition Model With Optimization Algorithms

Mehmet Fatih ÖZDEMİR^{1,2*}, Davut HANBAY²

¹ Havelsan A.Ş., Ankara, Türkiye

² Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Malatya, Türkiye

*¹ mfatih.ozdemir@inonu.edu.tr, ² davut.hanbay@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 12/01/2023;

Kabul/Accepted: 20/06/2023)

Abstract: In recent years, many studies have been carried out in the field of artificial intelligence in the literature with the development of equipment. Face recognition algorithms have an important place among these developments. Among the face recognition algorithms, the most successful ones are usually deep learning approaches. Models such as SphereFace, CosFace, ArcFace, and MagFace are important deep learning models in the literature. Despite their success, deep learning models are often computationally costly. Therefore, advanced methods are needed to reduce the computational load for these models. One of the most valid methods for this is to choose the most valuable one among embedding features for face recognition. Thus, cost can be reduced, and accuracy values can be increased even more. In this study, the most valuable of the 512 embedded features in the MagFace model was tried to be obtained by using PSO, GA, SCA, and DE optimization algorithms. As a result, accuracy values of 99.83%, 98.57%, and 98.65% were reached for 193, 252, and 280 features selected in the LFW, CFP, and AGEDB datasets, respectively.

Key words: Face Recognition, Feature Selection, Optimization.

Optimizasyon Algoritmaları ile MagFace Yüz Tanıma Modelinden Özellik Seçimi

Öz: Son yıllarda gelişen donanımlarla birlikte literatürde yapay zekâ alanında birçok çalışma yapılmaktadır. Bu gelişmeler arasında yüz tanıma algoritmaları önemli bir yere sahiptir. Yüz tanıma algoritmaları arasında ise en başarılı olanları genellikle derin öğrenme yaklaşımlarıdır. SphereFace, CosFace, ArcFace, MagFace gibi modeller literatürde yer alan önemli derin öğrenme modelleridir. Derin öğrenme modelleri başarılarının aksine genellikle hesaplama açısından maliyetlidir. Bu nedenle, bu modeller için hesaplama yükünü azaltacak gelişmiş yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için en geçerli yöntemlerden biri gömülü yüz öznitelikleri arasından en değerli olanı seçmektir. Böylece maliyet düşürülebilir hatta başarı değerleri daha da artırılabilir. Bu çalışmada PSO, GA, SCA, DE optimizasyon algoritmaları kullanılarak MagFace 512 gömülü özelliklerinin en değerlileri elde edilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak LFW, CFP, AGEDB veri setlerinde seçilen değerli 193, 252, 280 öznitelikleri sırasıyla 99.83, 98.57, 98.65 doğruluk değerlerine ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yüz Tanıma, Öznitelik Seçimi, Optimizasyon.

1. Introduction

Face recognition algorithms have been developing rapidly in recent years. Along with these developments, there are many problems that need to be dealt with, such as low resolution, blurriness, and lighting issues. In addition, it is necessary to correctly extract the real features of the face for successful face recognition.

Face recognition algorithms are examined in two categories in the literature: closed-set and open-set. In the open-set approach, the identities in the train dataset and test dataset are expected to be completely different. After the face features are extracted in the face recognition model, a comparison is made using the nearest neighbor metric. In the closed-set approach, the identities of the training dataset must be included in the test dataset. Therefore, it operates in a more limited space. On the other hand, the open-set approach is universally adaptable. However, obtaining learning characteristics in the open-set system is often difficult due to high inter-class similarity and large intra-class variation. SphereFace [1], CosFace [2], ArcFace [3], and MagFace [4] can be shown among the successful open-set models in the literature. SphereFace used A-Softmax loss function, which is characterized as angular Softmax, enabling convolutional neural networks to learn angular distinctive features. The A-Softmax loss function can be easily generalized for multiple classes, similar to the softmax loss in the classification process. To learn the task of the minimum distance between classes being greater than the maximum

* Sorumlu yazar: mfatih.ozdemir@inonu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-3563-054X, ² 0000-0003-2271-7865

distance within classes, the limit values were obtained. The model trained on the CASIA-WebFace [5] dataset achieved competitive results on various criteria in the LFW [6], YTF [7], and MegaFace [8] datasets.

Deep learning models in face recognition methods generally use large margin Softmax or angular Softmax loss functions instead of traditional Softmax. All these loss functions aim to maximize the variance between classes and minimize the variance within the class. In the CosFace model, a new loss function called Large Margin Cosine Loss (LMCL) is proposed with this approach. It uses a cosine margin to further maximize the decision margin in angular space. The model is trained on the CASIA-WebFace dataset using the large margin cosine loss function. Benchmarks were made on the CosFace model, MegaFace, YTF, and LFW face recognition datasets.

ArcFace, on the other hand, has proposed a new loss function with the same approach. ArcFace, the proposed face recognition model to obtain highly distinctive features, has a clear geometric interpretation as it fits the geodesic distance on a hypersphere precisely with its new loss function. The softmax loss function used in many standard face recognition approaches has been reinterpreted.

MagFace, on the other hand, emerged as a model that falls into the category of loss functions that learn a universal feature that can evaluate the quality of the face. The model attracted relevant candidates to class centers while removing irrelevant candidates, thus providing an adaptive mechanism to learn well-structured in-class feature distributions. As a result, it was emphasized that it prevents the models from overfitting to noisy, low-quality samples. In the study, extensive experiments on face recognition, quality evaluation, and clustering underscored its superiority over state-of-the-art technology.

In the study, it was aimed to select valuable features by using face-embedding features, which are outputs of MagFace face recognition algorithm. Valuable features were selected using 4 optimization algorithms for embedded features in the output. The success of the selected features in the datasets has been tested.

The organization of the article consists of four sections. Methods and algorithms used are described in the materials and methods section. Details of the application are given in the third section and the conclusions are given in the fourth section.

2. Material and Methods

2.1. MagFace

Face recognition systems perform poorly when there is a lot of variation in the faces they analyze. To tackle this issue, a new approach called MagFace [4] is proposed. MagFace uses a set of losses to learn a feature embedding that can measure the quality of a face based on its magnitude. This approach ensures that the magnitude of the feature embedding increases for faces that are more likely to be recognized. It also includes a mechanism to improve the structure of within-class feature distributions, preventing overfitting on low-quality samples and enhancing face recognition in real-world scenarios.

The another face recognition losses based on cosine similarity lacks a detailed constraint beyond a fixed margin, resulting in an unstable within-class structure, especially when faces have high variability. MagFace addresses this problem by encoding a quality measure into the face representation. Unlike previous methods that introduce uncertainty terms, MagFace optimizes the magnitude of each feature without normalization, allowing the use of the cosine-based metric commonly used in inference systems. By simultaneously considering the direction and magnitude, the learned face representation becomes more robust to variations in real-world faces. This is the first work to unify feature magnitude as a quality indicator in face recognition.

MagFace incorporates two auxiliary functions: the magnitude-aware angular margin and the regularizer. The angular margin concentrates high-quality face samples around the cluster center, penalizing samples with large magnitudes more. The regularizer rewards samples with large magnitudes and pushes them towards the boundary of the feasible region. This approach extends the ArcFace method by incorporating the magnitude-aware margin and regularizer, promoting diversity among different face samples and similarity among samples of the same class. MagFace's design is intuitive and also provides theoretical guarantees, ensuring a unique optimal solution for the magnitude and revealing the difficulties of recognition based on feature magnitudes. The new loss proposed by MagFace is shown in Eq. 1.

$$L_{Mag} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i \quad \text{where} \quad L_i = \frac{e^s \cos(\theta_{y_i + m(a_i)})}{e^s \cos(\theta_{y_i + m(a_i)}) + \sum_{j \neq y_i} e^s \cos \theta_j} \quad (1)$$

where λg determines the balance between the classification loss and the regularization loss. a_i is magnitude. $m(a_i)$ is the magnitude of the angular edge, that is the ascending convex function. $g(a_i)$ is the regularizer that diminishing convex function. Let's consider a training batch consisting of N face samples $\{f_i, y_i\}_{i=1}^N$, where $(f_i \in R^d)$ represents the d -dimensional embedding obtained from the last fully connected layer of the neural networks. Each sample is associated with a class label y_i , ranging from 1 to n , representing different identities. The angle θ_j is between j -th class center and f_i . The parameter m , with a value greater than zero ($m > 0$), represents the additive angular margin, while s refers to the scaling parameter.

2.2. Particle swarm optimizer (PSO)

Particle Swarm Optimizer (PSO) [9] is metaheuristic as it forms few or no suppositions for problems being optimized and is able to explore very large areas of candidate solutions. It also does not use the gradient of the optimized problem. That is, it does not require the optimization problem to be differentiable as required by classical optimization methods such as quasi-newton and gradient descent methods. However, metaheuristic methods such as PSO do not guarantee that an optimal solution will be found.

The PSO algorithm works for optimization using a population (called a swarm) of candidate solutions (called particles). These particles are displaced in the search space according to some formulas. Particles are guided by the swarm's best-known positions along with the best-known positions in the search space. Discovered improved locations guide the movements of the swarm. The optimization process cannot be guaranteed, but a satisfactory solution can be hoped. Cost-effect is quite successful as to other heuristic algorithms. The position and velocity of each particle are regenerated using Eq. 2.

$$v_{t+1}^i = v_t^i + c_1 r_1 (pbest_t^i - x_t^i) + c_2 r_2 (gbest - x_t^i) \quad (2)$$

where v_t^i indicates the i th particle's velocity at the iteration t , indicates x_t^i , i th particle at the iteration t , c_1 refers to cognition learning parameter, c_2 refers to social learning parameter, r_1 and r_2 are random numbers (0-1), $pbest_t^i$ indicates local best position for i th particle at the iteration t , $gbest$ indicates global best position for all particles. v_{t+1}^i indicates the i th particle's the velocity at next iteration $t + 1$.

Particles are re-positioned as to an objective function. Each particle compares the fitness values from the previous best position to the current position in order to find the new best position. $c_1 r_1 (pbest_t^i - x_t^i)$ in the formula is used for this. Also, $c_2 r_2 (gbest - x_t^i)$ in the formula is used to approximate particles to the global best position of all particles.

2.3. Genetic algorithm (GA)

For the first time in history, genetic algorithm emerged as a stochastic solution to optimization problems. Genetic algorithm (GA) [10] is an approach to solving constrained or unconstrained optimization problems. At each step, individuals are randomly selected from the current population. Selected individuals use as parents for the next generation. The population changes towards an optimal solution over successive generations. This algorithm is used to solve problems where the fitness function is stochastic, non-differentiable, discontinuous or not highly linear. At the same time, it can be used to solve problems that are not very suitable for standard optimization algorithms. The genetic algorithm summary is as follows:

- Initialize populations randomly and determine fitness of the population.
- While algorithm stop conditions are not satisfied:
 - a. Calculate the score of the current population using raw fitness data for each member
 - b. Calculate expectation values to convert raw fitness scores into a more useful range of values.
 - c. Selects parents based on their expectation values.
 - d. Some of the individuals with a lower fitness value are selected as elite and transferred to the next population.
 - e. The offspring are obtained either by random changes (mutation) in a single parent or by combining vector inputs from a pair of parents (crossover).
 - f. Replaces the current population with the offspring to create the next generation.

2.4. Sine cosine algorithm (SCA)

A new population-based stochastic optimization algorithm called Sine Cosine Algorithm (SCA) [11] was proposed in 2016. SCA initially generates multiple candidate solutions randomly. A mathematical model based on sine and cosine functions is used. This mathematical model makes it fluctuate out of the solution space or towards the best solution. Various adaptive and random variables are also integrated to explore the search space of the optimization.

The common approach among algorithms in the field of stochastic population-based optimization is to consider the optimization process in two stages. The first phase aims to discover promising regions of the search space with a sudden and high randomness in the set of solutions. The second is usage stage that random variations are significantly less at this stage than at the discovery stage.

2.5. Differential evolution (DE)

Differential Evolution (DE) [12] is a stochastic, population-based optimization method. The DE method is simple, easy to use, robust and fast. DE tries to iteratively improve a candidate solution. Such methods are often known as meta-heuristics, as they make few suppositions about the problem and can discover very large areas of candidate solutions. DE is used for multidimensional real-valued functions, ignoring the gradient of the optimized problem. Therefore, DE does not require the optimization problem to be differentiable. As a result, DE is noisy, time-varying, etc. can be used in optimization problems. DE algorithm summary is as follows:

- Initialization individuals with NP (NP Population Size).
- Calculate the fitness values for all individuals.
- While the termination condition is not satisfied:
 - a. For each individual (j) in the population.
 - i. Generate three vectors ($r_1, r_2, r_3 \in (1, NP)$) from the current population randomly.
 - ii. Generate random number ($i_{rand} \in (1, n)$).
 - iii. Create mutant vectors using a mutation using ($v_{i,j} = r_1 + F(r_2 - r_3)$) formula.
 - iv. Evaluate three vectors using their fitness values using following equation.
 1.
$$u_{i,j} = \begin{cases} v_{i,j}, & \text{if } r_{i,j} \leq \text{Crossover Probability or } i = i_{rand} \\ x_{i,j}, & \text{otherwise} \end{cases}$$
 - v. Select winning vectors in the new generation.

3. Application

All codes runned for this study using a system with Intel(R) Xeon(R) W-2245 processor and 32 GB RAM. The codes were written in python 3.8 using niapy [13] library.

Features for the datasets are extracted using the model trained using the iResNet100 backbone shared in the MagFace [4] repository. Then, the most valuable ones were tried to be selected by using these features. The cosine distance metric was used as the objective function of the algorithms. Each algorithm was run with 30 population size and 100 iterations. The k-fold value of 10 is selected. Thus, it is aimed to obtain the results more objectively and accurately.

A study was conducted to select the most valuable face recognition embedding features, as shown in Figure 1. First, embedded features were extracted from the images in the dataset using the open-set face recognition model MagFace [4]. The MagFace model generates 512 embedded features. Then, it is aimed to select the most valuable features from the 512 embedded features. In the literature, optimization algorithms are among the most preferred algorithms for feature selection. In this study, PSO [9], GA [10], SCA [11], DE [12] optimization algorithms were used to select the most valuable features. These algorithms were run for 100 iterations respectively and the results were obtained. In the study, LFW [6], CFP [14], AGEDB [15] datasets from the MagFace article were used as datasets. In addition, to generalize the optimization, the existing datasets (LFW + CFP + AGEDB) were combined and the fourth dataset was included in the study.

In Table 1, the number of the most valuable features selected from each data set using optimization algorithms is shared. As a result of the experiments, between 193 and 285 valuable features were obtained. It has been determined that the number of valuable features obtained is almost half of the total.

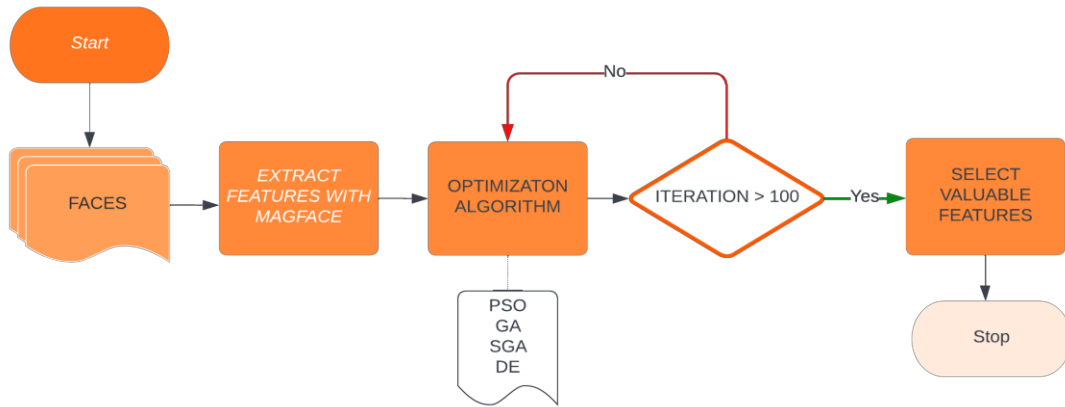


Figure 1. Flowchart of selection valuable features.

Table 1. Number of feature selections.

Algorithm	LFW	CFP	AGEDB	LFW + CFP + AGEDB
PSO	193	252	280	260
GA	231	269	245	265
SCA	234	269	254	256
DE	205	285	275	257

In Table-2, a study was conducted to examine the effects of the selected features in any data set on other data sets by using their indices. In other words, the results in other datasets were examined by using the features obtained in any dataset. It is used to evaluate the accuracy metric. The following steps are performed to obtain the accuracy value.

- The indexes corresponding to the features selected from the dataset are obtained.
- The values in the indexes obtained for other datasets are selected.
- The accuracy value is calculated for the selected features.

Table 2. Selected features accuracies.

Algorithm	Selected Features	LFW	CFP	AGEDB
SphereFace [1]	-	99.67	96.84	97.05
CosFace [2]	-	99.78	98.26	98.17
ArcFace [3]	-	99.81	98.40	98.05
MagFace [4]	-	99.83	98.46	98.17
PSO	LFW(193)	99.83	97.55	97.81
	CFP(252)	99.76	98.57	97.86
	AGEDB(280)	99.8	97.67	98.65
	LFW+CFP+AGEDB(260)	99.75	98.02	98.33
GA	LFW(231)	99.83	97.4	97.63
	CFP(269)	99.78	98.18	97.88
	AGEDB(245)	99.73	97.54	98.3
	LFW+CFP+AGEDB(265)	99.8	98.08	97.93
SCA	LFW(234)	99.81	97.77	97.81
	CFP(269)	99.8	98.17	98.05
	AGEDB(254)	99.76	97.84	98.18
	LFW+CFP+AGEDB(256)	99.78	97.77	98.06
DE	LFW(205)	99.83	97.57	97.81
	CFP(285)	99.7	98.48	98
	AGEDB(275)	99.78	98.1	98.55
	LFW+CFP+AGEDB(257)	99.76	98.05	98.23

MagFace [4] has the best accuracy in LFW dataset, but with the help of valuable features obtained using PSO algorithm, the same accuracy has been achieved by using less features. On the other hand, in CFP and AgeDB datasets, more accuracy results were obtained with the help of valuable features obtained by using the PSO algorithm. As a result, accuracy values of 99.83, 98.57, 98.65 were obtain by using fewer features in LFW, CFP, AGEDB datasets, respectively.

4. Conclusion

In current study, the most valuable features of the embedding features produced by MagFace model were tried to be selected. Four different optimization algorithms were used. These are PSO, GA, SCA, and DE optimization algorithms. Accuracy values of 99.83, 98.57, and 98.65 were obtained in LFW, CFP, and AGEDB data sets, respectively. It was observed that the PSO algorithm made a more successful selection in LFW, CFP, and AGEDB data sets. Moreover, the same or higher accuracies were obtained with approximately half of the embedding features thanks to these algorithms. In addition, a cost-effective proposal was presented thanks to the comparison of fewer features in face recognition.

The study can be used as a reference for future research. Also, valuable features can be obtained by applying different face recognition algorithms using this study. Cost-effective systems can design using fewer embedding features.

References

- [1] Weiyang Liu, Yandong Wen, Zhiding Yu, Ming Li, Bhiksha Raj, and Le Song. Sphreface: Deep hypersphere embedding for face recognition. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pages 212–220, 2017.
- [2] Hao Wang, Yitong Wang, Zheng Zhou, Xing Ji, Dihong Gong, Jingchao Zhou, Zhifeng Li, and Wei Liu. Cosface: Large margin cosine loss for deep face recognition. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pages 5265–5274, 2018.
- [3] Jiankang Deng, Jia Guo, Niannan Xue, and Stefanos Zafeiriou. Arcface: Additive angular margin loss for deep face recognition. In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, pages 4690–4699, 2019.
- [4] Qiang Meng, Shichao Zhao, Zhida Huang, and Feng Zhou. Magface: A universal representation for face recognition and quality assessment. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 14225–14234, 2021.
- [5] Dong Yi, Zhen Lei, Shengcai Liao, and Stan Z Li. Learning face representation from scratch. arXiv preprint arXiv:1411.7923, 2014.
- [6] Gary B Huang, Marwan Mattar, Tamara Berg, and Eric Learned-Miller. Labeled faces in the wild: A database for studying face recognition in unconstrained environments. In Workshop on faces in 'Real-Life' Images: detection, alignment, and recognition, 2008.
- [7] Lior Wolf, Tal Hassner, and Itay Maoz. Face recognition in unconstrained videos with matched background similarity. In CVPR 2011, pages 529–534. IEEE, 2011.
- [8] Ira Kemelmacher-Shlizerman, Steven M Seitz, Daniel Miller, and Evan Brossard. The megaface benchmark: 1 million faces for recognition at scale. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pages 4873–4882, 2016.
- [9] James Kennedy and Russell Eberhart. Particle swarm optimization. In Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks, volume 4, pages 1942–1948. IEEE, 1995.
- [10] John H Holland. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. MIT press, 1992.
- [11] Seyedali Mirjalili. SCA: A Sine Cosine Algorithm for solving optimization problems. Knowledge-Based Systems, 96:120–133, March 2016.
- [12] Rainer Storn and Kenneth Price. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. Journal of global optimization, 11(4):341–359, 1997.

- [13] Grega Vrbancič, Lucija Brezocnik, Uroš Mlakar, Dušan Fister, and Iztok Fister Jr. NiaPy: Python microframework for building nature-inspired algorithms. *Journal of Open Source Software*, 3, 2018.
- [14] Soumyadip Sengupta, Jun-Cheng Chen, Carlos Castillo, Vishal M. Patel, Rama Chellappa, and David W. Jacobs. Frontal to profile face verification in the wild. In *2016 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, pages 1–9, 2016.
- [15] Stylianos Moschoglou, Athanasios Papaioannou, Christos Sagonas, Jiankang Deng, Irene Kotsia, and Stefanos Zafeiriou. Agedb: The first manually collected, in-the-wild age database. In *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, pages 1997–2005, 2017.

Siber Güvenlikte CIC-Darknet2020 Veri Seti Kullanarak VPN/NoVPN ve Tor/NoTor Sınıflandırması: Basit ve Karmaşık Modellerin Kullanımı

Yusuf ALACA^{1*}

¹ Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Osmancık Ömer Derindere MYO, Hitit Üniversitesi, Çorum, Türkiye

*1 yusufalaca@hitit.edu.tr

(Geliş/Received: 02/05/2023;

Kabul/Accepted: 01/07/2023)

Öz: İnternet kullanımını günümüzde hızla artmakta ve birçok işlem dijital ortamda gerçekleştirilmektedir. Ancak, bu durum aynı zamanda internetin kötüye kullanımına zemin hazırlamaktadır. Siber suçlar ve saldırılar her geçen gün artmaktadır ve siber güvenlik konusu son derece önemli hale gelmiştir. CIC-Darknet2020 adlı veri seti, siber güvenlik alanında çalışan araştırmacılar tarafından hazırlanmış ve Darknet ağlarında gerçekleşen trafiği içermektedir. Bu trafiğin analizi, Darknet ağlarındaki faaliyetler hakkında önemli bilgiler sağlayabilmektedir. Bu çalışmada, CIC-Darknet2020 veri seti üzerinde modeller kullanılarak VPN/NoVPN ve Tor/NoTor sınıflandırması yapılmıştır. OneR ve Ensemble OneR modelleri kullanılarak yapılan sınıflandırma sonuçları incelenmiştir. Sonuçlar, VPN/NoVPN sınıflandırması için Ensemble OneR modelinin ROC-AUC değerinin 0.779 olduğunu göstermiştir. Tor/NoTor sınıflandırması için ise Ensemble OneR modeli, son derece iyi sonuçlar elde ederek ROC-AUC değeri 0.980 olmuştur. Bu çalışma, siber güvenlik alanında basit modellerin bile önemli sonuçlar elde edebileceğini ve kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Ancak, daha karmaşık modellerin kullanımının da gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Siber güvenlik alanında hem basit hem de karmaşık modellerin kullanılması gerektiği sonucuna varılmaktadır. Sonuç olarak, CIC-Darknet2020 veri seti üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar siber güvenlik alanında farklı modeller kullanılarak VPN/NoVPN ve Tor/NoTor sınıflandırması yapılabilirliğini göstermektedir. Bu çalışmanın sonuçları, daha karmaşık modellerin kullanımının gerekliliği ortaya koysa da, basit modellerin bile önemli sonuçlar elde edebileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Siber güvenlik, VPN, Tor, Ensemble OneR modeli, sınıflandırma.

Classification of VPN/NoVPN and Tor/NoTor Using CIC-Darknet2020 Dataset in Cybersecurity: Utilizing Simple and Complex Models

Abstract: Internet usage is rapidly increasing today, and many transactions are being carried out in the digital environment. However, this situation also paves the way for the misuse of the internet. Cybercrimes and attacks are increasing day by day, and the issue of cybersecurity has become extremely important. The CIC-Darknet2020 dataset, prepared by researchers working in the field of cybersecurity, contains traffic occurring in Darknet networks. The analysis of this traffic can provide important information about activities on Darknet networks. In this study, VPN/NoVPN and Tor/NoTor classification were made using models on the CIC-Darknet2020 dataset. The classification results obtained using OneR and Ensemble OneR models were examined. The results showed that the ROC-AUC value of the Ensemble OneR model was 0.779 for VPN/NoVPN classification. For Tor/NoTor classification, the Ensemble OneR model achieved excellent results with a ROC-AUC value of 0.980. This study demonstrates that even simple models can achieve significant results in the field of cybersecurity and are usable. However, the use of more complex models also becomes necessary. It is concluded that both simple and complex models need to be used in the field of cybersecurity. In conclusion, the results obtained from the studies conducted on the CIC-Darknet2020 dataset demonstrate the possibility of performing VPN/NoVPN and Tor/NoTor classification using different models in the field of cybersecurity. Although the results of this study emphasize the necessity of using more complex models, they also demonstrate that even simple models can achieve significant results.

Key words: Cybersecurity, VPN, Tor, Ensemble OneR model, classification.

1. Giriş

Siber güvenlik alanında gerçekleştirilen araştırmalar ve çalışmalar, internet kullanımının yaygınlaşmasına paralel olarak siber suçlar ve zafiyetlerin artmasına yol açtığını göstermektedir. Bu durum, siber güvenlik konusunun son derece kritik bir öneme sahip olmasını beraberinde getirmektedir.

VPN (Sanal Özel Ağ) ve Tor (The Onion Router) hizmetleri, internet kullanıcılarının çevrimiçi gizliliklerini ve güvenliklerini artırmak için kullanılan araçlardan oluşmaktadır. Her ikisi de farklı çalışma prensiplerine ve zafiyetlere sahiptir.

* Sorumlu yazar: yusufalaca@hitit.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-4490-5384

VPN, internet trafiğini şifreleyerek kullanıcının IP adresini gizler ve verilerin güvenli bir şekilde iletilmesini sağlamaktadır. VPN kullanmak, internet sağlayıcısının veya diğer izleyicilerin izlemesini engellemekte ve internete bağlantısının konum bilgisini gizlemektedir. Ancak, VPN hizmetlerinde zafiyetler olabilmektedir.

Tor, internet trafiğini gizlemek için farklı sunucular üzerinden yönlendirilmiş bir ağ kullanmaktadır. Bu ağ üzerinden iletilen veriler, şifrelenir ve Tor ağındaki sunucular arasında rastgele yönlendirilir, bu nedenle kimlik bilgilerinin izlenmesi zorlaşmaktadır. Tor, anonimliği artırırken bazı zafiyetlere de sebep olabilmektedir.

CIC-Darknet2020 veri seti, siber güvenlik alanında çalışan araştırmacılar tarafından hazırlanmış ve Darknet ağlarında gerçekleşen trafiği içermektedir. Bu trafiğin analizi, Darknet ağlarındaki faaliyetler hakkında önemli bilgiler sağlayabilmektedir. Birçok araştırmacı, CIC-Darknet2020 veri seti üzerinde VPN/NoVPN ve Tor/NoTor sınıflandırması yapmak için modeller kullanmaktadır. Bu sınıflandırma, internet trafiğinin analizi için önemlidir. Birçok çalışmada, OneR modeli ve Ensemble OneR modeli kullanılmıştır. Bu modellerin kullanımı ile VPN/NoVPN ve Tor/NoTor sınıflandırması yapılabilmektedir.

Siber güvenlik alanında CIC-Darknet2020 veri seti kullanarak yapılan VPN/NoVPN ve Tor/NoTor sınıflandırması konusunda birçok akademik makale mevcuttur. Bu makalelerde, farklı modeller kullanılarak sınıflandırma sonuçları incelenmiştir. SVM ve Random Forest modelleri kullanılarak VPN tespiti yapılmıştır. Bu çalışmada, Random Forest modeli daha yüksek doğruluk oranı elde etmiştir[1]. Farklı sınıflandırma modelleri (Decision Tree, Naive Bayes, k-NN, SVM) kullanılarak Tor trafiği tespit edilmiştir[2]. Bu çalışmada, SVM modelinin en yüksek doğruluk oranını elde ettiği görülmüştür. Ayrıca, One-Class SVM modeli kullanılarak VPN trafiği tespit edilmiştir[3]. Bu çalışmada, One-Class SVM modelinin yüksek doğruluk oranı elde ettiği görülmüştür.

CIC-Darknet2020 veri seti kullanılarak VPN/NoVPN trafiği sınıflandırması yapılmıştır. Hem Ensemble OneR hem de derin öğrenme yöntemleri kullanılarak sınıflandırma yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, Ensemble OneR modelinin daha yüksek doğruluk ve daha düşük hesaplama maliyeti ile daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur[4]. Tor/NoTor trafiği sınıflandırması için farklı sınıflandırma algoritmaları karşılaştırılmıştır. CIC-Darknet2017 veri seti kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, K-NN, SVM ve Decision Tree gibi algoritmaların Ensemble OneR modelinden daha düşük doğruluk oranlarına sahip olduğunu göstermiştir[5-7]. Tor trafiğinde kötü amaçlı trafiği tespit etmek için bir makine öğrenmesi yaklaşımı kullanılmıştır. CIC-Darknet2017 veri seti kullanılmıştır. Çalışmada, Naive Bayes, Decision Tree, Random Forest ve SVM gibi farklı sınıflandırma algoritmaları kullanılmıştır. Sonuçlar, SVM ve Random Forest gibi daha karmaşık modellerin daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir[8-10]. Bu çalışmaların ortak noktası, siber güvenlik konusunda machine learning tekniklerinin kullanımının incelenmesidir. OneR ve Ensemble OneR modelleri, sınıflandırma için kullanılmıştır ve sonuçlar incelenmiştir. Bu çalışma, basit modellerin bile siber güvenlik alanında önemli sonuçlar elde edebileceğini göstermektedir. Ancak, daha karmaşık modellerin de kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

CIC-Darknet2020 veri seti üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilen CICFlowMeter aracı tanıtılmıştır. Bu araç, siber güvenlik analizleri için hafif bir akış özellikleri çıkarma aracı olarak kullanılabilir[11]. Birden çok çalışmada CIC-Darknet2020 veri seti üzerinde gerçekleştirilen bir dizi test sonucunda, DDos saldırılarının SDN ağlarında algılanması için bir makine öğrenimi algoritması kullanılmıştır[12-14]. Son olarak, siber güvenlik alanında makine öğrenimi tekniklerinin kullanımı incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında, CIC-Darknet2020 veri seti üzerinde gerçekleştirilen deneysel testler sonucunda yüksek oranda başarı elde edilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Veriseti

CIC-Darknet2020 veri seti[15], Darknet ağlarındaki trafiği içeren bir veri setidir. Toplamda 12 ayrı ağdaki 2,000'den fazla Darknet trafiği kaydını içermektedir. Bu kayıtlar arasında VPN, TOR, SSH ve diğer ağ protokollerinin trafiği bulunmaktadır[16]. Veri seti, siber güvenlik araştırmalarında kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Her bir kayıt, aşağıdaki özellikleri içermektedir:

- Kaydın zaman damgası (timestamp)
- Kaynağı ve hedefi belirten IP adresleri
- Kaynağı ve hedefi belirten port numaraları
- Kullanılan ağ protokolü (TCP, UDP, ICMP)
- Kaydın boyutu (bytes)

- Kaydın sınıflandırılması (normal, VPN, TOR, SSH)

Tablo 1’de bu çalışmada kullanılan veri setinde, VPN ve Tor ağları üzerinden gerçekleştirilen normal ve zararlı ağ trafiği verileri bulunmaktadır. Bu veriler VPN kullanılan durumlar için "VPN" ve VPN kullanılmayan durumlar için "NonVPN", Tor kullanılan durumlar için "Tor" ve Tor kullanılmayan durumlar için "NonTor" olarak veri seti etiketlenmiştir. Veri setinde toplam 103,121 örnek bulunmaktadır. Etiketlenmiş örnekler arasında "NonTor" sınıfından 64,804, "NonVPN" sınıfından 20,216, "VPN" sınıfından 16,922 ve "Tor" sınıfından ise sadece 1,179 örnek bulunmaktadır.

Tablo 1. Veri setindeki veri tipi ve büyüklükleri oranları.

Veri Tipi	Büyükük
NonTor	64804
NonVPN	20216
VPN	16922
Tor	1179

Veri seti, VPN trafiği, TOR trafiği, SSH trafiği ve normal trafiği sınıflandırmak için kullanılabilir. Bu sınıflandırmalar, siber güvenlikte çeşitli amaçlar için kullanılabilir, örneğin kötü amaçlı yazılımları tespit etmek, ağ güvenliğini artırmak ve güvenlik açıklarını belirlemektedir[17]. CIC-Darknet2020 veri seti, siber güvenlik araştırmacılarına, siber saldırıları analiz etmek için gerçekçi bir veri kaynağı sunmaktadır. Ancak, veri seti sadece Darknet ağlarında gerçekleşen trafiği içerdiği için tam bir ağ trafiği analizi yapmak mümkün değildir[18].

Bu çalışmada, CIC-Darknet2020 veri kümesinde OneR ve Ensemble OneR modelleri kullanılarak VPN/NoVPN ve Tor/NoTor sınıflandırması yapılmıştır. Veri setinin ayrımı öncesinde, rastgele bir çekirdek seçilmiştir. Çekirdek, modelin başlangıç noktasını belirlemek ve sonuçların tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla seçilmiştir. Seçilen çekirdek, veri kümesinin ilk sıralama veya belirli bir özelliğine dayanmamaktadır, sadece rastgele bir seçimdir. Bu yaklaşım, araştırmacıların analizlerini başlatmak için rastgele bir başlangıç noktası seçmelerini sağlamakla birlikte sonuçların tarafsız ve yeniden üretilebilir olmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Verileri eğitim, doğrulama ve test kümelerine ayırma seçimini veri kümesi özellik seçimi yaparak, sonuçlarda daha fazla değişkenlik ve dolayısıyla daha az tekrarlanabilirlik sağlanmaktadır.

2.2. OneR (One Rule) Modeli

OneR (One Rule), basit bir kural tabanlı sınıflandırma modelidir. Bu model, veri setindeki her özelliğin sınıf etiketi üzerindeki etkisini tek bir kural olarak özetler. OneR, her özellik için en iyi kuralı seçmek ve bu kurala göre sınıflandırmak için veri setini analiz eder. Bu kural, özelliklerin kategorik olması durumunda "en sık görülen sınıf" olarak tanımlanırken, özelliklerin sayısal olması durumunda sınıf etiketlerinin belirli bir aralıkta toplanması ve en fazla sınıfın hangi aralıkta olduğuna bakılarak belirlenir. OneR, basit ve anlaşılır olması nedeniyle küçük veri kümeleri üzerinde etkili sonuçlar verir, ancak büyük veri kümeleri için yeterli olmayabilir.

OneR modeli, sınıflandırma problemleri için basit bir karar ağacı yöntemidir ve kolayca anlaşılabilir bir kural kümesi oluşturur. OneR modelinin performansını değerlendirmektedir. Yazarlar, birçok veri kümesinde OneR'ın en iyi performansı gösterdiğini ve aynı zamanda diğer algoritmaların performansına yakın olduğunu bulmuşlardır[19]. Eğitim verilerini sınıflandırmak için OneR ve ID3 algoritmalarını karşılaştırmaktadır. Sonuç olarak, OneR'ın daha az hesaplama gücüne ve daha az eğitim verisine ihtiyaç duyduğu ve aynı zamanda daha yüksek doğruluk oranlarına sahip olduğu bulunmuştur[20].

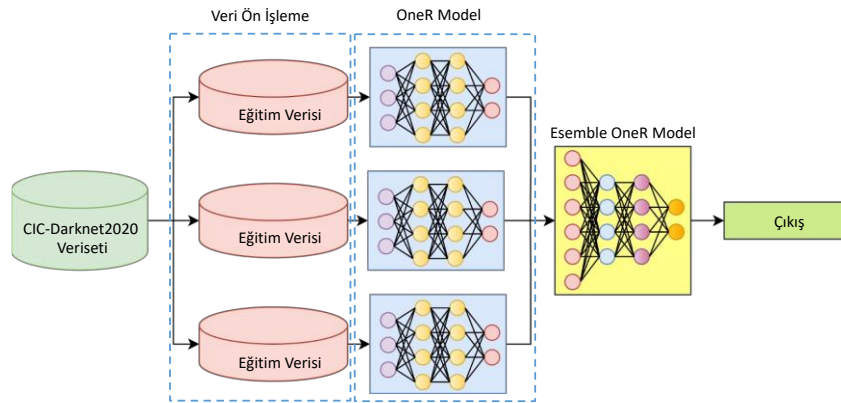
OneR modeli, basit ve anlaşılır bir makine öğrenimi modeli olması sebebiyle birçok uygulama için tercih edilir. OneR'ı yüksek boyutlu verilerin özellik seçiminde kullanılmaktadır. Yazarlar, OneR'ın diğer özellik seçim yöntemlerinden daha yüksek bir seçim oranına sahip olduğunu ve aynı zamanda daha az hesaplama gücüne ihtiyaç duyduğunu sonuca varılmıştır[21]. OneR'ı dengesiz veri kümelerinde sınıflandırma yapmak için kullanılmaktadır. Yazarlar, OneR'ın diğer yöntemlere göre daha az öğrenme süresine ve daha yüksek doğruluk oranlarına sahip olduğunu sonuca varılmıştır[22].

Bu çalışma, saldırıların tespit edilmesinde sorunlar ikili VPN veya NonVPN olarak ele alınmıştır. Etiket sütunu genellikle sınıfı sunmakta ve birden çok saldırıya sahip bazı sınıflar için bunları ayrı ayrı etiketlenmektedir. Bu çalışmada ilk odak noktası, ikili problemdir, bu nedenle sınıf etiketini daraltılmıştır.

2.3. Esemble OneR (One Rule) Modeli

Ensemble OneR modeli, birden fazla OneR modelinin bir araya getirilerek oluşturulmuş bir sınıflandırma modelidir. OneR modelinin temel mantığı, her bir özellik (feature) için en iyi ayrımı yapacak bir kural (rule) oluşturmak ve bu kuralları bir araya getirerek sınıflandırma yapmaktır. Ensemble OneR modeli ise, farklı özellik seçimleri ve veri kümesi örneklemeleri kullanarak birden fazla OneR modeli oluşturur ve bunların sonuçlarını birleştirir. Ensemble OneR modeli, farklı OneR modellerinin farklı hatalarını bir araya getirerek genel bir hatayı azaltabilmektedir. Ayrıca, farklı özelliklerin bir arada kullanılması, tek bir özellik kullanımına göre daha iyi sonuçlar verebilmektedir. Ensemble OneR modeli, özellikle küçük boyutlu veri setlerinde başarılı sonuçlar vermektedir. Sınıflandırma problemlerinin yanı sıra, regresyon problemleri için de kullanılabilir. Ensemble OneR modeli, basit bir yapıya sahip olduğu için kolay anlaşılır ve yorumlanabilir sonuçlar vermektedir. Ensemble OneR modelinin kullanımı, özellikle diğer sınıflandırma modellerinin yetersiz kaldığı durumlarda, veri setinin özelliklerini ve örneklem büyüklüğünü değiştirerek yapılan tekrarlı denemeler sonucunda optimize edilebilir.

Şekil 1’de önerilen yöntemin akış şeması gösterilmiştir. Sınıflandırma işlemi yapılmadan önce veri ön işleme adımı gerçekleştirilmiştir. Öncelikle eksik veriler temizlenmiş ve modelin eğitilmesinde katkısı olmayan Flow ID,Fwd Header Length,1, Source IP, Src IP,Source Port, Src Port, Destination IP, Dst IP, Destination Port,Dst Port, Timestamp sütunları çıkarılmıştır. Böylelikle veri seti 78 kolona düşürülmüştür. Veri setinde VPN ve NonVPN ile ilgili rasgele çekirdek sayesinde %20 rasgele seçilerek 7428 satır eğitim verisi ve 29710 satır uzunluğunda da test verisi oluşturulmuştur. Ayrıca Tor ve NonTor veri seti de rastgele seçilerek 13197 satır eğitim ve 52786 satır test verisi elde edilmiştir.



Şekil 1. Önerilen yöntemin genel akış şeması.

3. Bulgular

3.1. Performans Metriklerinin Hesaplanması

Bu çalışmada önerilen yöntemlerin başarısını ölçmek için sırasıyla şu kriterler kullanılmıştır. Eşitlik 1 ve Eşitlik 2’te Doğruluk ve Kesinlik ölçümü yapılmıştır. Bu eşitliklerde DN doğru negatifler, DP doğru pozitifler, YN yanlış negatifler ve YP yanlış pozitifler olmak üzere parametreler kullanılmıştır. Eşitlik 3 ve Eşitlik 4’te Duyarlılık ve Hassasiyet değerleri hesaplanmıştır. Doğruluk ve Kesinlik ’in kümülatif toplamından F-skor Eşitlik 5’te hesaplanmıştır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (1)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP+YN} \quad (2)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DN}{DN+YP} \quad (3)$$

$$\text{Hassasiyet} = \frac{DP}{DP+YP} \quad (4)$$

$$\text{F – Skor} = \frac{2*TP}{2*TP+FP+FN} \quad (5)$$

ROC AUC (Receiver Operating Characteristic Area Under the Curve), bir sınıflandırma modelinin performansını değerlendirmek için kullanılan bir ölçüttür. ROC eğrisi, duyarlılık (sensitivite) ve özgüllük (specificity) arasındaki ilişkiyi gösteren bir grafikdir.

ROC eğrisinin altında kalan alan, yani AUC (Area Under the Curve), sınıflandırma modelinin performansını ölçmektedir. AUC değeri, 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır. Eğer AUC değeri 1'e yakınsa, model mükemmel bir performans sergilerken, AUC değeri 0.5'e yaklaştıkça modelin performansı rastgele tahmin etmeye yaklaşmaktadır.

Bu nedenle, ROC AUC eğrisi, bir sınıflandırma modelinin duyarlılık ve özgüllük performansını bir arada değerlendiren ve modelin sınıflandırma yeteneğini özetleyen bir ölçüttür. Yüksek bir ROC AUC değeri, modelin iyi bir ayırma gücüne sahip olduğunu gösterirken, düşük bir ROC AUC değeri, modelin zayıf performans sergilediğini gösterebilmektedir.

ROC AUC eğrisinde iki önemli oran hesaplanmaktadır. Bunlardan biri denklem 6'da gösterilen Gerçek Pozitif Oranı'dır. Diğeri de denklem 7'de gösterilen Gerçek Negatif Oranı'dır. Grafiğin x ekseninde daha küçük değerler yani daha düşük yanlış pozitifleri ve daha yüksek gerçek negatifleri göstermektedir. Grafiğin y ekseninde de daha büyük değerler yani daha yüksek gerçek pozitifleri ve daha düşük yanlış negatifleri göstermektedir. Bu da şunu göstermektedir iyi bir model grafikte kesikli çizgilerle gösterilen kısım yani eşik değeri 0,5'den daha yüksek bir değer göstermektedir. Bu da modelin iyi bir sonuç ortaya koyduğunu göstermektedir.

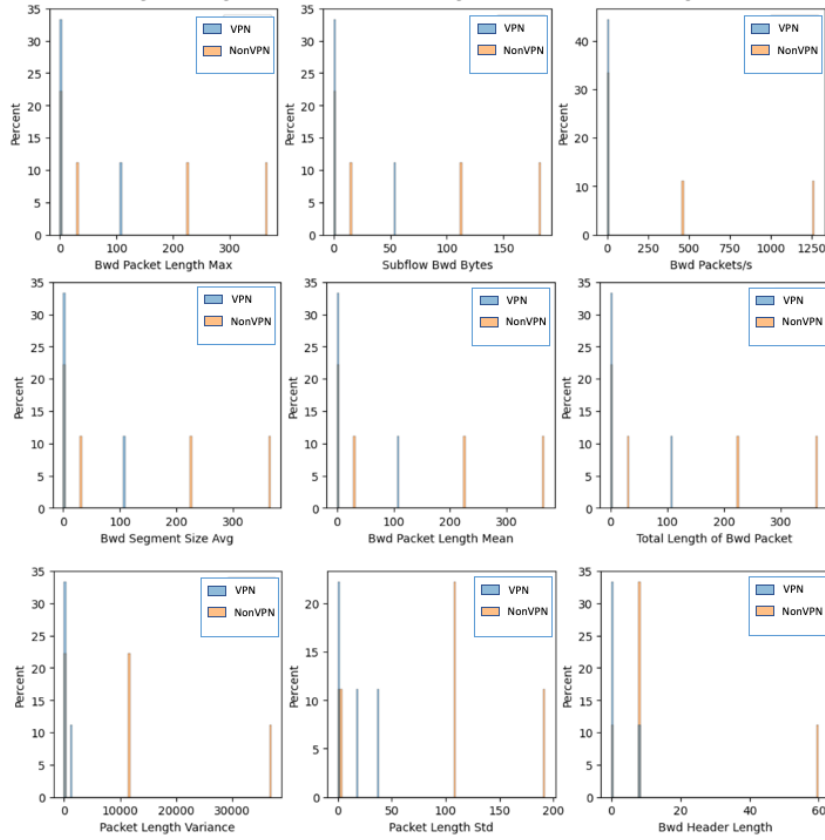
$$\text{Gerçek Pozitif Oranı} = \frac{|DP|}{|YN|+|DP|} \quad (6)$$

$$\text{Gerçek Negatif Oranı} = \frac{|DN|}{|YN|+|DN|} \quad (7)$$

3.2. Deneysel Test Sonuçları

CIC-Darknet2020 veri kümesi, VPN ve Tor ağları üzerinden gerçekleştirilen normal ve zararlı ağ trafiği verilerini içermektedir. Bu veri kümesi, eğitim ve test veri setleri olarak ayrılmamıştır, bu nedenle bu çalışmada rastgele bir çekirdek belirleyerek veriyi eğitim, doğrulama ve test veri setlerine ayrılmıştır. Bu çalışmada, çok basit modeller olan One Rule per feature (OneR) ve ensemble OneR kullanarak, VPN/NoVPN ve Tor/NoTor sınıflarını tahmin edilmektedir.

OneR modeli, her bir özellik için bir kural belirler ve tahminlerin doğruluğunu hesaplamak için bunları kullanmaktadır. Şekil 2'de gösterildiği üzere OneR modeli, her bir özellik için bir kural belirlemede ve tahminlerin doğruluğunu hesaplamak için bunları kullanmaktadır. Böylelikle veri seti üzerinde yapılan hesaplamalar sonucunda, VPN/NoVPN sınıflandırmasında Ensemble OneR modelinin roc-auc puanının 0.779 olduğu tespit edilmiştir. Bu değer, diğer CIC OneR ensemble modellerinden daha düşüktür.



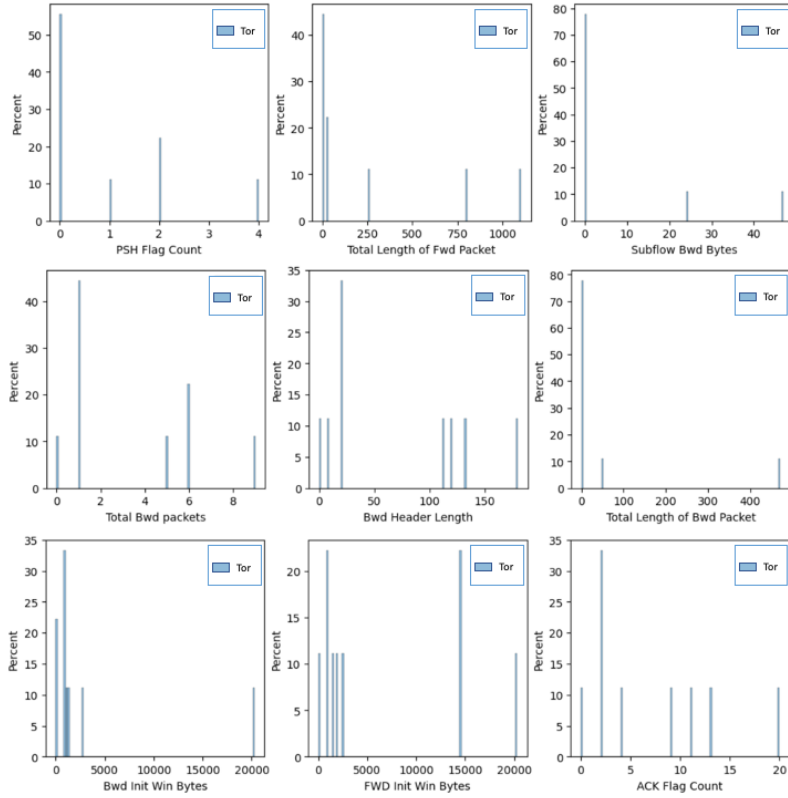
Şekil 2. Her bir OneR modelinin VPN/NonVPN tahmin değerleri.

Ensemble OneR modeli, etkili özellikleri kullanarak tek özellikli modeller oluşturur ve bu modelleri tüm örnekler için kullanarak sınıflandırma yapar. Örneklerin yeni tahmin edilen çıktı sınıfı, her bir OneR modelinin tahmin edilen çıktı sınıflarının ortalamasıdır.

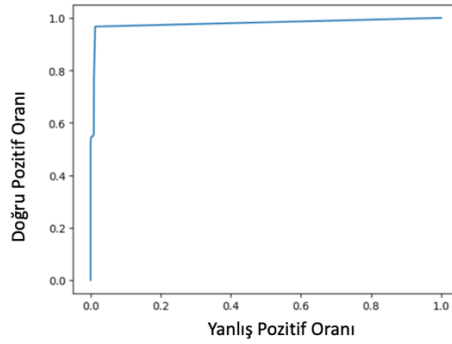
Ensemble OneR modeli, tahminlerin doğruluğunu artırmak için bir dizi OneR modeli kullanmaktadır. Bu model, tüm özellikleri kullanarak tahminler yapar ve her bir OneR modelinden gelen tahminlerin ortalama değerini kullanarak yeni bir tahmin oluşturmaktadır. Şekil 3'te gösterildiği üzere birkaç OneR modelinin sonuçlarını birleştirerek oluşturulan bir sınıflandırma modelidir. Bu model, veri setindeki her bir özelliği ayrı ayrı ele alır ve tek özellikli OneR modellerini kullanarak her bir özellik için bir sınıflandırma modeli oluşturmaktadır. Daha sonra, bu modellerin sonuçları birleştirilerek Tor/NonTor sınıflandırmasına ait bir çıktı sınıfı elde edilmiştir.

ROC-AUC (Receiver Operating Characteristic - Area Under the Curve) ölçütü, bir sınıflandırma modelinin performansını değerlendirmek için kullanılan bir metriktir. AUC değeri, modelin gerçek pozitif oranı (GPO) ve yanlış pozitif oranı (YPO) arasındaki ilişkiyi gösterir.

Bu çalışmadaki ensemble OneR modeli, Tor ve NoTor sınıflarını ayırt etmek için kullanılmıştır. Şekil 4'te gösterildiği üzere modelin ROC-AUC skoru 0.980'dir. Bu, modelin oldukça yüksek bir ayırtma gücüne sahip olduğunu gösterir. Model, veri setindeki özelliklerin tek tek ele alınması ve basit bir birleştirme yöntemi kullanarak oluşturulması nedeniyle oldukça basit bir modeldir. Ancak, veri setindeki özelliklerin OneR modelleri tarafından doğru bir şekilde tahmin edilebildiği ve sonuçların doğru bir şekilde birleştirildiği için yüksek bir performans elde edilmiştir.



Şekil 3. Ensemble OneR modelinin Tor/NonTor sınıflandırma sonuçları.



Şekil 4. Ensemble OneR modeli, Tor ve NoTor AUC-ROC grafiği.

3.2. Önerilen Metodun Performans Sonuçları

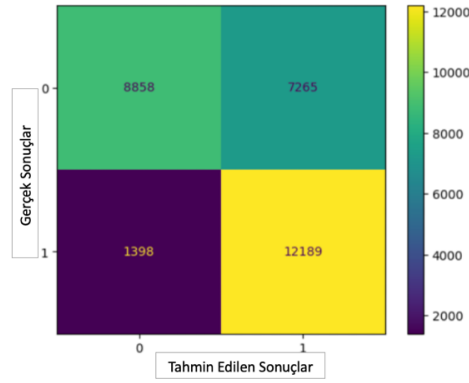
Sınıflandırma performansı karmaşıklık matrisi kullanılarak da değerlendirilmiştir. Karmaşıklık matrisi, sınıflandırma probleminde gerçek ve tahmin edilen sınıf etiketlerine göre oluşan 4 farklı durumu gösteren bir matristir. Bu durumlar gerçek pozitif (GP), yanlış pozitif (YP), gerçek negatif (GN) ve yanlış negatif (YN) olarak adlandırılmaktadır.

Tablo 2’de modelin sınıflandırma performansını ölçmek için kullanılan bir metrikler, bir sınıflandırıcının ne kadar iyi ayırt edici olduğunu göstermektedir. Hassasiyet, doğru pozitif tahminlerin toplam pozitif tahminlere oranını, duyarlılık ise gerçek pozitiflerin toplam pozitifler içindeki oranını ifade etmektedir. F1 ise hassasiyet ve duyarlılığın harmonik ortalamasını ifade etmektedir. Doğruluk, tüm örneklerin doğru şekilde sınıflandırıldığı oranı ifade ederken, dengeli doğruluk, her sınıfın ağırlığını eşit olarak alarak hesaplanan bir doğruluk ölçüsüdür. Burada, VPN/NonVPN problemi için modelin performansı düşükken, Tor/NonTor problemi için oldukça yüksek görülmektedir. Dengelenmiş doğruluk değeri her iki problem için de yüksek olsa da, Hassasiyet değeri Tor/NonTor problemi için düşüktür. Bu sonuçlar, basit bir model olan Ensemble OneR kullanılarak elde edilmiştir.

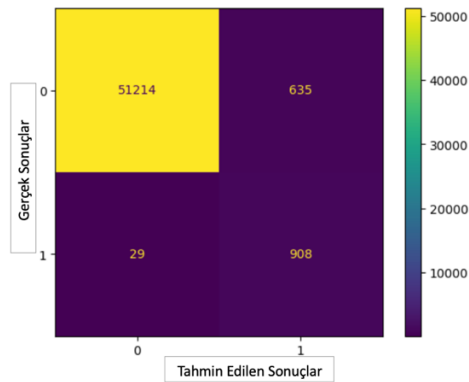
Tablo 2. Esemble OneR modelin VPN/NonVPN ve Tor/NonTor değerlerinin performans metriklerin kullanılarak hesaplanan deneysel sonuçlar.

Model	Doğruluk	Dengelenmiş Doğruluk	Duyarlılık	Hassasiyet	F1 Skoru
Esemble OneR(VPN/NonVPN)	70.84	72.33	89.71	62.66	73.78
Esemble OneR(Tor/NonTor)	98.74	97.84	96.91	58.85	73.23

Karmaşıklık matrisi, sınıflandırma modelinin doğruluğunu, hassasiyetini, özgüllüğünü ve diğer performans ölçüleri gibi farklı metrikleri hesaplamak için kullanılır. Şekil 5'te VPN/NoVPN ve Şekil 6'da Tor/NoTor sınıflandırma problemleri için ensemble OneR modeli için elde edilen karmaşıklık matrisleri verilmiştir. Bu sonuçlara göre, Ensemble OneR modeli Tor/NoTor sınıflandırma problemi için oldukça yüksek performans göstermiştir. Ancak VPN/NoVPN sınıflandırma problemi için performansı diğer CIC OneR ensemble modellere göre zayıf kalmıştır.



Şekil 5. Esemble OneR VPN/NoVPN performans sonucu.



Şekil 6. Esemble OneR Tor/NonTor performans sonuçları.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma, çok basit modeller olan OneR ve ensemble OneR kullanarak VPN/NoVPN ve Tor/NoTor sınıflarının tahmin edilmesi üzerine odaklanmıştır. Veri kümesinde eğitim ve test veri setleri ayrılmamıştır, ancak rastgele bir çekirdek belirlenerek veri seti eğitim, doğrulama ve test veri setlerine ayrılmıştır. Sonuçlar, ensemble

OneR modelinin Tor/NoTor sınıflarının tahmininde yüksek bir performans sergilediğini göstermektedir. ROC-AUC değeri 0.9804, doğruluğu 0.9874 ve dengelenmiş doğruluğu 0.9784 olarak bulunmuştur. Bununla birlikte, VPN/NoVPN sınıflarının tahmininde ensemble OneR modeli daha düşük bir performans sergilemiştir. ROC-AUC değeri 0.7791, doğruluğu 0.7084 ve dengelenmiş doğruluğu 0.7233 olarak bulunmuştur.

Duyarlılık, hassasiyet ve F1 skoru değerleri, her iki model için de Tor/NoTor sınıflarının tahmininde VPN/NoVPN sınıflarından daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuçlar, Tor ağındaki trafiğin diğer sınıflardan daha kolay bir şekilde ayırt edilebileceğini göstermektedir. Ancak, ensemble OneR modelinin VPN/NoVPN sınıfları için daha düşük bir performans sergilemesi, bu sınıfların birbirine daha benzer olması ve birçok benzer özellik taşıması nedeniyle olabilmektedir. Bu nedenle, daha karmaşık modellerin kullanılması veya farklı özelliklerin keşfedilmesi bu sınıfların doğru bir şekilde ayırt edilmesine yardımcı olmaktadır. Önerilen çalışmamızın aynı veriseti ve benzer çalışmaların karşılaştırılması Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Önerilen çalışmanın diğer çalışmalarla karşılaştırılması.

Çalışma	Yıl	Önerilen Model	Doğruluk(%)
[18]	2023	Ensemble Öğrenme	96.74
[23]	2021	Evrişimli Sinir Ağı (CNN) ve K-Means (KM)	97.40
[24]	2020	Yapay Sinir Ağı ve Apache Spark (ANN-AS)	96.66
[25]	2021	Tekrarlayan Sinir Ağı (RNN)	94.51
Mevcut Çalışma	2023	OneR ve Ensemble OneR modelleri	98.74

Sunduğumuz yöntem ile karşılaştırdığımız çalışmalar, aynı veri setini kullanmış ancak farklı makine öğrenimi ve yapay zekâ tekniklerini içeren çalışmalardır. Ensemble öğrenme yöntemiyle birbirinden farklı algoritmalar olan Rasele Orman Algoritması, Destek Vektör Makinaları ve Yapay Sinir Ağları algoritmaları kullanılmıştır [18]. Sınıflandırma aşamasında ise Lojistik Regresyon yöntemi tercih edilmiştir. Farklı algoritmaların kullanılması, ensemble öğrenme yönteminde her bir algoritmanın performansının farklı olmasına yol açmış ve genel başarıyı düşürmüştür. Önerdiğimiz çalışmamızda ise Ensemble OneR yönteminde birbirinden farklı algoritmaları yerine OneR algoritması kullanılmış farklı performans yerine birbirine yakın performanslar elde edilerek daha yüksek genel başarı elde edilmiştir. Yapay sinir ağları ve Apache Spark motoru kullanılarak VPN ve VPN olmayan ağ trafiğinin doğru bir şekilde sınıflandırılması için bir yaklaşım sunulmaktadır [23]. VPN sınıflandırması için %96.76 ve VPN olmayan sınıflandırması için %92,56 doğruluk elde etmektedir. Bu da şifreli ağlarda verimli ve etkili trafik analizi yapmak için yetersizdir çünkü Tor ve Tor olmayan ağlarda deneysel testler yapılmamıştır. Önerdiğimiz yöntemde ise hem VPN ve VPN olmayan hem de Tor ve Tor olmayan trafik analizlerini deneysel testlerde kullanmıştır. Önerdiğimiz çalışmada Tor sınıflandırması için %98.74 Tor olmayan sınıflandırma için %97.84 başarı elde edilmiştir. Gerçek zamanlı olarak sinir ağları çerçevesini kullanan bir yaklaşım sunulmaktadır [24]. Ancak, uygun bir mimariyi belirlemek için önceden işlem yapılması gereken özel ve zaman alıcı bir işlem olması, veri analizi ve açıklama modellerinin araştırma karmaşıklığı eklemesi ve bu nedenle yüksek bir araştırma maliyetinin olmasına sebep olmaktadır. Önerdiğimiz yöntem uygun ve belli bir mimariyle işlem yapıldığı için önceden işlem yapılmasına gerek duymadan kısa zamanda ve araştırma maliyetini düşüren sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle, önerdiğimiz modelin benzer veri seti ve çalışmalarla karşılaştırıldığında daha yüksek başarı oranı, doğruluk, önceden işlem yapılmasına gerek duymadan ve kısa zaman içinde yüksek başarı sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Bu çalışma, veri kümesinin basit modellerle bile doğru bir şekilde sınıflandırılabilirliğini göstermektedir. Ancak, daha karmaşık modellerin kullanılması ve farklı özelliklerin keşfedilmesi, daha yüksek performans elde etmek için gereklidir.

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, CIC-Darknet2020 veri kümesindeki VPN/NoVPN ve Tor/NoTor sınıflarının tahmin edilmesi için One Rule per feature (OneR) ve ensemble OneR modelleri kullanılmıştır. Model performansı, doğruluk, dengelenmiş doğruluk, duyarlılık, hassasiyet ve F1 skoru ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, ensemble OneR modelinin Tor/NoTor sınıfı için oldukça yüksek doğruluk, dengelenmiş doğruluk ve duyarlılık

değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, VPN/NoVPN sınıfı için düşük hassasiyet ve F1 skoru değerleri dikkat çekmektedir.

Bu çalışma, OneR ve ensemble OneR modelleri, VPN/NoVPN ve Tor/NoTor sınıflarının tahmininde iyi performans göstermiştir. Ancak, VPN/NoVPN sınıflarında düşük hassasiyet değeri dikkat çekmektedir. Bu sonuçlar, benzer veri kümelerinde de benzer modellerin kullanılabilirliğini göstermektedir. Ancak, VPN/NoVPN sınıfı için modelin daha iyi performans göstermesi gerektiğini göstermektedir. Bu durumun nedeni, VPN ve NoVPN trafiği arasındaki farkın çok küçük olması ve bu nedenle modele doğru sınıflandırma yapmak için yeterli özniteliklerin olmaması olabilmektedir. Bu sorunu çözmek için daha kapsamlı bir öznitelik seçimi veya daha karmaşık bir model kullanılabilir. Sonuç olarak, bu çalışma, VPN/NoVPN ve Tor/NoTor sınıflarının tahmininde OneR ve ensemble OneR modellerinin kullanılabilirliğini göstermektedir. Ancak, bu modellerin daha iyi performans göstermesi için daha kapsamlı bir öznitelik seçimi veya daha karmaşık bir model kullanılması önerilmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalar, siber güvenlik alanında VPN/NonVPN ve Tor/NonTor sınıflandırması üzerine odaklanarak ve daha geniş kapsamlı araştırma yapılması planlanmaktadır. Bu kapsamda model iyileştirme ve hiperparametre ayarlaması yaparak sınıflandırma modellerinin performansını artırmak için model iyileştirme teknikleri kullanılacaktır. Bu, modelin doğruluğunu, hassasiyetini ve duyarlılığını optimize etmeye yardımcı olacaktır.

Kaynaklar

- [1] Abu Al-Haija Q, Krichen M, Abu Elhaija W. Machine-learning-based darknet traffic detection system for IoT applications. *Electronics* 2022; 11: 556.
- [2] Iliadis LA, Kaifas T. Darknet traffic classification using machine learning techniques. In: 2021 10th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST). IEEE, 2021, pp. 1–4.
- [3] Lotfollahi M, Jafari Siavoshani M, Shirali Hossein Zade R, et al. Deep packet: A novel approach for encrypted traffic classification using deep learning. *Soft Comput* 2020; 24: 1999–2012.
- [4] Afuwape AA, Xu Y, Anajemba JH, et al. Performance evaluation of secured network traffic classification using a machine learning approach. *Comput Stand Interfaces* 2021; 78: 103545.
- [5] Lingyu J, Yang L, Bailing W, et al. A hierarchical classification approach for tor anonymous traffic. In: 2017 IEEE 9th International conference on communication software and networks (ICCSN). IEEE, 2017, pp. 239–243.
- [6] Sarkar D, Vinod P, Yerima SY. Detection of Tor traffic using deep learning. In: 2020 IEEE/ACS 17th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA). IEEE, 2020, pp. 1–8.
- [7] Rao Z, Niu W, Zhang X, et al. Tor anonymous traffic identification based on gravitational clustering. *Peer-to-Peer Netw Appl* 2018; 11: 592–601.
- [8] Hu X, Gao Y, Cheng G, et al. An Adversarial Learning-based Tor Malware Traffic Detection Model. In: GLOBECOM 2022-2022 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2022, pp. 74–79.
- [9] Johnson C, Khadka B, Ruiz E, et al. Application of deep learning on the characterization of tor traffic using time based features. *J Internet Serv Inf Secur* 2021; 11: 44–63.
- [10] Cuzzocrea A, Martinelli F, Mercaldo F, et al. Tor traffic analysis and detection via machine learning techniques. In: 2017 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). IEEE, 2017, pp. 4474–4480.
- [11] Ali BH, Sulaiman N, Al-Haddad SAR, et al. DDoS Detection Using Active and Idle Features of Revised CICFlowMeter and Statistical Approaches. In: 2022 4th International Conference on Advanced Science and Engineering (ICOASE). IEEE, 2022, pp. 148–153.
- [12] Rahman O, Quraishi MAG, Lung C-H. DDoS attacks detection and mitigation in SDN using machine learning. In: 2019 IEEE world congress on services (SERVICES). IEEE, 2019, pp. 184–189.
- [13] Polat H, Polat O, Cetin A. Detecting DDoS attacks in software-defined networks through feature selection methods and machine learning models. *Sustainability* 2020; 12: 1035.
- [14] Banitalebi Dehkordi A, Soltanaghaei M, Boroujeni FZ. The DDoS attacks detection through machine learning and statistical methods in SDN. *J Supercomput* 2021; 77: 2383–2415.
- [15] Habibi Lashkari A, Kaur G, Rahali A. Didarknet: A contemporary approach to detect and characterize the darknet traffic using deep image learning. In: 2020 the 10th International Conference on Communication and Network Security. 2020, pp. 1–13.
- [16] Rust-Nguyen N. Darknet Traffic Classification.
- [17] Anyanwu GO, Lee J-M, Kim D-S. Optimized Ensemble Learning Algorithm for Hidden Malicious Traffic Detection in VANET. 2021; 111–112.
- [18] Almomani A. Darknet traffic analysis, and classification system based on modified stacking ensemble learning algorithms. *Inf Syst E-bus Manag* 2023; 1–32.
- [19] Holte RC. Very simple classification rules perform well on most commonly used datasets. *Mach Learn* 1993; 11: 63–90.

- [20] Anuradha C, Velmurugan T. A comparative analysis on the evaluation of classification algorithms in the prediction of students performance. *Indian J Sci Technol* 2015; 8: 1–12.
- [21] Gangavarapu T, Patil N. A novel filter–wrapper hybrid greedy ensemble approach optimized using the genetic algorithm to reduce the dimensionality of high-dimensional biomedical datasets. *Appl Soft Comput* 2019; 81: 105538.
- [22] Liu X-Y, Wu J, Zhou Z-H. Exploratory undersampling for class-imbalance learning. *IEEE Trans Syst Man, Cybern Part B* 2008; 39: 539–550.
- [23] Li Y, Lu Y, Li S. EZAC: Encrypted Zero-day Applications Classification using CNN and K-Means. In: 2021 IEEE 24th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD). IEEE, 2021, pp. 378–383.
- [24] Aswad SA, Sonuç E. Classification of VPN network traffic flow using time related features on Apache Spark. In: 2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT). IEEE, 2020, pp. 1–8.
- [25] Demertzis K, Tsiknas K, Takezis D, et al. Darknet traffic big-data analysis and network management for real-time automating of the malicious intent detection process by a weight agnostic neural networks framework. *Electronics* 2021; 10: 781.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e (TBDY-2018) göre betonarme bir binanın perde elemanlarının hasar sınırlarının tespiti

Dilara TURSUN¹, Ömer Faruk TAŞ², Erku SAYIN^{3*}

^{1,2,3} İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
¹ dilaratursun3@gmail.com, ² oftas@firat.edu.tr, ³ esayin@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 25/04/2023;

Kabul/Accepted: 01/07/2023)

Öz: Depremler, insan hayatını etkileyen doğal afetlerden biridir. Ülkemiz deprem kuşağında yer aldığından dolayı mevcut yapıların ve yeni tasarlanan yapıların deprem güvenliğinin belirlenmesi son derece önemlidir. Yapıların tasarımı ve değerlendirilmesinde kullanılacak olan yöntemler Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) esasları gereğince yapılan doğrusal ve doğrusal olmayan hesap yöntemleridir. Doğrusal hesap yöntemleri, eşdeğer deprem yükü ve mod birleştirme yöntemi; doğrusal olmayan hesap yöntemleri ise itme yöntemi ve zaman tanım alanında hesap yöntemidir. Bu çalışma kapsamında 10 katlı konut tipi betonarme bir binanın ETABS sonlu elemanlar programı ile deprem analizi yapılarak bina performansı incelenmiştir. Dikkate alınan bina perde duvar + çerçeve sistemine sahiptir. Şekil-değiştirme esasına dayanan yöntemlerden biri olan zaman tanım alanında analiz yöntemi, TBDY-2018 esasları dikkate alınarak uygulanmıştır. Yapılan analizler sonucunda mevcut binanın perde elemanlarının güncel yönetmeliğe göre hasar sınırları belirlenmiş ve bu elemanların performansına karar verilmiştir. İncelenen binanın perde elemanlarının Kontrollü Hasar (KH) performans düzeyini sağladığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Betonarme yapılar, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz, ETABS.

Determining the damage zones of the shear walls of a reinforced concrete building according to the Turkish Building Earthquake Code 2018 (TBEC-2018)

Abstract: Earthquakes are one of the natural disasters that affect human life. Since our country is located in an earthquake zone, it is extremely important to determine the earthquake safety of existing structures and newly designed structures. The methods to be used in the design and evaluation of buildings are linear and non-linear calculation methods made in accordance with the Türkiye Building Earthquake Code (TBEC-2018). Linear calculation methods are equivalent earthquake load and mode superposition method, nonlinear calculation methods are pushover and time history analysis. Within the scope of this study, earthquake analysis of a 10-storey residential reinforced concrete building was performed with the ETABS finite element program and the building performance was examined. The building considered is shear wall + frame system. Time history analysis method, which is one of the methods based on shape change, was applied by taking into account the principles of TBEC- 2018. As a result of the analysis, the damage limits of the shear walls were determined according to the current regulation and the performance of the shear walls were decided. As a result, it has been determined that the shear walls of the existing building provide the Controlled Damage performance level.

Key words: Reinforced concrete structures, nonlinear time history analysis, ETABS.

1. Giriş

Türkiye aktif deprem kuşağı üzerinde yer almaktadır. Dolayısıyla sıklıkla deprem hareketleri oluşmaktadır. Meydana gelen depremler ve bu depremlerin sonucunda yaşanan can ve maddi kayıplar neticesinde mevcut yapıların deprem performansının tespiti önem arz etmektedir [1]. Deprem performansı yetersiz olanların güçlendirilmesi eğer güçlendirilmesi ekonomik değilse yıkılarak yeni yapıların inşa edilmesi gerekmektedir. Böylece can ve maddi kayıplar azaltılabilir [2]. Son zamanlarda meydana gelen depremlerde mevcut yapı stoklarının birçoğu çökmüş veya ciddi hasarlar almıştır. Bu sebeple binaların deprem performanslarının tespiti hakkında yapılan çalışmalar önem kazanmıştır [3]. Performansa dayalı tasarıma ilk olarak 1996'da yürürlüğe giren Betonarme Binaların Sismik Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesinde (ATC 40) yer verilmiştir [4]. Daha sonra Binaların Sismik İyileştirilmesi için Ön-standart ve Açıklamalar (FEMA 356) 2000 yılında yayınlanmıştır [5]. Ülkemizde ilk defa 2007 yılında yürürlüğe giren Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007) mevcut yapıların deprem performanslarının belirlenmesinde kullanılmıştır [6].

* Sorumlu yazar: esayin@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0009-0003-1501-6961, ² 0000-0002-1431-5316, ³ 0000-0003-0266-759X

2018 tarihi itibarıyla yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY-2018) de performansa dayalı analiz yöntemi bir önceki yönetmeliğe göre genişletilmiştir [7]. Literatür incelendiğinde yeni yapılacak binaların ve mevcut binaların deprem performanslarının belirlenmesiyle ilgili birçok çalışma mevcuttur. İbiş ve Ulutaş [8], yapımı devam eden betonarme bir binayı yeni yapılacak bir bina gibi kabul edip TBDY-2018'e göre performans analizini yapmışlardır. Analiz sonucunda binanın TBDY-2018'de yer alan hedef performans seviyesini sağladığı sonucuna ulaşmışlardır. Taş vd. [9], çalışmalarında farklı kat adetlerine sahip yeni betonarme binaların modelini SAP2000 programı ile oluşturmuşlardır. Binaların performans seviyelerini belirlemek amacıyla doğrusal olmayan davranış modellerinden yığılı plastik davranış modelini esas almışlardır. XTRACT programı ile taşıyıcı elemanların etkin kesit rijitliklerini elde etmişlerdir. İnceledikleri binalara SAP2000 sonlu elemanlar programı ile doğrusal olmayan tek modlu statik itme analizi yöntemi uygulamışlardır. Kolon elemanlarda kat yüksekliğinin artmasıyla etkin kesit rijitlik değerlerinin değişimini incelemişlerdir. Performans noktasına denk gelen tepe yer değiştirme değerlerindeki değişimi, kat adetleri farklı dört bina modeli kullanarak tespit etmişlerdir. Dalyan ve Şahin [10], DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 yönetmeliklerini dikkate alarak 5 katlı betonarme konut yapısının deprem yükleri altında taşıyıcı sistem performansını belirlemek amacıyla doğrusal olmayan tek modlu itme yöntemini kullanmışlardır. İncelenen binanın itme eğrisini hesaplamışlar ve kesit hasar bölgelerini elde etmişlerdir. Ayrıca etkin kesit rijitliklerini tespit etmişler ve her iki yönetmeliğe göre sonuçları karşılaştırmışlardır. Çapa [11], güncel yönetmelikte bulunan doğrusal ve doğrusal olmayan hesap yöntemlerini kullanarak kat adetleri farklı betonarme binaların deprem performanslarını incelemiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin tümünü uygulayarak bina performans seviyeleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda taban kesme kuvveti ve tepe yer değiştirme değerlerinin kat adedi arttıkça arttığı tespit edilmiştir. Çavdar [12], çalışmasında İstanbul ilinde bulunan mevcut 6 katlı betonarme bir yapının TBDY-2018 yönetmeliğine göre performans analizini yapmıştır. Bu amaç doğrultusunda binanın performansını doğrusal olmayan itme yöntemi ile incelemiştir. Yapılan analizler sonucunda x ve y yönündeki yer değiştirmelere bakılarak düzensizlik hesaplamaları yapılmıştır. Yapıda sistem elemanının çalışmasına mani olan herhangi bir süreksizlik belirlenmemiştir. Y yönünde A3 düzensizliği gözlenmiştir. Çalışma neticesinde ara kat ve normal katlarda burulma düzensizliği, ikinci katlarda rijitlik düzensizliği belirlenmiştir ve ağır hasarlar oluşmuştur. Uygulanan itme analizi sonucunda x yönünde binanın kontrollü hasar performans seviyesini sağladığı görülürken y yönünde sağlamamıştır. Tekdemir [13], çalışmasında 4 katlı betonarme binanın deprem performansını TBDY-2018'de yer alan doğrusal ve doğrusal olmayan hesap yöntemlerini kullanarak incelemiştir ve analiz sonuçlarını karşılaştırmıştır. Performans analizi için bina doğrusal hesap yöntemlerinden iki farklı yöntem tabii tutularak görece kat ötelemeleri ve taban kesme kuvveti tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Ardından 8 katlı iki betonarme bina seçerek statik itme analizi yöntemini uygulamıştır. Analiz neticesinde plastik mafsallı oluşum düzenleri, itme eğrileri ve taban kesme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Binanın zemin kat yüksekliğinin fazla olmasının binanın doğal titreşim periyodunu artırdığı belirlenmiştir. Meral ve İnel [14], çalışmalarında kat sayıları farklı olan (2, 4 ve 7) 144 konut binasını incelemişlerdir. İnceledikleri binalar düşük ve orta katlı binaları temsil etmektedir. Yapıların hepsine statik itme analizi uygulayarak yapıların kapasite eğrilerini elde etmişlerdir ve binaların periyotlarının değişimini incelemişlerdir. Kuşu ve Beyen [15], Çanakkale'de yapılacak 12 katlı betonarme ve çelik binanın performansını tespit etmek amacıyla lineer olmayan zaman tanım alanında analiz yöntemini esas almışlardır. Yapılan analiz sonucunda betonarme olarak yapılacak binanın çelik binaya göre birçok yönden daha avantajlı ve daha ekonomik olduğunu tespit etmişlerdir. Meral [16], 2007 Türk Deprem Yönetmeliği'ne göre yapılan 2, 4 ve 7 katlı betonarme binalara zaman tanım alanında analiz yöntemini uygulamıştır. Analiz sonucu kat adedi arttıkça deplasman taleplerinde artış gözlenmiştir. Meral [17], 3,6 ve 9 katlı betonarme binaları 12 adet deprem ivme kaydıyla zaman tanım alanında analiz yöntemi kullanarak bu binaların deprem performanslarını incelemiştir. Kürkçü [18], 20 katlı betonarme bir binanın ETABS programı ile tasarımını yapmıştır. Tasarımını yaptığı binaya zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi uygulamıştır ve binanın performansını belirlemiştir. Analiz sonucu kirislerde hasarlar belirgin hasar ve sınırlı hasar bölgelerinde dağılırken yapının herhangi bir kolonunda plastikleşme oluşmadığı gözlemlenmiştir. Aksoylu [19], mevcut bir binanın deprem performansını güncel yönetmeliği esas alarak incelemiştir. Performans analizi için binaya doğrusal olmayan değerlendirme yöntemlerinden zaman tanım alanında analiz yöntemini uygulamıştır. Sonuç olarak kirislerde hasarın fazla olduğu, kolon ve perdelerde ise kirislere göre plastik şekil-değiştirmelerin daha az olduğu gözlenmiştir. Ayrıca yapının performansı göçmenin önlenmesi performans düzeyi olarak belirlenmiştir. Koçak [20], yaptığı çalışmada betonarme çerçeve bina modelinin performans analizini yapmayı amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda güncel yönetmelik (TBDY-2018) esas alınarak binaya doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz yöntemi uygulamıştır. Ayrıca analizlerde SAP2000 programını kullanmıştır. Analiz sonucunda tepe noktası yer-değiştirme değerlerini ve taban kesme kuvvetlerini tespit etmiştir. Şahin [21], çalışmasında mevcut betonarme bir binayı dikkate almış ve yeni

yönetmeliğe göre hesaplamalarını yapmıştır. Şekil-değiştirme esasına dayanan yöntemlerden biri olan zaman tanım alanında analiz yöntemi ile deprem yükleri altındaki taşıyıcı sistem performansını incelemiştir. Analiz sonucu hasar seviyelerini tespit ederek mevcut yapının performansını elde etmiştir. Yapının performansının hedeflenen performans seviyesini sağlamadığını gözlemiştir. Alemдар ve Caymazer [22], 1995 yılında inşa edilen betonarme bir binayı kentsel dönüşüm kapsamında ele alarak deprem performansını incelemiştir. Binanın performansını belirlemek amacıyla zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemini uygulamışlardır. Ayrıca incelenen binanın deprem performansını tespit ederken DBYBHY 2007 yönetmeliğini dikkate almışlardır. Binanın performansının göçme durumunda olduğunu ve binanın yıkılarak yeniden yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Turan [23], çalışmasında mevcut 5 katlı betonarme bir binayı ele almıştır. Deprem performansını belirlemek amacıyla binaya zaman tanım alanında lineer olmayan analiz yöntemini uygulamıştır. Analizde ETABS programını kullanarak TBDY-2018'de yer alan performans şartlarına sahip olup olmadığını belirlemiştir. İncelenen binanın taşıyıcı eleman hasar bölgelerini elde ederek güçlendirme yapılması gerektiğini öne sürmüştür. Yıldız [24], çalışmasında 44 katlı betonarme binayı incelemiş ve bu binanın deprem performansını belirlemek için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemini kullanmıştır. Bina modeli oluşturulurken ve analizi yapılırken ETABS programından yararlanmıştır. 11 adet ivme kaydı kullanarak çözüm yapmıştır ve elde edilen sonuçları değerlendirmiştir. İçöz [25], orta ve yüksek katlı binaları temsilen 8, 12, 16 ve 20 katlı binaları incelemiştir. Bu çalışmada zemin yapı etkileşiminin orta ve yüksek katlı binaların deprem performansını nasıl etkilediğini araştırmıştır. Binalar doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin ikisine de tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda görel kat ötelenme oranları, hasar dağılımları ve deplasman taleplerini belirlemiş ve mukayese etmiştir. Yalın ve Ulutaş [26], çalışmalarında mevcut okul türü bir binanın DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 deprem yönetmeliklerine göre performans analizlerini yapmışlardır. Bina doğrusal olmayan hesap yöntemlerinden artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi ve tek modlu itme yöntemine tabi tutularak deprem hesabı yapılmıştır. Deprem performansı belirlenmiş ve sonuçlar iki yönetmeliğe göre karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler neticesinde iki yönetmeliğe göre doğrultu ve aşılma olasılıklarının en olumsuz olanı esas alındığında yapının hedef performans seviyesini sağlamadığı tespit edilmiştir. Balun vd. [27], TBDY-2018 yönetmeliğini dikkate alarak betonarme yapıyı basitleştirilmiş ve standart hesap yöntemleri ile taban kesme kuvvetleri bakımından kıyaslamıştır. Çözümler ETABS programı ile eşdeğer deprem yükü yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Basitleştirilmiş ve standart deprem hesabı ile tespit edilen taban kesme kuvveti değerleri kıyaslandığında basitleştirilmiş deprem hesabındaki değerlerin daha fazla olduğu gözlenmiştir. Koçer vd. [28], Türk Deprem Yönetmeliği 2007 (TDY 2007) ve TBDY-2018'de yer alan zemin hakim periyotları ve spektral ivme değerlerini elde etmeyi amaçlamışlardır. Bu amaç doğrultusunda tasarım spektrum eğrileri elde edilerek her iki yönetmeliğe göre bu değerler mukayese edilmiştir. Tasarım ivme spektrumları değişik zemin sınıfları ve dört il için risk durumlarına bakılarak tespit edilmiştir. Genellikle çalışmada ele alınan bölgelerdeki zayıf zemin gruplarında TBDY-2018'in daha emniyetli kısmında olduğu belirlenmiştir. Yel vd. [29], yaptıkları çalışmada TBDY-2018 yönetmeliğine göre tasarlanmış kat adedi 3, 4 ve 5 olan toplam 144 betonarme binanın deprem performansını değerlendirmişlerdir. Doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri uygulanarak yapıların performans düzeyleri tespit edilmiştir. Analizler neticesinde tepe yer değiştirmeleri, taban kesme kuvvetleri ve görel kat ötelemeleri elde edilerek kıyaslanmıştır. Işık vd. [30], çalışmalarında kat yüksekliği 3 m olan 7 katlı betonarme çerçeve binayı TBDY-2018'e göre SAP2000 sonlu elemanlar programı ile tasarlamışlardır. Kısa kolon etkilerinin oluşabileceği dört farklı model oluşturulmuştur. Oluşturulan modellere itme analizi uygulamışlar ve hasar bölgelerini tespit etmişlerdir. Kısa kolon oluşumunun plastik dönme talebini ve kesme kuvvetini artırdığı görülmüştür. Aksoylu vd. [31], çalışmasında seçtikleri kat sayıları farklı betonarme binaların deprem etkisi altındaki davranışlarını incelemiştir. Betonarme yapıların yapısal davranışını tespit etmek amacıyla doğrusal olmayan statik itme yöntemini kullanarak analizleri gerçekleştirmişlerdir. Analizlerde ETABS programını kullanarak hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda taban kesme kuvveti ve deplasman değerleri elde edilerek TDY-2007, TBDY-2018 ve ASCE 7-16 deprem yönetmeliklerine göre değerlendirilmiştir. Kumbasaroğlu [32], ankraj çubuklu ve ankraj çubuksuz dolgu duvarlı çerçeve konut tipi betonarme bina kullanarak üç tip yapı modeli oluşturmuştur. Çalışma kapsamında ele alınan yapılarda ankraj çubuklarının etkisini belirlemek amacıyla modellerin doğrusal olmayan sismik analizlerini yapmıştır. 20 adet ivme kaydı kullanılarak zaman tanım alanında analizler SAP2000 programı ile gerçekleştirilmiştir ve performans düzeyleri tespit edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında 10 katlı konut tipi betonarme bir binanın ETABS sonlu elemanlar programı ile deprem analizi yapılarak bina performansı incelenmiştir. Dikkate alınan bina perde duvar + çerçeve sistemine sahiptir. Mevcut bina kat planı x ve y doğrultularında 3 açıklığa sahip olup simetrik olarak tasarlanmıştır. Performans limitini, performans limitine ilk ulaşan malzeme belirlemektedir. Bundan dolayı donatı ve beton malzemenin her biri için elde edilen maksimum ve minimum şekil-değiştirme değerleri dikkate alınmıştır.

İlgili yönetmelik kapsamında betonun kısılma değeri ve çeliğin uzama değerleri hesaplanarak ETABS sonlu elemanlar programına tanımlanmıştır. Şekil-değiştirme esasına dayanan yöntemlerden biri olan zaman tanım alanında analiz yöntemi, TBDY-2018 esasları dikkate alınarak uygulanmıştır. İlgili yapının İstanbul da olduğu ve zemin sınıfının ZC olduğu kabul edilmiştir. Deprem analizleri 1999 Kocaeli depremi ivme kayıtları kullanılarak incelenmiştir. Analizlerde dikkate alınan deprem ivme kayıtları Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) veri tabanından alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda mevcut binanın perde elemanlarının güncel yönetmeliğe göre hasar sınır bölgeleri elde edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Yapıların tasarımı ve değerlendirilmesinde TBDY-2018'de kullanılan yöntemler doğrusal ve doğrusal olmayan hesap yöntemleridir. Doğrusal hesap yöntemlerinde kuvvet esasına dayalı yaklaşım kullanılırken doğrusal olmayan hesap yöntemlerinde ise şekil-değiştirmeye göre yaklaşım dikkate alınmaktadır. Bu çalışma kapsamında, güncel yönetmelik dikkate alınarak 10 katlı konut tipi betonarme bir binanın deprem performansı incelenmiştir. Binanın modellenmesinde ve analizinde ETABS sonlu elemanlar programından faydalanılmıştır. Binanın performans seviyesini belirlemek amacıyla doğrusal olmayan davranış modellerinden yayılı plastik davranış modeli kullanılmıştır. Bina şekil-değiştirme esasına dayanan yöntemlerden biri olan doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz yöntemine tabi tutulmuştur. ETABS programı kullanılarak doğrusal olmayan malzeme özellikleri verilmiş ve kesit analizleri yapılmıştır. AFAD veri-tabanı kullanılarak analizlerde esas alınacak deprem ivme kayıtları seçilmiştir ve tasarım spektrumuna uygun olacak şekilde ölçeklendirme yapılmıştır. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz esasları ilgili yönetmelik kapsamında dikkate alınarak 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi ivme kaydı seçilmiştir.

İncelenen binanın İstanbul da yer aldığı ve yerel zemin sınıfının ZC olduğu kabul edilmiştir. Yapıya x ve y doğrultularında deprem ivme kayıtları uygulanmıştır. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz sonucunda mevcut binanın perde elemanlarının güncel yönetmeliğe göre hasar sınırları araştırılmış ve yapı performansı değerlendirilmiştir.

2. 1. Doğrusal olmayan davranış modelleri

Güncel yönetmelikte 2 adet doğrusal olmayan davranış modeli yer almaktadır. Bu davranış modelleri yığılı ve yayılı plastik davranış modeli olarak tanımlanmıştır [7].

2.2. Doğrusal olmayan hesap yöntemleri

TBDY-2018'de belirtilen deprem hesap yöntemlerinden biri olan doğrusal olmayan hesap yöntemleri, itme yöntemleri ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemidir. İtme yöntemleri ise tek ve çok modlu hesap yöntemleri olarak ikiye ayrılmıştır [7].

2.2.1. Statik itme yöntemleri

Deprem hesaplarında kullanılan ve statik itme yöntemlerinden biri olan tek modlu itme yönteminin kullanılabilmesi için güncel yönetmelikte birtakım koşullar yer almaktadır. Bina yükseklik sınıfı ($BYS \geq 5$) şartını tek modlu itme yöntemi için sağlamalıdır. Ayrıca burulma düzensizliği katsayısının $\eta_{bi} < 1.4$ olması gerekmektedir. Bu şartlara ek olarak dikkate alınan deprem doğrultusunda birinci (hâkim) titreşim moduna sahip taban kesme kuvveti etkin kütlelerinin, toplam bina kütlelerine oranının en az 0.70 olması gerekmektedir. Ancak, Bina Yükseklik Sınıfı ($BYS \geq 2$) koşulunu sağlayan binaların tümüne itme yöntemlerinden biri olan çok modlu itme yöntemi uygulanmalıdır. TBDY-2018'de tasarımı yapılan binalar deprem etkisinde yükseklikleri dikkate alınarak sekiz sınıfa ayrılmışlardır. Bina yükseklik sınıflarını belirlemek amacıyla öncelikle Deprem Tasarım Sınıfı (DTS) Tablo 1 ile tespit edilmektedir. Ardından Bina Yüksekliği H_N esas alınarak Tablo 2'den BYS belirlenmektedir [7].

Tablo 1. Deprem tasarım sınıfları [7]

DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyinde Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (S_{DS})	Bina Kullanım Sınıfı	
	BKS = 1	BKS=2, 3
$S_{DS} < 0,33$	DTS=4a	DTS=4
$0,33 \leq S_{DS} < 0,50$	DTS=3a	DTS=3
$0,50 \leq S_{DS} < 0,75$	DTS=2a	DTS=2
$0,75 \leq S_{DS}$	DTS=1a	DTS=1

Tablo 2. Bina yükseklik sınıfları ve deprem tasarım sınıflarına göre tanımlanan bina yükseklik aralıkları [7]

Bina Yükseklik Sınıfı	Bina Yükseklik Sınıfları ve Deprem Tasarım Sınıflarına Göre Tanımlanan Bina Yükseklik Aralıkları (m)		
	DTS=1, 1a, 2, 2a	DTS=3, 3a	DTS=4, 4a
BYS=1	$H_N > 70$	$H_N > 91$	$H_N > 105$
BYS=2	$56 < H_N \leq 70$	$70 < H_N \leq 91$	$91 < H_N \leq 105$
BYS=3	$42 < H_N \leq 56$	$56 < H_N \leq 70$	$56 < H_N \leq 91$
BYS=4	$28 < H_N \leq 42$	$42 < H_N \leq 56$	
BYS=5	$17,5 < H_N \leq 28$	$28 < H_N \leq 42$	
BYS=6	$10,5 < H_N \leq 17,5$	$17,5 < H_N \leq 28$	
BYS=7	$7 < H_N \leq 10,5$	$10,5 < H_N \leq 17,5$	
BYS=8	$H_N \leq 7$	$H_N \leq 10,5$	

2.2.2. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi

İlgili yönetmelikte yer alan şekil-değiştirme esaslı yöntemlerden biri olan doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap yöntemi, depreme maruz kalan bir yapının davranışını en doğru şekilde tahmin etmek için kullanılan analiz yöntemidir. Yüksek binalarda (BYS=1) bu analiz yönteminin kullanımı mecburidir [7].

Bu analiz yöntemi deprem yer hareketinin etkisinde yer alan taşıyıcı sistemin hareket denklemlerinin zaman artırımlarıyla aşama aşama direkt olarak integrasyonunu belirtir.

Analiz esnasında, doğrusal olmayan davranıştan dolayı sistemin rijitliğinin zamanla değişimi dikkate alınır. Çözüm yapılırken taşıyıcı sisteme yatay iki ortogonal doğrultudaki ivme kayıtları aynı zamanda etki ettirilir. Ardından ivme kayıtlarının eksenleri 90° döndürülür ve hesap yinelenir. Analizde önemli olan, ivme kayıtlarının seçimi ve esas alınan spektruma göre ölçeklendirilmesidir [34]. Binanın mevcut olduğu yerde tasarımda esas alınan deprem düzeyiyle uyumlu geçmiş ivme kayıtları varsa bu kayıtlara öncelik verilerek kullanılmalıdır [7].

Deprem kayıtlarının ölçeklendirme işlemini yapmak amacıyla doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap yöntemi dikkate alınarak basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmesinde TBDY-2018 yönetmeliğinde bazı kurallar yer almaktadır. Bu kurallar aşağıda belirtilmiştir:

- Bir ya da iki boyutlu hesapta kullanmak için seçilen kayıtların hepsinin spektrumların ortalamasının $0.2T_p$ ve $1.5T_p$ periyotları arasındaki genliklerinin, tasarım spektrumunun farklı periyot aralığında olmayan genliklerinden daha düşük bulunmaması gerekir.

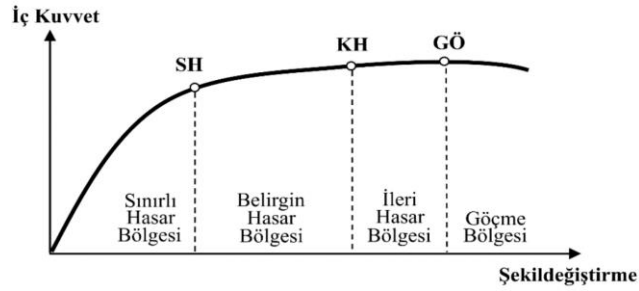
- Bileşke yatay spektruma ulaşmak amacıyla üç boyutlu hesapta kullanmak üzere deprem kayıtları tercih edilir. Bu deprem kayıtlarının iki yatay bileşenine özgü spektrumların kareleri toplamının karekökü alınır. Ardından bileşke yatay spektruma ulaşılır. Tercih edilen kayıtların hepsi için elde edilen bileşke spektrumların ortalamasının $0.2T_p$ ve $1.5T_p$ periyotları arasındaki genliklerin, tasarım spektrumunun farklı periyotta olmayan genliklere oranının 1.3 değerinden düşük çıkması gerekir [7].

2.3. Kesit hasar durumları

Güncel yönetmeliğimizde sünek elemanlar dikkate alınarak Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçme Öncesi Hasar (GÖ) olmak üzere üç hasar durumu belirtilmiştir [7].

2.3.1. Kesit hasar bölgeleri

Elemanların Sınırlı Hasar Bölgesi'nde olabilmesi için kesit hasarlarının Sınırlı Hasara yetişmemesi, Belirgin Hasar Bölgesi'nde olabilmesi için Sınırlı Hasar ve Kontrollü Hasar arasında olması, İleri Hasar Bölgesi'nde olabilmesi için Kontrollü Hasar ve Göçmenin Önlenmesi arasında olması, Göçme Bölgesinde olabilmesi için ise Göçmenin Önlenmesi düzeyini geçmesi gerekmektedir. Kesit hasar bölgeleri Şekil 1'de verilmiştir [7].



Şekil 1. Kesit hasar bölgeleri [7]

2.3.2. Kesit ve eleman hasarlarının belirlenmesi

TBDY-2018'deki deprem hesap yöntemleri dikkate alınarak iç kuvvetler ve şekil-değiştirmeler elde edilir. Elde edilen bu değerler kesit hasar sınırına denk gelen değerler ile kıyaslanır ve kesitlerin hasar bölgeleri tespit edilir. Elemanda en çok hasar gören kesit esas alınarak elemandaki hasar bulunur [7].

3. Bulgular ve tartışma

3.1. Sayısal çalışma

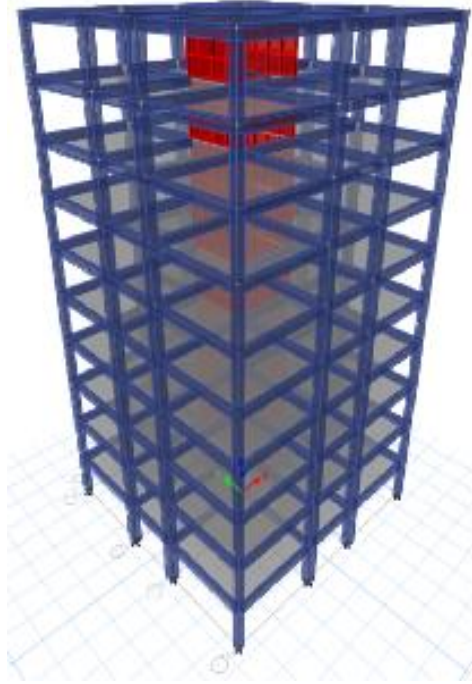
Bu çalışmada ele alınıp incelenen mevcut bina 10 katlı perde-çerçeve taşıyıcı sisteme sahip betonarme bir binadır. Mevcut bina modeli oluşturulurken TBDY-2018 dikkate alınmıştır [7]. Kat yüksekliği 3m olarak alınmıştır. Mevcut bina kat planı x ve y doğrultularında 3 açıklığa sahip olup simetrik olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan yapının plandaki boyutları akstan aksa 16m x 16m'dir. X yönündeki aksların aralıkları sırayla 6 m, 4 m, 6 m'dir. Bina taban alanı toplam 256 m² dir. Kolonlar 40 x 40 cm ve 55 x 55 cm, kirişler 25 x 50 cm olarak tasarımı yapılmıştır. Her kata rijit diyafram tanımlaması yapılmıştır. Kolon ve kirişler çubuk eleman olarak tasarlanmıştır. Döşeme kalınlığı 0.15 m olarak seçilmiştir. Tüm kesitler için beton sınıfı C30, donatı çeliği B420C seçilmiştir. Ayrıca yerel zemin sınıfı ZC alınmıştır. Şekil-değiştirme esaslı tasarım yöntemlerinden doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap yöntemi binanın deprem performansının belirlenmesinde kullanılmıştır. Binanın 3 boyutlu sonlu eleman modelinin oluşturulmasında ve analizlerinde ETABS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır.

Döşemeler üzerindeki hareketli yük ve kaplama yükü 2 kN/m², duvar yükü 0.5 kN/m², çatı katı döşemelerinde kaplama yükü 2 kN/m², hareketli yük 1 kN/m² kabul edilmiştir. Çatı katı hariç tüm kirişlerde 7.5 kN/m, çatı katı dış kirişlerinde ise 2 kN/m yük kabulü yapılmıştır. Tablo 3'de binanın tipik özellikleri özetlenmiştir.

Tablo 3. Mevcut binanın tipik özellikleri

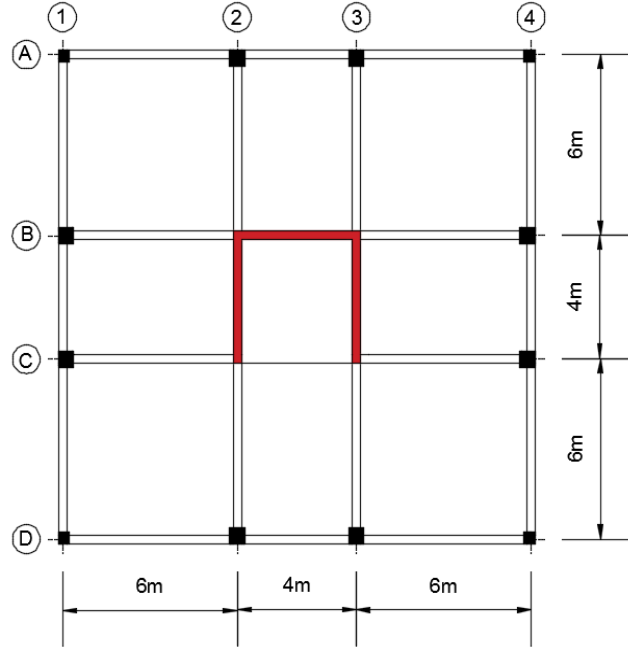
Binanın kat adedi	10
Binanın boyutları	16 m x 16 m
Kat yüksekliği	3 m
Döşeme kalınlığı	0.15 m
Beton sınıfı	C30
Donatı sınıfı	B420C
Kolon boyutları	40 x 40 cm ve 55 x 55 cm
Kiriş boyutu	25 x 50 cm
Zemin Sınıfı	ZC

ETABS programından faydalanılarak modellenen ve analizleri yapılan perde-çerçeve taşıyıcı sisteme sahip betonarme binanın 3 boyutlu görüntüsü ve kat planı Şekil 2 ve 3’de sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 2. Analizde kullanılan betonarme binanın 3 boyutlu modeli

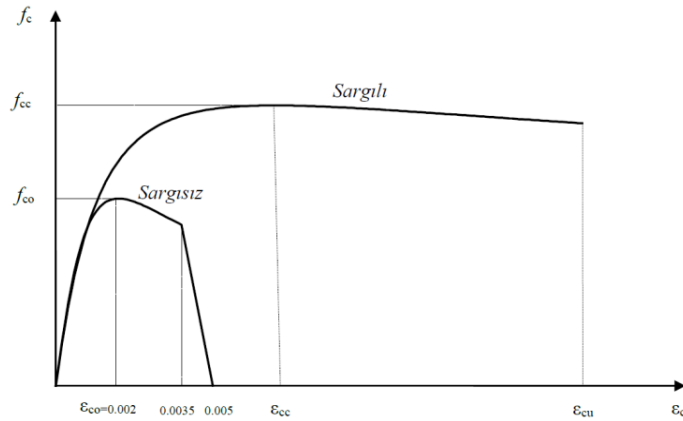
Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e (TBDY-2018) göre betonarme bir binanın perde elemanlarının hasar sınır bölgelerinin tespit edilmesi



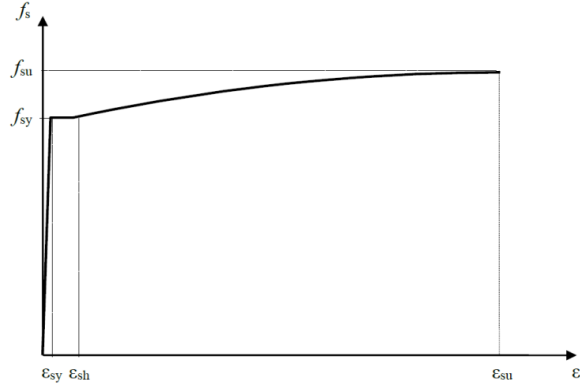
Şekil 3. Binanın tipik kat planı

3.2. Malzeme ve kesit özellikleri

Mevcut bina modelinde 40 x 40 cm ve 55 x 55 cm olmak üzere 2 farklı kolon kesiti seçilmiştir. Kiriş kesitlerinin tümü 25 x 50 cm seçilmiştir. Sırayla beton ve donatı çeliği için elastisite modülleri 32.000 MPa ve 200.000 MPa alınmıştır. TBDY-2018'in önerdiği beton modeli, hem sargılı hem de sargısız betonlar için verilmiştir. Şekil 4'de ilgili yönetmelikte yer alan sargılı ve sargısız beton modeli gösterilmiştir. TBDY-2018'in önerdiği çelik modeli ise pekleşmeli çelik modelidir. Şekil 5'de ise pekleşmeli donatı çeliği modeli gösterilmiştir [7]. Bu çalışmada, beton ve donatı çeliği için yönetmelikte yer alan beton ve donatı çeliği modelleri kullanılmıştır.



Şekil 4. Sargılı ve sargısız betonlar için TBDY-2018'in tavsiye ettiği beton modeli [7]



Şekil 5. TBKY-2018'in tavsiye ettiği pekleşmeli donatı çeliği modeli [7]

3.3. Doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin ETABS'a tanımlanması

Performans limitini, performans limitine ilk ulaşan malzeme belirlemektedir. Bundan dolayı malzemelerin her biri için elde edilen maksimum ve minimum şekil-değiştirme değerleri dikkate alınmaktadır. İlgili yönetmelik kapsamında betonun kısalma değeri ve donatı çeliğinin uzama değerleri hesaplanarak ETABS sonlu elemanlar programına sırasıyla tanımlanmıştır (Şekil 6 ve 7).

Şekil 6. Betonun doğrusal olmayan malzeme verisinin ETABS'a girilmesi

Şekil 7. Donatı çeliğinin doğrusal olmayan malzeme verisinin ETABS'a girilmesi

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e (TBDY-2018) göre betonarme bir binanın perde elemanlarının hasar sınır bölgelerinin tespit edilmesi

ETABS bu plastik mafsallık özelliklerinin tanımlayabildiği bir dizi uygulama alanına sahiptir. Plastik mafsallar kullanıcı tarafından veya varsayılan (default) olarak tanımlanabilir. Bu çalışma kapsamında kullanıcı tanımlı ayarlamalar yapılmış olup hasar durumları (Sınırlı Hasar, Kontrollü Hasar ve Göçmenin Önlenmesi Performans düzeyleri) yönetmelikte verilen denklemlere göre hesaplanmıştır.

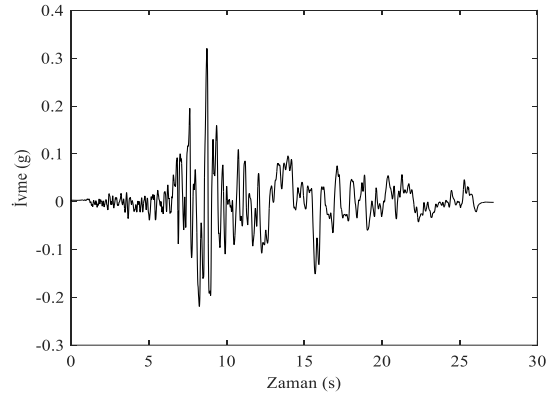
3.4. Analizde kullanılacak deprem ivme kayıtlarının seçimi

Güncel yönetmelikte deprem hesaplarında kullanılan ve doğrusal olmayan değerlendirme yöntemlerinden olan zaman tanım alanında analiz yöntemi dikkate alınarak analizlerde 1999 Kocaeli depremi ivme kaydı kullanılmıştır (Tablo 4).

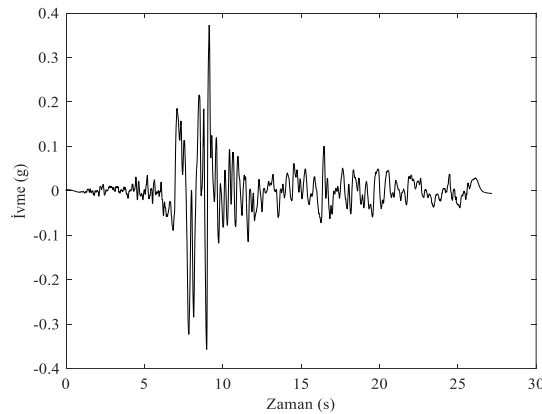
Tablo 4. Analizde kullanılan deprem kaydı

Deprem Adı	İstasyon	Tarih	Büyükük (Mw)
Kocaeli	Düzce	17 Ağustos 1999	7.6

Analizlerde dikkate alınan deprem ivme kayıtları AFAD veri tabanından alınmıştır [33]. Şekil 8 ve 9'da analizde kullanılmak üzere 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin kuzey-güney ve doğu-batı doğrultularına ait ivme kayıtları verilmiştir.

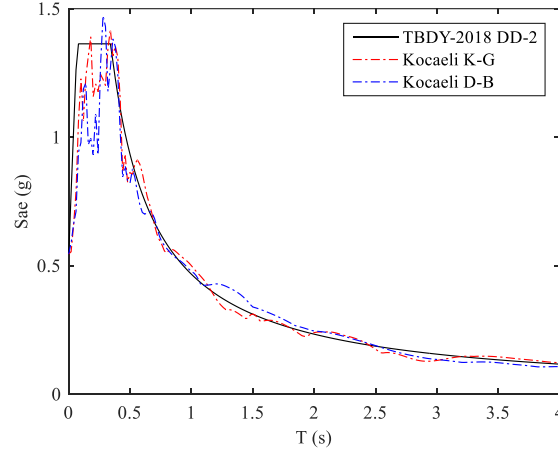


Şekil 8. Kocaeli depremi kuzey-güney doğrultusu ivme kaydı



Şekil 9. Kocaeli depremi doğu-batı doğrultusu ivme kaydı

Yapının bulunduğu konum dikkate alınarak çizilen elastik tasarım spektrumu ve ölçeklendirilmiş deprem ivme kayıtlarının tepki spektrumları Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Tasarım spektrumu ve ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarının tepki spektrumları

İncelenen binanın yerel zemin sınıfının ZC olduğu kabul edilmiş, deprem yer hareketi düzeyi ise DD-2 (50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem) olarak dikkate alınmıştır.

Kocaeli depreminin doğu-batı bileşeninin sayısal modelin x eksenı doğrultusunda, kuzey-güney bileşeninin ise y eksenı doğrultusunda uygulandığı deprem ivme kaydı birinci, aynı depremin kuzey-güney bileşeninin sayısal modelin x eksenı doğrultusunda, doğu-batı bileşeninin y eksenı doğrultusunda uygulandığı deprem ivme kaydı ise ikinci deprem olarak adlandırılmıştır.

Tablo 5. Birinci deprem sonucu perdede okunan beton birim şekil-değiştirme değerleri

Kat	Perde	Yükleme Durumu/ Kombinasyon	Mafsalsal	Numarası	Gerilmesi (MPa)	Şekil-değiştirme	Yapı Malzemesi	Yapı Durumu
Kat1	W19	1158 1 Maks	P1	1	3.23	0.015107	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 1 Maks	P1	2	3.04	0.015691	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 1 Maks	P1	3	3.46	0.016469	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 1 Maks	P1	4	4.07	0.017248	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 1 Maks	P1	5	3.96	0.018026	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 1 Maks	P1	6	3.86	0.018805	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 1 Maks	P1	7	3.78	0.019388	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 1 Min	P1	1	-19.11	-0.001073	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 1 Min	P1	2	-20.47	-0.001177	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 1 Min	P1	3	-22.72	-0.001349	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 1 Min	P1	4	-27.81	-0.001741	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 1 Min	P1	5	-32.91	-0.002132	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 1 Min	P1	6	-37.21	-0.002524	C30 L1.45	SH - KH
Kat1	W19	1158 1 Min	P1	7	-37.97	-0.002818	C30 L1.45	SH - KH

Tablo 6. Birinci deprem sonucu perdede okunan donatı birim şekil-değiştirme değerleri

Kat	Perde	Yükleme Durumu/ Kombinasyon	Mafsalsal	Numarası	Gerilmesi (MPa)	Şekil-değiştirme	Yapı Malzemesi	Yapı Durumu
Kat1	W19	1158 1 Maks	P1	8	461.16	0.015302	S420	SH - KH
Kat1	W19	1158 1 Maks	P1	9	463.48	0.016080	S420	SH - KH
Kat1	W19	1158 1 Maks	P1	10	464.88	0.016858	S420	SH - KH
Kat1	W19	1158 1 Maks	P1	11	466.29	0.017637	S420	SH - KH
Kat1	W19	1158 1 Maks	P1	12	467.69	0.018415	S420	SH - KH
Kat1	W19	1158 1 Maks	P1	13	469.1	0.019194	S420	SH - KH
Kat1	W19	1158 1 Min	P1	8	-416.89	-0.001108	S420	A - SH
Kat1	W19	1158 1 Min	P1	9	-417.49	-0.001254	S420	A - SH
Kat1	W19	1158 1 Min	P1	10	-419.15	-0.001545	S420	A - SH
Kat1	W19	1158 1 Min	P1	11	-421.06	-0.001936	S420	A - SH
Kat1	W19	1158 1 Min	P1	12	-423.18	-0.002328	S420	A - SH
Kat1	W19	1158 1 Min	P1	13	-425.3	-0.002720	S420	A - SH

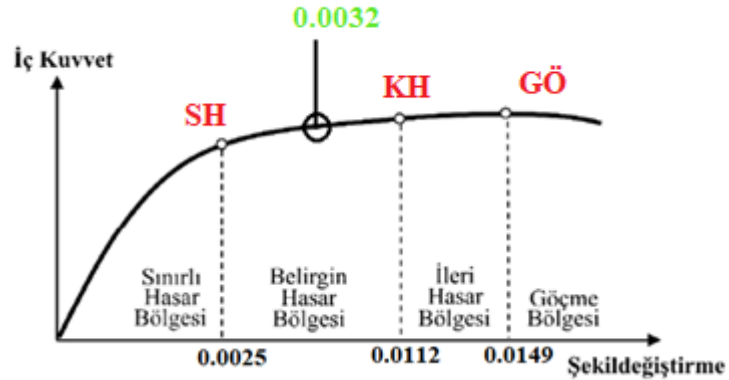
Tablo 7. İkinci deprem sonucu perdede okunan beton birim şekil-değiştirme değerleri

Kat	Perde	Yükleme Durumu/ Kombinasyon	Mafsalsal	Numarası	Gerilmesi (MPa)	Şekil-değiştirme	Yapı Malzemesi	Yapı Durumu
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	1	2.78	0.020137	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	2	2.87	0.020743	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	3	3.27	0.021550	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	4	4.07	0.022357	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	5	4.05	0.023164	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	6	4.07	0.023971	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	7	4.05	0.024576	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	1	-25.77	-0.001584	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	2	-29.18	-0.001846	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	3	-33.74	-0.002196	C30 L1.45	A - SH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	4	-37.27	-0.002546	C30 L1.45	SH - KH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	5	-38.16	-0.002895	C30 L1.45	SH - KH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	6	-39.04	-0.003245	C30 L1.45	SH - KH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	7	-39.7	-0.003508	C30 L1.45	SH - KH

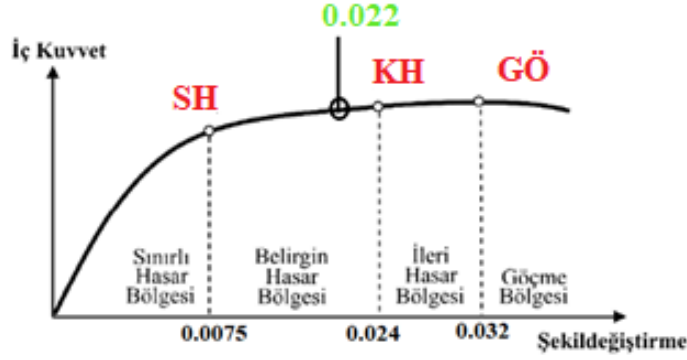
Tablo 8. İkinci deprem sonucu perdede okunan donatı birim şekil-değiştirme değerleri

Kat	Perde	Yükleme Durumu/ Kombinasyon	Mafsalsal	Numarası	Gerilmesi (MPa)	Şekil-değiştirme	Yapı Malzemesi	Yapı Durumu
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	8	471.17	0.020339	S420	SH - KH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	9	472.63	0.021146	S420	SH - KH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	10	474.08	0.021953	S420	SH - KH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	11	475.54	0.022760	S420	SH - KH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	12	477	0.023567	S420	SH - KH
Kat1	W19	1158 2 Maks	P1	13	478.45	0.024374	S420	KH - GÖ
Kat1	W19	1158 2 Min	P1	8	-424.21	-0.001671	S420	A - SH
Kat1	W19	1158 2 Min	P1	9	-426.02	-0.002021	S420	A - SH
Kat1	W19	1158 2 Min	P1	10	-427.79	-0.002371	S420	A - SH
Kat1	W19	1158 2 Min	P1	11	-429.57	-0.002721	S420	A - SH
Kat1	W19	1158 2 Min	P1	12	-431.35	-0.003070	S420	A - SH
Kat1	W19	1158 2 Min	P1	13	-433.13	-0.003420	S420	A - SH

Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz sonucunda, birinci depremde ilgili perdede hesaplanan maksimum beton birim şekil-değiştirme değeri 0.002818, donatı birim şekil-değiştirme değeri ise 0.019194 olarak hesaplanmıştır (Tablo 5-6). İkinci deprem sonucunda ilgili perdede okunan maksimum beton birim şekil-değiştirme değeri 0.003508, donatı birim şekil-değiştirme değeri ise 0.024374 olarak elde edilmiştir (Tablo 7-8). Kolon ve kiriş elemanlar ise analizler sonucunda elastik bölgede kalmıştır.



Şekil 11. Perdede okunan maksimum ortalama beton birim şekil-değiştirme değeri



Şekil 12. Perdede okunan maksimum ortalama donatı birim şekil-değiştirme değeri

Her iki deprem sonucunda perdede hesaplanan maksimum ortalama beton birim şekil-değiştirme değeri 0.003163, perdede hesaplanan maksimum ortalama donatı birim şekil-değiştirme değeri ise 0.021784 olarak hesaplanmıştır (Şekil 11-12). Betonarme bina elemanlarında incelenen hesap yöntemleri dikkate alındığında perdede oluşan maksimum ortalama birim şekil-değiştirme değerlerinin belirgin hasar bölgesinde kaldığı görülmektedir. Sonuç olarak incelenen perde elemanın Kontrollü Hasar (KH) performans düzeyini sağladığı tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında 10 katlı konut tipi betonarme bir binanın ETABS sonlu elemanlar programı ile deprem analizi yapılarak bina performansı incelenmiştir. Dikkate alınan bina perde duvar + çerçeve sistemine sahiptir. Mevcut bina kat planı x ve y doğrultularında 3 açıklığa sahip olup simetrik olarak tasarlanmıştır. Performans limitini, performans limitine ilk ulaşan malzeme belirlemektedir. Bundan dolayı donatı ve beton malzemenin her biri için elde edilen maksimum ve minimum şekil-değiştirme değerleri dikkate alınmıştır. İlgili yönetmelik kapsamında betonun kısalma değeri ve çeliğin uzama değerleri hesaplanarak ETABS sonlu elemanlar programına tanımlanmıştır. Şekil-değiştirme esasına dayanan yöntemlerden biri olan zaman tanım alanında analiz yöntemi, TBDY-2018 esasları dikkate alınarak uygulanmıştır. Deprem analizleri 1999 Kocaeli depremi ivme kayıtları kullanılarak yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda mevcut binanın perde elemanının güncel yönetmeliğe göre hasar sınırları belirlenmiş ve perde elemanlarının hasar sınır bölgeleri elde edilmiştir.

Yapılan analizlerin sonucunda;

- Birinci depremde ilgili perdede hesaplanan maksimum beton birim şekil-değiştirme değeri 0.002818, donatı birim şekil-değiştirme değeri ise 0.019194 olarak hesaplanmıştır.
- İkinci deprem sonucunda ilgili perdede hesaplanan maksimum beton birim şekil-değiştirme değeri 0.003508, donatı birim şekil-değiştirme değeri 0.024374 olarak hesaplanmıştır.
- Perdede hesaplanan maksimum ortalama beton birim şekil-değiştirme değeri 0.003163, maksimum ortalama donatı birim şekil-değiştirme değeri ise 0.021784 olarak hesaplanmıştır.
- İkinci deprem sonucunda donatı birim şekil değışırtme değeri ileri hasar bölgesinde kalmasına rağmen birinci depremde belirgin hasar bölgesinde kalmıştır. Perdede hesaplanan maksimum ortalama donatı birim şekil-değiştirme değeri ise 0.021784 olarak hesaplandığından donatı birim şekil-değiştirme değeri belirgin hasar bölgesinde kalmıştır.

Sonuç olarak malzemelerin her biri için elde edilen maksimum ve minimum şekil-değiştirme değerleri perde kesitlerin hasar sınır bölgesini belirlemede etkin bir rol oynamaktadır. Performans limitini, performans limitine ilk ulaşan malzeme belirlediği bundan dolayı malzemelerin her biri için hesaplanan maksimum ortalama donatı birim şekil değışırtme değeri ve minimum beton birim şekil-değiştirme değerlerinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. İleride yapılacak çalışmalarda farklı perde konumları ve farklı deprem ivme kayıtlarının kullanılması hedeflenmektedir.

Kaynaklar

- [1] Yalın M. Mevcut bir okul binasının deprem performansının 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [2] Şenel A.C.N. Mevcut betonarme bir yapının deprem performansının artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi ile belirlenmesi ve güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [3] Sayın E., Yön B., Onat O., Gör M., Öncü M.E., Tuğrul Tunç E., Bakır D., Karaton M., Calayır Y. 24 January 2020 Sivrice-Elazığ Turkey earthquake: geotechnical evaluation and performance of structures. Bulletin of Earthquake Engineering 2021; 19(2): 657-684.
- [4] ATC 40. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Applied Technology Council, California, ABD. 1996.
- [5] FEMA 356. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Emergency Management Agency, Washington DC. 2000.
- [6] DBYBHY 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- [7] TBDY 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- [8] İbiş T., Ulutaş H. Yeni yapılacak betonarme bir binanın TBDY 2018'e göre deprem performansının belirlenmesi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2021; 10(3): 1104-1124.
- [9] Taş Ö.F., Sayın E., Öncü M.E. Yeni betonarme binalar için etkin kesit rijitlikleri ve statik itme analizleri. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2022; 34(2): 505-516.
- [10] Dalyan İ., Şahin B. Mevcut betonarme bir binanın 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre deprem yükleri altındaki taşıyıcı sistem performansının değerlendirilmesi. Türk Deprem Araştırma Dergisi 2019; 1(2): 134-147.
- [11] Çapa Y.U. Kat adetleri farklı betonarme binaların deprem performanslarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2020.
- [12] Çavdar Ö. Earthquake performance analysis of existing concrete structure in the Istanbul metropolitan area using non-linear method. International Journal of Science and Engineering Applications 2020; 9(12): 139-146.
- [13] Tekdemir H. Betonarme binaların deprem performanslarının Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e göre değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [14] Meral E., İnel M. Düşük ve orta yükseklikteki betonarme binaların yapısal parametre özelliklerinin değerlendirilmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2016; 22(6): 468-477.
- [15] Kuşu A., Beyen K. Aynı koşullar altında tasarlanan 12 katlı çelik ve betonarme bir yapının TBDY 2018 esaslarına göre karşılaştırılması. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2019; 2(2): 64-73.
- [16] Meral E. Kapalı çıkmalı betonarme binaların deprem davranışının değerlendirilmesi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2019; 31(2): 309-318.
- [17] Meral E. Betonarme binaların doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan zaman tanım alanında analizlerinden elde edilen sismik taleplerinin karşılaştırılması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2021; 32: 183-190.
- [18] Kürkcü F. 20 katlı betonarme bir yapının Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre tasarımı ve deprem performansının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [19] Aksoylu T. 40 katlı asimetrik betonarme bir binanın deprem performansının zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi ile belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [20] Koçak N. Betonarme bir yapıda farklı malzeme türlerinin yapının zaman tanım alanında analizi sonuçlarına etkilerinin karşılaştırılması (Ocak 2020 Elazığ deprem örneği). Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [21] Şahin Y. Mevcut bir betonarme binanın 2019 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre zaman tanım alanında analizinin yapılarak performansının belirlenmesi ve çelik güçlendirme önerileri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [22] Fırat Alemdar Z., Caymazer D. Kentsel dönüşüm kapsamında çok katlı betonarme bir binanın deprem performansının değerlendirilmesi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2018; 8(2): 273-283.
- [23] Turan M.E. Mevcut betonarme bir binanın deprem performansının zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi ile belirlenmesi, güçlendirme önerileri ve maliyet analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2022.
- [24] Yıldız E. Mevcut 44 katlı betonarme yüksek bir binanın TBDY 2018'e göre deprem performansının zaman tanım alanında doğrusal olmayan yöntemle belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2021.
- [25] İçöz Z.G. Orta ve yüksek katlı binalarda zemin yapı etkileşiminin zaman tanım alanında doğrusal elastik olmayan analiz yöntemi ile incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [26] Yalın M., Ulutaş H. Mevcut okul türü bir binanın deprem performansının 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre değerlendirilmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2021; 10(2): 648-661.
- [27] Balun B., Nemutlu Ö.F., Sarı A. TBDY 2018 basitleştirilmiş tasarım kurallarının taban kesme kuvvetine etkisinin incelenmesi. Türk Doğa ve Fen Dergisi 2020; 9: 173-181.
- [28] Koçer M., Nakipoğlu A., Öztürk B., Al-Hagrı M.G., Arslan M.H. Deprem kuvvetine esas spektral ivme değerlerinin TBDY 2018 ve TDY 2007'ye göre karşılaştırılması. Selçuk-Teknik Dergisi 2018; 17(2): 43-58.

- [29] Yel N.S., Arslan M.H., Aksoyulu C., Erkan İ.H., Arslan H.D., Işık E. Investigation of the earthquake performance adequacy of low-rise RC structures designed according to the simplified design rules in TBEC-2019. *Buildings* 2022; 12(10): 1722.
- [30] Işık E., Ulutaş H., Harirchian E., Avcil F., Aksoyulu C., Arslan M.H. Performance-based assessment of RC building with short columns due to the different design principles. *Buildings* 2023; 13(3): 750.
- [31] Aksoyulu C., Mobark A., Arslan M.H., Erkan İ.H. A comparative study on ASCE 7-16, TBEC-2018 and TEC-2007 for reinforced concrete buildings. *Revista de la Construcción* 2020; 19(2): 282-305.
- [32] Kumbasaroğlu A. Effect of anchor bars on seismic behavior of infilled walled frames. *KSCE Journal of Civil Engineering* 2020; 24(10): 2980-2992.
- [33] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) veri tabanı, <https://deprem.afad.gov.tr/home-page/>, Erişim: 2023.
- [34] Celep, Z. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı. Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul, 2017.

Pıhtı Birikiminin Abdominal Aort Anevrizması Yırtılma Riskine Etkisinin Mühendislik Yöntemleriyle İncelenmesi

Hüseyin Enes SALMAN^{1*}

¹ Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara, Türkiye
*¹ hsalman@etu.edu.tr

(Geliş/Received: 08/01/2023;

Kabul/Accepted: 05/07/2023)

Öz: Abdominal aort anevrizması (AAA) karın bölgesinde yer alan aort damarının genişlemesine bağlı olarak oluşan bir kardiyovasküler hastalıktır. Tedavi edilmeyen AAA yapıları büyümeye devam etmekte ve yırtılma riski oluşturmaktadır. AAA yırtılması acil bir sağlık durumu olup, yırtılma vakalarının yarısından fazlası ölümlerle sonuçlanmaktadır. Bu nedenle erken safhada AAA yapılarını teşhis edebilmek önem teşkil etmektedir. Yüksek seviyede genişleme olduğunda AAA içinde pıhtı yapıları oluşabilmektedir. Bu çalışmada, AAA içindeki pıhtı yapılarının yırtılma riski üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Bu amaçla idealize edilmiş bir AAA modeli oluşturulmuştur. AAA modeli katı-sıvı etkileşimi göz önüne alınarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri ile incelenmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda pıhtı olan ve olmayan durumlar için farklı hemodinamik koşulların oluştuğu gözlenmiştir. AAA oluşumunun damar duvarı üzerinde oluşan mekanik gerilmeleri azalttığı görülmüştür. Yüksek seviyede pıhtı içeren AAA modelinin damar gerilme seviyeleri, pıhtı içermeyen AAA modeline kıyasla %12 daha düşüktür. Elde edilen sonuçlar, pıhtı yapılarının AAA hemodinamiğine ve damar duvarındaki mekanik gerilmelere olan etkisinin anlaşılmasına katkı sağlamıştır.

Anahtar kelimeler: Kardiyovasküler biyomekanik, abdominal aort anevrizması, katı-sıvı etkileşimi, mekanik gerilme.

Investigation of the Effect of Clot Deposition on the Risk of Abdominal Aortic Aneurysm Rupture by Engineering Methods

Abstract: Abdominal aortic aneurysm (AAA) is a cardiovascular disease caused by enlargement of the abdominal aorta. Untreated AAA structures continue to grow and pose a risk of rupture. AAA rupture is a health emergency, with more than half of ruptures resulting in death. Therefore, it is important to be able to diagnose AAA structures at an early stage. When there is a high level of enlargement, clot structures can form within the AAA. In this study, the effect of clot structures on the risk of AAA rupture is examined. For this purpose, an idealized AAA model is created. The AAA model is investigated by performing computational fluid dynamics (CFD) analysis considering the fluid-structure interaction. As a result, different hemodynamic conditions occurred for the cases with and without clots. AAA formation reduced the mechanical stresses on the vessel wall. The vascular stresses on the AAA wall are 12% lower for the models with high levels of clot. The results obtained contributed to the understanding of the effect of clot structures on AAA hemodynamics and mechanical stresses on the AAA wall.

Key words: Cardiovascular biomechanics, abdominal aortic aneurysm, fluid-structure interaction, mechanical stress.

1. Giriş

Abdominal aort anevrizması (AAA), karın kısmında yer alan infrarenal aort kısmının anormal olarak genişlemesine bağlı olarak ortaya çıkan bir kardiyovasküler hastalıktır. Tedavi edilmemesi durumunda karın bölgesindeki infrarenal aort büyümeye devam eder ve damarın yırtılması ile sonuçlanabilir. AAA yırtılması son derece risklidir ve yırtılma vakalarının %80'i ölüm ile neticelenmektedir [1, 2]. 50 yaşın üzerindeki erkeklerde AAA görülme sıklığı %4 ile %8 arasındadır. 50 yaşın üzerindeki kadınlarda ise AAA görülme olasılığı %0.5 ile %1 arasında olarak belirtilmiştir [3]. 65 yaş üstü insanlarda AAA görülme sıklığı %5 ile %9 aralığındadır [4]. AAA görülme sıklığı ve yırtılması durumunda oluşturduğu hayati risk, AAA teşhisinin ve tedavisinin önemini ortaya koymaktadır.

Aort damarının karın kısmında yer alan abdominal bölgedeki normal çap değeri sağlıklı insanlarda 2 cm ile 2.5 cm arasındadır [5, 6]. Anevrizma oluşumu ile beraber damarın dış çap değeri giderek büyümeye başlar. Aort damarının karın bölgesindeki çapı normal çap değerine oranla %50 veya daha fazla artış gösterdiğinde, bu durum klinik bir vaka olarak değerlendirilir ve AAA olarak isimlendirilir. AAA çapları anevrizmanın büyüklüğüne göre

* Sorumlu yazar: hsalman@etu.edu.tr. Yazarın ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-7572-9902

5 cm'nin üzerine çıkabilir. 5.5 cm ve üzerindeki AAA çapları yırtılma açısından kritik kabul edilir ve cerrahi operasyon planlanır [7].

Anevrizmalar genellikle farklı bir rahatsızlık için doktora başvuran hastalarda tesadüfen fark edilir. Anevrizmalar gerek oluşum aşamasında ve gerekse ilerleme safhalarında fazla belirti göstermezler ve hastalık sessiz olarak ilerler. Bu durum, AAA'nın erken aşamada tespit edilmesini oldukça zorlaştırır. El ile muayene sonrasında şüphe uyandıran durumlarda bilgisayarlı tomografi gibi detaylı medikal görüntüleme teknikleri kullanılarak AAA teşhis edilir.

Günümüzdeki klinik uygulamalarda, anevrizmanın yırtılma riskini belirlemek için temel parametre olarak çap değeri göz önüne alınır. Ancak, 9 cm çapa ulaşmasına rağmen ömür boyu yırtılmayan anevrizmalar bulunmaktadır. Buna karşın, 3 cm çap değerine sahip olup yırtılan anevrizmalar da görülmektedir. 473 farklı AAA vakasını içeren bir otopsi çalışmasına göre, 5 cm ve altındaki AAA'ların %13'ü, 5 cm üzerindeki AAA'ların ise %60'ı yırtılmamıştır [8]. Bu veriler, yırtılma riskini belirlemek için sadece anevrizma çapını kullanmanın yeterli olmadığını ortaya koymaktadır.

Biyomekanik alanındaki gelişmeler ile birlikte anevrizma yırtılmasının sebepleri üzerine birçok araştırma yapılmıştır [1, 6]. Yapılan araştırmaların bir kısmında mühendislik yaklaşımları kullanılarak sonlu elemanlar analizi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi gibi metotlar uygulanmış, anevrizma içindeki kan akışı ve damar duvarında oluşan gerilmeler incelenmiştir. HAD analizlerini gerçekleştirmek için anevrizma yapısı bilgisayar ortamında üç boyutlu olarak modellenir ve kan akışı analiz edilir. Gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için Doppler ultrasonografi ölçümleri ile elde edilmiş kan akış hızları sınır koşulları olarak kullanılır [6, 7].

Anevrizma ile birlikte büyüyen damar çapı, akış alanının genişlemesine neden olur ve kan akış hızını anevrizma civarında düşürür. Hız düşüşüne bağlı olarak, damarın iç yüzeylerinde oluşan duvar kayma gerilmelerinde düşüş meydana gelir [9]. Anevrizma nedeniyle azalan duvar kayma gerilmeleri büyük önem taşımaktadır, çünkü damar yüzeyinde bulunan endotel hücreler duvar kayma gerilimine bağlı olarak tepki gösterirler ve damarın büyüme şeklini değiştirirler [10]. Normal düzeyde olmayan kayma gerilmeleri endotel hücre davranışının normal dışı olmasına sebep olur ve damar anormal bir şekilde gelişim göstermeye başlar. Bu nedenle, akış koşullarındaki anormal değişimler damar gelişmesini doğrudan etkileyebilmektedir.

Literatürdeki çalışmaların bir kısmında AAA yırtılma riski üzerine araştırmalar yapılmıştır [11, 12]. Bu çalışmaların bazılarında katı-sıvı etkileşimli akış analizleri gerçekleştirilmiştir [13, 14]. Katı-sıvı etkileşimli analizlerde katı damar modeli ile sıvı akış modeli birlikte çözülür ve bu sayede kan akışının damar üzerindeki mekanik etkileri incelenebilir. Literatürde, tek yönlü veya çift yönlü olarak gerçekleştirilen katı-sıvı etkileşimli analizler mevcuttur [15].

AAA içinde pıhtı oluşumu damar mukavemetini etkileyebilir. Dolayısıyla, AAA damarındaki mekanik gerilmeler, damar yapısına ve pıhtı oluşumuna bağlı olarak değişebilmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, AAA içindeki pıhtı yapısının genellikle ihmal edildiği görülmüştür [6]. Bu çalışmada, ideal bir AAA modeli oluşturulmuş ve bu model üzerindeki pıhtı seviyelerinin mekanik gerilmelere etkisi irdelenmiştir. İdeal AAA modeli kullanılarak pıhtı olan ve olmayan modeller için katı-sıvı etkileşimli analizler gerçekleştirilmiştir.

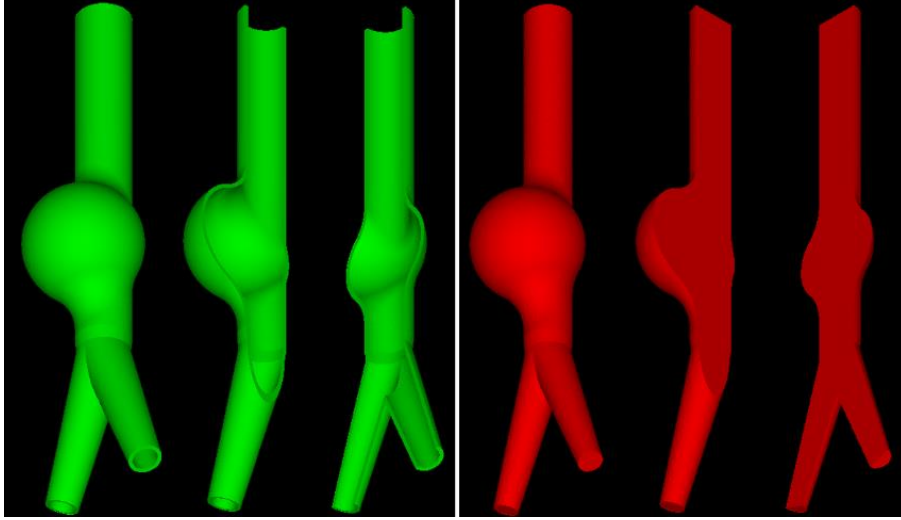
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemini kullanan ADINA (versiyon 9.7) yazılımı kullanılmıştır. Öncelikle ideal bir AAA geometrisi oluşturulmuştur. AAA geometrisini belirlemek için literatürde yer alan çalışmalar örnek alınmıştır [6]. AAA modeli içinde kan, damar ve pıhtı yapısı yer almaktadır. Kan, akışkan bir sıvı olarak modellenmiştir. Damar ve pıhtı yapıları ise birbirine yapışık iki katı olarak modellenmiştir. Kan ile damar veya pıhtının temas ettiği yüzeyler katı-sıvı etkileşim yüzeyleri olarak modellenmiştir. Böylelikle, katı ve sıvı yapılar arasında kuvvet transferi sağlanmıştır. Sıvı alanındaki kan akışını çözmek amacıyla "ADINA CFD" modülü kullanılmıştır. Katı alanlardaki deformasyonları ve gerilmeleri çözmek için "ADINA Structures" modülü kullanılmıştır. Katı ve sıvı alanları etkileştirmek için ise "ADINA FSI" modülü kullanılmıştır.

2.1. İdeal anevrizma geometrisi

İdeal AAA modellerinde anevrizma yapısı 40 mm çapa sahip küresel bir forma sahiptir. 17 mm'lik iç akış çapı ve 1.5 mm'lik damar kalınlığı kullanılmıştır. Anevrizma küresinin merkezi ile aort damarının akış merkez çizgisi arasında 10 mm'lik bir kaçıklık düşünülmüştür. Bunun nedeni abdominal aort anevrizması vakalarının büyük çoğunluğunun bir kaçıklık içermesidir ve simetrik olmamasıdır [16-18]. Genellikle anevrizma ön tarafa doğru genişlemektedir [19, 20]. Anevrizma genişlemesinden sonraki kısımlarda, akış alanı tekrar normale

dönmekte ve iki iliak artere bölünerek devam etmektedir. İdeal modellerde iliak arterlerin bulunduğu çatallaşma bölgesi de düşünülmüştür. İki iliak arter arasındaki açı 40 derece olarak modellenmiştir [21, 22]. Farklı pıhtı seviyelerinin etkilerini inceleyebilmek için düşük, orta ve yüksek seviyelerde 3 farklı pıhtı hacmi modellenmiştir. İçinde pıhtı içermeyen model ile birlikte düşünüldüğünde 4 farklı ideal anevrizma geometrisi elde edilmiştir. İçinde pıhtı olmayan AAA modeli Şekil 1’de sunulmuştur. AAA içinde farklı seviyelerde pıhtı oluşumu içeren modeller Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 1. İçinde pıhtı bulunmayan AAA modeli. Yeşil renkli kısım damar yapısını, kırmızı renkli kısım ise kan hacmini göstermektedir. Damar ve kan hacimlerinin izometrik açıdan genel görünümü ve 2 farklı kesit görünümü sunulmuştur.

Yüksek seviyede pıhtı içeren ideal modelde kan akış alanı bir düz boru formundadır ve anevrizma bölgesinde iç akış çapı değişmemektedir. Orta ve düşük seviyede pıhtı içeren ideal modellerde anevrizma bölgesindeki kan akış alanı genişlemektedir. Orta seviyede pıhtı içeren modelde, anevrizma bölgesinde genişleyen akış alanı 20 mm çapında bir küre formundadır. Düşük seviyede pıhtı içeren modelde, genişleyen akış alanı 30 mm çapında bir küre formundadır. Pıhtı içermeyen modelde ise anevrizma bölgesinde genişleyen akış alanı 40 mm çapında bir küre formundadır.

2.2. Sayısal modellerin çözümünde kullanılan denklemler

Sayısal modeller, akış alanını oluşturan sıvı hacmi ve sıvı hacmini çevreleyen katı yapı olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Sıvı hacminde oluşan hız ve basınç gibi parametreleri zamana bağlı olarak elde etmek için süreklilik ve Navier-Stokes denklemleri kullanılmıştır [19, 23]. Süreklilik ve Navier-Stokes denklemleri sırasıyla Denklem 1 ve Denklem 2’de sunulmuştur. Süreklilik denklemi akış hacminin giriş ve çıkış alanlarındaki kütle akış miktarlarının aynı olduğunu göstermektedir. Diğer bir deyişle, birim zamanda akış modeline dahil olan ve akış modelinden ayrılan kütle miktarları birbirine eşittir. Denklem 1’de yer alan v parametresi akış hız tensörünü belirtmektedir. Denklem 2’de yer alan ρ_s parametresi sıvı alanındaki kanın özkütlesini, τ_s parametresi sıvı gerilim tensörünü, w parametresi ise sıvı modeldeki koordinat sisteminin katı alan deformasyonuna bağlı olarak değişen hız tensörünü belirtmektedir. Denklem 2’de belirtilen w hız tensörü katı-sıvı etkileşimine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Eğer katı-sıvı etkileşimi olmayan ve sıvı akış geometrisi sabit olan bir problem düşünülürse w hız tensörünün değeri sıfır olacaktır. Mevcut çalışmada modellenen anevrizmalar deforme olabilen bir katı yapıya sahip olduğu için sıvı akış hacmi zamana bağlı olarak değişmektedir. Buna bağlı olarak, çözülen sayısal modellerde w tensörünün değeri sıfırdan farklı olarak elde edilmektedir [23].

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (1)$$

$$\rho_s \frac{\partial v}{\partial t} + \rho_s (v - w) \cdot \nabla v - \nabla \cdot \tau_s = 0 \quad (2)$$

Katı alanında momentum korunumu denklemi kullanılmıştır ve Denklem 3'te sunulmuştur [23]. Denklem 3'te yer alan τ_k parametresi katı alandaki gerilim tensörünü, ρ_k parametresi katı alandaki özkütle değerini, x_k parametresi ise katı alandaki deformasyon tensörünü göstermektedir. Yer çekiminin modellenen problem üzerindeki etkisi çok düşük olduğu için yer çekimi ihmal edilmiştir. Bu nedenle, Denklem 3'te eşitliğin sol tarafında yer çekimine bağlı olarak oluşabilecek kuvvetler eklenmemiştir [23].

$$\nabla \cdot \tau_k = \rho_k \ddot{x}_k \quad (3)$$

Katı-sıvı etkileşimini modelleyebilmek amacıyla akışkanın katıyla temas ettiği alanlar katı-sıvı etkileşim yüzeyi olarak belirlenmiştir. Katı-sıvı etkileşim yüzeylerinde karşılıklı deformasyon ve kuvvet transferlerini modelleyebilmek amacıyla sırasıyla Denklem 4 ve Denklem 5'te yer alan deformasyon uyumu ve kuvvet dengesi eşitlikleri kullanılmıştır [6, 19]. Denklem 4'te yer alan x_s parametresi katı-sıvı etkileşim yüzeyine temas eden sıvı için deformasyon tensörünü göstermektedir. Denklem 5'te yer alan \hat{n}_k parametresi katı-sıvı etkileşim yüzeyine temas eden katı yüzeyi için normal vektörlerini, \hat{n}_s parametresi ise katı-sıvı etkileşim yüzeyine temas eden sıvı yüzeyi için normal vektörlerini belirtmektedir.

$$x_k = x_s \quad (4)$$

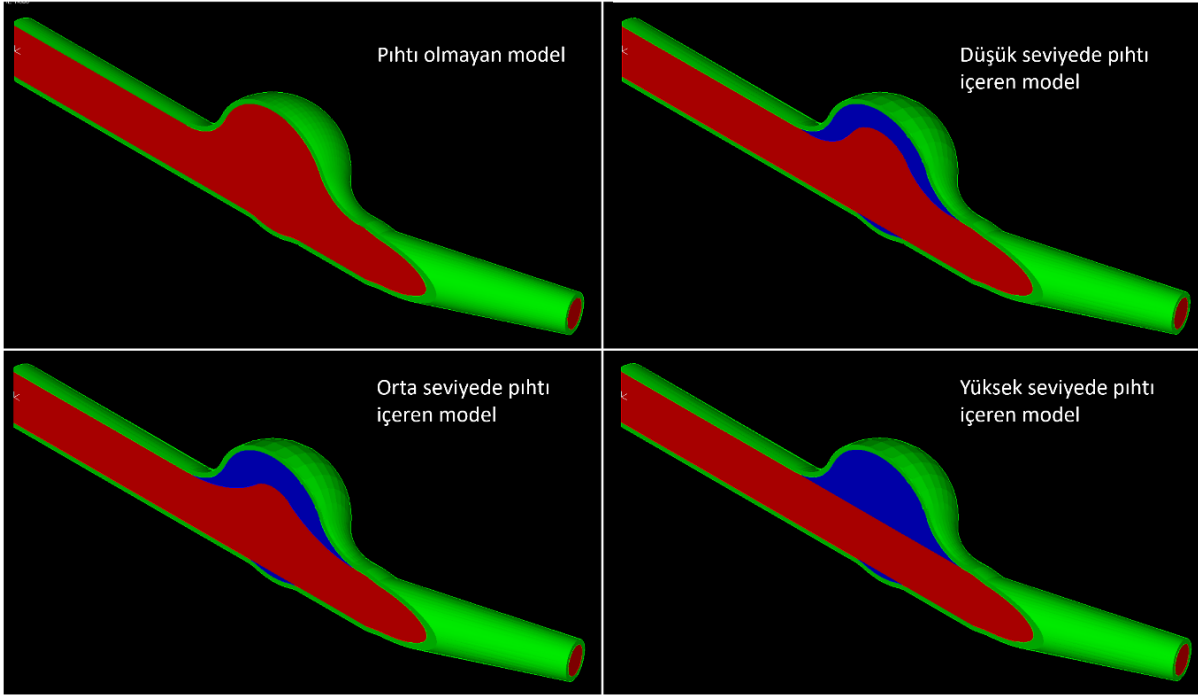
$$\tau_k \cdot \hat{n}_k = \tau_s \cdot \hat{n}_s \quad (5)$$

2.3. Sıvı akış modeli ve ağdan bağımsız sonuç elde edilmesi

Tüm akış analizleri, kanın Newton tipi olmayan özelliklerinin düşünüldüğü Carreau modelini kullanarak gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki birçok anevrizma çalışmasında kullanıldığı gibi laminar akış modeli kullanılmıştır [24-26]. AAA modellerinde, laminar akış modelinin türbülanslı modeller ile benzer sonuçlar verdiğini belirten birçok çalışma bulunmaktadır [27, 28]. Carreau sıvı modelinde kanın viskozitesi sabit değildir ve akış koşullarına bağlı olarak viskozite değeri değişmektedir. Carreau modeli için kullanılan parametreler Denklem 6'da sunulmuştur [23]. Kanı modellemek için kullanılan Carreau modelinde, μ_0 değeri 0.056 olarak, μ_∞ değeri 0.0033 olarak, A değeri 10.976 olarak, n değeri ise -0.3216 olarak kullanılmıştır [23, 28, 29]. Akış kayma gerilimleri ($\dot{\gamma}$) sabit bir parametre olmayıp, zamana bağlı olarak değişmektedir ve HAD çözümü ile elde edilen akış verilerinden sağlanmaktadır.

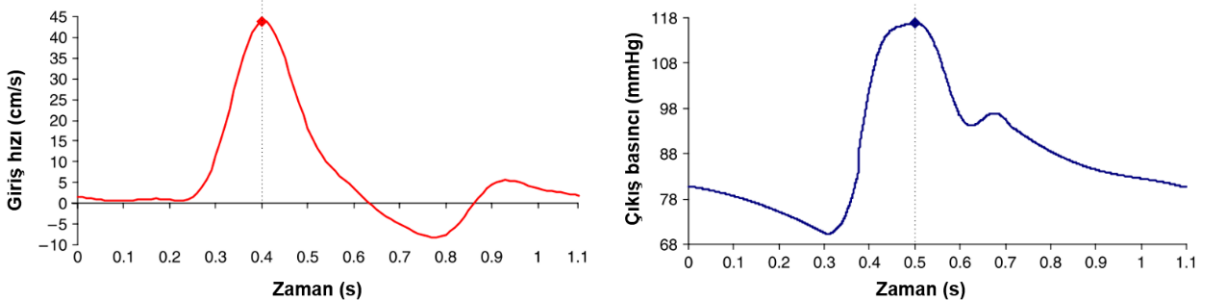
$$\mu = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty)(1 + A|\dot{\gamma}|^2)^n \quad (6)$$

Tüm analizler üç kardiyak döngü boyunca gerçekleştirilmiştir. Her bir kardiyak döngü 1.1 saniye uzunluğundadır. Kardiyak döngüden bağımsız sonuç elde etmek için her bir kardiyak döngüdeki sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, pıhtı içermeyen AAA modeli kullanılarak en fazla anevrizma genişlemesi olan bölgedeki ortalama basınç değerleri karşılaştırılmıştır. İlk kardiyak döngüdeki ortalama basınç 11649.2 Pa olarak elde edilmiştir. İkinci ve üçüncü kardiyak döngüdeki ortalama basınç değerleri sırasıyla 11880.0 Pa ve 11881.1 Pa olarak elde edilmiştir. Birinci ve ikinci kardiyak döngü arasındaki ortalama basınç farkı %1.98 olarak hesaplanmıştır. İkinci ve üçüncü kardiyak döngü arasındaki ortalama basınç farkı %0.01 olarak elde edilmiştir. Akış başlangıcındaki geçici etkiler ilk kardiyak döngüde görülmektedir ve sonraki kardiyak döngülerde etkisini kaybetmektedir. İkinci ve üçüncü kardiyak döngü arasındaki farkların oldukça küçük olmasından ötürü ikinci kardiyak döngüdeki sonuçlar esas alınmıştır. Akış analizlerinde, birim zaman adımı 0.022 saniye olarak kullanılmıştır ve her bir kardiyak döngü 50 eşit zaman adımına bölünmüştür.



Şekil 2. AAA içinde farklı seviyelerde pıhtı içeren modeller. Düşük, orta ve yüksek seviyede pıhtı oluşumunu gösteren modellerin kesit görünüşleri sunulmuştur. Kesit görünüşlerini sunabilmek amacıyla görsellerde modellerin yarısı gösterilmektedir. Yeşil renkli kısım damarı, mavi renkli kısım pıhtıyı, kırmızı renkli kısım ise kanı göstermektedir. Yüksek seviyede pıhtı içeren modelde kan akış alanı düz bir boru formundadır.

AAA modelinin giriş kısmında sınır koşulu olarak literatürden elde edilmiş bir hız profili kullanılmıştır [19, 23]. Çıkış kısmında ise literatürden elde edilmiş bir basınç profili kullanılmıştır [19, 23]. Kullanılan sınır koşulları Şekil 3'te sunulmuştur. Şekil 3'te gösterilen profiller 1 kardiyak döngü içindir ve her bir kardiyak döngüde tekrar etmektedir. Modellerde kullanılan giriş hızı ve çıkış basıncı profillerini zamana bağlı fonksiyonlar olarak ifade etmek amacıyla MATLAB (R2017b) yazılımının eğri uyarlama modülü kullanılmıştır. Giriş hızı fonksiyonunu elde etmek için Denklem 7'de gösterilen 6 farklı sinüs dalgası kullanılmıştır. Denklem 7'de yer alan tüm parametrelerin değerleri Tablo 1'de sunulmuştur. Denklem 7'de yer alan t parametresi zamanı göstermektedir ve birimi saniyedir. Anlık olarak giriş hızını belirten $v(t)$ parametresi zamana bağlı olarak elde edilmiştir ve birimi m/s'dir.



Şekil 3. Zamana bağlı AAA giriş hızı ve çıkış basıncı profilleri [19, 23].

$$v(t) = a_1 \sin(b_1 t + c_1) + a_2 \sin(b_2 t + c_2) + a_3 \sin(b_3 t + c_3) + a_4 \sin(b_4 t + c_4) + a_5 \sin(b_5 t + c_5) + a_6 \sin(b_6 t + c_6) \quad (7)$$

Çıkış basınç profilini ifade eden fonksiyonu bulmak için hız profilinde kullanılan yöntemle benzer bir metot kullanılmıştır. Çıkış basıncı profilinin zamana bağlı fonksiyonu Denklem 8’de sunulmuştur. Çıkış basıncına ait fonksiyonu elde edebilmek için 8 farklı sinüs dalgası kullanılmıştır. Denklem 8’de kullanılan tüm parametrelerin değerleri Tablo 2’de sunulmuştur. Denklem 8’de yer alan $p(t)$ parametresi anlık olarak çıkış basıncının değerini vermektedir ve birimi Pa’dır. Zamana ifade eden t parametresinin birimi saniyedir.

$$p(t) = d_1 \sin(e_1 t + f_1) + d_2 \sin(e_2 t + f_2) + d_3 \sin(e_3 t + f_3) + d_4 \sin(e_4 t + f_4) + d_5 \sin(e_5 t + f_5) + d_6 \sin(e_6 t + f_6) + d_7 \sin(e_7 t + f_7) + d_8 \sin(e_8 t + f_8) \quad (8)$$

Denklem 7 ve Denklem 8 kullanılarak elde edilen giriş hızı ve çıkış basıncı profilleri ile Şekil 3’te sunulmuş olan literatüre ait giriş hızı ve çıkış basıncı profilleri, Şekil 4 üzerinde karşılaştırılmıştır. Denklem 7 ile elde edilen giriş hızı eğrisi literatürde verilen değerlere oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Denklem 8 ile elde edilen çıkış basıncı eğrisi kardiyak döngünün ikinci yarısında nispeten biraz daha yüksek hataya sebep olmuştur. Ancak, oluşacak en yüksek basınç hatasının 160 Pa olduğu görülmüş ve bu hatanın tolere edilebilecek limitler dahilinde olduğu düşünülmüştür. Kardiyak döngü boyunca ortalama çıkış basıncının 13000 Pa civarında olduğu düşünülürse, en yüksek hatanın yaklaşık olarak %1.23 olduğu görülmüştür. En yüksek hata değerinin %2’den daha küçük olması nedeniyle Denklem 8 ile elde edilecek çıkış basıncı verisinin yeterince isabetli olduğu düşünülmüştür. Denklem 7 ile elde edilen giriş hızı eğrisinin Denklem 8 ile elde edilen çıkış basıncı eğrisine nispeten daha doğru sonuçlar vermesinin nedeni, giriş hız profilindeki lokal minimum ve lokal maksimum noktalarının birbirinden daha uzak olması olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, çıkış basıncı profilinde daha fazla sayıda lokal minimum ve lokal maksimum noktası bulunmaktadır. Bu durum da eğrinin gerçek veriyeye yakınsamasını zorlaştırmaktadır.

Modeller üzerinde yer alan diğer bir sınır koşulu da katı-sıvı etkileşim yüzeyleridir. Katı yapılar ile kanın temas ettiği yüzeyler katı-sıvı etkileşim yüzeyi olarak tanımlanmıştır. Bu yüzeylerde, kan akışı nedeniyle oluşan hemodinamik kuvvetler katı yapılara aktarılmaktadır. Sıvı akış modelinde, katı-sıvı etkileşim yüzeyleri üzerinde kayma olmayacak şekilde modelleme yapılmıştır. Bu nedenle, katı-sıvı etkileşim yüzeyi üzerindeki akış hızı tüm zaman adımlarında sıfırdır. Katı-sıvı etkileşim modellerindeki deformasyon ve kuvvet transferleri katı-sıvı etkileşim yüzeyleri üzerinden gerçekleşmektedir.

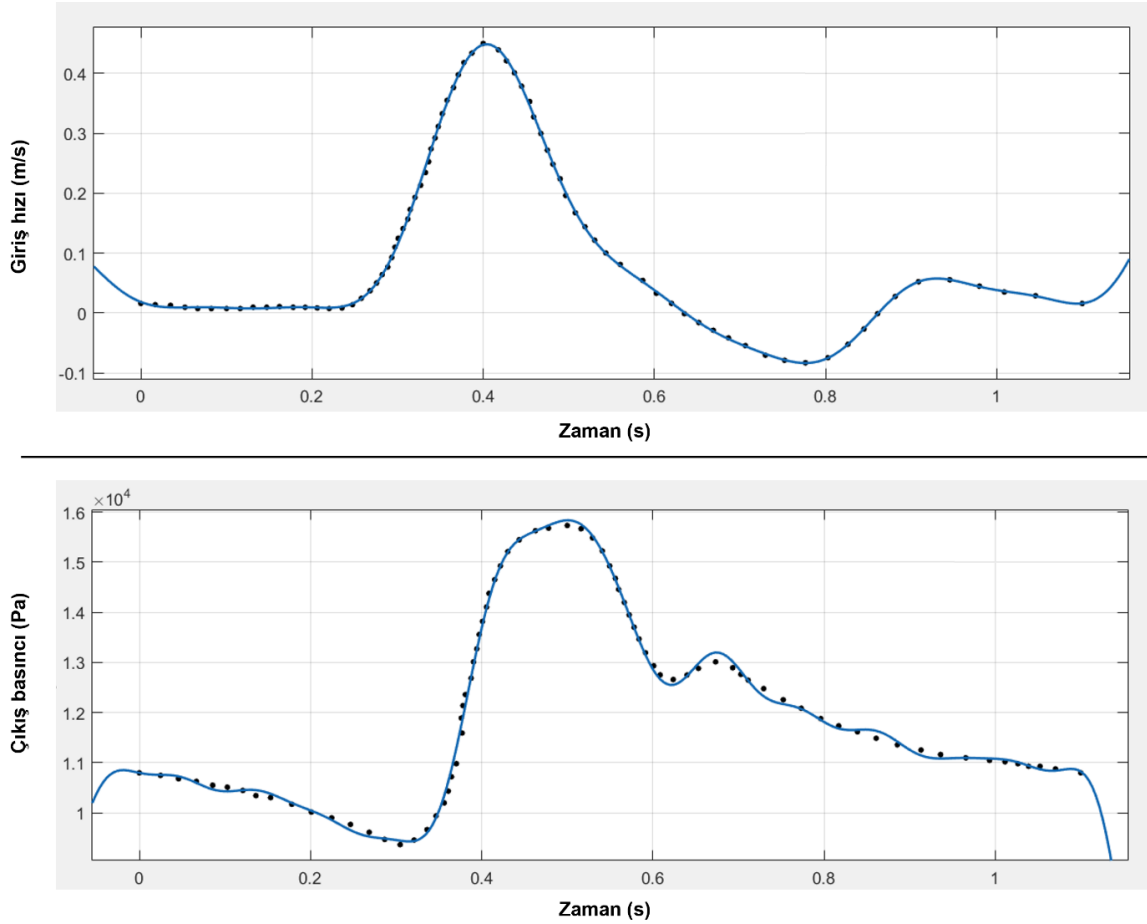
Tablo 1. Giriş hız profilini zamana bağlı bir fonksiyon olarak tanımlamak için kullanılan ve Denklem 7’de yer alan tüm parametrelerin değerleri.

$a_1 = 0.1361$	$b_1 = 0.2476$	$c_1 = 2.285$
$a_2 = 0.1582$	$b_2 = 2.173$	$c_2 = 1.787$
$a_3 = 0.09308$	$b_3 = 3.78$	$c_3 = 1.945$
$a_4 = 0.05821$	$b_4 = 5.992$	$c_4 = 2.587$
$a_5 = 0.02407$	$b_5 = 7.672$	$c_5 = 2.994$
$a_6 = 0.01379$	$b_6 = 9.825$	$c_6 = -2.867$

Tablo 2. Çıkış basınç profilini zamana bağlı bir fonksiyon olarak tanımlamak için kullanılan ve Denklem 8’de yer alan tüm parametrelerin değerleri.

$d_1 = 26500$	$e_1 = 0.9866$	$f_1 = 1.592$
$d_2 = 30250$	$e_2 = 2.103$	$f_2 = 1.649$
$d_3 = 41870$	$e_3 = 1.839$	$f_3 = -1.487$
$d_4 = 1109$	$e_4 = 5.379$	$f_4 = 2.477$
$d_5 = 526.4$	$e_5 = 7.634$	$f_5 = -3.063$
$d_6 = 70.53$	$e_6 = 19.28$	$f_6 = 3.21$
$d_7 = 264.1$	$e_7 = 12.32$	$f_7 = 0.2647$
$d_8 = 183.9$	$e_8 = 14.74$	$f_8 = 0.5574$

Sıvı modelinde ağdan bağımsız kan akış çözümlerini elde edebilmek amacıyla 3 farklı sıvı ağ yapısı kullanılmıştır. Ağdan bağımsız çözüm elde etmek için içinde pıhtı bulunmayan ideal AAA akış geometrisi kullanılmıştır. Akış alanı genişlemesine bağlı olarak en yüksek hemodinamik değişimlerin pıhtı bulunmayan AAA geometrisinde olması beklenmektedir. Pıhtı miktarı arttıkça anevrizma bölgesindeki akış alanı genişlemesi azalmakta ve akış düzgün boru akışına yakın bir forma gelmektedir. Kullanılan tüm ağ yapılarında, akış alanının duvarlarında her biri 0.15 mm'lik kalınlığa sahip 4 adet sınır tabakası kullanılmıştır. İnce sınır tabakaları sayesinde duvar yüzeyindeki akış gelişimi isabetli bir şekilde modellenebilmiştir. Düşük, orta ve yüksek yoğunluklu ağ olmak üzere 3 farklı sıvı ağ yapısı kullanılmıştır. Düşük, orta ve yüksek yoğunluklu sıvı ağ yapılarında sırasıyla 3 mm, 1.7 mm ve 1.1 mm'lik birim eleman uzunluğu kullanılmıştır. Düşük, orta ve yüksek yoğunluklu sıvı ağ yapılarının sırasıyla 38361, 138354 ve 417269 elemanı bulunmaktadır. Sıvı ağ yapısı oluşturmak için kullanılan elemanlar üçgen prizma profiline sahip 4 köşeli elemanlardır. Elde edilen sonuçların ağdan bağımsız olduğunu göstermek amacıyla genişlemenin en fazla olduğu anevrizma kesitindeki ortalama basınç değerleri karşılaştırılmıştır. Ortalama basınç değerleri karşılaştırıldığında, düşük yoğunluklu sıvı ağ yapısı için 11807.8 Pa, orta yoğunluklu sıvı ağ yapısı için 11802.4 Pa, yüksek yoğunluklu sıvı ağ yapısı için ise 11800.3 Pa büyüklüğünde basınç değerleri elde edilmiştir. Düşük ve orta yoğunluklu ağlar arasındaki ortalama basınç farkı %0.05, orta ve yüksek yoğunluklu ağlar arasındaki ortalama basınç farkı ise %0.02 olarak bulunmuştur. Farklı ağ yapıları ile elde edilen basınç farklarının %2'den küçük olması nedeniyle orta yoğunluklu sıvı ağ yapısının yeterince isabetli akış sonuçları verdiği düşünülmüştür.



Şekil 4. Denklem 7 ve Denklem 8 kullanılarak elde edilen giriş hızı ve çıkış basıncı profillerinin Şekil 3'te sunulmuş olan literatüre ait giriş hızı ve çıkış basıncı profilleri ile karşılaştırması. Grafiklerde gösterilen siyah noktalar Şekil 3 üzerinden alınan verilere aittir. Mavi renkli giriş hızı eğrisi Denklem 7 ile elde edilmiştir. Mavi renkli çıkış basıncı eğrisi Denklem 8 ile elde edilmiştir. Elde edilen eğriler 0 ile 1.1 saniye aralığında doğru sonuca yakın değerler vermektedir.

2.4. Katı modeli ve ağdan bağımsız sonuç elde edilmesi

Katı model, damar ve pıhtı yapısından oluşmaktadır. Damar malzeme özelliklerini modellemek için Neo-Hookean hiper-elastik malzeme modeli kullanılmıştır [23, 30]. Neo-Hookean modelin gerilme enerjisi yoğunluk fonksiyonu (W) Denklem 9'da belirtilmiştir. Denklem 9'da yer alan I_1 parametresi Cauchy-Green gerilme tensörünün ilk değişmezidir. Damar yapısı için c_1 değeri 17.4 N/cm^2 olarak, c_2 değeri 188.1 N/cm^2 olarak kullanılmıştır [31]. Damar yapısının Poisson oranı 0.49 olarak kullanılmıştır [32] ve özkütlesi 2000 kg/m^3 olarak modellenmiştir [11]. Damar içindeki kan basıncı düşünülerek, katı model iç yüzeyine 120 mmHg değerinde bir iç basınç uygulanmıştır [30].

$$W = c_1(I_1 - 3) + c_2(I_1 - 3) \quad (9)$$

Katı modelde yer alan pıhtı yapısı için doğrusal elastik malzeme modeli kullanılmıştır. Pıhtı elastik modül değeri 0.1 MPa olarak kullanılmıştır [33]. Pıhtı yapısının Poisson oranı literatürde belirttiği üzere 0.45 olarak kullanılmış [34] ve özkütlesi 1050 kg/m^3 olarak modellenmiştir [35].

İdeal AAA geometrileri ile gerçekleştirilen katı-sıvı etkileşimli analizlerde en yüksek deformasyon değerleri, en fazla pıhtı yoğunluğu bulunan modelde beklenmektedir. Bunun temel nedeni, pıhtının damar yapısına oranla daha yumuşak bir malzeme özelliğine sahip olmasıdır. Bu nedenle, katı modeli için ağdan bağımsız çözüm elde etme çalışmaları yüksek seviyede pıhtı içeren AAA modeli ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 3 farklı katı ağ yapısı ile analizler gerçekleştirilmiş ve maksimum deformasyon değerleri karşılaştırılmıştır.

Katı modelinde ağdan bağımsız çözüm elde edebilmek amacıyla, 1.35 mm , 1 mm ve 0.75 mm olarak 3 farklı birim eleman boyutu kullanılmıştır. Katı modellerde ağ yapısı oluşturmak için 8 köşeli prizmatik elemanlar kullanılmıştır. Birim eleman boyutu 1.35 mm olarak kullanılan düşük yoğunluklu katı ağ yapısında, pıhtı üzerinde 24881 eleman ve damar üzerinde 20184 eleman olmak üzere toplam 45064 eleman kullanılmıştır. Birim eleman boyutu 1 mm olarak kullanılan orta yoğunluklu katı ağ yapısında, pıhtı üzerinde 51783 eleman ve damar üzerinde 60649 eleman olmak üzere toplam 112432 eleman kullanılmıştır. Birim eleman boyutu 0.75 mm olarak kullanılan yüksek yoğunluklu katı ağ yapısında, pıhtı üzerinde 107268 eleman ve damar üzerinde 93379 eleman olmak üzere toplam 200647 eleman kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre en yüksek deformasyon değerleri, düşük yoğunluklu katı ağ yapısı için 1.133 mm , orta yoğunluklu katı ağ yapısı için 1.115 mm , yüksek yoğunluklu katı ağ yapısı için ise 1.119 mm olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, düşük ve orta yoğunluklu katı ağ yapıları arasında %1.59, orta ve yüksek yoğunluklu katı ağ yapıları arasında ise %0.36'lık bir fark elde edilmiştir. Her üç katı ağ yapısında da en yüksek deformasyon kan ile pıhtının temas ettiği bölgede oluşmuştur. Bunun temel nedeni, pıhtı yapısının damara oranla daha yumuşak bir malzeme özelliğine sahip olmasıdır.

Üç farklı katı ağ yapısı ile elde edilen efektif gerilme dağılımları Şekil 5'te sunulmuştur. Şekil 5'te sunulan sonuçlara göre efektif gerilme dağılımı düşük yoğunluklu katı ağ yapısı için yeterince düzgün bir şekilde elde edilememiştir. Orta yoğunluklu ağ yapısı kullanıldığında, efektif gerilme dağılımı yüksek yoğunluklu katı ağ yapısına benzer bir şekilde elde edilebilmiştir. Bu nedenle, katı-sıvı etkileşimli analizlerde orta yoğunluklu katı ağ yapısı kullanılmıştır.

2.5. Katı-sıvı etkileşimi

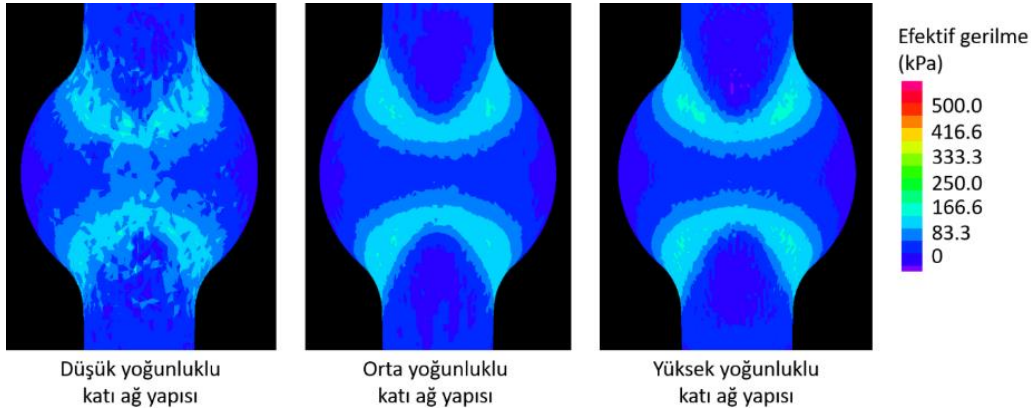
Katı-sıvı etkileşimi içeren problemlerde tek yönlü veya çift yönlü olmak üzere iki farklı metot kullanmak mümkündür. Çift yönlü katı-sıvı etkileşim analizlerinde, katı modeldeki geometrik deformasyonlar sıvı modele aktarılmaktadır. Ayrıca, sıvı modeldeki akış koşullarına bağlı olarak katı model deforme olabilmektedir. Bu nedenle, çift yönlü katı-sıvı etkileşim analizlerinde katı ve sıvı modeller birbirlerini doğrudan etkilemektedir. Tek yönlü katı-sıvı etkileşim analizlerinde ise sadece katı modelin geometrisi deformasyonlara bağlı olarak değişebilmektedir. Dolayısıyla, tek yönlü katı-sıvı etkileşim modellerinde sıvı modelin geometrik formu deforme olmayan sabit bir yapıda kabul edilmektedir. Bu nedenle, tek yönlü katı-sıvı etkileşim modellerinde katı modeldeki geometrik deformasyonların etkisi sıvı modele yansıtılmamaktadır [21].

Tek yönlü katı-sıvı etkileşim modelleri, katı deformasyonunun yüksek olduğu problemlerde hatalı sonuçlara neden olabilmektedir [3]. Çünkü, yüksek katı deformasyonu sıvı akışı üzerinde ciddi değişimlere neden olabilir. Katı deformasyonunun nispeten az olduğu durumlarda ise tek yönlü ve çift yönlü katı-sıvı etkileşim modelleri benzer sonuçlar vermektedir [6]. Analiz edilen ideal AAA geometrilerinde, deformasyon seviyelerinin $1-2 \text{ mm}$ seviyelerinde olduğu görülmüştür. Katı ve sıvı model uzunluklarının 100 mm seviyelerinde olduğu

düşünüldüğünde, beklenen deformasyon seviyelerinin geometrik boyutlar üzerinde %2'den daha az değişimlere neden olabileceği düşünülmüştür.

Bu durumu detaylı olarak inceleyebilmek amacıyla, en yüksek deformasyonların beklendiği durum olan içinde yüksek seviyede pıhtı bulunan ideal AAA modeli için hem tek yönlü hem de çift yönlü katı-sıvı etkileşim analizleri gerçekleştirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Katı ve sıvı ağ yapıları için daha önce belirlenen ve isabetli sonuç verdiği gözlemlenen orta sıklıktaki katı ve sıvı ağ yapıları kullanılmıştır.

Çift yönlü katı-sıvı etkileşim modeli ile çözüm gerçekleştirildiğinde 1.123 mm'lik bir maksimum deformasyon ve 710.80 kPa değerinde bir maksimum efektif gerilme değeri elde edilmiştir. Elde edilen maksimum efektif gerilme değeri, iliak arter çatallaşmasının başladığı bölgededir ve anevrizma üzerinde yer almamaktadır. Aynı problem tek yönlü katı-sıvı etkileşim analizi ile çözüldüğünde, 1.115 mm'lik bir maksimum deformasyon ve 709.43 kPa değerinde bir maksimum efektif gerilme değeri bulunmuştur. Elde edilen değerler karşılaştırıldığında %0.71 değerinde bir deformasyon farkı ve %0.19 değerinde bir efektif gerilme farkı bulunmuştur. Tek yönlü ve çift yönlü analizlerle elde edilen değerler arasındaki farkların %2'den küçük olması nedeniyle, tek yönlü katı-sıvı etkileşim analizlerinin yeterince doğru sonuçlar sağladığı düşünülmüştür. Bu nedenle, analizler tek yönlü katı-sıvı etkileşim metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. İçinde yüksek seviyede pıhtı bulunan AAA modeli ile gerçekleştirilen analizlerde katı ağ yapısı yoğunluğunun elde edilen sonuçlar üzerindeki etkisi. Anevrizma bölgesinin arka tarafında yer alan efektif gerilme dağılımları gösterilmiştir. Efektif gerilme dağılımları en yüksek giriş hızının olduğu anda elde edilmiştir.

3. Elde Edilen Sayısal Veriler

Gerçekleştirilen katı-sıvı etkileşimli analizler sonucunda pıhtı yapısının hacmine bağlı olarak değişen hemodinamik ve yapısal parametreler incelenmiştir. Temel olarak incelenen hemodinamik parametreler kan akış hızı ve sıvı basıncıdır. İncelenen yapısal parametreler ise damar ve pıhtı üzerinde oluşan deformasyonlar ve efektif gerilmelerdir. Elde edilen tüm sayısal bulgular son kardiyak döngüye aittir. Son kardiyak döngünün başlangıç anı 0 s olarak, bitiş anı ise 1.1 s olarak düşünülmüştür. Kanın akış hızını ve basıncını gösteren hemodinamik bulgular Şekil 2'de gösterilen ve modellerin tam ortasından geçen kesit alanları üzerinde sunulmuştur.

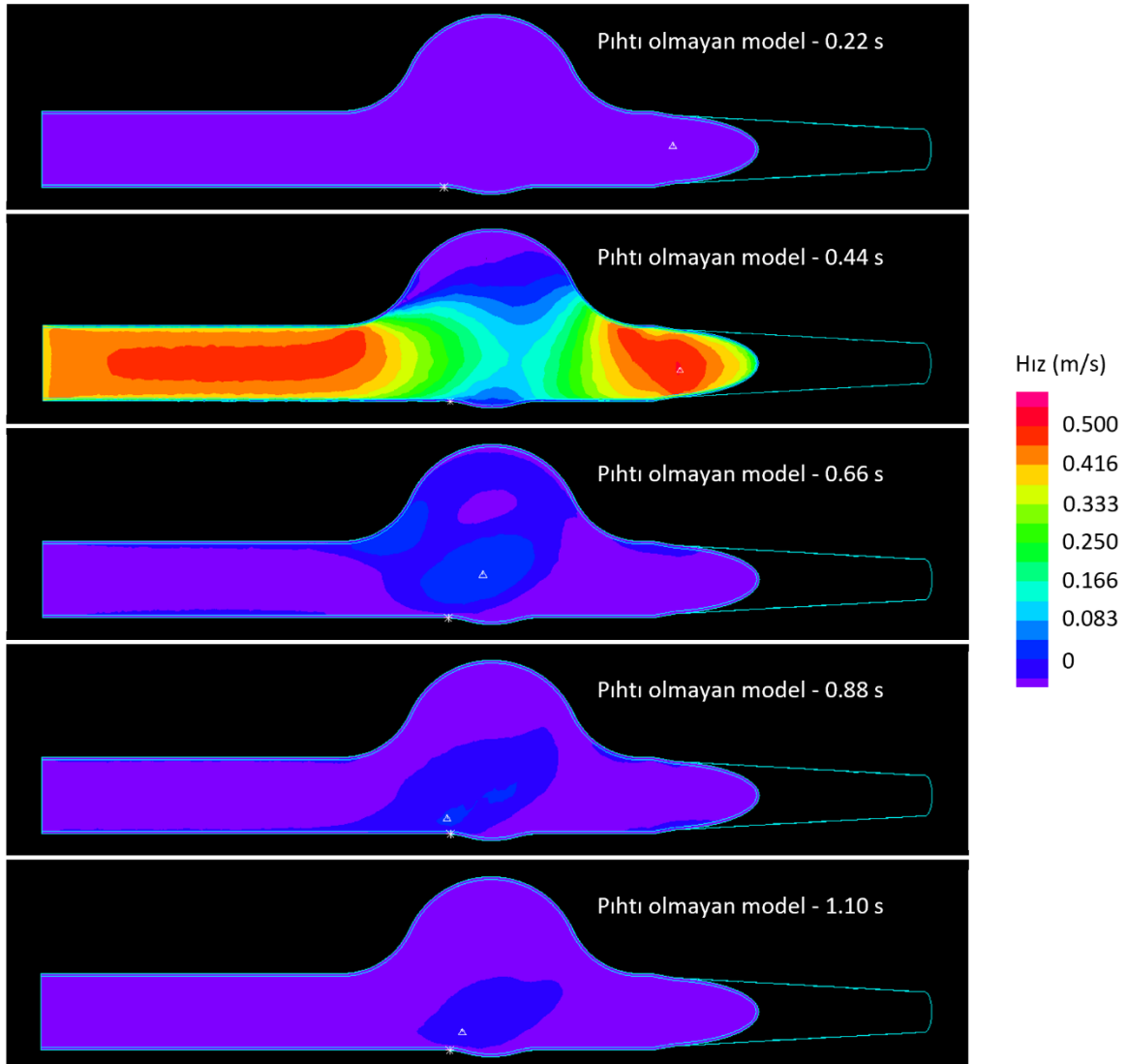
Şekil 6'da içinde pıhtı olmayan model için farklı anlardaki hız büyüklüğü dağılımları görülmektedir. En yüksek akış hızları, giriş hızının en yüksek olduğu 0.44 s anında elde edilmektedir. Anevrizmadan önce yer alan damar çapının sabit olduğu kısımda akış hızı 0.5 m/s değerine kadar yükselmektedir. Anevrizmanın başladığı bölgeden itibaren hızlarda düşüş gözlenmekte ve anevrizma içindeki en yüksek hız değeri 0.15 m/s mertebesine düşmektedir. En düşük hız değerleri anevrizma genişlemesinin olduğu kısımlarda görülmektedir. Anevrizma bölgesinden sonra yer alan iliak arter kısımlarında akış hızı tekrar artmakta ve en yüksek akış hızı değerleri tekrar 0.5 m/s civarına gelmektedir.

En yüksek hız değerinin görüldüğü 0.44 s anından sonra giriş hızındaki azalmaya bağlı olarak model kesitindeki hızlar düşmektedir. Kardiyak döngünün ikinci yarısındaki düşük akış hızlarını incelemek amacıyla 0.66 s, 0.88 s ve 1.10 s anlarındaki akış davranışları Şekil 7 üzerinde incelenmiştir. Şekil 7'de tüm modeller için hız vektörleri yer almaktadır ve sadece anevrizma bölgesine odaklanılmıştır. Pıhtı olmayan modelin 0.66 s anındaki akış formunda bir girdap yapısının oluştuğu gözlemlenmektedir. Bu girdap yapısı 0.88 s ve 1.10 s anlarında da bulunmaktadır ancak ilerleyen zaman ile birlikte hız değerleri azalarak girdabın kuvveti azalmaktadır. Benzer girdap formuna düşük pıhtı içeren modelin 0.66 s anında da rastlanmaktadır. Düşük seviyede pıhtı içeren

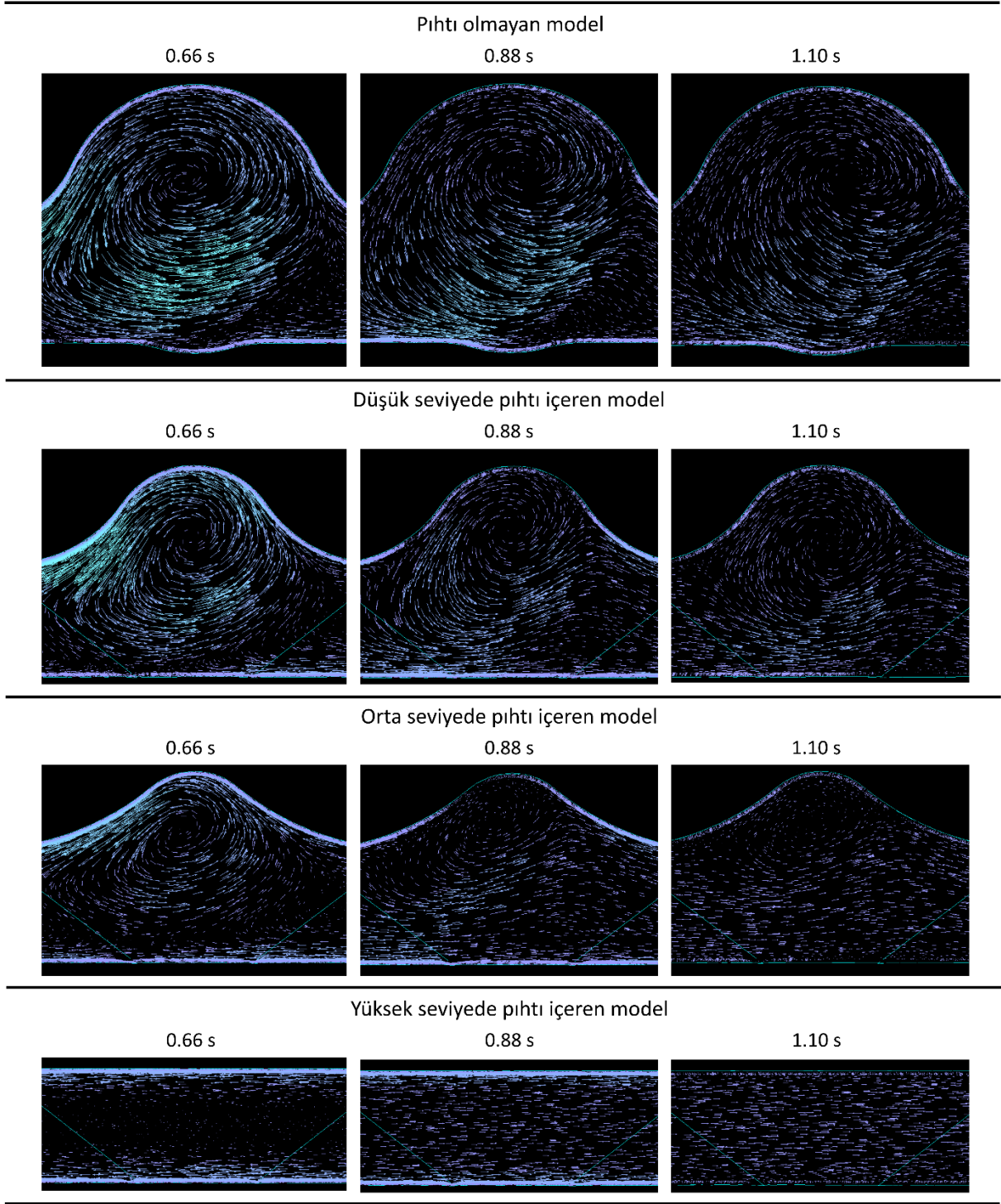
modeldeki girdabın büyüklüğü ve hızı, pıhtı içermeyen modele kıyasla daha küçüktür. Düşük pıhtı içeren modeldeki girdap yapısı kardiyak döngünün sonu olan 1.10 s anına kadar azalarak devam etmektedir. Orta seviyede pıhtı içeren modelde de 0.66 s anında bir girdap yapısı oluşmakta ancak bu girdap yapısı kardiyak döngü sonunda etkisini neredeyse tamamen kaybetmektedir. Yüksek seviyede pıhtı içeren modeldeki akış alanı bir düz boru akışına benzediği için herhangi bir girdap yapısına rastlanmamıştır.

En yüksek seviyede hemodinamik değişimlerin görüldüğü 0.44 s anındaki hız dağılımları Şekil 8'de tüm modeller için gösterilmiştir. Hız değeri 0.1 m/s'den daha küçük olan bölgeler düşük hızlı bölgeler olarak isimlendirilmektedir. Elde edilen bulgulara göre, düşük hızlı bölgelerin en yoğun olduğu model, içinde pıhtı bulunmayan modeldir. Anevrizma içindeki pıhtı miktarı arttıkça düşük hızlı bölgelerin azaldığı gözlemlenmektedir. Yüksek seviyede pıhtı içeren modelde 0.44 s anında düşük hızlı bölgeye rastlanmamıştır.

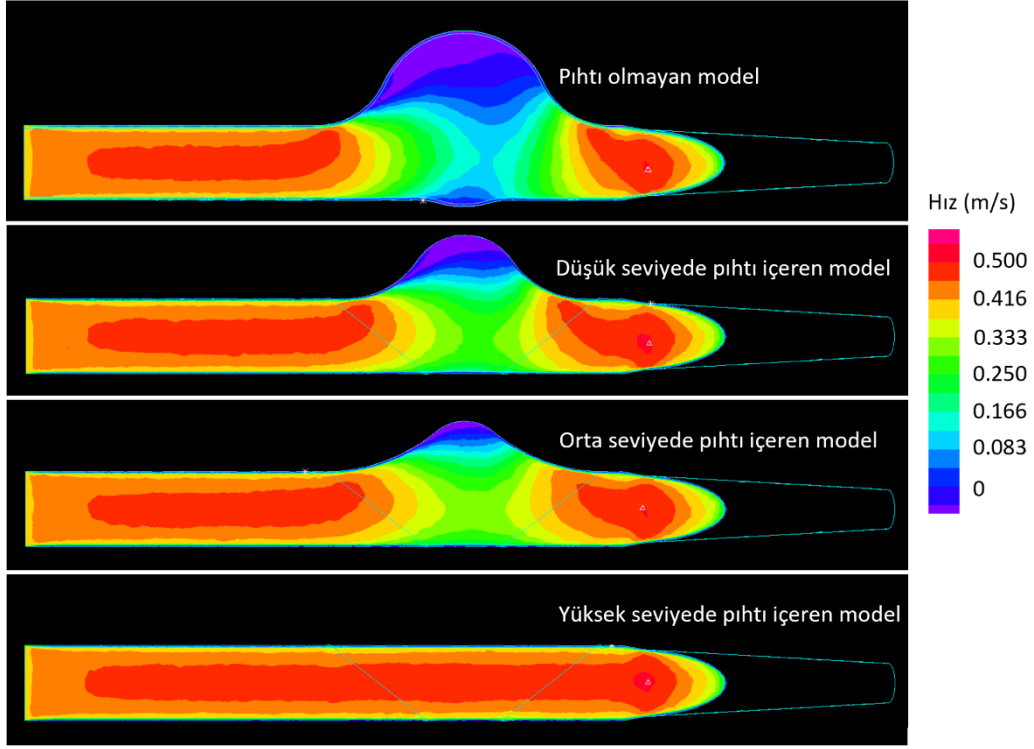
Şekil 9'da tüm modeller için 0.44 s anındaki basınç dağılımları gösterilmiştir. Elde edilen verilere göre, anevrizma hacmi içindeki basınç seviyeleri pıhtı yoğunluğundan etkilenmektedir. Anevrizma içindeki en yüksek basınç değerleri, içinde pıhtı bulunmayan modelde görülmüştür. İçinde pıhtı olmayan modelde, anevrizma içindeki en yüksek basınç yaklaşık 15600 Pa olarak ölçülmüştür. İçinde yüksek seviyede pıhtı olan modelde bu değer 15400 Pa seviyelerine düşmüştür.



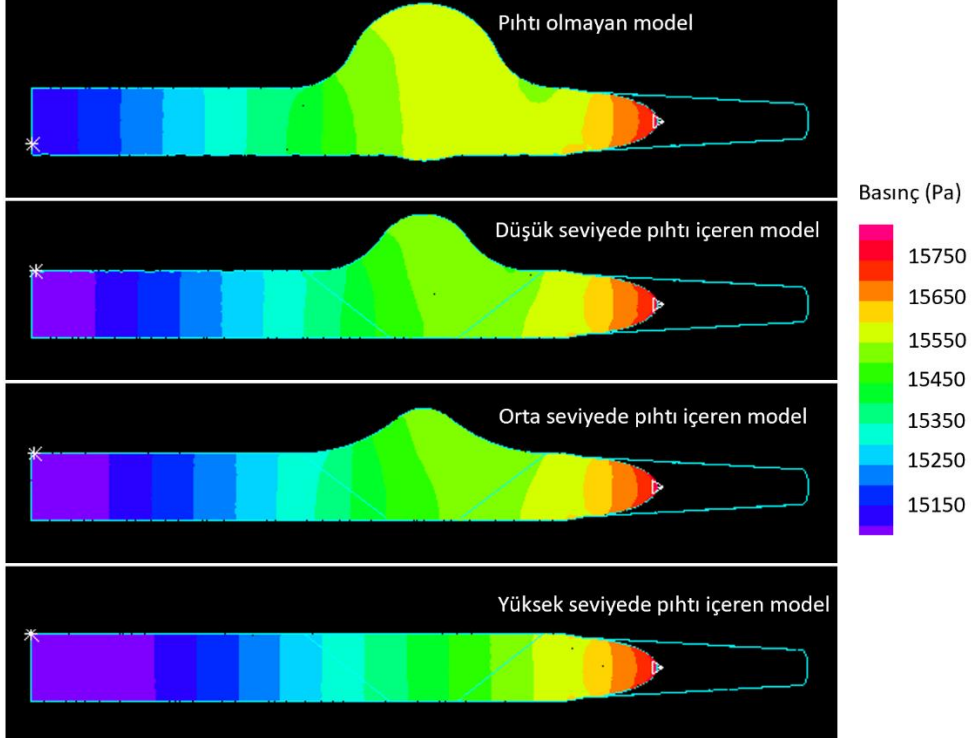
Şekil 6. İçinde pıhtı olmayan model için kardiyak döngünün farklı anlarında kesit alanı üzerindeki hız büyüklüğü dağılımları. Akış yönü soldan sağa doğrudur.



Şekil 7. Tüm modeller için kardiyak döngünün ikinci yarısında anevrizma bölgesindeki hız vektörlerinin karşılaştırması. Görsellerde sadece anevrizma bölgesine odaklanılmış ve 0.66 s, 0.88 s, 1.10 s anlarındaki hız vektörleri sunulmuştur. Damar duvarlarına yakın olan sınır bölgelerinde daha yoğun sıklıkta ağ yapıları kullanıldığı için modellerin sınır bölgelerinde daha fazla sayıda vektör bulunmakta ve daha yoğun görülmektedir. Hız vektörlerinin renk skalası Şekil 6'da sunulan renk skalası ile aynıdır. Akış yönü soldan sağa doğrudur.



Şekil 8. Tüm modeller için en yüksek giriş hızının olduğu 0.44 s anındaki hız dağılımları. Akış yönü soldan sağa doğrudur.



Şekil 9. Tüm modeller için en yüksek giriş hızının olduğu 0.44 s anındaki basınç dağılımları. Akış yönü soldan sağa doğrudur.

Tüm pıhtı oluşumu durumları için modellerin orta kesitlerinde yer alan maksimum akış hızları kardiyak döngünün farklı anları düşünülerek Tablo 3'te sunulmuştur. Tüm modeller için orta kesitte yer alan minimum ve maksimum basınç değerleri kardiyak döngünün farklı anları düşünülerek Tablo 4'te özetlenmiştir. Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterildiği üzere, en yüksek akış hızı ve basınç değerleri 0.44 s anında elde edilmektedir. Bu nedenle, damar ve pıhtı yapıları üzerindeki en yüksek deformasyonlar ve en yüksek efektif gerilme değerleri 0.44 s anında beklenmektedir.

Tablo 3. Farklı seviyede pıhtı içeren AAA modelleri için kardiyak döngünün farklı anlarında orta kesitte elde edilen maksimum akış hızları.

	Pıhtı olmayan AAA modeli	Düşük seviyede pıhtı içeren AAA modeli	Orta seviyede pıhtı içeren AAA modeli	Yüksek seviyede pıhtı içeren AAA modeli
0.22 s anındaki maksimum akış hızı (m/s)	0.01222	0.01229	0.01227	0.01226
0.44 s anındaki maksimum akış hızı (m/s)	0.4676	0.4701	0.4672	0.4710
0.66 s anındaki maksimum akış hızı (m/s)	0.09809	0.1067	0.08355	0.04296
0.88 s anındaki maksimum akış hızı (m/s)	0.06997	0.05025	0.04058	0.04085
1.10 s anındaki maksimum akış hızı (m/s)	0.04702	0.03779	0.02687	0.02682

Tablo 4. Farklı seviyede pıhtı içeren AAA modelleri için kardiyak döngünün farklı anlarında orta kesitte elde edilen minimum ve maksimum basınç değerleri.

	Pıhtı olmayan AAA modeli	Düşük seviyede pıhtı içeren AAA modeli	Orta seviyede pıhtı içeren AAA modeli	Yüksek seviyede pıhtı içeren AAA modeli
0.22 s anındaki maksimum basınç (Pa)	9920	9920	9920	9920
0.22 s anındaki minimum basınç (Pa)	9911	9911	9910	9910
0.44 s anındaki maksimum basınç (Pa)	15656	15657	15658	15666
0.44 s anındaki minimum basınç (Pa)	15341	15314	15303	15283
0.66 s anındaki maksimum basınç (Pa)	12871	12871	12871	12871
0.66 s anındaki minimum basınç (Pa)	12742	12727	12724	12713
0.88 s anındaki maksimum basınç (Pa)	11688	11710	11713	11731
0.88 s anındaki minimum basınç (Pa)	11476	11476	11476	11476
1.10 s anındaki maksimum basınç (Pa)	10788	10788	10788	10788
1.10 s anındaki minimum basınç (Pa)	10756	10753	10752	10750

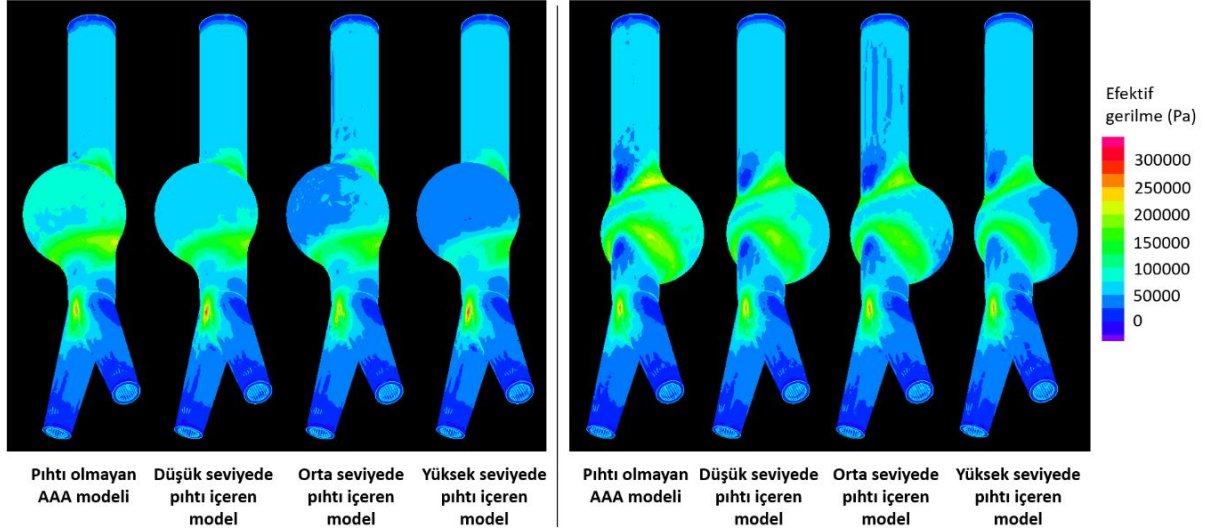
Akış hızı ve sıvı basıncı gibi hemodinamik parametrelerin yanı sıra damar ve pıhtı yapılarının üzerinde oluşan deformasyon ve efektif gerilme değerleri de önem teşkil etmektedir. Farklı yoğunluktaki pıhtı oluşumları göz önüne alınarak, katı-sıvı etkileşim analizleri sonucunda 0.44 s anında elde edilen maksimum damar deformasyonları, maksimum pıhtı deformasyonları, damar üzerindeki maksimum efektif gerilme değerleri ve pıhtı üzerindeki maksimum efektif gerilme değerleri Tablo 5'te sunulmuştur. Bu çalışma kapsamında AAA bölgesine odaklanıldığı için Tablo 5'te sunulan değerler sadece AAA genişlemesi olan kısımdaki en yüksek değerleri belirtmektedir.

Damar yapısı üzerinde oluşan efektif gerilme dağılımları Şekil 10'da sunulmuştur. En yüksek gerilme değerleri 0.44 s anında olduğu için, bu andaki dağılımlar üzerine odaklanılmıştır. Şekil 10'da tüm modellenen durumlar için ön ve arka profillerden efektif gerilme dağılımları görülmektedir. Tablo 5'te sunulan sonuçlarla uyumlu olarak, AAA içindeki pıhtı miktarı arttıkça AAA yüzeyi üzerindeki efektif gerilmeler düşüş göstermektedir. Damar üzerindeki maksimum efektif gerilme değerleri damarın iç yüzeyinde olduğu için anevrizmanın dış yüzey görünümü riskli bölgeleri göstermemektedir.

Şekil 11’de anevrizma genişlemesinin olduğu bölgede damar iç yüzeyindeki maksimum efektif gerilme dağılımları gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, damarın iç yüzeyinde riskli olarak değerlendirilen 2 farklı bölge dikkat çekmektedir. Bu bölgeler anevrizma genişlemesinin başladığı ve sonlandığı kısımlardadır. Anevrizmanın arka tarafında yer almakta olan bu riskli bölgeler incelendiğinde, pıhtı miktarındaki artış ile beraber efektif gerilme seviyelerinin düştüğü görülmektedir.

Tablo 5. Farklı seviyede pıhtı içeren AAA modelleri için anevrizma bölgesinde elde edilen maksimum deformasyon seviyeleri ve maksimum efektif gerilme değerleri.

	Pıhtı olmayan AAA modeli	Düşük seviyede pıhtı içeren AAA modeli	Orta seviyede pıhtı içeren AAA modeli	Yüksek seviyede pıhtı içeren AAA modeli
Damar üzerindeki maksimum deformasyon (mm)	0.4566	0.4126	0.4003	0.2967
Pıhtı üzerindeki maksimum deformasyon (mm)	-	0.6670	0.8028	1.115
Damar üzerindeki maksimum efektif gerilme (kPa)	335.75	327.13	330.91	295.15
Pıhtı üzerindeki maksimum efektif gerilme (kPa)	-	9.50	12.01	13.33

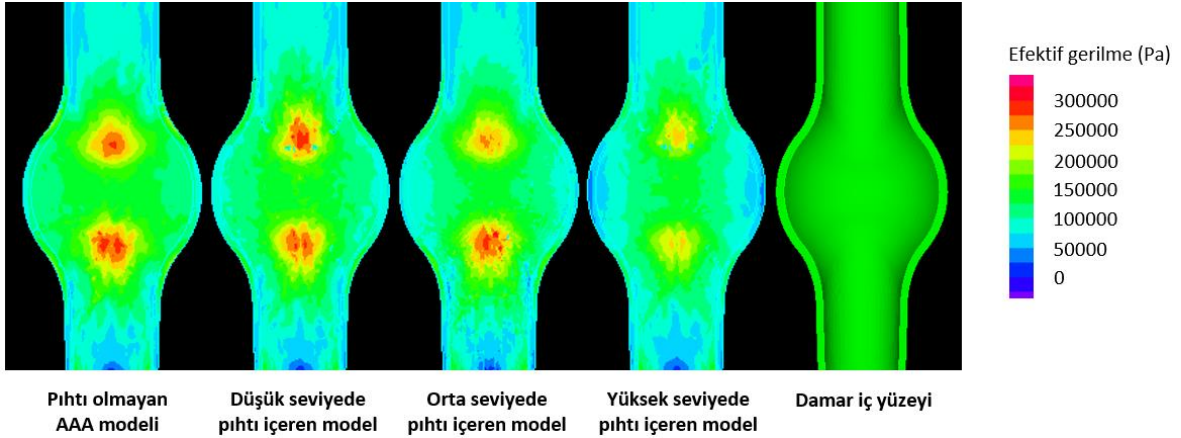


Şekil 10. AAA damar modelleri üzerindeki efektif gerilme dağılımları. Sol tarafta ön profilden görünüm, sağ tarafta ise arka profilden görünüm yer almaktadır. Sunulan dağılımlar en yüksek gerilme değerlerinin görüldüğü 0.44 s anında elde edilmiştir.

4. Tartışma

Bu çalışmada, AAA içindeki pıhtı birikiminin neden olduğu hemodinamik ve yapısal etkiler incelenmiştir. Hemodinamik parametreler olarak damar içi akış hızı ve sıvı basıncı değerleri farklı pıhtı oluşumu içeren sayısal modeller kullanılarak karşılaştırılmıştır. En yüksek akış hızları, kardiyak döngüde sistolik safhaya denk gelen 0.44 s anında görülmüştür. Sistolik safhanın sonrasındaki anlarda genel akış hızları ve basınç değerleri düşüş göstermektedir.

Kardiyak döngünün ikinci yarısında görülen akış hızları 0.05 m/s mertebesinde ve anevrizma genişlemesinin olduğu bölgede girdap formunda bir akış rastlanmaktadır. Girdap şiddetinin en yüksek olduğu model, içinde pıhtı bulunmayan anevrizma modelidir. Anevrizma içindeki pıhtı birikimi arttıkça girdap akış formu azalmakta ve yüksek pıhtı birimi durumunda girdap formundaki akış tamamen kaybolmaktadır. Sistolik safha olan 0.44 s anındaki en düşük akış hızları, içinde pıhtı olmayan anevrizma modelindedir. Bunun nedeni akış alanının anevrizma bölgesinde aniden büyümesidir. Pıhtı birikimi arttıkça anevrizma içindeki akış alanı daraldığı için düşük hızlı bölgeler pıhtı oluşumuna bağlı olarak azalmaktadır.



Şekil 11. Farklı seviyede pıhtı içeren AAA modellerinin damar iç yüzeyindeki efektif gerilme dağılımları. Sunulan dağılımlar, en yüksek değerlerin görüldüğü 0.44 s anında ve AAA'nın arka tarafındaki yüzey üzerinde elde edilmiştir.

Sistolik safhada anevrizma içindeki basınç değerleri karşılaştırıldığında, en yüksek basınçların pıhtı bulunmayan anevrizma modelinde olduğu görülmektedir. Pıhtı oluşumuna bağlı basınç değişimi kısıtlıdır. İçinde yüksek seviyede pıhtı bulunan model ile pıhtı bulunmayan model karşılaştırıldığında, aralarındaki maksimum basınç farkının 200 Pa civarında olduğu görülmüştür. Sistolik anda anevrizma içinde 15000 Pa'dan daha yüksek basınç değerleri olduğu düşünüldüğünde, pıhtı birikimine bağlı olarak oluşacak maksimum basınç farkının %1.33'den daha az olacağı görülmektedir.

İncelenen hemodinamik parametrelerde pıhtı oluşumuna bağlı değişimler uzun vadede damarın yenilenme mekanizmasını bozarak damarın mekanik özelliklerini zayıflatır [6]. Bu nedenle hemodinamik parametrelerin yırtılma üzerinde ikincil bir etkiye sahip olduğu düşünülmektedir. Damar yırtılmasının temel nedeni damar yapısının akış kaynaklı oluşan mekanik kuvvetlere ve gerilmelere karşı mukavemet gösterememesidir. Bu nedenle damar üzerindeki efektif gerilmelerin yırtılma riskini belirleme açısından birincil derecede etkili olduğu belirtilmektedir [1, 12].

Damar üzerinde normal değerlerin üzerindeki mekanik gerilmeler, AAA yırtılması için risk teşkil etmektedir. Katı-sıvı etkileşimli analizler gerçekleştirilerek, farklı pıhtı seviyeleri içeren modeller için damar ve pıhtı yapıları üzerinde oluşan en yüksek mekanik gerilmeler ve deformasyonlar elde edilmiştir. Maksimum mekanik gerilme ve deformasyonlar, AAA giriş hızının en yüksek olduğu 0.44 s anında gözlenmiştir. Mekanik gerilmeler, efektif gerilme veya von-Mises gerilmeleri olarak da isimlendirilmektedir.

Tablo 5'te sunulan değerler incelendiğinde, pıhtı oluşumunun damar üzerindeki deformasyon değerlerini azalttığı görülmektedir. Pıhtı yoğunluğuna bağlı olarak damar üzerindeki maksimum deformasyon seviyeleri yaklaşık olarak 0.3 mm ile 0.45 mm aralığında bulunmuştur. İçinde pıhtı olmayan AAA modeli ile yüksek seviyede pıhtı içeren AAA modeli karşılaştırıldığında, yüksek miktarda pıhtı oluştuğu zaman maksimum deformasyon seviyesinin yaklaşık olarak %35 oranında azaldığı görülmüştür.

Damar üzerindeki efektif gerilme değerleri, deformasyon değerlerinin davranışına benzerlik göstermekte ve pıhtı oluşumuna bağlı olarak azalmaktadır. Farklı pıhtı seviyelerine sahip olan modeller incelendiğinde, maksimum efektif gerilme değerleri yaklaşık olarak 295 kPa ile 335 kPa aralığında bulunmuştur. İçinde pıhtı olmayan AAA modeli ile yüksek seviyede pıhtı içeren AAA modeli karşılaştırıldığında, yüksek seviyede pıhtı içeren AAA modelinde maksimum efektif gerilme değerinin %12 oranında azaldığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, AAA içindeki pıhtı birikimi arttıkça efektif gerilme değerlerinin azaldığı ve buna bağlı olarak yırtılma riskinin düştüğü değerlendirilmiştir.

Pıhtı yapısı üzerindeki maksimum deformasyon ve efektif gerilmeler incelendiğinde, pıhtı miktarındaki artış ile birlikte pıhtı üzerindeki deformasyon ve efektif gerilmelerin arttığı görülmektedir. Bu yönüyle, pıhtı ve damar arasında ters bir davranış görülmektedir. Pıhtı hacminin artışı, damar üzerindeki gerilmeyi azaltırken pıhtı üzerindeki gerilmeyi artırmaktadır. Pıhtı yapısı üzerindeki maksimum deformasyon seviyeleri 0.66 mm ile 1.11 mm aralığında bulunmuştur. Düşük seviyede pıhtı birikimi olan AAA modeli ile yüksek seviyede pıhtı birikimi olan AAA modeli karşılaştırıldığında, yüksek miktarda pıhtı içeren modelde pıhtı deformasyonunun yaklaşık olarak %67 oranında yükseldiği gözlemlenmiştir. Pıhtı üzerindeki efektif gerilmeler incelendiğinde ise, pıhtı hacminin artışına bağlı olarak yaklaşık %40 oranında bir efektif gerilme artışı görülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre, AAA içindeki pıhtı birikimi damar üzerindeki deformasyon seviyelerini ve efektif gerilmeleri azaltmaktadır. Buna karşın, pıhtı yapısı üzerindeki deformasyon ve gerilme değerleri önemli ölçüde artmaktadır. Damar üzerindeki efektif gerilmelerin azalması, yırtılma riskini azaltan bir etken olarak değerlendirilebilir. Ancak, pıhtı oluşumuna bağlı olarak üzeri kapanan damar yüzeyleri yeterince beslenemeyebilir. Bu durum, damar üzerinde lokal olarak mukavemet kayıplarının yaşanmasına sebep olabilir. Mukavemet açısından heterojen bir forma gelen ve zayıflayan AAA damar duvarının ise yırtılma açısından risk barındırabileceği düşünülmektedir.

Pıhtı yapısı üzerindeki deformasyon ve efektif gerilme artışı da önemli bir husustur. Bunun temel nedeni, pıhtı üzerindeki gerilmelerin artmasına bağlı olarak pıhtı yapısı üzerinde oluşabilecek parçalanma veya kopmalardır. Pıhtıdan kopabilecek parçalar, kan dolaşımı yoluyla akciğer ve beyni besleyen atar damarlara kadar ulaşabilir. Bu durumda, kopan pıhtı yapılarının beyni besleyen 1-2 mm çapındaki küçük damarları tıkaması ve buna bağlı olarak inme riski oluşturması söz konusu olabilir. Bu çalışma kapsamında, sadece oluşacak gerilme seviyeleri üzerine odaklanılmıştır ve pıhtı yapısındaki olası parçalanma ve kopmalar incelenmemiştir.

Model geometrileri detaylı olarak incelendiğinde, AAA geometrisinin arka tarafında daha yüksek efektif gerilmeler olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, literatürde belirtildiği üzere AAA yırtılmalarının en fazla arka tarafta yaşandığını göstermektedir [6]. AAA yapıları arka tarafta omurgaya dayandığı için, sırt tarafına doğru fazla genişleyememektedir. Bu nedenle, AAA yapılarının çoğu karın tarafına doğru genişleyerek asimetric bir geometrik form oluşturmaktadır [19].

5. Sonuç

Bu çalışma kapsamında, abdominal bölgede yer alan bir ideal anevrizmanın içindeki pıhtı birikiminin neden olduğu hemodinamik değişimler ve damar üzerindeki etkileri mühendislik yöntemleri kullanılarak irdelenmiştir. İdeal bir anevrizma geometrisi kullanıldığı için hastaya özgü anevrizma geometrilerinin etkileri minimize edilerek parametrelere bağlı değişimler daha açık bir şekilde incelenebilmiştir. Pıhtı oluşumuna bağlı olarak anevrizma bölgesindeki düşük hızlı bölgelerin azaldığı ve kardiyak döngünün ikinci yarısında ortaya çıkan girdap akış formlarının etkisini yitirdiği gözlemlenmiştir. Pıhtı birikimi ile birlikte anevrizma bölgesindeki sıvı basıncının kısmi olarak azaldığı görülmüştür. Pıhtı birikimine bağlı olarak akış hızı ve basınç değerlerinde meydana gelen değişimlerin damar yırtılma riski üzerinde kısıtlı bir etkiye sahip olduğu ve uzun vadede damar yapısının mukavemeti üzerinde etkili olabileceği değerlendirilmiştir. Kısa vadede anevrizmanın yırtılma riskini belirlemek için efektif gerilme gibi yapısal parametreleri belirlemek önem arz etmektedir. Bu nedenle, farklı pıhtı oluşumu durumlarında damar üzerindeki efektif gerilme değerleri ve deformasyonlar sayısal yöntemlerle elde edilerek irdelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, pıhtı birikiminin damar üzerindeki efektif gerilimi yaklaşık olarak %12 oranında düşürebileceği ve dolayısıyla yırtılma riskini azaltabileceği görülmüştür. İleride gerçekleştirilecek çalışmalarda problemin biyolojik tarafı da incelenerek daha isabetli bir yırtılma riski değerlendirmesi yapılabilir. Bunun temel sebebi, pıhtı oluşumunun efektif gerilmeleri düşürerek yırtılma riskini azaltmasına karşın damarın kan ile temasını kısıtlayarak damar yapısının düzgün bir şekilde beslenmesine engel olmasıdır. Düzgün beslenemeyen damar yapısı mukavemetini yitirebilir ve daha küçük mekanik gerilmelerde yırtılma gerçekleşebilir. Bu çalışmanın sonuçları, anevrizmalar üzerindeki hemodinamik ve yapısal parametreleri anlamak için katkı sunmuş ve pıhtı birikimine bağlı olarak yırtılma riskini belirlemek açısından fayda sağlamıştır.

Teşekkür

Bu araştırma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 3501 Kariyer Geliştirme Programı kapsamında desteklenmiştir (Proje No: 221M001). Yazar, bu çalışmanın ortaya çıkmasında verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkür eder.

Kaynaklar

- [1] Bengtsson H, Bergqvist D. Ruptured abdominal aortic aneurysm: a population-based study. *J Vasc Surg* 1993; 18(1): 74-80.
- [2] Limet R, Sakalihan N, Defawe OD. Abdominal aortic aneurysm. *Lancet* 2005; 365(9470): 1577-1589.
- [3] Kontopodis N, Metaxa E, Papaharilaou Y, Tavlas E, Tsetis D, Ioannou C. Advancements in identifying biomechanical determinants for abdominal aortic aneurysm rupture. *Vascular* 2014; 23(1): 65-77.
- [4] Thompson RW. Aneurysm treatments expand. *Nat Med* 2005; 11(12): 1279-1281.

- [5] Hafez H, Druce PS, Ashton HA. Abdominal aortic aneurysm development in men following a “normal” aortic ultrasound scan. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 2008; 36(5): 553-558.
- [6] Salman HE, Ramazanli B, Yavuz MM, Yalcin HC. Biomechanical investigation of disturbed hemodynamics-induced tissue degeneration in abdominal aortic aneurysms using computational and experimental techniques. *Front Bioeng Biotechnol* 2019; 7: 111.
- [7] Chaikof EL, Brewster DC, Dalman RL, Makaroun MS, Illig KA, Sicard GA, Timaran CH, Upchurch Jr GR ve diğerleri. The care of patients with an abdominal aortic aneurysm: the Society for Vascular Surgery practice guidelines. *J Vasc Surg* 2009; 50(4): 2-49.
- [8] Darling RC, Messina CR, Brewster DC, Ottinger LW. Autopsy study of unoperated abdominal aortic aneurysms: the case for early resection. *Circulation* 1977; 56(3): 161-164.
- [9] Peattie RA, Asbury CL, Bluth EI, Riehle TJ. Steady flow in models of abdominal aortic aneurysms. Part II: Wall stresses and their implication for in vivo thrombosis and rupture. *J Ultrasound Med* 1996; 15(10): 689-696.
- [10] Arzani A, Shadden SC. Characterizations and correlations of wall shear stress in aneurysmal flow. *J Biomech Eng* 2016; 138(1): 014503.
- [11] Di Martino ES, Guadagni G, Fumero A, Ballerini G, Spirito R, Biglioli P, Redaelli A. Fluid-structure interaction within realistic three-dimensional models of the aneurysmatic aorta as a guidance to assess the risk of rupture of the aneurysm. *Med Eng Phys* 2001; 23(9): 647-655.
- [12] Erhart P, Grond-Ginsbach C, Hakimi M, Lasitschka F, Dihlmann S, Böckler D, Hyhlik-Dürr A. Finite element analysis of abdominal aortic aneurysms: predicted rupture risk correlates with aortic wall histology in individual patients. *J Endovasc Ther* 2014; 21(4): 556-564.
- [13] Cong Y, Wang L, Liu X. A numerical study of fluid-structure coupled effect of abdominal aortic aneurysm. *Biomed Mater Eng* 2015; 26(1): 245-255.
- [14] Canchi T, Saxena A, Ng EYK, Pwee EC, Narayanan S. Application of fluid-structure interaction methods to estimate the mechanics of rupture in asian abdominal aortic aneurysms. *Bionanoscience* 2018; 8(4): 1035-1044.
- [15] Scotti CM, Finol EA. Compliant biomechanics of abdominal aortic aneurysms: a fluid-structure interaction study. *Comput Struct* 2007; 85: 1097-1113.
- [16] Doyle BJ, Callanan A, Burke PE, Grace PA, Walsh MT, Vorp DA, McGloughlin TM. Vessel asymmetry as an additional diagnostic tool in the assessment of abdominal aortic aneurysms. *J Vasc Surg* 2009; 49(2): 443-454.
- [17] Rosero EB, Peshock RM, Khera A, Clagett P, Lo H, Timaran CH. Sex, race, and age distributions of mean aortic wall thickness in a multiethnic population-based sample. *J Vasc Surg* 2011; 53(4): 950-957.
- [18] Shang EK, Nathan DP, Woo EY, Fairman RM, Wang GJ, Gorman RC, Gorman III JH, Jackson BM. Local wall thickness in finite element models improves prediction of abdominal aortic aneurysm growth. *J Vasc Surg* 2015; 61(1): 217-223.
- [19] Scotti CM, Jimenez J, Muluk SC, Finol EA. Wall stress and flow dynamics in abdominal aortic aneurysms: finite element analysis vs. fluid-structure interaction. *Comput Methods Biomech Biomed Eng* 2008; 11(3): 301-322.
- [20] Martufi G, Di Martino ES, Amon CH, Muluk SC, Finol EA. Three-dimensional geometrical characterization of abdominal aortic aneurysms: image-based wall thickness distribution. *J Biomech Eng* 2009; 131(6).
- [21] Drewe CJ, Parker LP, Kelsey LJ, Norman PE, Powell JT, Doyle BJ. Haemodynamics and stresses in abdominal aortic aneurysms: A fluid-structure interaction study into the effect of proximal neck and iliac bifurcation angle. *J Biomech* 2017; 60, 150-156.
- [22] Qiu Y, Yuan D, Wen J, Fan Y, Zheng T. Numerical identification of the rupture locations in patient-specific abdominal aortic aneurysms using hemodynamic parameters. *Comput Methods Biomech Biomed Eng* 2018; 21(1): 1-12.
- [23] Arslan AC, Salman HE. Effect of intraluminal thrombus burden on the risk of abdominal aortic aneurysm rupture. *J Cardiovasc Dev Dis* 2023; 10(6).
- [24] Soudah E, Ng EYK, Loong TH, Bordone M, Pua U, Narayanan S. CFD modelling of abdominal aortic aneurysm on hemodynamic loads using a realistic geometry with CT. *Comput Math Methods Med* 2013.
- [25] Poelma C, Watton PN, Ventikos Y. Transitional flow in aneurysms and the computation of haemodynamic parameters. *J R Soc Interface* 2015; 12(105): 20141394.
- [26] Meyrignac O, Bal L, Zadro C, Vavasseur A, Sewonu A, Gaudry M, Saint-Lebes B, De Masi M ve diğerleri. Combining volumetric and wall shear stress analysis from CT to assess risk of abdominal aortic aneurysm progression. *Radiology* 2020; 295(3): 722-729.
- [27] Khanafer KM, Bull JL, Upchurch Jr GR, Berguer R. Turbulence significantly increases pressure and fluid shear stress in an aortic aneurysm model under resting and exercise flow conditions. *Ann Vasc Surg* 2007; 21(1): 67-74.
- [28] Philip NT, Patnaik BSV, Jayanand SB. Fluid Structure Interaction study in model abdominal aortic aneurysms: Influence of shape and wall motion. *Int J Numer Methods Biomed Eng* 2020; 37(3): e3426.
- [29] Jahangiri M, Saghafian M, Sadeghi MR. Numerical simulation of non-Newtonian models effect on hemodynamic factors of pulsatile blood flow in elastic stenosed artery. *J Mech Sci Technol* 2017; 31(2): 1003-1013.

- [30] Raghavan ML, Vorp DA. Toward a biomechanical tool to evaluate rupture potential of abdominal aortic aneurysm: identification of a finite strain constitutive model and evaluation of its applicability. *J Biomech* 2000; 33(4): 475-482.
- [31] Raut SS, Jana A, De Oliveira V, Muluk SC, Finol EA. The effect of uncertainty in vascular wall material properties on abdominal aortic aneurysm wall mechanics. In *Computational Biomechanics for Medicine*. New York, NY, USA: Springer, 2014; pp. 69-86.
- [32] Reeps C, Gee M, Maier A, Gurdan M, Eckstein HH, Wall WA. The impact of model assumptions on results of computational mechanics in abdominal aortic aneurysm. *J Vasc Surg* 2010; 51(3): 679-688.
- [33] Wilson JS, Virag L, Di Achille P, Karšaj I, Humphrey JD. Biochemomechanics of intraluminal thrombus in abdominal aortic aneurysms. *J Biomech Eng* 2013; 135(2).
- [34] Geest JPV, Sacks MS, Vorp DA. A planar biaxial constitutive relation for the luminal layer of intra-luminal thrombus in abdominal aortic aneurysms. *J Biomech* 2006; 39(13): 2347-2354.
- [35] Chandra S, Raut SS, Jana A, Biederman RW, Doyle M, Muluk SC, Finol EA. Fluid-structure interaction modeling of abdominal aortic aneurysms: the impact of patient-specific inflow conditions and fluid/solid coupling. *J Biomech Eng* 2013; 135(8).

Boşluk ve Arayer Kusurlarının Cu Nano Telinin Mekanik Özelliklerine Etkisi: Moleküler Dinamik Çalışması

Sefa KAZANÇ¹, Canan Aksu CANBAY^{2*}

¹Fırat Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi, 23119, Elazığ/TÜRKİYE

²Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 23119, Elazığ/TÜRKİYE

¹skazanc@firat.edu.tr, ^{2*}caksu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 23/03/2023;

Kabul/Accepted: 03/07/2023)

Öz: Bu çalışmada farklı yüzdelerde boşluk ve arayer kusuru içeren Cu nano tellerine uygulanan tek eksenli çekme zorlanması sonucu mekanik özelliklerde meydana gelen değişimler Moleküler Dinamik (MD) benzetim yöntemiyle incelendi. Cu atomlarına etki eden kuvvetlerin belirlenmesinde çok cisim etkileşmelerini içeren Gömülmüş Atom Metodu (GAM) potansiyel fonksiyonundan yararlanıldı. Noktasal kusurların yoğunluğuna bağlı olarak, Cu model nano teline uygulanan tek eksenli çekme zorlanması sonucu zor-zorlanma eğrileri, Young modülü, akma zorlanması değerleri belirlendi. Uygulanan deformasyon sonucu oluşan yapısal değişimler, dislokasyon oluşumları ve yayılımları sırasıyla genel komşu analiz yöntemi (CNA) ve dislokasyon analizi (DXA) ile incelendi. Çekme zorlanması sonucu oluşan hcp birim hücreli yığılım kusurları ve Shockley dislokasyonlarının model nano telin mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu belirlendi.

Anahtar kelimeler: Noktasal kusurlar, zor-zorlanma, moleküler dinamik, nano tel.

The Effect of Vacancy and Interstitial Defects on Mechanical Properties of Cu Nanowire: Study of Molecular Dynamics

Abstract: In this study, changes in mechanical properties as a result of uniaxial tensile strain applied to Cu nanowires containing different percentages of vacancy and interstitial defects were investigated by Molecular Dynamics (MD) simulation method. The Embedded Atom Method (EAM) potential function, which includes many-body interactions, was used to determine the forces acting on Cu atoms. Depending on the density of the point defects, the stress-strain curves, Young's modulus, yield stress values were determined as a result of the uniaxial tensile stress applied to the Cu model nanowire. Structural changes, dislocation formations and their spread resulting from the applied deformation were examined by common neighbour analysis method (CNA) and dislocation analysis (DXA), respectively. It was determined that hcp unit cell stacking fault defects and Shockley dislocations caused by tensile strain were effective on the mechanical properties of the model nanowire.

Keywords: Point defects, stress-strain, molecular dynamics, nanowire.

1. Giriş

Nano bilim ve nano teknolojinin yapı taşları olan nano malzemeler son yıllarda malzeme bilminde büyük ilgi görmektedir. Özellikle metalik nano teller yüksek mukavemetleri ve hafif olmaları sebebiyle gelecek nesil elektronik, opto-elektronik, süperiletken cihazlar, kompozit malzemeler, sensörler, taramalı tünelleme mikroskobu ve atomik kuvvet mikroskobu için uç olarak kullanılması gibi çeşitli uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır [1-4]. Bu nedenle nano tellerde istenilen özelliklerin elde edilmesi teknolojik kullanımları açısından büyük önem taşımaktadır. Nano teller hacimsel (bulk) malzemelerle karşılaştırıldığında yüksek yüzey/hacim oranına sahiptirler. Bu da onların hacimsel yapı malzemelere göre üstün mekanik özelliklere sahip olmasına neden olur [5-6]. Mekanik özelliklerin araştırılması nano malzemelerin gelecekteki teknolojik uygulamaları için üstesinden gelinmesi gereken temel konulardan biridir. Şekil hatırlama etkisi [7], yüzey stress kaynaklı faz dönüşümü [8], akma mukavemeti asimetrisi [9] ve boyuta bağlı özelliklerinden [10-11] dolayı kusursuz nano tellerin mekanik özellikleri üzerine birçok çalışma yapılmıştır.

Nano teller boyut olarak çok küçük olmalarına rağmen onları kusursuz bir şekilde üretmek ve işlemek oldukça zor bir işlemdir [12, 13]. Deneysel olarak SEM [14, 15], AFM [16, 17] ve TEM [18, 19] gibi bir dizi yöntem, nano tellere uygulanan çekme deformasyonu esnasında mikroyapısal değişimleri belirlemek için kullanılmaktadır. Nano malzemelerin küçük boyutu göz önüne alındığında nano tel numunesi hazırlamak, nano tel eksensel yönünü

* Sorumlu yazar: caksu@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-8896-8571, ² 0000-0002-5151-4576

yüklenme yönü ile hizalamak ve uygun çekme testini gerçekleştirmedeki zorluklar hala devam etmektedir [20]. Bununla birlikte deneysel teknikler hem pahalı hem de zaman alıcıdır. Daha da önemlisi çok az sayıda numune elde edilmektedir. Nano tellerin özelliklerinin kusurlardan büyük ölçüde etkilendiği yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir [21-24]. Nano tellerdeki kusurlar hem yüzeyde hemde iç bölgede tane sınırları, büyük boşluklar (void), boşluk ve arayer atomları olarak görülebilir [25]. Deneylerin sınırlı olması nedeniyle nano ölçekli kusurların nano tellerin mekanik davranışları üzerindeki etkisinin belirlenmesi oldukça zordur.

Deneysel tekniklerdeki bu karmaşıklıktan dolayı araştırmalar teorik hesaplamalı araçlara yönelmektedir. En çok kullanılan atomik boyutta hesaplama yöntemlerinden MD benzetim yöntemi, bilgisayar hesaplama kapasitesinin artması ve güvenilir potansiyel enerji fonksiyonlarının geliştirilmesi ile malzemelerin özelliklerini araştırmak için önemli bir araç haline gelmiştir. MD benzetim yöntemleri sıcaklık, boyut, zorlanma oranı, yapısal kusurlar gibi farklı koşullar altında nano tellerin atomik düzeyde araştırılmasına yardımcı olan bir sayısal hesaplama tekniğidir. Bununla birlikte MD benzetimlerinde çok sayıda örneklem elde edilmekte, mikro yapının gelişimi tam olarak açıklanmakta ve aynı zamanda malzemelerin mekanik özellikleri kapsamlı bir şekilde anlaşılmaktadır [26, 27]. Elektronik endüstrisinin gelişmesiyle Cu'nun elektrik bağlantı elamanı olarak kullanılması önemli hale gelmiştir [28]. Literatürde nano tel yapısındaki Cu elementinin fiziksel ve termodinamik özelliklerinin belirlenmesi için yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır [29-31].

N parçacıktan oluşan bir sistemin Lagrange fonksiyonundan hem parçacıklar hem de hesaplama hücresi için elde edilen hareket denklemlerinin bir algortima ile sayısal çözümü klasik MD yönteminin temelini oluşturmaktadır [32]. Hesaplamalarda kullanılan potansiyel enerji fonksiyonunun (PEF) modellenen sisteme uygun olarak seçilmesi, elde edilecek sonuçların deneysel değerlerle uyum içerisinde olması açısından son derece önemlidir. Çok cisim etkileşmelerini içermesi ve matematiksel olarak sade bir yapıya sahip olmasının getirdiği avantajlardan dolayı GAM, MD benzetim çalışmalarında en çok tercih edilen fonksiyonlardandır [33].

Bu çalışmada farklı yüzdelerde boşluk ve arayer kusuru içeren Cu nano tel sistemine uygulanan tek eksenli çekme zorlanması sonucu mekanik özelliklerde ve mikro yapıda meydana gelen değişimler MD benzetim yöntemi kullanılarak belirlenmeye çalışıldı. Çalışmada büyük ölçekli atomik/moleküler kitlesel paralel simülatör (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator-LAMMPS) programı kullanıldı [34]. GAM potansiyel fonksiyonu ile modellenen Cu nano tel sisteminin deformasyonu sonucu oluşan yapısal değişimler, dislokasyon çekirdeklenmesi ve yayılımının belirlenmesi için sırasıyla CNA ve DXA analiz yöntemleri kullanıldı.

2. Materyal ve Metot

Parçacıklar ve hesaplama hücresinin kinetik ve potansiyel kısımlarını içeren Lagrange fonksiyonu MD yönteminde;

$$L_{PR}(\mathbf{r}^N, \dot{\mathbf{r}}^N, \mathbf{h}, \dot{\mathbf{h}}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i (\dot{\mathbf{s}}_i^t G \dot{\mathbf{s}}_i) - \sum_{i=1}^N \sum_{j>i}^N \phi(|\mathbf{h}_{s_{ij}}|) + \frac{1}{2} M \text{Tr}(\dot{\mathbf{h}}^t \dot{\mathbf{h}}) - P_{ext} V \quad (1)$$

şeklinde verilmektedir. Denklemde i parçacığının koordinatını, metrik tensörü, MD hücre eksenlerini, i parçacığının kütlelerini, dış basıncı, hesaplama hücresinin kütlelerini ve hacmini sırasıyla s_i , G , \mathbf{h} , m_i , P_{ext} , M ve V parametreleri ifade etmektedir. Bu fonksiyondan parçacıklar ve hesaplama hücresi için elde edilen hareket denklemleri sırasıyla aşağıda verilmiştir.

$$\ddot{\mathbf{s}}_i = -\frac{1}{m_i} \mathbf{F}_i - G^{-1} \dot{G} \dot{\mathbf{s}}_i \quad (2)$$

$$\ddot{\mathbf{h}} = M^{-1} (\mathbf{\Pi} - I P_{ext}) \sigma \quad (3)$$

$$\mathbf{\Pi} = V^{-1} \left[\sum_{i=1}^N m_i \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i - \sum_{i=1}^N \sum_{j>i}^N \frac{F_{ij}}{r_{ij}} \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{r}_i \right] \quad (4)$$

Mikroskobik zor tensörü ($\mathbf{\Pi}$) denklem (4)'te verildiği gibi ifade edilmektedir [35]. Tek atomlu element ve alaşım sistemlerini modellemek için kullanılan ve çok cisim etkileşmelerini içeren GAM, yarı deneysel bir potansiyel enerji fonksiyonudur. GAM da sistemin enerjisi bir atomu çevresindeki diğer atomların oluşturduğu yük yoğunluğuna gömmek için gerekli enerjiden belirlenir. GAM'da sistemin toplam enerjisi

$$E_T = \frac{1}{2} \sum_{i,j}^N \phi(r_{ij}) + \sum_i^N F(\bar{\rho}_i) \quad (5)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Fonksiyondaki ilk terim olan $F_i(\rho_i)$, çok cisim etkileşmelerini içeren gömme enerjisini, ikinci terim $\Phi(r_{ij})$ ise iki cisim etkileşmesini vermektedir [36]. Cu elementinin GAM parametreleri literatürden bulunabilir [37].

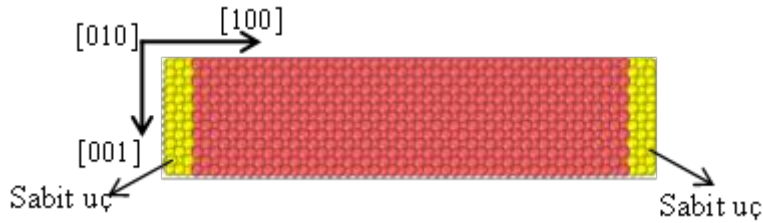
Modelleme çalışmalarında LAMMPS moleküler dinamik benzetim yöntemi kullanıldı. 4647 atomdan oluşan Cu nano tel yapısı x ve y yönlerinde 2,17 nm ve z yönünde 10,8 nm boyutlarına sahiptir. Atomlar fcc örgü noktalarına $\langle 100 \rangle$ doğrultusu boyunca yerleştirilerek model sistemin başlangıç yapısı oluşturulmuştur. Atomlara ilk hızları rastgele ve Maxwell-Boltzman hız dağılımına uyacak şekilde atanmıştır. z-ekseni doğrultusunda çekme deformasyon işlemi *NVT* istatistiksel topluluğuna uygulanmıştır. İntegrasyon adım aralığı 1fs olarak alınarak hareket denklemlerinin Verlet algoritmasının hız formu kullanılarak çözülmesi sağlanmıştır. Periyodik sınır şartı sadece z eksenine doğrultusunda uygulanmış x ve y yönleri boyunca atomların hareketleri serbest bırakılmıştır. Noktasal kusurlara sahip Cu nano tel sistemine uygulanan tek eksenli germe deformasyonu sonucu mekanik özelliklerdeki değişimleri ve yapısal gelişimleri belirlemek için model sistem içerisinde rastgele bir şekilde %0,2, %0,4, %0,6, %0,8 ve %1 oranlarında boşluk ve arayer kusurları oluşturuldu. Çekme işlemi uygulanmadan önce model sistem 5×10^4 MD adımı dengeletildi. Boşluk ve arayer kusurları içeren nano tel sistemlerine bütün çalışma boyunca 1×10^9 s⁻¹ değerindeki germe zorlanması 10 K sıcaklık değerinde uygulandı. Çekme deformasyonu sonucu farklı yüzdelerde boşluk ve arayer kusuru içeren nano tellerden elde edilen zor-zorlanma eğrilerinden akma zorlanması, elastiklik modülü değerleri belirlenerek, kusurların bu değerler üzerinde değişime neden olduğu belirlendi. Çekme deformasyonu sonucu meydana gelen yapısal değişimler CNA analizi ile yapı içerisindeki dislokasyonlar DXA analizi ile tespit edildi.

Model sisteme uygulanan fiziksel, mekanik veya termodinamik işlemlerden sonra oluşan yapısal değişimlerin belirlenmesi MD benzetim çalışmalarında oldukça önemlidir. Bunun için farklı analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Her atomun komşu atomlarıyla oluşturduğu birim hücreli yapıların belirlenmesi bu analiz yöntemlerinin temel amacıdır. Ayrıca bu analiz yöntemleri belirlenen yapıyı ideal bir yapıyla karşılaştırarak, ne kadar uyumlu olduklarını tespit etmeye çalışır. En çok kullanılan analiz yöntemleri arasında genel yakın komşu analizi (common neighbor analysis), merkez simetri parametre analizi (centrosymmetry parametre analysis), bağ-yönelim analizi, Honeycutt-Andersen ve Voronoi analizi sayılabilir [38, 39].

Bu analiz yöntemleri içerisinde CNA, MD çalışmalarında en çok kullanılan yöntemlerdendir [40]. Temel olarak bir atomun hangi tür yapıyı temsil ettiğini tayin etmek için 4 karakteristik tamsayı (i, j, k, l) tanımlanır. İki atom bağlı ise i indisi 1 aksi halde 2 değerini alır. Atom çiftinin ortak paylaşılan yakın komşuları varsa bu yakın komşuların sayısı j indisi tarafından verilmektedir. Paylaşılan komşular arasındaki bağların sayısı k indeksine karşılık gelmektedir. Ortak komşulardaki en uzun zincirdeki bağ sayısı ise l indisi tarafından ifade edilmektedir [41].

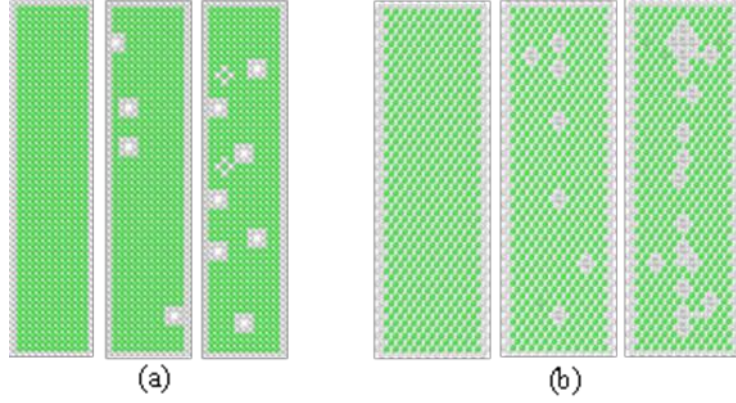
3. Bulgular

Bu çalışmada model Cu nano tel sistemi içerisinde %0,2, %0,4, %0,6, %0,8 ve %1 oranlarında oluşturulan boşluk ve arayer kusurlarının, nano tele uygulanan tek eksenli germe zorlanması sonu mekanik özellikleri üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışıldı. Şekil 1'de kusursuz Cu nano telinin başlangıç yapısı verilmiştir. Sarı renkli atomlarla gösterilen ve üç atomik tabakadan oluşan bölgeler hareketsiz uçlar olarak belirlenmiştir. Çekme deformasyon işlemi soldaki sabit uç hareketli uç tutularak ve sağdaki sabit uç ise 1×10^{10} s⁻¹ zorlanma oranı ile çekilerek uygulanmıştır.



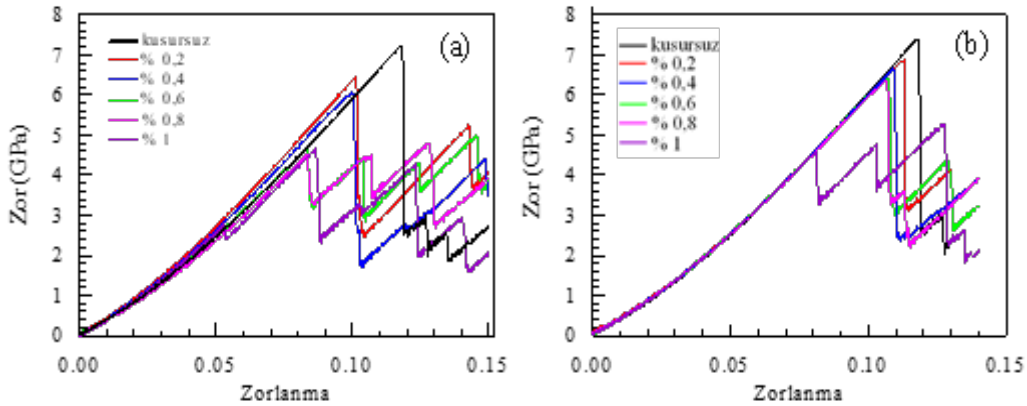
Şekil 1. Kusursuz Cu nano telinin başlangıç yapısı.

Şekil 2’de kusursuz, %0,4 ve %1 oranında sırasıyla boşluk ve arayer kusurlarını içeren Cu nano tel model sistemlerinin başlangıç yapılarının farklı düzlem kesitlerinden alınan atomik görüntüleri verilmiştir. Hem boşluk hem de arayer noktasal kusurları model nano tel sisteminde rastgele oluşturulmuştur. Kusurların bazılarının nano telin yüzeyinde meydana geldiği ve bazılarının ise iç bölgelerde olduğu belirlenmiştir.



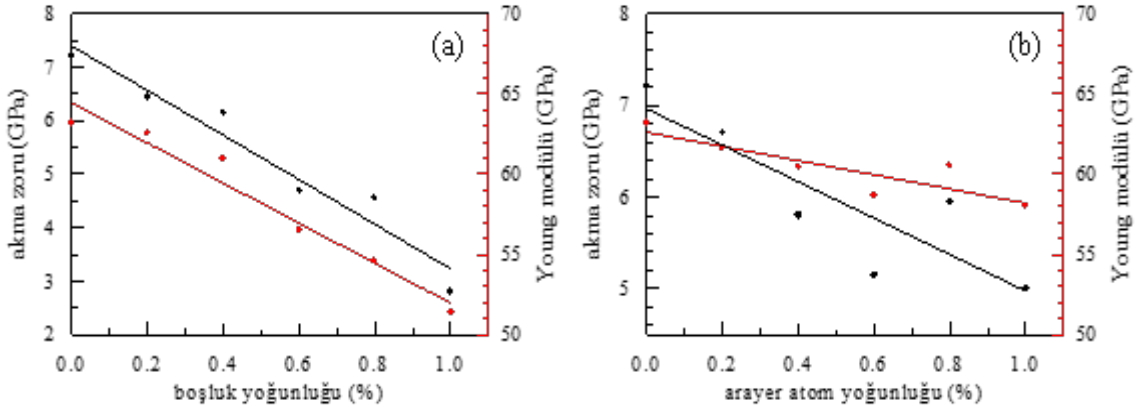
Şekil 2. Kusursuz, %0,4 ve %1 yoğunluğunda nokta kusurları içeren Cu nano telinin a) (100) düzlem kesitinden alınan boşluk, b) (110) düzlem kesitinden alınan arayer kusurlarının atomik görüntüleri.

Şekil 3’te farklı yüzdelerde boşluk ve arayer kusurları içeren Cu nano tel sistemlerine $1 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ zorlanma oranında uygulanan tek eksenli germe deformasyonu esnasında elde edilen zor-zorlanma eğrileri verilmiştir. Her iki noktasal kusur içeren nano tel yapıları için zorlanma değerinin artırılmaya başlamasıyla zor değerinin hemen hemen lineer bir değişim sergilediği açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca bütün kusur yüzdeleri için bu değişimler neredeyse üst üste çakışık şekildedir. Doğrusal değişimin meydana geldiği bu bölge malzemenin elastik olarak şekil değiştirdiğini ifade etmektedir. Zor-zorlanma arasındaki ilişki incelenen materyalin mekanik özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Zor-zorlanma grafiğinde doğrusal olarak değişen bu bölgenin regresyon analizinden elastiklik modülü (Young modülü) belirlenmektedir. Düşük değerdeki elastiklik modülü malzemenin elastiklik özelliğinin arttığına bir göstergesidir. Şekil 3’de görüldüğü gibi hem boşluk hem de arayer kusurlarına sahip nano tellere uygulanan çekme deformasyonu işleminde, zorlanma değeri belirli bir değere ulaştığında zorda ani bir düşüş meydana gelmektedir. Ani düşüşün meydana geldiği bu nokta kalıcı şekil değişiminin oluşmaya başladığı akma zoru olarak ifade edilmektedir. Model sistem içerisinde dislokasyonların çekirdeklenmeye başlaması zor-zorlanma eğrisindeki bu ani azalmanın sebebi olarak bilinmektedir [42]. Akma noktasından sonra artan zorlanma değerlerinde zor-zorlanma eğrisinin her iki kusurlu yapı içeren nano tel sistemi içinde zig-zag şeklinde bir değişim sergilediği görülmektedir. Yapı içerisinde oluşan dislokasyonların büyümesi ve artan zorlanma ile yayılması bu değişimin sebebi olarak ifade edilebilir [43].



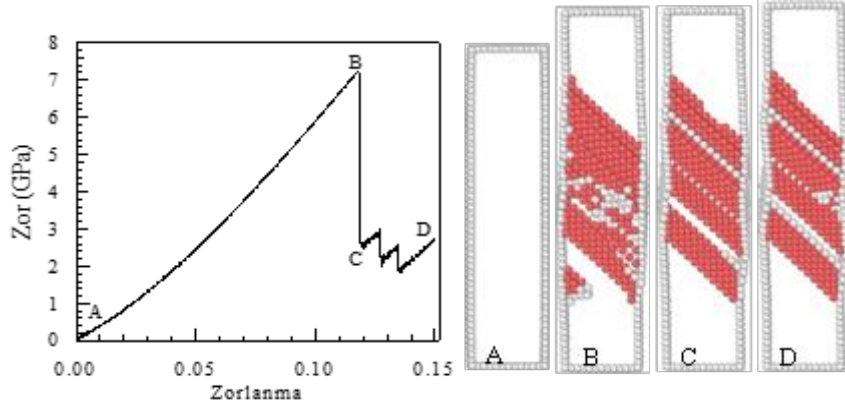
Şekil 3. Farklı yüzdelerde a) boşluk ve b) arayer kusuru içeren Cu nano telinin zor-zorlanma eğrileri.

Model sistem için akma zoru ve Young modülü değerlerinin farklı yüzdelerdeki boşluk ve arayer kusurları ile değişimi Şekil 4’de verilmiştir. Hem akma zorunun hem de Young modülünün boşluk ve arayer kusur konsantrasyonundaki artış ile bir azalma sergilediği görülmektedir. Young modülü boşluk kusuru içeren nano teller için 64 GPa-51 GPa aralığında, arayer kusuru içeren nano tel yapıları için 64 GPa-58 GPa aralığındadır. Akma zorundaki azalma ise boşluk kusurlu nano teller için 7,2 GPa-3 GPa değerlerinde iken arayer kusurlu teller için ise 7,2 GPa-5 GPa aralığındadır. Bu azalmaların boşluk kusuru içeren nano tel yapılarda daha fazla olduğu belirlenmiştir. Boşluk kusurlarının nano telleri arayer kusurlarına göre daha fazla yumuşattığı söylenebilir. Zorlanma uygulandığında nano tel içerisinde oluşturulan nokta kusurları, kusurların yakınında uygulanan zoru azaltan atomik gevşeme için ortam sağladığı için Young modülünü azaltır [44]. Chang yaptığı çalışmada %3, %6, %9 ve %12 boşluk kusuruna sahip Cu nano tellerine uyguladığı çekme deformasyonu sonucu akma zorunun ve Young modülünün boşluk sayılarının artışıyla azaldığını tespit etmiştir [45]. Ayrıca Zr için yapılan bir çalışmada nokta kusur konsantrasyonundaki artışın çekme dayanımını azalttığı ifade edilmiştir [46]. Zhu ve ark. [47] boşluk yoğunluğunun artmasıyla elastiklik modülünün azaldığını belirlemişlerdir.



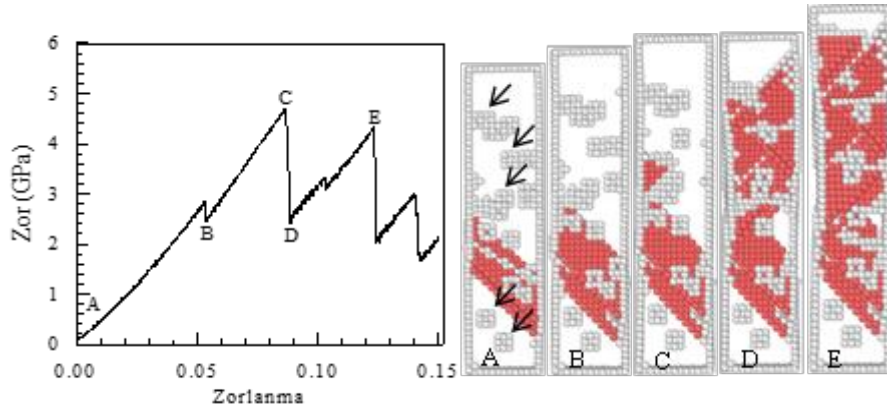
Şekil 4. Akma zoru ve Young modülü değerlerinin a) boşluk ve b) arayer kusur yoğunluğu ile değişimi.

Noktasal kusurlar içeren model nano tel sistemlerine uygulanan tek eksenli gerilme deformasyonu esnasında mikro yapısal değişimleri belirlemek amacıyla OVITO programından [48] CNA analiz yöntemi kullanılarak zor-zorlanma eğrilerinin bazı noktaları için atomik konumlar incelenmiştir. Atomik görüntüler sadece başlangıç yapısında hiçbir kusur içermeyen, %1 boşluk ve %1 arayer noktasal kusur içeren nano teller için verilmiştir. Şekil 5’de kusur içermeyen model sisteme uygulanan çekme zorlanması sonucu elde edilen zor-zorlanma eğrisi ve farklı zorlanma değerlerine karşılık gelen atomik görüntüler verilmiştir. CNA analizinde bir atomun, çevresindeki en yakın komşu atomlarıyla olan geometrik yapısı analiz için ele alınır. Komşu atomlarla yapılan bağlar tarafından fcc, bcc, hcp gibi farklı kristal yapılar tespit edilir. Tanımlı yapıların haricindeki yapılar, bu analiz yönteminde “diğer” olarak adlandırılır. Her atom grubu farklı renklerle görselleştirilmiştir. Yeşil renk fcc, kırmızı, hcp ve mavi renk bcc birim hücreleri gösterirken, diğer olarak adlandırılan ve tanımlı birim hücre sınıfına girmeyen atomlar ise beyaz renk ile ifade edilmiştir [49, 50]. Deforme edilmemiş model nanotelin atomları fcc yapısına sahiptir ve yüzey atomları OVITO tarafından “diğer” olarak adlandırılan atomlar olarak kabul edilir. CNA analizinde $\{111\}/\langle 112 \rangle$ kısmi kayması tarafından üretilen yığılma kusurlarını görselleştirmek için fcc atomları ve $[100]$ doğrultusundaki yüzey atomları çıkartılmıştır. Şekil 5’te zorlanmanın uygulanmadığı A noktası için belirlenen atomik görüntüde model nano tel sisteminde herhangi bir yapısal kusur görülmektedir. Uygulanan germe zorlanması $\epsilon=0,117$ olan B noktasına ulaşmış akma meydana gelene kadar nano tel elastik olarak deforme olmaktadır. B noktasına karşılık gelen zorlanma değerinde nano tel içerisinde %10,9 oranında hcp birim hücreli yığılma kusurlarının oluştuğu görülmektedir. Zor-zorlanma eğrisinde ani bir düşüş meydana gelip C noktasına ulaşıldığında yeni dislokasyonlar çekirdeklenerek yığılma kusurları %11,3 değerine gelmektedir. Literatürde Ni nano teli için yapılan bir çalışmada akmanın model sistemin serbest yüzey köşelerinden $\{111\}$ düzleminde $1/6\langle 112 \rangle$ Shockley kısmi dislokasyonunun çekirdeklenmesi sonucu meydana geldiği tespit edilmiştir [51]. Zorlama artırılıp $\epsilon=0,127$ değerindeki D noktasına gelindiğinde yeni yığılma kusurları oluşmadan bu yığılma kusurlarının az da olsa gelişerek %11,9 oranına ulaştığı görülmektedir. Artan zorlanma yeni yığılma kusur bölgelerini ortaya çıkarmakta ve eğride bir sonraki düşüşü oluşturmaktadır [52]. Çekme deformasyonu sonucu elde edilen zor-zorlanma eğrisindeki testere dişi yapıları yığılma kusur bölgelerinin oluşumuna atfedilmiş ve bu durum Cu, Ag ve Ni elementleri için yapılan çalışmalarda gözlenmiştir [53, 54].



Şekil 5. Kusursuz Cu nano telinin zor-zorlanma eğrisi ve farklı zorlanma değerleri için nano telin (100) düzleminde elde edilen atomik görüntüler.

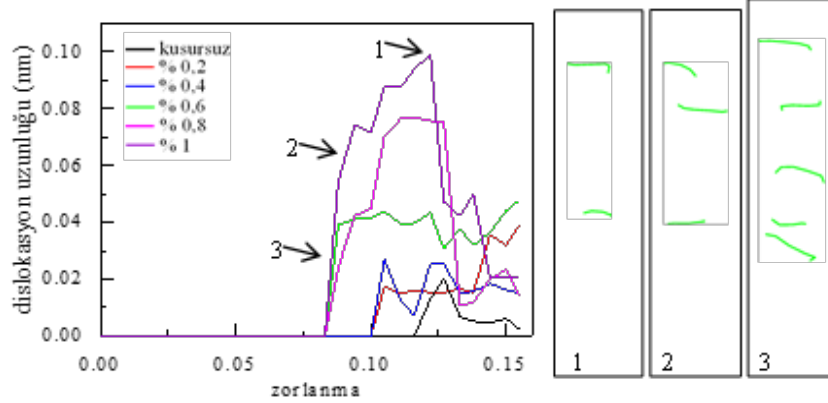
Şekil 6'da, %1 boşluk kusuru içeren Cu nano tel sisteminin zor-zorlanma eğrisi ve bu eğride seçilen bazı noktalara karşılık gelen atom konumları görülmektedir. Ok işareti ile gösterilen bölgeler boşluk kusurlarına karşılık gelmektedir. A noktasına karşılık gelen ve rastgele oluşturulan boşluk kusurlu nano tel yapısına çekme deformasyonu uygulanmadan önce yapılan dengeleme işlemi sonucu yapı içerisinde %3,5 oranında hcp birim hücreli bir yığılım kusuru tabakası meydana geldiği görülmektedir. Bir boşluk oluştuğunda malzemenin termodinamik kararlılığını artırır. Örgüdeki atomlar boşluğun olduğu bölgede boşluğu bir şekilde telafi etmek için içe doğru itilirler [55]. $\epsilon=0,054$ e karşılık gelen zorlanma değerinde B noktası için verilen atomik görüntülerden hcp birim hücreli yığılım kusurlarının %4.1 değerine ulaştığı görülmektedir. Devam eden süreçte yeni yığılım kusurlarının çekirdeklendiği ve artan zorlanma değerleriyle birlikte bu kusurların yapı içerisinde bir uçtan diğer uca yayılarak plastik deformasyonun devam ettiği C, D ve E noktaları için sırasıyla %11,4, %12,8 ve %13,4 değerlerine ulaştığı atomik görüntülerden tespit edilmektedir. $1/6\langle 112 \rangle$ Shockley kısmi dislokasyonlarının aktif hale gelmesi sonucu meydana gelen yığılım kusurları, hcp birim hücrelerden oluşan bu düzlemlerin oluşum sebebi olarak gösterilebilir [56, 57]. Artan zorlanmayla birlikte yeni Shockley kısmi dislokasyonları çekirdeklenecek ve yapı içerisine yayılarak yığılım kusurlarının artmasına yol açacaktır [58]. Brochard ve ark. [59] atomik boyutta iç kusur içeren fcc kristal yapıları nano teller üzerine yaptıkları çalışmalarda bu bölgelerin doğrudan dislokasyon çekirdeklenmesine yol açabileceğini göstermişlerdir.



Şekil 6. %1 boşluk kusuru içeren Cu nano telinin zor-zorlanma eğrisi ve farklı zorlanma değerleri için nano telin (100) düzleminde elde edilen atomik görüntüler.

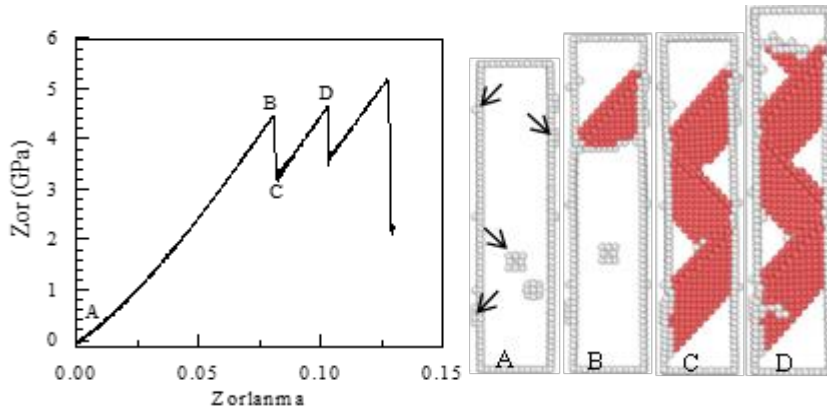
Şekil 7'de uygulanan germe zorlanması sonucu yapı içerisinde oluşan dislokasyonların uzunluğu, kusursuz ve farklı boşluk yüzdelere sahip nano tel yapıları için verilmiştir. Zorlanma değeri kusursuz nano tel için 0,0117, %0,2, %0,4 boşluk içeren nano teller için 0,1 ve %0,6, %0,8, %1 boşluk kusuru içeren yapılar için ise 0,083 değerine ulaşana kadar herhangi bir dislokasyon çekirdeklenmesi görülmemektedir. Şekil 7'deki %1 boşluk kusuru için belirlenen 1, 2 ve 3 numaralı noktalar Şekil 6'da zor-zorlanma eğrisindeki C, D ve E noktalarına karşılık

gelmektedir. Zorlanmanın artmaya devam etmesi ile birlikte özellikle akma noktası geçildikten sonra dislokasyonlar oluşmaya başlamakta, dislokasyon uzunluğu ve sayısında bir artış meydana gelmektedir. Akma zorlanmasından sonra yapı içerisinde kayma ve ikizlenme meydana gelmekte ve daha fazla dislokasyon ağı görülmektedir [46]. Bununla birlikte Şekil 7’de %1 boşluk kusuru için birkaç zorlanma değerinde DXA analizinden alınan nano tel yapı içerisindeki dislokasyonlar yeşil renkli çizgiler halinde görülmektedir. 1, 2 ve 3 noktalarında $1/6\langle 112 \rangle$ Shockley kısmi dislokasyonların artan zorlanma ile birlikte yapı içerisinde yayıldığı tespit edilmiştir. Boşluklu nano tel yapısında gerilme zorlanması altında dislokasyon emisyonu vardır. Bu dislokasyon emisyonu ve çekirdeklenmesi zor değerini etkiler. Tüm süreçte zor daima boşluklar ve dislokasyon birikimi üzerine yoğunlaşır [60]. Kusursuz yapı ile karşılaştırıldığında boşluklar dislokasyon oluşumunu kolaylaştırır [46].



Şekil 7. Farklı yüzdelerde boşluk kusuru içeren Cu nano teline uygulanan zorlanmaya karşı dislokasyon uzunluklarının değişimi ve farklı noktalar için elde edilen Shockley kısmi dislokasyonlarının dağılımı.

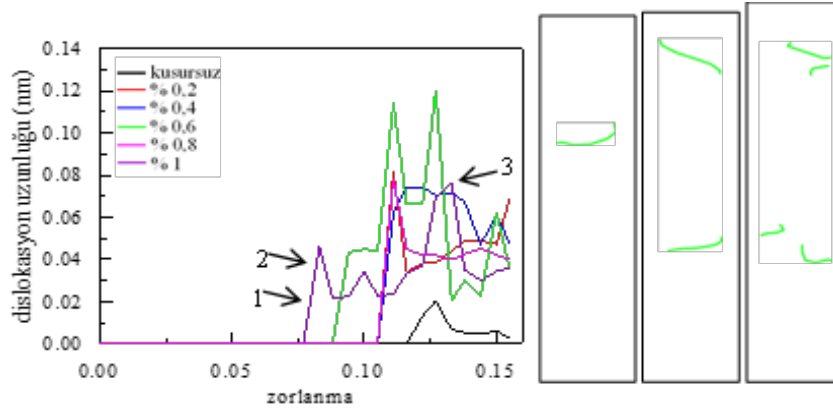
Şekil 8’de, %1 arayer kusuru içeren Cu nano tel sisteminin zor-zorlanma eğrisi ve bu egride seçilen bazı noktalara karşılık gelen atom konumları verilmiştir. Şekil üzerinde belirtilen oklar arayer atomlarının bulunduğu bölgeleri göstermektedir. Arayer atomları nano tel içerisinde kararlı değildirler ve nano tele germe deformasyonu uygulanmadan öndeki dengeleme sürecinde büyük çoğunluğu yüzeye göç eder [44]. $\epsilon=0$ a karşılık gelen A noktasında nano tel içerisinde herhangi bir yığılım kusurunun oluşumu görülmemektedir. $\epsilon=0,08$ ’e karşılık gelen B noktasındaki akma gerilim değerinde matris içerisinde %1,7 oranında her birim hücrelerin bir araya gelmesinden oluşan bir yığılım tabakasının nano telin üst ucunda oluşmaya başladığı belirlenmiştir. Zor-zorlanma eğrisinde zor değerinin aniden düştüğü ve kalıcı şekil değişiminin başladığı C noktasında Shockley kısmi dislokasyonlarının aktif hale geçmesi sonucu yığılım kusurlarının zigzag şeklinde yapı içerisinde bir uçtan diğer uca yayılarak %13,3 değerine ulaştığı görülmektedir [1]. D noktasına karşılık gelen zorlanma değerinde yeni yığılım kusur düzlemleri %16,9 oranına ulaşmıştır.



Şekil 8. %1 arayer kusuru içeren Cu nano telinin zor-zorlanma eğrisi ve farklı zorlanma değerleri için nano telin (100) düzleminde elde edilen atomik görüntüler.

Nokta kusurları, Young modülünü ve akma zorlanmasını azaltarak Cu nano tellerini yumuşatır. Bununla birlikte yığılma kusurları Cu nano tellerini güçlendirir. Bu nedenle, hem yığılma kusurları hem de nokta kusurları içeren nano teller için, yumuşama (nokta kusurlarının neden olduğu) ve güçlendirme (yığılma kusurlarının neden olduğu) arasında bir çekişme olduğu söylenebilir [44].

Şekil 9'da uygulanan çekme zorlanması sonucu yapı içerisinde oluşan $1/6\langle 112 \rangle$ Shockley kısmi dislokasyonların uzunluğu, kusursuz ve farklı arayer kusur yüzdelere sahip nano tel yapıları için verilmiştir. Zorlanma değeri kusursuz nano tel için 0,0117, %0,2, %0,4, %0,6 arayer kusuru içeren nano teller için 0,105, %0,8 için 0,088 ve %1 arayer kusuru içeren yapılar için ise 0,077 değerine ulaşana kadar herhangi bir dislokasyon çekirdeklenmesi görülmektedir. Bu zorlanma değerlerinden sonra dislokasyonlar yapı içerisinde giderek artmaktadır. Bununla birlikte Şekil 9'da %1 arayer kusuru için birkaç zorlanma değeri için DXA analizinden belirlenen $1/6\langle 112 \rangle$ Shockley kısmi dislokasyonları görülmektedir. 1, 2 ve 3 noktalarında Shockley kısmi dislokasyonların artan zorlanma ile birlikte yapı içerisinde yayıldığı tespit edilmiştir.



Şekil 9. Farklı yüzdelerde arayer kusuru içeren Cu nano teline uygulanan zorlanmaya karşı dislokasyon uzunluklarının değişimi ve farklı noktalar için elde edilen Shockley kısmi dislokasyonlarının dağılımı.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada farklı yüzdelerde boşluk ve arayer kusuru içeren Cu nano teline uygulanan tek eksenli çekme zorlanması sonucu model nano telin mekanik özelliklerinde ve yapısal gelişiminde meydana gelen değişimler incelendi. Boşluk ve arayer noktasal kusurları nano telin mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu belirlendi. Kusur yoğunluklarının artmasıyla Young modülü ve akma zorlanması değerlerinde azalmanın meydana geldiği, bu azalmanın boşluk kusuru içeren nano tellerde daha fazla olduğu görüldü. Noktasal kusurların, zorlanmasının uygulanmasıyla kusurların çevresinde uygulanan zoru azaltan bir gevşeme ortamı oluşturarak Young modülünü azalttığı söylenebilir. Artan zorlanmayla birlikte özellikle akma noktası geçildikten sonra dislokasyonların oluşmaya başlamasıyla birlikte dislokasyon uzunluğu ve sayısının da arttığı belirlendi. Ayrıca Shockley kısmi dislokasyonlarının çekirdeklenmesi ve yapı içerisine yayılması model sistemde yığılma kusurlarının artmasına yol açmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Sainath G, Choudhary B. Molecular dynamics simulation of twin boundary effect on deformation of Cu nanopillars. Phys Lett A 2015; 379(34): pp.1902–1905.
- [2] Zhan H, Gu Y, Yan C, Yarlagadda PK. Bending properties of Ag nanowires with pre-existing surface defects. Comput Mater Sci 2014; 81: pp.45–51.
- [3] Park HS, Cai W, Espinosa HD, Huang H. Mechanics of crystalline nanowires. MRS Bull 2009; 34(3): pp.178-183.
- [4] Wu H, Kong D, Ruan Z, Hsu PC, Wang S, Yu Z, Carney TJ, Hu L, Fan S, Cui Y. A transparent electrode based on a metal nanotrough network. Nat Nanotechnol 2009; 8(6): pp.421-425.
- [5] Diao J, Gall K, Dunn ML. Yield strength asymmetry in metal nanowires, Nano Lett 2004; 4: pp.1863-1867.
- [6] Tosatti E, Prestipino S, Kostlmeier S, Dal Corso A, Di Tolla FD. String tension and stability of magic tip-suspended nanowires. Science 2001; 291: pp.288-290.

- [7] Park HS, Gall K, Zimmerman JA. Shape memory and pseudoelasticity in metal nanowires. *Phys Rev Lett* 2005; 95(25): pp.255504.
- [8] Diao J, Gall K, Dunn M. Surface-stress-induced phase transformation in metal nanowires. *Nat Mater* 2003; 2: pp.656–660.
- [9] Diao J, Gall K, Dunn ML. Yield strength asymmetry in metal nanowires. *Nano Lett* 2004; 4(10): pp.1863-1867.
- [10] Jing GY, Duan HL, Sun XM, Zhang ZS, Xu J, Li YD, Wang JX, Yu DP. Surface effects on elastic properties of silver nanowires: contact atomic-force microscopy. *Phys Rev B* 2006; 73(23): pp.235409.
- [11] Yvonnnet J, Mitrushchenkov A, Chambaud G, He QC. Finite element model of ionic nanowires with size-dependent mechanical properties determined by ab initio calculations. *Comput Meth Appl Mech Eng* 2011; 200(5-8): pp. 614-625.
- [12] Cao G, Wang Y. *Nanostructures and Nanomaterials: Synthesis, Properties, and Applications*. 2nd ed. World Scientific Series in Nanoscience and Nanotechnology, 2011.
- [13] Kazanc S, Aksu C.C. The Effect of Uniaxial Tensile Strain on the Mechanical Properties of Cu Element: Molecular Dynamics Method. *Firat University Journal of Engineering Science* 2021; 33(2): pp. 481-490.
- [14] Liu HJ, Owen JHG, Miki K. Degenerate electronic structure of reconstructed MnSi_{1.7} nanowires on Si(001). *J. Phys Condens Matter* 2012; 24(9): pp.095005.
- [15] Wilson NS, Kraemer S, Pennachio DJ, Callahan P, Pendharkar M, Palmstrom CJ. Mechanism for embedded in-plane self-assembled nanowire formation. *Phys Rev Mater* 2020; 4 (6): pp. 066003.
- [16] Kim J. Nanoscale amorphization of GeTe nanowire with conductive atomic force microscope. *J Nanosci Nanotechnol* 2014; 14(10): pp.7688-7692.
- [17] Alducin D, Borja R, Ortega E, Velazquez-Salazar JJ, Covarrubias M, Santoyo FM, Bazan-Diaz L, Sanchez JE, Torres N, Ponce A, Jose-Yacamán M. In situ transmission electron microscopy mechanical deformation and fracture of a silver nanowire. *Scr Mater* 2016; 113: pp.63–67.
- [18] Wang L, Xu Z, Yang S, Tian X, Wei J, Wang W, Bai X. Real-time in situ TEM studying the fading mechanism of tin dioxide nanowire electrodes in lithium ion batteries. *Sci China Technol Sci* 2013; 56: pp.2630-2635.
- [19] Meng Y, Wang LH, Zhang Z, Han XD. In situ TEM studies of the large plastic deformation of nanocrystalline gold nanowire. *J Chinese Electron Microscopy Soc* 2014; 4: pp.295–299.
- [20] Chen Y, An X, Liao X. Mechanical behaviors of nanowires. *Appl Phys Rev* 2017; 4(3): pp. 031104.
- [21] Wu B, Heidelberg A, Boland JJ, Sader JE, Sun X, Li Y. Microstructure-hardened silver nanowires. *Nano Lett* 2006; 6(3): pp.468-472.
- [22] Cao AJ, Wei YG, Mao SX. Deformation mechanisms of face-centered-cubic metal nanowires with twin boundaries. *Appl Phys Lett* 2007; 90(15): pp.151909.
- [23] Zhang Y, Huang H. Do twin boundaries always strengthen metal nanowires?. *Nanoscale Res Lett* 2009; 4(1): pp.34-38.
- [24] Zhan HF, Gu YT, Yarlagadda PKDV. Advanced Numerical Characterization of Mono-Crystalline Copper with Defects. *Adv Sci Lett* 2011; 4: pp.1293-1301.
- [25] Kelly A, Knowles KM. *Crystallography and Crystal Defects*. 2nd ed. West Sussex, UK: John Wiley and Sons Ltd, 2012.
- [26] Yu Y, Cui J. Elastic-plastic deformation decomposition algorithm for metal clusters at the atomic scale. *Comput Mech* 2021; 67(2): pp.567–581.
- [27] Samiri A, Khmich A, Haouas H, Hassani A, Hasnaoui A. Structural and mechanical behaviors of Mg-Al metallic glasses investigated by molecular dynamics simulations. *Comput Mater Sci* 2020; 184: pp.109895.
- [28] Hu CK, Luther B, Kaufman FB, Hummel J, Uzo C, Pearson DJ. Copper interconnection integration and reliability. *Thin Solid Films* 1995; 262(1-2): pp. 84-92.
- [29] Nath SKD. Elastic, elastic-plastic properties of Ag, Cu and Ni nanowires by the bending test using molecular dynamics simulations. *Comput Mater Sci* 2014; 87: pp.138-144.
- [30] Sun J, Fang L, Ma A, Jiang J, Han Y, Chen H, Han J. The fracture behavior of twinned Cu nanowires: A molecular dynamics simulation. *Mater Sci Eng A* 2015; 634: pp.86-90.
- [31] Cao H, Rui Z, Yang F. Mechanical properties of Cu nanowires: Effects of cross-sectional area and temperature. *Mater Sci Eng A* 2020; 791: pp.139644.
- [32] Marque's LA, Pelaz L, Aboy M, Lopez P, Barbolla J. Atomistic modelling of dopant implantation and annealing in Si: damage evolution, dopant diffusion and activation. *Comput Mater Sci* 2005; 33: pp.92-105.
- [33] Daw MS, Hatcher RD. Application of the embedded atom method to phonons in transition metals. *Solid State Commun* 1985; 56(8): pp.697-699.
- [34] <http://lammmps.sandia.gov/LAMMPS> Molecular Dynamics Simulator (online date:02.04.2021).
- [35] Parrinello M, Rahman A. Crystal Structure and Pair Potentials: A Molecular-Dynamics Study. *Phys Rev Lett* 1980; 45(14): pp.1196-1201.
- [36] Guellil AM, Adams JB. The application of the analytic embedded atom method to bcc metals and alloys. *J Mater Res* 1992; 7: pp.639–652.
- [37] Foiles SM, Baskes MI, Daw MS. Embedded-atom-method functions for the fcc metals Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, and their alloys. *Phys Rev B* 1986; 33: pp.7983.
- [38] Malins A, Williams SR, Eggers J, Royall CP. Identification of structure in condensed matter with the topological cluster classification. *J Chem Phys* 2013; 139: pp.234506.
- [39] Stukowski A. Structure identification methods for atomistic simulations of crystalline materials. *Modell Simul Mater Sci Eng* 2012; 20: pp.045021.

- [40] Bonny G, Castin N, Terentyev D. Interatomic potential for studying ageing under irradiation in stainless steels: the FeNiCr model alloy. *Model Simul Mater Sci Eng* 2013; 21: pp.085004.
- [41] Stukowski A. Structure identification methods for atomistic simulations of crystalline materials. *Model Simul Mater Sci Eng* 2012; 20: pp.045021.
- [42] Setoodeh AR, Attariani H, Khosrownejad M. Nickel nanowires under uniaxial loads: A molecular dynamics simulation study. *Comput Mater Sci* 2008; 44: pp.378-384.
- [43] Wu HA. Molecular dynamics study of the mechanism of metal nanowires at finite temperature. *Eur J Mech A Solids* 2006; 25: pp.370-377.
- [44] Li W, Sun L, Xue J, Wang J, Duan H. Influence of ion irradiation induced defects on mechanical properties of copper nanowires. *Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B* 2013; 307: pp.158–164.
- [45] Chang WJ. Molecular-dynamics study of mechanical properties of nanoscale copper with vacancies under static and cyclic loading. *Microelectron Eng* 2003; 65: pp.239–246.
- [46] Li Y, Chen H, Chen Y, Wang Y, Shao L, Xiao W. Point defect effects on tensile strength of zirconium studied by molecular dynamics simulations. *Nucl Mater Energy* 2019; 20: pp.100683.
- [47] Zhu X, Gao X, Song H, Han G, Lin DY. Effects of vacancies on the mechanical properties of zirconium: an ab initio investigation. *Mater Des* 2017; 119: pp.30–37.
- [48] Stukowski A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO—the Open Visualization Tool. *Modell Simul Mater Sci Eng* 2010; 18(1): pp.015012.
- [49] Bañuelos EU, Aburto CC, Arce AM. A common neighbor analysis of crystallization kinetics and excess entropy of charged spherical colloids. *J Chem Phys* 2016; 144: pp.094504.
- [50] Fanga R, Wanga W, Guoa L, Zhanga K, Zhanga X, Lib H. Atomic insight into the solidification of Cu melt confined in graphene Nanoslits. *J Cryst Growth* 2020; 532: pp.125382.
- [51] Paul SK. Effect of twist boundary angle on deformation behavior of (100) FCC copper nanowires. *Comput Mater Sci* 2018; 150: pp.24–32.
- [52] Kardani A, Montazeri A. Metal-matrix nanocomposites under compressive loading: Towards an understanding of how twinning formation can enhance their plastic deformation. *Sci Rep* 2020; 10(1): pp.9745.
- [53] Bejaud R, Durinck J, Brochard S. Twin-interface interactions in nanostructured Cu/Ag: Molecular dynamics study. *Acta Mater* 2018; 144: pp.314–324.
- [54] Pukšic N, Jenko M, Godec M, McGuinness PJ. A comparison of the uniaxial deformation of copper and nickel (111) surfaces: a molecular dynamics study. *Sci Rep* 2017; 7: pp.42234.
- [55] Carey B. Simulation and Analysis of Vacancies in Carbon Nanostructures. BmfTech, Metropolia University of Applied Sciences, Helsinki, Finland, 2018.
- [56] Wu HA. Molecular dynamics study of the mechanism of metal nanowires at finite temperature. *Eur J Mech A Solids* 2006; 25: pp.370-377.
- [57] Wen YH, Zhang Y, Wang Q, Zheng JC, Zhu ZZ. Orientation-dependent mechanical properties of Au nanowires. *Comput Mater Sci* 2010; 48: pp.513-519.
- [58] Sainath G, Choudhary BK. Orientation dependent deformation behaviour of bcc iron nanowires. *Comput Mater Sci* 2016; 111: pp.406-415.
- [59] Brochard S, Beauchamp P, Grilhé J. Combination of Continuum and Atomistic Approaches for the Study of Dislocation Nucleation from Atomic Size Surface Defects. *MRS Online Proc Lib* 2001; 677: pp.55.
- [60] Feng R, Cao H, Li H, Rui Z, Yan C. Effects of Vacancy Concentration and Temperature on Mechanical Properties of Single-Crystal γ -TiAl Based on Molecular Dynamics Simulation. *High Temp Mater Proc* 2018; 37(2): pp.113–120.

Modül Yapay Sinir Ağları ile Doğrusal Olmayan Sistemlerin Denetimi

Şerafettin BALOĞLU^{1*}, Muammer GÖKBULUT²

¹ Seydişehir İlçe Milli Eğitim Müdürlüğü, Seydişehir/Konya, Türkiye

² Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ serefbal@gmail.com, ² mgokbulut@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 29/04/2023;

Kabul/Accepted: 06/07/2023)

Öz: Yapay sinir ağı (YSA) tarafından gerçekleştirilen hesaplama, birbiriyle iletişim kurmadan girdi uzayı üzerinde çalışan iki veya daha fazla modüle (alt sistemler) ayrıştırılabilirse, sinir ağı modüllerdir (MYSA). Modülerlik, karmaşık bir hesaplama görevini daha basit görevlere bölerek girdi uzayının farklı bölgelerini öğrenip uzmanlaşma eğilimindeki modüllerin bireysel çözümlerini birleştirme yaparak çözüme izin veren böl ve fethet ilkesinin bir tezahürüdür. Bu çalışmada, doğrusal olmayan iki sistemin MYSA ile modellenmesi ve denetim başarıları incelenerek elde edilen sonuçlar YSA ile karşılaştırılmıştır. Sistemlerin modelleme ve denetiminde yapılan karşılaştırma sonuçlarına bakıldığında MYSA performansının YSA' ya göre iyi olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Modül yapay sinir ağları, doğrusal olmayan sistemler, modelleme ve denetim.

Modular Neural Network Control of Nonlinear Systems

Abstract: A neural network is modular (MNN) if the computation performed by an artificial neural network (ANN) can be decomposed into two or more modules (subsystems) operating on the input space without communicating with each other. Modularity is a manifestation of the divide-and-conquer principle, which allows a solution by dividing a complex computational task into simpler tasks, combining individual solutions of modules that tend to learn and specialize in different regions of the input space. In this study, the modeling of two nonlinear systems with MCA and the audit successes were examined and the results obtained were compared with ANN. When the comparison results made in the modeling and inspection of the systems are examined, it has been determined that the MYSA performance is better than the ANN.

Key words: Module neural networks, nonlinear systems, modeling and control.

1. Giriş

YSA, makine öğrenmesinde yaygın kullanıma sahip model olup temeli 1940'lı yıllara dayanmaktadır. YSA hakkında geçmişte birçok çalışma yapılmış ve son yıllarda popüler olan derin öğrenme çalışmalarının da temelini oluşturmuştur [1]. İnsan beyninin çalışma prensibini modellemeyi amaçlayan YSA günümüzde, sistem tanılama ve denetimi, güdültü önleme, nesne tanıma, sinyal işleme, otomobiller için otomatik pilot tasarımı gibi tıp, mühendislik başta olmak üzere pek çok multidisipliner alanda kullanılmaktadır.

1950'lerin başlarında YSA sorgulanmaya başlanmış ve hayata geçmesi on yıllar sürmüştür. İlk başlarda YSA'nın nasıl eğitileceği büyük bir sorun olmuş, birçok bilim insanının birbirinden bağımsız olarak geri yayılım olarak adlandırılan "gratiant inişi"ni kullanmasıyla birlikte YSA yeniden keşfedilmiştir. 1989 yılında Bell Labs' dan Yan LeCun'un sonradan LeNet adı verilen evrimsel sinir ağları ile geri yayılım algoritmasını birleştirip el ile yazılmış rakamları tanıma kullanılması, YSA' nda ilk başarılı uygulama olmuştur [2].

İnvaziv mekanik ventilasyonun yönetimi ve ventilasyon sırasında sedasyon ve analjezinin düzenlenmesi yoğun bakıma başvuran hastaların bakımının önemli bir bölümünü oluşturur. Hem mekanik ventilasyona uzun süreli bağımlılık hem de erken ekstübasyon, artan komplikasyon riski ve daha yüksek hastane maliyetleri ile ilişkilidir, ancak hastaları ventilatörden ayırmanın en iyi protokolüne ilişkin klinik görüş değişiklik gösterir. YSA, ekstübasyon hazır olma süresini tahmin etmek ve kişiselleştirilmiş bir sedasyon dozu ve ventilatör desteği rejimi önermek için mevcut hasta bilgilerinden (geçmiş yoğun bakım ünitesi verileri) hareketle bir karar destek aracı olarak kullanılabilir [3]. Akut akciğer hasarının ventilasyon tedavisi, akciğer çökmesini önlemek için ekspirasyon sonunda pozitif hava yolu basıncının (PEEP) uygulanmasını gerektirmektedir. Ancak alveol duvarlarına uygulanan toplam basınç, pozitif hava yolu basıncı ile gizli bileşen olan intrinsik PEEP'in (PEEPi) toplamıdır. Alveol duvarlarına uygulanan toplam basıncı ölçmek için ventilasyon, ekspirasyon sonu tutma

* Sorumlu yazar: serefbal@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-6541-4023, ² 0000-0003-1870-1772

manevrası ile kesilmelidir. YSA'nın devam eden mekanik ventilasyon sırasında akış ve basınç izlerinden toplam basınç tahmini araştırılmış ve YSA'nın toplam basıncı dinamik koşullar altında farklı seviyelerinde tahmin ederek ventilatör tedavisi gerektiren kritik hastalarda PEEPi'nin izlenmesinde yeni yaklaşımlar ortaya koymuştur [4]. Beyin tümörü sınıflandırması, tümör bölgesi alanlarında iyi huylu (benign) ve kötü huylu (malign) tümör sınıflandırması yapmayı amaçlar ve görüntü işlemede oldukça zorlu bir süreçtir. MRI görüntüleri Neutrosophy ve Convolutional Neural Network (NS-CNN) kullanan hibrit bir yöntemle sınıflandırılmıştır. Bulgular, CNN özneliklerinin farklı sınıflandırıcılarla yüksek bir sınıflandırma performansı sergilediğini göstermiştir [5].

Doğrusal olmayan sistemleri kontrol etmek amacıyla doğrusal olmayan kontrol problemleriyle başa çıkmak için YSA ve bulanık mantık sistemleri (FLS) son zamanlarda yaygın olarak incelenmektedir. Doğrusal olmayan kontrol problemlerinin çözümünde uyarlanabilir ve buluşsal bir yol olan YSA derin bir etkiye sahiptir. Özellikle, sistem parametreleri bozulduğunda veya matematiksel model tanımlanamadığında, sistem performansının sağlamak için parametrelerin ayarlanması, optimize edilmesi gerekir [6]. YSA, öğrenme üzerine odaklanmış ve doğrusal olmayan sistemlerde, sisteme ait bilginin eksik veya hatalı olduğu sistemler için uygundur. YSA'ların en önemli dezavantajı ise var olan uzman bilgisinin problem çözümüne aktarılmasındaki zorluktur [7].

Sistem dinamiklerine göre en iyi kararların alınması, otomatik olarak kontrol edilen sistemlerde yüksek düzeyde özerklik sağlar [8-11]. Günlük yaşamda karşılaşılan çoğu fiziksel sistemlerde çeşitli biçimlerde model parametre hataları ve belirsizlikler vardır [12-15]. Bilinmeyen bu dinamikler ciddi performans düşüşüne ve diğer sorunlara neden olabilmektedir [16].

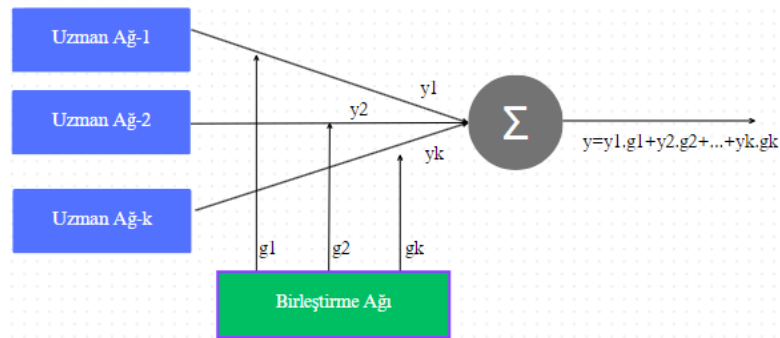
Gelişen modüler yapay sinir ağı (MYSA), doğrusal olmayan sistemlerin karmaşıklığını etkili bir şekilde azaltabilir. MYSA tasarımı, nörobiyolojiden esinlenmiştir. Omurgalı canlıya ait beynin organizasyonunu ve işlevini simüle eder. MYSA, "böl ve fetet" taktiğini kullanır. MYSA'nın büyük ölçekli bir sorunu daha küçük ve daha basit alt probleme böldüğü ve öğrenmek için bağımsız ve basit "uzman sistem" ile bir veya daha fazla alt ağ modülü atadığı anlamına gelir [17].

İnsan beyni incelendiğinde, gerçekleştirilecek işlevin beynin farklı alanlarında meydana gelen birtakım değerlendirmeler bütünü olduğu anlaşılmıştır. İnsan beyninin occipital lobunda hayal ve düş, periate lobunda duygusal, temporal lobunda işitsel ve görsel, frontal lobunda hareket planlaması gibi fonksiyonların gerçekleştiği saptanmıştır. Beynin her lobunda meydana gelen bu olaylar birleştirilerek insan tepkisi oluşturulmaktadır [18, 19]. Beynin bu çalışmasından hareketle MYSA geliştirilmiştir.

Günümüzde MYSA, çok sınıflı sınıflandırma problemleri için basit ama etkili çözümler sunarken, AlexNet ve ResNet gibi daha karmaşık derin sinir ağlarına göre parametre sayısını önemli ölçüde azaltmaktadır [20].

2. Materyal ve Yöntem

Genel olarak MYSA, birbirinden bağımsız olarak çalışan iki ya da daha fazla YSA yapısının birleşmesinden oluşur [17]. Modüllerin veya uzman ağların çıkışları, geri besleme olmaksızın birleştirici (geçit) ağ ile birleştirilir. Şekil 1' de gösterildiği gibi, MYSA blok şeması verilmiştir.



Şekil 1. MYSA yapısı

Birleştirme ağının iki görevi vardır;

- Modül çıkışlarının nasıl birleştirileceğine karar vererek, MYSA çıkışını belirler,
- Her bir modül için en uygun eğitim şeklini belirler.

2.1. Birleşmeli gauss karışımı modeli

Şekil 1' de verilen MYSA'da, uzman ağ adı verilen K adet denetlenmiş modülden ve birleştirme ağı adı verilen ve uzman ağlar arasında birleştirme görevi yapan bir üniteden oluşur. Eğitim örnekleri p boyutlu x giriş vektörü ile, arzu edilen davranış q boyutlu d vektörü ile gösterilmek üzere, giriş vektörü x, uzman ağa ve birleştirme ağına eş zamanlı olarak uygulanır [21, 22]. y_i , i . uzman ağın çıkış vektörünü, g_i birleştirme ağın aktivasyon fonksiyonunu ve y tüm modüler ağın çıkış vektörünü göstermek üzere Denklem 1' deki ifade bulunur.

$$y = \sum_{j=1}^K g_j y_j \quad (1)$$

MYSA'nın eğitiminde, uzman ağlar ve birleştirme ağı eşzamanlı olarak eğitilir [21, 22]. Eş zamanlı eğitimde aşağıdaki öğrenme algoritması kullanılır.

- Rasgele belirlenmiş bir x giriş vektörü seçilir,
- x giriş vektörünün i . uzman ağ olasılığı $P(i|x)$ kullanılarak, bir uzman ağ seçilir,
- Arzu edilen d davranış vektörü, geri yayılım sonunda i . kural olarak oluşturulur.

Arzu edilen davranışı bildiren d vektörünün çoklu rastlantısal değişkenli Gauss dağılımı, x giriş vektörü ve i . uzman ağın seçilmesi halinde Denklem 2'deki gibi bulunur.

$$\begin{aligned} f(d|x, i) &= \frac{1}{(2\pi \det \Lambda_i)^{q/2}} e^{\left(-\frac{1}{2}(d-y_i)^T \Lambda_i^{-1}(d-y_i)\right)} \\ &= \frac{1}{(2\pi)^{q/2}} e^{\left(-\frac{1}{2}(d-y_i)^T (d-y_i)\right)} \\ &= \frac{1}{(2\pi)^{q/2}} e^{\left(-\frac{1}{2}\|d-y_i\|^2\right)}, i = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (2)$$

Burada $\|-\|$, kapalı vektörün Öklit normunu ifade eder. Denklem 2'deki çoklu rastlantısal değişkenli dağılım, şarta bağlı olasılık yoğunluk fonksiyonu olarak yazılır. Bunun nedeni ise belli bir x giriş vektörü için, i . uzman ağın arzu edilen d vektörüne en uygun olanı ürettiği kabul edilir. Bu nedenle, arzu edilen d vektörünün olasılık dağılımı bir karışım modeli olarak Denklem 3'de K adet çoklu rastlantısal değişkenli Gauss dağılımının lineer kombinasyonu şeklinde ele alınır. Denklem 3'deki olasılık dağılımına birleşmeli Gauss karışım modeli denir.

$$\begin{aligned} f(d|x) &= \sum_{i=1}^K g_i f(d|x, i) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^{q/2}} \sum_{i=1}^K g_i e^{\left(-\frac{1}{2}\|d-y_i\|^2\right)} \end{aligned} \quad (3)$$

MYSA'da uzman ağların ve birleştirme ağın ağırlıklarını uyarlamak için Denklem 3'de bulunan çoklu rastlantısal değişkenli Gauss dağılımının logaritması alınarak elde edilen log-olasılık fonksiyonu kullanılır. w uzman ağların, g birleştirme ağın ağırlık vektörü olmak üzere $l(w, g)$ log-olasılık fonksiyonu Denklem 4'deki gibi bulunur.

$$l(w, g) = \ln \sum_{i=1}^K g_i e^{\left(-\frac{1}{2}\|d-y_i\|^2\right)} \quad (4)$$

MYSA'da, uzman ağların değişik şekillerde bağlanmaları mümkünken, birleştirme ağındaki aktivasyon fonksiyonu iki şartı yerine getirmek üzere sınırlandırılmıştır [21, 22];

- Her modülün aktivasyon fonksiyonu 0 ile 1 değeri arasındadır. Bu şart Denklem 5'deki gibi bulunur.

$$0 \leq g_i \leq 1, \quad \forall i \quad (5)$$

- Bütün modüllerin aktivasyon fonksiyonları toplamı 1'e eşittir.

$$\sum_{i=1}^K g_i = 1 \quad (6)$$

Birleştirme ağındaki i . çıkış hücresine uygulanan girişlerin ağırlıklı toplamı olan u_i ' nin verilmesi halinde, Denklem 5 ve 6'daki şartlar dikkate alınarak, birleştirme ağıının i . çıkış hücresine ait g_i aktivasyon fonksiyonu softmax olarak adlandırılır [21-23] ve Denklem 7'deki gibi bulunur.

$$g_i = \frac{e^{(u_i)}}{\sum_{i=1}^K g_i e^{(u_i)}} \quad \{u_i | i = 1, 2, \dots, K\} \quad (7)$$

2.2. Stokastik – eğitim öğrenme algoritması

Stokastik – eğitim öğrenme algoritması, MYSA'daki i . uzman ağıın çıkışı ile ilişkili bir sonraki olasılığı tahmin eder. Bu olasılık Denklem 8'deki gibi bulunur.

$$h_i = \frac{g_i e^{\left(-\frac{1}{2}\|d-y_i\|^2\right)}}{\sum_{j=1}^K g_j e^{\left(-\frac{1}{2}\|d-y_j\|^2\right)}}, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (8)$$

h_i , hem x giriş vektörü hem de arzu edilen davranışı bildiren d vektörü şartına bağlıdır. g_i aktivasyon fonksiyonu gibi, h_i sonraki olasılık ile temsil edilen öncül olasılıklar da iki şartla sınırlandırılmıştır.

- Her modülün h_i sonraki olasılığı 0 ile 1 değeri arasındadır. Bu şart Denklem 9'daki gibi bulunur.

$$0 \leq h_i \leq 1, \quad \forall i \quad (9)$$

- Bütün modüllerin h_i sonraki olasılık toplamları 1' e eşittir.

$$\sum_{i=1}^K h_i = 1 \quad (10)$$

MYSA' da yapılan iki farklı parametre ayarlama işlemi vardır;

- Uzman ağlardaki ağırlıkların yenilenmesi işlemi,
- Birleştirme ağıındaki ağırlıkların yenilenmesi işlemidir.

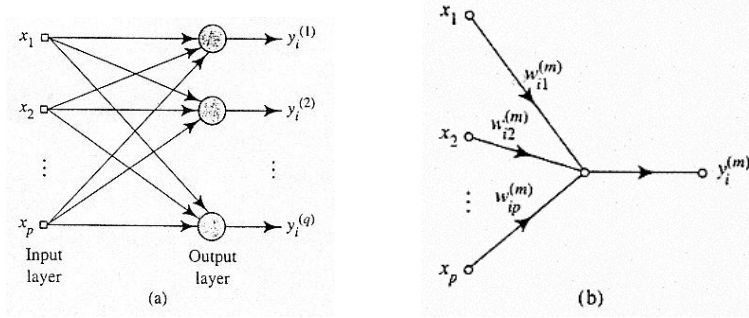
Tüm bu parametre değişiklikleri eş zamanlı olarak Denklem 3'de ifade edilen Gauss karışım modeline dayanan *stokastik- eğitim algoritması* kullanılarak yapılmıştır.

2.3. Uzman ağların uyarlanması

Şekil 1' de gösterildiği gibi MYSA' nın logaritmik-olasılık fonksiyonu Denklem 4 ile tanımlanmıştır. Uzman ağıın uyarlanması, l log-olasılık fonksiyonunun w ağırlık vektörüne göre kısmi eğimi bulunarak yapılmaktadır. Dolayısıyla i . uzman ağıın y çıkış vektörü ile ilgili olarak bu denklemin diferansiyeli, Denklem 11'deki kısmi türev ile bulunur [1].

$$\frac{\partial l}{\partial y_i} = h_i(d - y_i), \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (11)$$

Denklem 11'de, y çıkış vektörü ile arzu edilen davranışı bildiren d vektörü arasındaki hatayı minimize etmek için uzman ağıın i . ağırlıkları eğitim süresince uyarlanır. Uyarlama esnasında kullanılan eğitim modeli, h_i sonraki olasılık ile orantılı olarak, i . uzman ağı tarafından belirlenir. Uyarlama işlemi basite indirgemek için her bir uzman ağıın Şekil 2.a' da gösterildiği gibi lineer olduğu kabul edilmiştir. Şekil 2.b' de gösterildiği gibi sinyal akış şeması, i . uzman ağıın m . hücresinin y_i çıkış vektörü, $w_i^{(m)}$ ağırlık vektörü ile x giriş vektörünün transpozitesinin çarpımıdır ve Denklem 12'deki gibi bulunur. Burada T kuvveti x vektörünün tersini gösterir ve ağırlık vektörü $w_i^{(m)}$ i . uzman ağıındaki m . hücrenin $w_{i1}^{(m)}$, $w_{i2}^{(m)}$, ... $w_{ip}^{(m)}$ ağırlıklarından oluşur. Eğitim düşme esasına dayanan geri yayılım algoritması aşağıdaki gibi çıkarılmıştır.



Şekil 2. a) Uzman Ağı Oluşturan Tek Bir Lineer YSA Tabakası, b) Lineer Bir Hücrenin Sinyal- Akış Şeması

$$y_i^{(m)} = x^T w_i^{(m)}, \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, K \\ m = 1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (12)$$

$$\frac{\partial l}{\partial w_i^{(m)}} = \frac{\partial l}{\partial y_i^{(m)}} \frac{\partial y_i^{(m)}}{\partial w_i^{(m)}} \quad (13)$$

$$\frac{\partial y_i^{(m)}}{\partial w_i^{(m)}} = x \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial l}{\partial y_i^{(m)}} &= h_i (d^{(m)} - y_i^{(m)}) \\ &= h_i e_i^{(m)} \end{aligned} \quad (15)$$

$$e_i^{(m)} = d^{(m)} - y_i^{(m)} \quad (16)$$

$$\frac{\partial l}{\partial w_i^{(m)}} = h_i e_i^{(m)} x, \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, K \\ m = 1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (17)$$

$w_i^{(m)}$ ağırlık vektörünü yenilemek için $\Delta w_i^{(m)}$ düzeltme miktarı Denklem 18'deki gibi bulunur.

$$\Delta w_i^{(m)} = \eta h_i e_i^{(m)} x, \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, K \\ m = 1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (18)$$

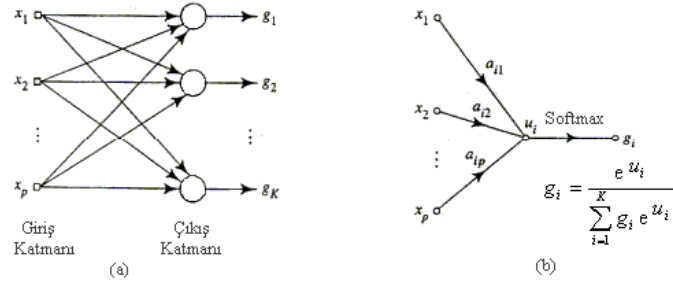
Burada η , öğrenme oranıdır. n iterasyon sayısını göstermek üzere öğrenme algoritmasının bir sonraki iterasyonunda kullanacağı yenilenmiş $w_i^{(m)}$ ağırlık vektörü Denklem 19'daki gibi bulunur.

$$\begin{aligned} w_i^{(m)}(n+1) &= w_i^{(m)}(n) + \Delta w_i^{(m)}(n) \\ &= w_i^{(m)}(n) + \eta h_i e_i^{(m)}(n) x, \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, K \\ m = 1, 2, \dots, q \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

Modelleme ve denetimi yapılacak sistemlere uygun uzman ağ yapıları seçilmelidir. Bölüm 2.3. de seçilen uzman ağ yapısı, uyarılma işlemini anlaşılır kılmak için lineer bir yapıya sahiptir.

2.4. Birleştirme ağı uyarlanması

Uzman ağların çıkışlarını değerlendirerek MYSA çıkışını belirleyen birleştirme ağ yapısı Şekil 3.a' da gösterilmiştir. Konunun anlaşılır olması için softmax hücreli yapı olarak bilinen birleştirme ağının tek katmanlı çıkış hücrelerinden oluştuğu kabul edilmiştir [20].



Şekil 3. a) Birleştirme Ağında Kullanılan Softmax Hücreleri, b) Bir Softmax Hücresinin Sinyal-Akış Şeması

Şekil 3.a' da gösterildiği gibi birleştirme ağ yapısı, uzman ağ yapısından iki bakımdan farklıdır.

- Birleştirme aği K adet çıkış hücresine sahipken, her bir uzman ağda q tane çıkış hücresi vardır.
- Birleştirme aği, Şekil 3.b' de gösterildiği gibi çıkış hücrelerinde aktivasyon fonksiyonu olarak softmax fonksiyonunu kullanır.

Birleştirme ağın uyarlanması, Denklem 20'de düzenlemiş olan l log-olasılık fonksiyonunun a ağırlık vektörüne göre doğru eğiminin hesaplanmasına dayanan geri yayılım algoritmasına göre yapılmaktadır.

$$l = \ln \sum_{i=1}^K e^{(u_i)} \cdot e^{\left(-\frac{1}{2}\|d-y_i\|^2\right)} - \ln \sum_{j=1}^K e^{(u_j)} \quad (20)$$

Buna göre birleştirme ağının giriş katmanındaki ağırlıklara uygulanacak düzeltme miktarı Δa_i ve yeni ağırlıklar Denklem 21 ile bulunur.

$$\Delta a_i = \eta(h_i - g_i)x, \quad a_i(n+1) = a_i(n) + \eta(h_i(n) - g_i(n))x \quad (21)$$

3. Benzetim Bulguları

Denklem 22 ve 23'te verilen giriş çıkış ilişkisine göre doğrusal olmayan iki sistem için sırasıyla MYSA ile YSA'nın düz ve ters modelleri ile başarıları, doğrudan uyarlamalı ve dolaylı uyarlamalı denetim sonuçları MATLAB programı kullanılarak kıyaslanmış ve paylaşılmıştır. Sistemin düz yön dinamiklerini ($y(k) = f(y(k-i), u(k-j))$) ortaya çıkaracak şekilde sinir ağının modellenmesi ve eğitimi için düz model, sistemin ters yön dinamiklerini ($u_m(k) = f(y(k-i), u(k-j))$) ortaya çıkaracak şekilde sinir ağının modellenmesi ve eğitimi için ters model kullanılmıştır. Hem doğrudan hem de dolaylı uyarlamalı denetimde denetleyici YSA'da ters model kullanılmıştır. Doğrusal olmayan sistemin doğru bir ters modeli elde edilemeyebilir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için ise sistemin düz modeli kullanılarak, sistem çıkış hatası düz model üzerinden geriye yayılarak denetleyici sinir aği eğitilmiştir.

$$y(k) = 0.9y(k-1) + \varphi[u(k)] \quad (22)$$

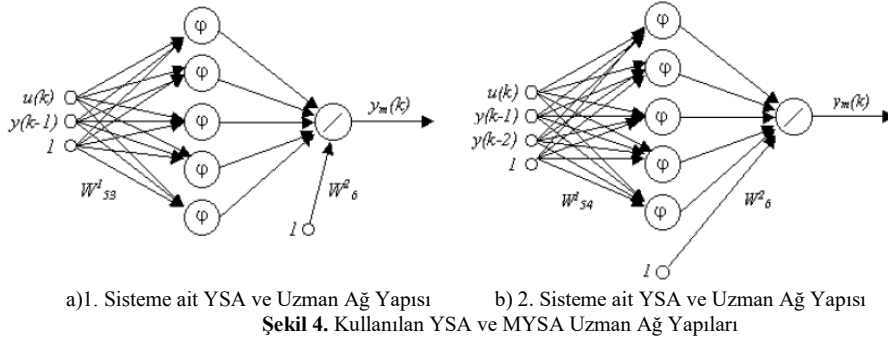
$$y(k) = \frac{1.5y(k-2)y(k-1)}{1+y(k-2)^2+y(k-1)^2} + 0.35 \sin[y(k-2) + y(k-1)] + \varphi[u(k)] \quad (23)$$

Denklemlerde yer alan $\varphi[u(k)]$ ifadesi Denklem 24'deki gibi tanımlanır.

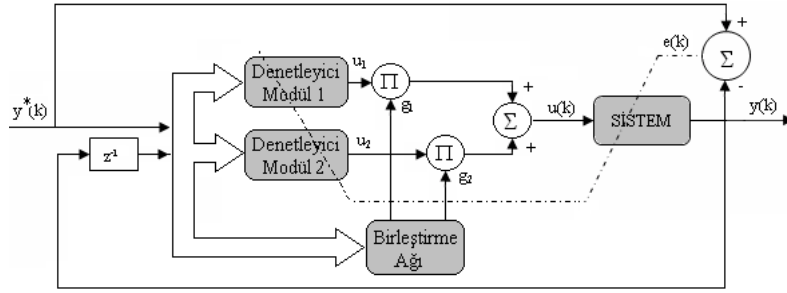
$$\varphi[x] = \begin{cases} 2x & x < 0 \\ \frac{1}{2}x & x \geq 0 \end{cases} \quad (24)$$

Sistemlerin modelleme ve denetiminde, iki uzman ağ ve bir birleştirme ağından oluşan MYSA yapısı seçilmiştir. Her uzman ağ yapısı; sigmoid aktivasyonlu 5 hücreden oluşan tek gizli katman ile tek hücreli doğrusal çıkış katmanından, birleştirme aği ise softmax aktivasyonlu 2 hücreli çıkış katmanından oluşturulmuştur. Karşılaştırmanın sağlıklı yapılabilmesi için MYSA uzman ağ yapısı ile aynı yapıya sahip YSA yapısı seçilmiş

(katmanlardaki hücre sayıları, katman sayıları vb.) ve geri yayılım algoritması kullanılmıştır. Sistemlerde kullanılan YSA yapısı ile MYSA uzman ağ yapısı Şekil 4’te verilmiştir.

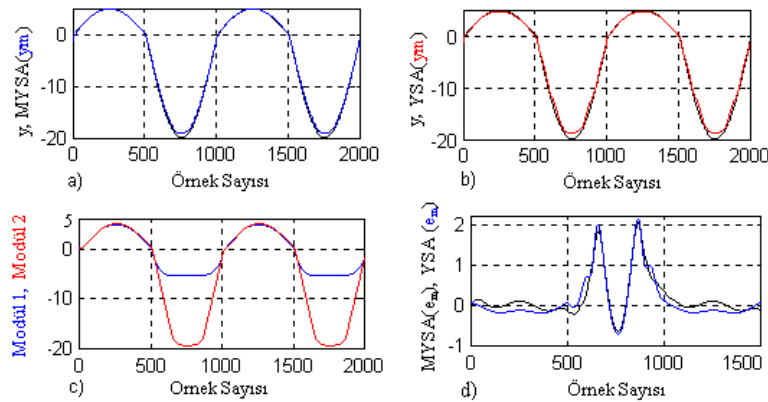


Sistemlerin düz ve ters model yapıları oluşturulup sistemlerin denetim yapılarında kullanılmıştır. Şekil 5’ te 1. sistemin denetiminde kullanılan doğrudan uyarlamalı model verilmiştir. Şekil 5’ te görülen denetleyici modüller altında sistemin ters yön dinamiklerini verecek şekilde eğitilmiş ters MYSA model yapılarıdır.

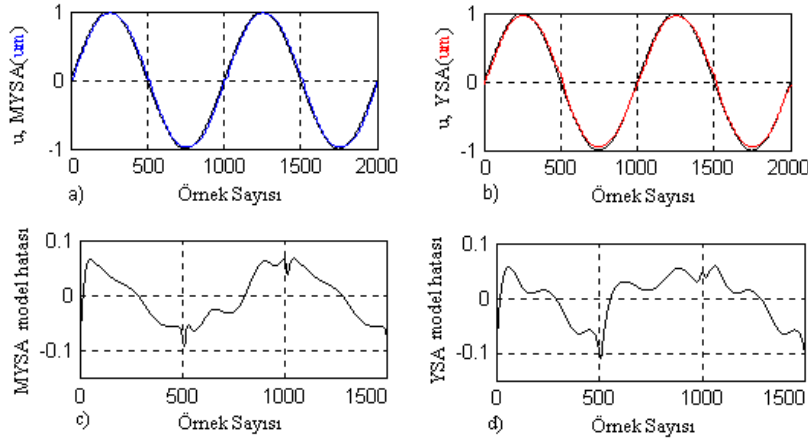


Sistemlerin düz ve ters modelleri, toplu öğrenme algoritması kullanılarak ileri beslemeli MYSA ile, doğrudan ve dolaylı uyarlamalı denetimleri ise örneksel öğrenme algoritması kullanılarak ileri beslemeli MYSA ile yapılmıştır. Bu bölümde, MYSA ile YSA’ nın modelleme ve denetim yapılarından elde edilen eğitim ve genelleme başarıları verilmiştir. Şekil 6’da görülen y sistem çıkışını, MYSA(y_m) düz model MYSA çıkışını, YSA(y_m) düz model YSA çıkışını, u referans girişi, MYSA(u_m) ters model MYSA çıkışını, YSA(u_m) ters model YSA çıkışını, Modül1- Modül2 düz ve ters model MYSA’ nın uzman ağ çıkışlarını göstermektedir.

Sistemlerin modelleme ve denetiminde kullanılan MYSA ile YSA yapılarında aynı parametre değerleri kullanılarak başarıları karşılaştırılmıştır.



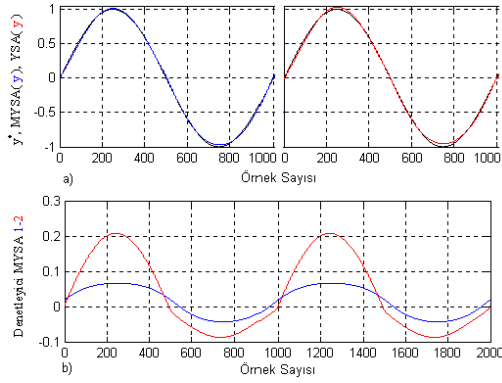
Şekil 6'da, 1. sisteme ait düz MYSA ile düz YSA modellerinin eğitim ve genelleme başarıları verilmiştir. Sistem girişine $u = \sin(k * 2 * \pi / 1000)$ referans giriş işareti uygulanarak toplu öğrenme yöntemiyle eğitilen MYSA ve YSA ile elde edilen düz model davranışları belirlenmiştir. Sistemin düz yön dinamiklerini ortaya çıkarmak ve eğitim örneklerini sistemin geniş çalışma bölgesinden almak için referans giriş olarak uyarlamalı bir sinüs sinyali seçilmiştir. Sinüs sinyalinin açılma değerini belirleyen k parametresi 0-2000 değerleri arasında değiştirilerek veriler (veri seti) elde edilmiştir. Şekil 6.a ve b' de eğitim sonunda elde edilen düz MYSA model davranışı ile düz YSA model davranışı verilmiştir. MYSA'daki uzman ağların eğitimine toplam modelleme hatasının 0.8 altına düşülünceye kadar devam edilmiştir. Düz MYSA modeli eğitiminde, birleştirme ağına kullanılan alfa öğrenme oranı uzman ağlarda kullanılan alfa öğrenme oranından farklı seçilmesi durumunda düz MYSA model çıkışının sistem çıkışına daha çabuk yakınsadığı ve eğitim sürecinin hızlandığı görülmüştür. Giriş vektörünün farklı bölümlerini öğrenerek uzmanlaşan uzman ağ çıkışları Şekil 6.c'de verilmiştir. Bu çıkışlara birleştirme ağına aktivasyon çıkışları dahil edilerek Şekil 6.a'da gösterilen düz MYSA model davranışı elde edilmiştir. MYSA ile YSA'nın modelleme hataları Şekil 6.d' de verilmiştir. MYSA model hatası, YSA model hatasına göre daha düşük hesaplanmıştır.



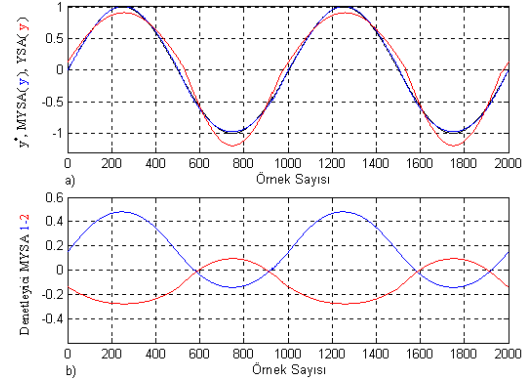
a) Ters MYSA Modeli. b) Ters YSA Modeli. c) Ters MYSA Modelleme Hatası. d) Ters YSA Modelleme Hatası.
Şekil 7. 1. Sistemin Toplu Öğrenme ile Elde Edilen Ters Modelleme Başarısı.

Şekil 7'de 1. sisteme ait toplu öğrenme algoritmasıyla eğitilen MYSA ve YSA ile elde edilen ters modellerin davranışları verilmiştir. Şekil 7.a. ve b'de eğitim sonunda elde edilen ters MYSA, YSA modellerinin davranışları paylaşılmıştır. MYSA'nın modelleme başarısı yaklaşık 5000 iterasyonda sonunda, YSA'nın modelleme başarısı ise yaklaşık 7000 iterasyon sonunda gerçekleşmiştir. İterasyon sayısından da anlaşılacağı üzere MYSA öğrenme süresi YSA'ya göre daha kısa sürmüştür. Ters MYSA'nın modelleme hatası Şekil 7.c' de, ters YSA'nın modelleme hatası ise Şekil 7.d'de verilmiştir. MYSA ters model hatasının YSA'nın hatasına göre daha az olduğu görülmüştür.

Şekil 8'de 1. sistemin MYSA ve YSA ile doğrudan uyarlamalı denetim ile bir referans hızı izleme başarısı verilmiştir. Simülasyon sonuçlarının karışmaması için Şekil 8.a'da gösterildiği gibi MYSA'lı doğrudan uyarlamalı denetim davranışı ile YSA'lı doğrudan uyarlamalı denetim davranışı ayrı ayrı çizdirilmiştir. MYSA ile doğrudan uyarlamalı denetimde uzman ağların sistemin farklı bölümlerini öğrenerek uzmanlaşmış ve denetleyici olarak kullanılan uzman ağlar sistemin ters yön dinamiklerini en iyi şekilde öğrenmişlerdir. Örneksel öğrenme yöntemine göre eğitilen uzman ağların davranışları her eğitim örneğinde iyileşmiş ve sistem çıkışı referans girişine doğru yakınsamıştır. Denetleyici olarak kullanılan uzman ağların denetim sürecindeki davranışları Şekil 8.b'de verilmiştir. Uzman ağ çıkışları birleştirici ağ çıkışlarıyla işleme tabi tutularak sistemin denetim girişi belirlenmiştir.

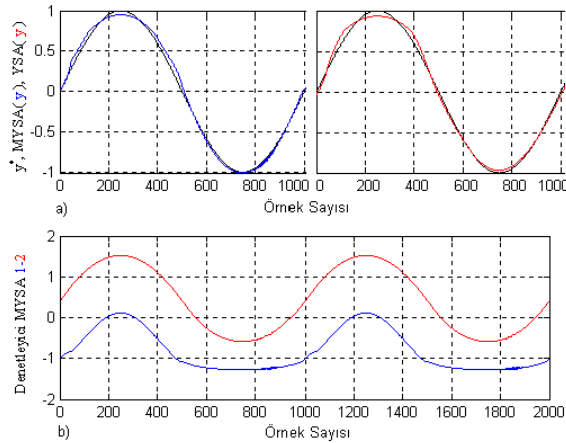


a) Ref. Giriş, MYSA' lı ve YSA' lı Denetim Çıktıları.
b) Denetleyici Uzman Ağ Çıktıları.
Şekil 8. 1. Sistemin Doğrudan Uyarlamalı Denetim Başarısı.



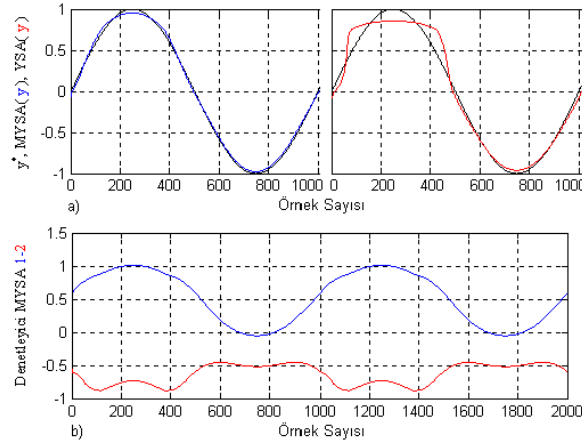
a) Ref. Giriş, MYSA' lı ve YSA' lı Denetim Çıktıları.
b) Denetleyici Uzman Ağ Çıktıları.
Şekil 9. 1. Sistemin Dolaylı Uyarlamalı Denetim Başarısı.

Şekil 9'da 1. sistemin dolaylı uyarlamalı denetim başarısı verilmiştir. Şekil 9.a'da MYSA' lı dolaylı uyarlamalı denetim başarısı ile YSA' lı dolaylı uyarlamalı denetim başarısı paylaşılmıştır. MYSA' lı denetim başarısı YSA' ya göre oldukça iyidir. Bunun nedeni, dolaylı uyarlamalı denetim yapısındaki düz MYSA modelinin sistemin düz yön dinamiklerini en iyi şekilde öğrenmesidir. Denetleyici uzman ağların eğitimi, referans giriş ile sistem çıkışı arasındaki hatanın sistemin düz modeli üzerinden geri yayılım algoritması kullanılarak her ağırlığa göre eğiminin doğru bir şekilde belirlenmesi ve ağırlıkların yenilenmesidir. Düz modelin, sistemin düz yön dinamiklerini doğru olarak tanınması ve denetleyici uzman ağların ağırlıklarının yenilenmesi sonucu sistemin MYSA ile dolaylı uyarlamalı denetim ve genelleme başarısı YSA' ya göre son derece iyidir. MYSA' nın karmaşık bir fonksiyonu daha küçük parçalara ayırarak, her parçayı ayrı ayrı yaklaştırma yeteneği burada YSA yapısına göre bir üstünlüğüdür. Şekil 9.b'de sistemin denetim girişini oluşturan MYSA' daki denetleyici uzman ağların eğitim başarıları çizdirilmiştir. Her uzman ağın davranışı diğerinden bağımsızdır.



a) Referans Giriş, MYSA' lı ve YSA' lı Denetim Çıktıları. b) Denetleyici Uzman Ağ Çıktıları.
Şekil 10. 2. Sistemin Doğrudan Uyarlamalı Denetim Başarısı.

Şekil 10'da 2. sistemin MYSA ve YSA yapıları kullanılarak elde edilmiş doğrudan uyarlamalı denetimin sinüsoydal referans girişi izleme başarısı verilmiştir. Şekil 10.a'da MYSA ve YSA ile elde edilen denetim başarıları ayrı ayrı çizdirilmiştir. Şekil 10.b'de MYSA' da denetleyici uzman ağların davranışları verilmiştir. Her uzman ağ, sistemin denetim girişini belirlemede rol oynamaktadır. Uzman ağların sistem girişine hangi oranda etki edeceğine ise birleştirme ağı karar vermektedir. Denetim sisteminde kullanılan birleştirme ağında softmax aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Birleştirme ağına çıkışı uzman ağ sayısına bağlıdır ve bu sayı ikidir.



a) Referans Giriş, MYSA' lı ve YSA' lı Denetim Çıktıları. b) Denetleyici Uzman Ağ Çıktıları.
Şekil 11. 2. Sistemin Dolaylı Uyarlamalı Denetim Başarısı.

Şekil 11'de aynı sistemin dolaylı uyarlamalı denetim başarısı, Şekil 11.a'da gösterildiği gibi MYSA ile YSA yapıları kullanılarak elde edilen dolaylı uyarlamalı denetimin sinüsoydal referans girişi izleme başarısı verilmiştir. Şekil 11.b'de gösterildiği gibi sinüsoydal referans girişine göre eğitilen MYSA uzman ağlarının davranışları elde edilmiştir. Burada da her uzman ağ, birleştirme ağı belirlediği oranda sistemin denetim girişine etki etmiştir.

4. Tartışma

Günümüzde, doğrusal olmayan sistemler için modelleme çalışmaları halen sürmektedir. Kendi kendini organize edebilen, çözülecek problemin özelliğine göre alt ağ modellerini otomatik ekleyebilen/birleştirebilen MYSA yapıları geliştirilmektedir [17, 20, 23]. Tiny ImageNet, CIFAR-10, MNIST, CIFAR-100, AlexNET, On-Road-Risk gibi veri setleri üzerinde böl ve fethet esasına göre çalışan modüler sinir ağlarının başarılı sonuçlar verdiği kanıtlanmıştır [20, 23]. Bu çalışmada, doğrusal olmayan sistemler için bir adet birleştirme ağı ile iki uzman ağdan oluşan MYSA yapısı önerilmiştir. MYSA'da, birleştirme ağındaki softmax puanına göre seçilen her uzman ağ, problemin bir parçasını öğrendiğinden doğrusal olmayan sistemlerde MYSA'nın öğrenme hızı, modelleme ve denetiminin YSA'ya göre daha başarılı olduğu görülmüştür.

5. Sonuç

Bu çalışmada, giriş çıkış ilişkisine göre lineer olmayan iki sistemin YSA ve MYSA kullanılarak modelleme ve denetim başarıları karşılaştırılmıştır. MYSA sistemin farklı bölümlerini çok daha iyi öğrendiği görülmüştür. Sistemlerin YSA' lı modelleme ve denetim başarıları da ayrıca incelenerek MYSA modelleme ve denetim başarıları ile birlikte verilmiştir. Karşılaştırmanın sağlıklı yapılabilmesi için YSA ve MYSA yapıları, katmanlardaki hücre sayıları, katman sayıları, öğrenme oranları vb. aynı seçilmiştir. Lineer olmayan sistemlerin kontrolünde, böl ve fethet esasına göre çalışan MYSA'nın YSA'na göre başarılı olduğu görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Uğuz, S., Makine Öğrenmesi Teorik Yönleri ve Python Uygulamaları ile Bir Yapay Zeka Ekolü. 2 ed. 2021: Nobel Akademik Yayıncılık. 300.
- [2] Chollet, F., Python ile Derin Öğrenme. 1. Baskı ed. Buzdağı Yayınevi, Ankara. 2019.
- [3] Prasad, N., et al., A reinforcement learning approach to weaning of mechanical ventilation in intensive care units. arXiv preprint arXiv:1704.06300, 2017.
- [4] Perchiazzi, G., et al., Monitoring of total positive end-expiratory pressure during mechanical ventilation by artificial neural networks. Journal of clinical monitoring and computing, 2017. 31: p. 551-559.
- [5] Özyurt, F., et al., Brain tumor detection based on Convolutional Neural Network with neutrosophic expert maximum fuzzy sure entropy. Measurement, 2019. 147: p. 106830.
- [6] Liu, Y.-J., et al., Adaptive neural network control for a class of nonlinear systems with function constraints on states. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021.
- [7] Kubat, P.D.C., Matlab Yapay Zeka ve Mühendislik Uygulamaları. 2019: Abaküs.

- [8] Izzo, D., M. Märten, and B. Pan, A survey on artificial intelligence trends in spacecraft guidance dynamics and control. *Astrodynamics*, 2019. 3: p. 287-299.
- [9] Kamalapurkar, R., et al., Reinforcement learning for optimal feedback control. 2018: Springer.
- [10] Wen, T., et al., Hop reachable domain on irregularly shaped asteroids. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2020. 43(7): p. 1269-1283.
- [11] Yin, S., J. Li, and L. Cheng, Low-thrust spacecraft trajectory optimization via a DNN-based method. *Advances in Space Research*, 2020. 66(7): p. 1635-1646.
- [12] Cheng, L., et al., Fast solution continuation of time-optimal asteroid landing trajectories using deep neural networks. *Acta Astronautica*, 2020. 167: p. 63-72.
- [13] Huang, Y., S. Li, and J. Sun, Mars entry fault-tolerant control via neural network and structure adaptive model inversion. *Advances in Space Research*, 2019. 63(1): p. 557-571.
- [14] Yang, T., et al., Neural network-based adaptive anti-swing control of an underactuated ship-mounted crane with roll motions and input dead zones. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2019. 31(3): p. 901-914.
- [15] Zhou, N., Y. Kawano, and M. Cao, Neural network-based adaptive control for spacecraft under actuator failures and input saturations. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 2019. 31(9): p. 3696-3710.
- [16] He, D., Z. Liu, and Y. Jiang, An intuitive model for on-axis pulse evolution of ultrashort pulsed Gaussian beams diffracted from a circular aperture. *Journal of Modern Optics*, 2015. 62(8): p. 620-625.
- [17] Qiao, J., X. Guo, and W. Li, An online self-organizing modular neural network for nonlinear system modeling. *Applied Soft Computing*, 2020. 97: p. 106777.
- [18] Aytaş, G., Sözlü çeviri eğitiminde bilişsel incelemeler: SAÜ çeviribilim bölümü hazırlık, 2. ve 4. sınıflar örneği, in *Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ph.D. 2019, Sakarya Üniversitesi*.
- [19] Baloğlu, Ş., Modül yapay sinir ağları ile doğrusal olmayan sistemlerin denetimi, *Fen Bilimleri Enstitüsü. 2003, Fırat Üniversitesi*.
- [20] Intisar, C.M. and Q. Zhao. A selective modular neural network framework. 2019 IEEE 10th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST). 2019. IEEE.
- [21] Ma, J., et al., Feature guided Gaussian mixture model with semi-supervised EM and local geometric constraint for retinal image registration. *Information Sciences*, 2017. 417: p. 128-142.
- [22] Khanmohammadi, S. and C.-A. Chou, A Gaussian mixture model based discretization algorithm for associative classification of medical data. *Expert Systems with Applications*, 2016. 58: p. 119-129.
- [23] Chowdhury, M.I., et al., CMNN: Coupled modular neural network. *IEEE Access*, 2021. 9: p. 93871-93891.

Çinko Oksit Nanoparçacıkları Katkılı Polietersülfon Ultrafiltrasyon Membranlar

Evrım ÇELİK MADENLİ^{1*}, Fulya ŞEN², Ahmet ERÇİN³

^{1, 2, 3} Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye
^{*} evrimcelik@sdu.edu.tr, ² fulyasen.160@gmail.com, ³ ercinaahmet@gmail.com

(Geliş/Received: 07/04/2023;

Kabul/Accepted: 07/07/2023)

Öz: Membranlar gıda, petrokimya, enerji endüstrilerinin yanı sıra yüksek giderim verimi ve düşük maliyeti nedeniyle su ve atık su arıtımında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat, membran uygulamalarında karşılaşılan en büyük sorun membran tıkanmasıdır. Membran tıkanmasını azaltmak için kullanılan yöntemlerden bir tanesi membran hidrofilitliğinin artırılmasıdır. Membran sentezi sırasında membran hidrofilitliğini arttıracak katkı maddeleri eklenmesi ile membran hidrofilitliği artırılabilir. Yüksek yüzey / hacim oranı ve düşük maliyeti ile çinko oksit nanoparçacıkları (nZnO) ilgi çeken nanoparçacıklardan biridir. Bu çalışmada nZnO, polietersülfon (PES) membranlarda katkı maddesi olarak kullanılmıştır. nZnO katkı PES (P/Z) membranlar faz geri çevrilmesi yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan membranlar temas açısı, Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektrometresi (FTIR), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak karakterize edilmiştir. Hazırlanan membranların saf su filtrasyonu ve protein giderim verimleri de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre nZnO ilavesi PES membranların hidrofilitliğini, porozitesini, saf su akısını, protein giderim verimini ve tıkanma direncini arttırmıştır.

Anahtar kelimeler: Çinko oksit nanoparçacıklar, membran, ultrafiltrasyon, polietersülfon.

Zinc Oxide Nanoparticles Blended Polyethersulfone Ultrafiltration Membranes

Abstract: Membranes are widely used in the food industry, petrochemical industry, energy industry as well as water and wastewater treatment due to their high removal efficiency and low cost. However, the main disadvantage of membrane applications is fouling. One of the methods used to prevent membrane fouling is to increase membrane hydrophilicity. Membrane hydrophilicity can be increased by using additives during membrane synthesis. Zinc oxide nanoparticles (nZnO) are one of the interesting nanoparticles with their high surface-to-volume ratio and low cost. nZnO were used as additives in polyethersulfone (PES) membranes in this study. nZnO doped PES (P/Z) membranes were prepared using the phase inversion method. Prepared membranes were characterized using water contact angle, Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR), and Scanning Electron Microscopy (SEM). Pure water filtration performance and protein removal efficiency of the prepared membranes were also investigated. The results of this study show that the addition of nZnO increased the hydrophilicity, porosity, pure water flux, protein removal efficiency and the fouling resistance of the PES membranes.

Key words: Zinc oxide nanoparticles, membrane, ultrafiltration, polyethersulfone.

1. Giriş

Membranlar gıda, petrokimya, enerji gibi sektörlerin yanı sıra su ve atık su arıtımında da yaygın olarak kullanılmaktadır [1-5]. Membran teknolojileri diğer su arıtma yöntemleri ile karşılaştırıldığında enerji verimliliği ve düşük maliyet avantajları sağlamaktadır [6]. Ancak membran teknolojisinin en önemli dezavantajı tıkanma problemi [7, 8]. Membranın ayırma performansının azalmasına membran tıkanması adı verilmektedir. Membran tıkanığında elde edilen süzöntü miktarı azalır ve akı düşer [9]. Kolloidler, partiküller, makromoleküller, tuzlar, vb. maddeler membranın gözeneklerinin içinde ve / veya membranın yüzeyinde birikerek tıkanmaya neden olur. [10]. Membran tıkanması geri dönüşlü ve geri dönüşsüz olmak üzere ikiye ayrılır. Geri dönüşlü tıkanma hidrolik temizleme metotları ile giderilebilir. Fakat, geri dönüşsüz tıkanma membranın kimyasal çözeltiler ile geri yıkanması ile giderilmektedir ve geri yıkama sırasında kimyasal kullanımı membran ömrünü kısaltmaktadır [11].

Yapılan çalışmalar membran hidrofilitliğinin artırılmasının, kirletici ile membran yüzeyi arasındaki hidrofobik etkileşimi azaltarak membran tıkanmasını azalttığını göstermiştir [12-14]. Bu nedenle son yıllarda tıkanmaya dirençli, düşük maliyetli polimerik membranların üretilmesi konusu öne çıkmaktadır. Membranın hidrofilitliğini arttırmak için 3 farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlar; (1) polimerin hidrofilitlik olan diğer bir

* Sorumlu yazar: evrimcelik@sdu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-1806-9121, ² 0000-0002-1009-2215, ³ 0000-0002-9447-6784

maddeyle karıştırılması, (2) polimerin hidrofilik monomer veya fonksiyonel gruplarla aşılması, (3) membranın hidrofilik olan maddeyle kaplanmasıdır [15].

Tıkanmaya dirençli ve yüksek süzütü akısına sahip membranların üretiminde genellikle membran özelliklerini iyileştirmeye katkı sağlaması amacıyla katkı maddesi olarak nanoparçacıklar kullanılmaktadır [16]. Örnek olarak alüminyum oksitler (g-Al₂O₃, a-Al₂O₃), zirkonyum oksit (ZrO₂), titanyum oksit (TiO₂), seryum oksit (CeO₂), silisyum dioksit (cam) (SiO₂) ve çinko oksit (ZnO) gibi maddeler kullanılmaktadır [9]. Membran tıkanmasına karşı TiO₂ nanoparçacıklarının kullanımının başarısı birçok çalışmada gösterilmiştir [17, 18]. Bununla birlikte tıkanmaya karşı nZnO, TiO₂ nanoparçacıklarına mükemmel bir alternatiftir. Yüksek yüzey / hacim oranı ve düşük maliyeti ile nZnO ilgi çeken nanoparçacıklardan biridir. Yapılan çalışmalarda nZnO eklenmesinin membran hidrofilikliğini ve akısını arttırdığı gösterilmiştir [8, 19]. Bu çalışmada nZnO katkılı PES membranlar (P/Z) sentezlenerek membran sentezinde nZnO kullanımının membran oluşumuna ve tıkanma direncine etkileri araştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Membran Sentezi

nZnO katkılı membranlar literatürde verilen nanoparçacık katkılı membran sentezi yöntemi temel alınarak sentezlenmiştir [20-24]. P/Z membran sentezinde katkı maddesi olarak nZnO, çözücü olarak ise N-metil-2-pirrolidon (NMP) kullanılmıştır. nZnO (ortalama 30 nm) Advanced Materials firmasından, NMP Sigma Aldrich firmasından ve PES Solvay firmasından temin edilmiştir. Saf ve nZnO katkılı membranların hazırlanması sırasında kullanılan polimer, çözücü ve nanoparçacıkların oranları Tablo 1’de verilmiştir. Sentez sırasında ilk olarak Tablo 1’de verilen oranlar kullanılarak NMP içerisine nZnO eklenerek ultrasonikasyona tabii tutulmuştur. Daha sonra PES eklenerek membran çözeltisi elde edilmiştir. Elde edilen membran çözeltisi hava kabarcıklarını çıkartmak için ultrasonikasyona tabii tutulmuş ve sonrasında otomatik film aplikasyon cihazı kullanılarak cam plaka üzerine dökülmüştür. Cam plaka üzerine dökülen membranların koagülasyon banyosuna koyulması ile membranlar elde edilmiştir. Hazırlanan membranlar distile su ile yıkayıp kullanılıncaya kadar distile su içerisinde muhafaza edilmiştir.

Tablo 1. Membranların hazırlanmasında kullanılan oranlar

Membran Adı	PES Oranı	NMP Oranı	nZnO Oranı
P/Z-0	%15	%85	-
P/Z-0,5	%15	%85	%0,5
P/Z-1	%15	%85	%1
P/Z-2	%15	%85	%2

2.2. Membran Karakterizasyonu

Membranların yan kesitleri ve üst yüzeylerinin incelenmesi için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM; FEI, QUANTA FEG 250, ABD), fonksiyonel gruplarını belirleyebilmek için Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektrometresi (FTIR; Perkin Elmer, Spectrum Two, ABD) kullanılmıştır.

Membranların porozitesi (ϵ) membranın kuru ve ıslak ağırlıkları ölçülerek belirlenmiştir. İlk olarak ıslak membranlar tartılmıştır (w_w , g). Tartımı yapılan membranlar etüvde 80 °C’de 24 saat kurutulmuştur. Kuruyan membranlar tekrar tartılmıştır (w_d , g). Membranların porozitesi Denklem 1 kullanılarak belirlenmiştir. Her membran için altı ölçümün ortalaması ve standart sapması hesaplanarak rapor edilmiştir.

$$\epsilon = \frac{(w_w - w_d)}{\rho_w \times A \times h} \quad (1)$$

A membran alanını (cm²), h membran kalınlığını (cm), ρ_w saf su yoğunluğunu (22 °C’de 0,9978 g/cm³) göstermektedir. Membranların hidrofilikliğini tespit etmek amacıyla temas açısı ölçüm cihazı (OneAttension, Theta Lite, İsveç) kullanılmıştır. Temas açısı ölçümü asılı damla tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bir damla saf su (1 µL) membran yüzeyine bırakılmış ve ölçüm yapılmıştır. Deneysel hatayı azaltmak amacıyla her numune için beş ölçümden oluşan bir seri alınmış ve ortalama değer ve standart sapma rapor edilmiştir.

Sentezlenen bütün membranların kalınlıkları mikrometre ile ölçülmüştür. Her membran için üç ölçüm ortalaması ve standart sapması rapor edilmiştir.

2.3. Membran Filtrasyonu

2.3.1. Saf Su Filtrasyonu

Membran filtrasyon testleri çapraz akışlı membran filtrasyon ünitesi kullanılarak yapılmıştır. Filtrasyon deneylerinde 27 cm² aktif alana sahip olan membranlar, saf su ile 2 bar basınç ve 200 ml/dk çapraz akış hızında 4 saat boyunca filtrasyona tabii tutulmuştur. Saf su filtrasyon akısı (J_{wf} , L/m²s) Denklem 2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$J_{wf} = \frac{m}{A_m t} \quad (2)$$

m birim zamanda süzülen suyun hacmini (L), A_m aktif membran alanını (m²), t filtrasyon süresini (s) göstermektedir.

2.3.2. Protein Filtrasyonu

Protein filtrasyonu testlerinde 0,5 g/L bovin serum albümin (BSA) çözeltisi filtrasyonu, 1 bar basınç ve 200 ml/dk çapraz akış hızında 1 saat boyunca yapılmıştır. 1 saat filtrasyon sonunda geri yıkama için 600 ml/dk çapraz akışta 15 dk boyunca saf su filtrasyonu yapılmıştır.

BSA filtrasyonu başlamadan önce ve filtrasyon bittikten sonra alınan numunelerde 280 nm dalga boyunda spektrofotometre (Hach, Dr 6000, ABD) ile BSA konsantrasyonları belirlenmiştir. BSA giderimi (R, %) Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R(\%) = \frac{C_f - C_p}{C_f} \quad (3)$$

C_p süzüntü BSA konsantrasyonunu (g/L), C_f besleme BSA konsantrasyonunu (g/L) göstermektedir. Tıkanmış membranın hidrolik direnci (R_{fm}) Denklem 4 kullanılarak hesaplanmıştır.

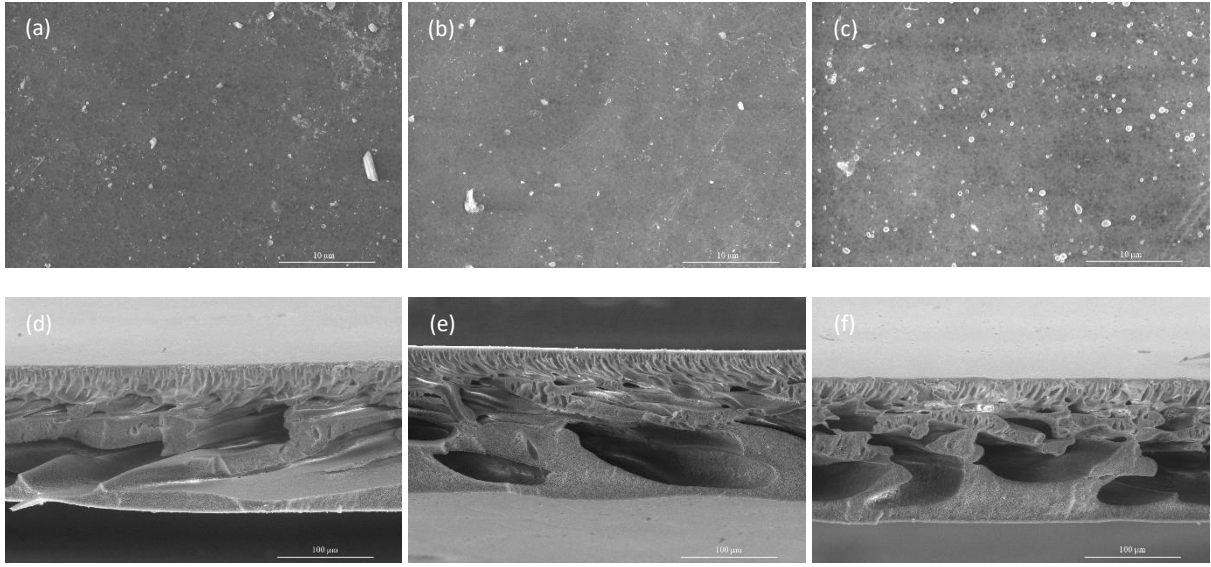
$$R_{fm} = \frac{\Delta P}{\mu J_p} \quad (4)$$

ΔP transmembran basıncını (Pa), μ su viskozitesini (22 °C'de $9,544 \times 10^{-4}$ Pa-s), J_p protein filtrasyon akısını (L/m²s) göstermektedir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

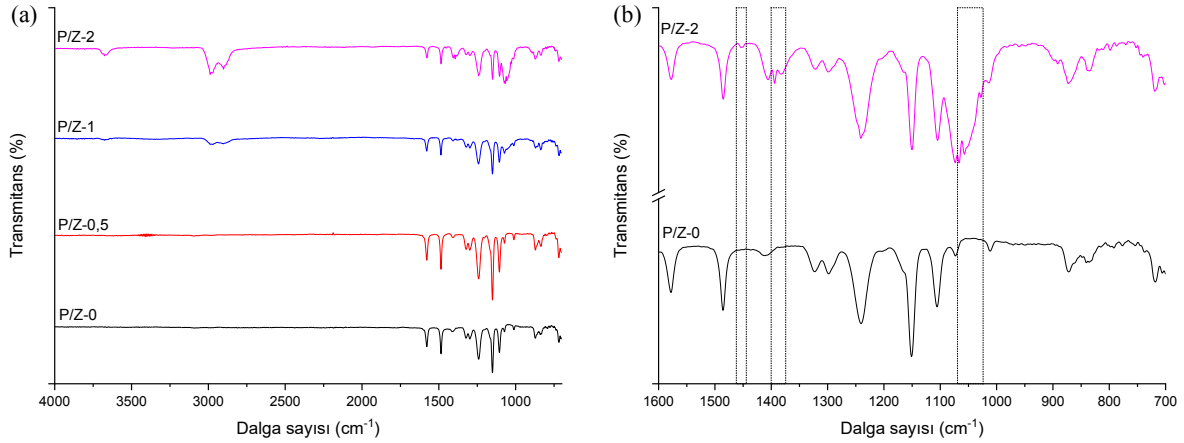
3.1. Membran Karakterizasyonu

P/Z membranların üst yüzey ve kesit alanlarını gösteren SEM görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir. Üst yüzey SEM görüntülerine göre bütün membran yüzeyinde homojen dağılmış gözeneklerin oluştuğu görülmektedir. Kesit alan görüntülerine göre bütün P/Z membranların alt bölümde geniş gözeneklere, orta bölümde parmaklı yapılar ve üst yüzeyde yoğun tabakaya sahip olan asimetrik membranlar olduğu görülmektedir.



Şekil 1. P/Z membranların üst yüzey SEM görüntüleri (a) P/Z-0, (b) P/Z-0,5, (c) P/Z-2 ve kesit alan SEM görüntüleri (d) P/Z-0, (e) P/Z-0,5, (f) P/Z-2

P/Z membranların fonksiyonel grupları FTIR ile belirlenmiştir. Sentezlenen membranların FTIR pikleri Celik vd.'nin [20] yaptığı çalışma ile karşılaştırılmış ve bütün membranların PES piklerini gösterdiği görülmüştür (Şekil 2a). nZnO katkılı membranlarda saf PES membranından farklı olarak 1450 cm^{-1} , 1395 cm^{-1} , 1380 cm^{-1} , 1065 cm^{-1} , 1055 cm^{-1} ve 1030 cm^{-1} dalga sayısı civarında altı yeni pik gözlemlenmektedir (Şekil 2b). $1500 - 1200\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı arasındaki bölge hidratlı ZnO bantları veya polimer ile etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla 1450 cm^{-1} , 1395 cm^{-1} ve 1380 cm^{-1} dalga sayısı civarındaki pikler nZnO ile ilişkilidir [25]. Ayrıca 1066 cm^{-1} [26], 1058 cm^{-1} [27] ve 1028 cm^{-1} [28] pikleri de ZnO ile ilişkilidir. Bu yeni pikler nZnO katkılı membranların başarı ile sentezlendiğini doğrulamaktadır.



Şekil 2. P/Z membranların FTIR spektrumları (a) $4000 - 700\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı aralığı ve (b) $1600 - 700\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı aralığı

P/Z membranların porozite, temas açısı ve kalınlıkları Tablo 2'de verilmiştir. Sentezlenen bütün membranların kalınlıklarının $170 - 180\text{ }\mu\text{m}$ aralığında olduğu görülmektedir. Sentezlenen membranların poroziteleri ve temas açıları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmamasına karşın membran sentezi sırasında katkı maddesi olarak nZnO eklemesinin az miktarda da olsa membran porozitesini arttırdığı ve temas açısını azalttığı görülmektedir. Membranların daha gözenekli bir yapıya sahip olması daha yüksek akı elde edilmesini sağlamaktadır. Temas açısındaki düşüş membran hidrofiliğinin arttığını göstermektedir. Ayrıca

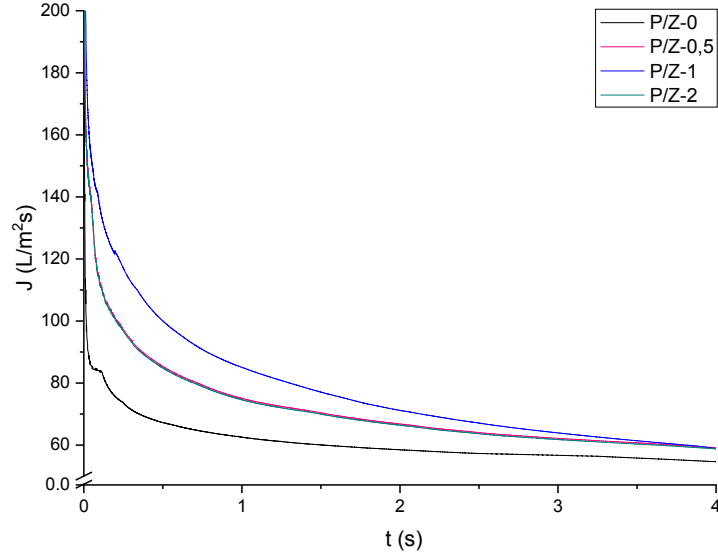
eklenen nZnO miktarı arttıkça membran hidrofiliğinin de arttığı görülmektedir. Daha hidrofilik membranlar daha uzun sürede tıkanacağı için bu çalışmada sentezlenen nZnO katkılı membranlar saf PES membrandan çok daha uzun süre filtrasyon için kullanılabilir.

Tablo 2. P/Z membranların özellikleri

Membran Adı	h (μm)	ϵ	Temas Açısı ($^\circ$)
P/Z-0	171 \pm 10	0,43 \pm 0,05	66,15 \pm 4,94
P/Z-0,5	172 \pm 7	0,44 \pm 0,04	64,52 \pm 5,38
P/Z-1	179 \pm 10	0,43 \pm 0,05	63,97 \pm 3,93
P/Z-2	176 \pm 12	0,48 \pm 0,05	62,09 \pm 5,37

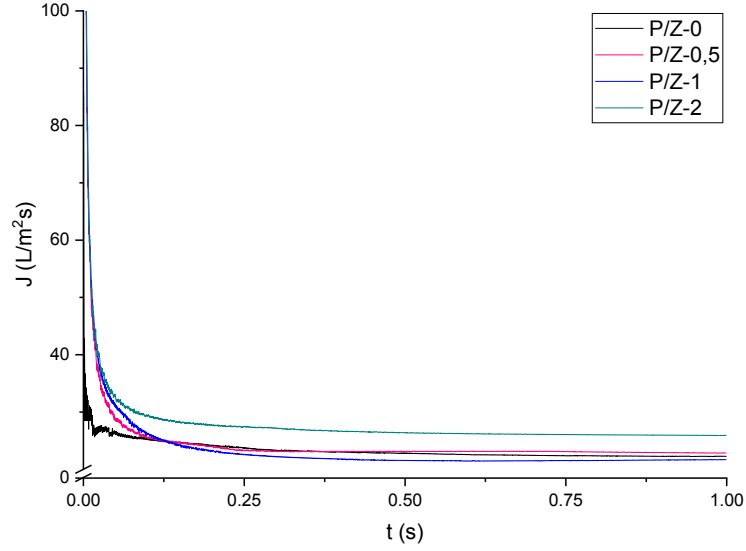
3.2. Filtrasyon Testleri

Hazırlanan bütün membranların saf su filtrasyon akıları Şekil 3'te gösterilmiştir. 4 saat saf su filtrasyonu sonunda P/Z-0 membranının saf su akısı 54 L/m²s, P/Z-0,5 membranının 59 L/m²s, P/Z-1 membranının 58 L/m²s, P/Z-2 membranının 58 L/m²s'tir. PES membranlara nZnO eklenmesi membranların saf su akılarını arttırmıştır.



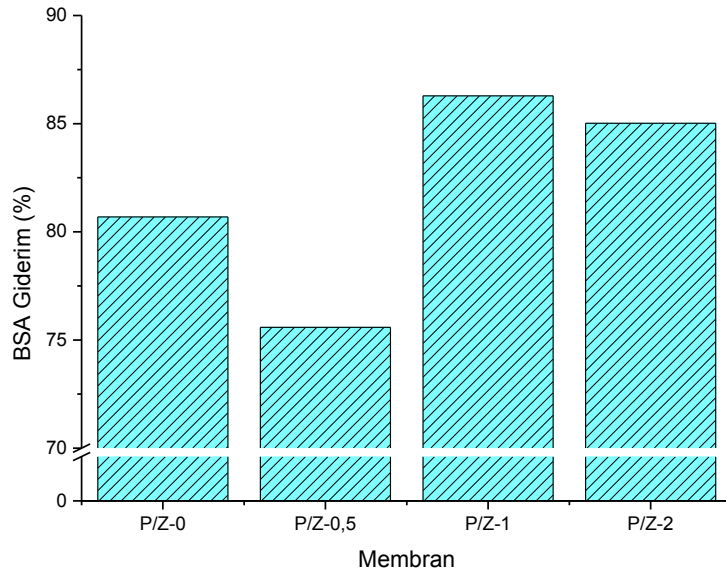
Şekil 3. Hazırlanan membranların saf su akıları

Su arıtımında bulunan tipik kirleticilerden biri, membran filtrasyonu sırasında ciddi tıkanmaya neden olan protein benzeri maddelerdir [29-33]. Bu çalışmada model protein olarak BSA kullanılmıştır. Hazırlanan membranların 1 saat süresince 0,5 g/L BSA filtrasyonu akıları Şekil 4'te gösterilmiştir. nZnO eklenmesi membranların protein filtrasyon akılarını arttırmıştır. Membrana eklenen nZnO miktarının artması ile orantılı olarak membran hidrofiliğliği de artmıştır (Tablo 2). Benzer şekilde protein filtrasyon akısı da artan nZnO miktarı ile artış göstermektedir.



Şekil 4. Hazırlanan membranların protein filtrasyon akıları

Hazırlanan membranların BSA giderim verimleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Membran sentezi sırasında katkı maddesi olarak %0,5 nZnO eklenmesi membranların protein giderim verimini düşürürken daha yüksek oranlarda nZnO eklenmesi membranların protein giderim verimini yükseltmiştir. Bunun nedeni muhtemelen membran sentezi sırasında katkı maddesi olarak nZnO eklenmesi membran gözeneklerini büyütürken daha yüksek miktarlarda nZnO eklenmesi membran çözeltisinin viskozitesini artırarak daha küçük gözenekler meydana gelmesine neden olduğu içindir [20]. Bu sonuç, artan polimer ve nZnO miktarı ile artan membran çözeltisi viskozitesi nedeniyle meydana gelen faz ayrımı gecikmesi ile açıklanabilir [20, 34].



Şekil 5. Hazırlanan membranların protein giderim verimleri

Hazırlanan membranların protein filtrasyonları sonrası hesaplanan hidrolik dirençleri Tablo 3'te özetlenmiştir. Membranlarda hidrolik direnç (R_{fm}), tıkanma ve konsantrasyon polarizasyonu nedeniyle oluşur [15, 35]. Hidrolik direnç artışı tıkanma artışına, azalması ise tıkanmada azalmaya işaret etmektedir. %2 nZnO eklenmesi membranların hidrolik direncini düşürmekte ve bu sayede membranların tıkanma direncini

arttırmaktadır. Membran filtrasyonu sırasında yüksek akı ile yüksek giderim aynı anda sağlandığında, konsantrasyon polarizasyon meydana gelir. Bu nedenle konsantrasyon polarizasyon mikrofiltasyon ve ultrafiltrasyon işlemlerinde yüksektir [23, 36].

Tablo 3. Hazırlanan membranların tıkanma dirençleri

Membran Adı	$R_{fm} (\times 10^8 m^{-1})$
P/Z-0	16,95
P/Z-0,5	16,49
P/Z-1	17,37
P/Z-2	14,55

Literatürde su / atık su arıtımı için nanokompozit membranların sentezlenmesinde gümüş (Ag), TiO₂, ZnO, bakır (Cu), selenyum (Se), grafen oksit, karbon nanotüpler (CNT) gibi farklı nanoparçacıkları kullanan çok sayıda çalışma bulunmaktadır. PES bazlı üretilen nanokompozit membranlara örnek bazı çalışmalar Tablo 4'te özetlenmiştir. Endüstriyel ölçekte su arıtımı için kullanılacak nanokompozit membranların yüksek seçicilik, akı ve tıkanma direncine sahip olması gerekmektedir [37]. Tablo 4'te gösterildiği gibi CNT, grafen oksit ve Ag nanoparçacıkları kullanılarak yüksek antimikrobiyal etkiye ve yüksek biyolojik tıkanma direncine sahip polimerik membranlar hazırlanabilmektedir. Ek olarak, ZnO, TiO₂, Se ve Cu nanoparçacıklar kullanılarak yüksek akı ve tıkanma direncine sahip polimerik membranlar hazırlanabilmektedir. Bu çalışmada, nZnO katkı maddesi kullanılarak yüksek porozite, akı, tıkanma direnci ve protein giderimi sağlayan membranlar hazırlanabileceği gösterilmiştir. Bu özellikleri nZnO katkılı polimerik membranların su arıtımı için umut verici bir alternatif olabileceğine işaret etmektedir.

Tablo 4. Nanoparçacık katkılı membran çalışmalarına örnekler

Nanoparçacık	Uygulama Alanı	Sonuçlar	Kaynak
ZnO	Su arıtımı (BSA)	Daha yüksek akı ve BSA giderimi ve daha düşük tıkanma	Bu çalışma
ZnO	Su arıtımı (boya giderimi)	Daha yüksek akı ve boya giderimi	[8]
ZnO	Su arıtımı (süt tozu)	Daha hidrofilik membran ve daha düşük tıkanma	[38]
ZnO	Su arıtımı (sodyum aljinat, BSA, hümik asit)	Daha yüksek akı ve daha düşük tıkanma	[39]
Grafen oksit	Damıtma atık suyu arıtımı	Daha yüksek akı ve damıtma atık suyunda daha yüksek renk giderimi	[40]
Grafen oksit	Su arıtımı	Daha yüksek akı ve daha düşük biyolojik tıkanma eğilimi	[41]
AgNO ₃	İleri ozmos uygulamaları	Daha yüksek antimikrobiyal etki ve biyolojik tıkanma direnci	[42]
Ag	Su arıtımı	Daha yüksek antimikrobiyal etki ve biyolojik tıkanma direnci	[43]
Cu	Su arıtımı (BSA)	Daha yüksek BSA giderimi	[44]
Se	Su arıtımı (BSA)	Daha yüksek tıkanma direnci	[44]
TiO ₂	Atık su arıtımı	Daha yüksek akı ve daha düşük tıkanma	[45]
CNT	Yüzey suyu arıtımı (doğal organik madde)	Daha yüksek akı ve doğal organik madde giderimi	[20]
CNT	Su arıtımı (BSA)	Daha yüksek akı ve daha düşük tıkanma	[21]
CNT	Su arıtımı	Daha yüksek antimikrobiyal etki ve biyolojik tıkanma direnci	[22]

4. Sonuçlar

Bu çalışmada farklı nZnO miktarlarına sahip PES membranlar faz geri dönüşümü yöntemi ile başarı ile sentezlenmiştir. Hazırlanan membranların karakterizasyonları FTIR, SEM, porozite ve temas açısı ile yapılmıştır. Hazırlanan bütün membranların saf su akıları, protein filtrasyon akıları, protein giderim verimleri ve tıkanma dirençleri belirlenmiştir.

Yürütülen çalışmalardan elde edilen verilere göre PES membranlara farklı oranlarda nZnO eklenmesi membran hidrofiliğini, membran porozitesini arttırabilmektedir. Ayrıca nZnO eklenmesi saf su akışı, protein giderim verimi ve tıkanma direncini de arttırmıştır. Ayrıca %2 nZnO eklenmesi PES membran porozitesini %11,6, akışını %7,4, protein giderim verimini %5,4 arttırmış, hidrolik direncini ise %14,2 düşürmüştür. Bu çalışmada nZnO katkı maddesi kullanılarak yüksek porozite, akı, tıkanma direnci ve protein giderimi sağlayan membranlar hazırlanabileceği gösterilmiştir. Bu özellikleri nZnO katkılı polimerik membranların su arıtımı için umut verici bir alternatif olabileceğine işaret etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından iki farklı proje ile (FLP-2021-8328 ve FBY-2018-5377/SDÜ3785) desteklenmiştir. ECM: fikir sahibi, deneylerin planlanması, yorumlanması ve makale yazımı, FS ve AE: deneylerin yapılması.

Kaynaklar

- [1] Daufin G, Escudier JP, Carrere H, Berot S, Fillaudeau L, Decloux M. Recent and emerging applications of membrane processes in the food and dairy industry. *Food Bioprod Process* 2001;79(C2):89-102.
- [2] Ravanchi MT, Kaghazchi T, Kargari A. Application of membrane separation processes in petrochemical industry: a review. *Desalination* 2009;235(1-3):199-244.
- [3] Wang Y, Chen KS, Mishler J, Cho SC, Adroher XC. A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research. *Appl Energ* 2011;88(4):981-1007.
- [4] Li XF, Zhang HM, Mai ZS, Zhang HZ, Vankelecom I. Ion exchange membranes for vanadium redox flow battery (VRB) applications. *Energ Environ Sci* 2011;4(4):1147-60.
- [5] Lee M, Wu ZT, Wang R, Li K. Micro-structured alumina hollow fibre membranes - Potential applications in wastewater treatment. *J Membrane Sci* 2014;461:39-48.
- [6] Nasrollahi N, Vatanpour V, Aber S, Mahmoodi NM. Preparation and characterization of a novel polyethersulfone (PES) ultrafiltration membrane modified with a CuO/ZnO nanocomposite to improve permeability and antifouling properties. *Sep Purif Technol* 2018;192:369-82.
- [7] Nguyen T, Roddick FA, Fan L. Biofouling of water treatment membranes: a review of the underlying causes, monitoring techniques and control measures. *Membranes (Basel)* 2012;2(4):804-40.
- [8] Balta S, Sotto A, Luis P, Benea L, Van der Bruggen B, Kim J. A new outlook on membrane enhancement with nanoparticles: The alternative of ZnO. *J Membrane Sci* 2012;389:155-61.
- [9] Koyuncu I. Su/Atık su Arıtılması ve Geri Kazanılmasında Membran Teknolojileri ve Uygulamaları. Ankara: Yıldızlar Ofset; 2018.
- [10] Geise GM, Lee HS, Miller DJ, Freeman BD, Mcgrath JE, Paul DR. Water Purification by Membranes: The Role of Polymer Science. *J Polym Sci Pol Phys* 2010;48(15):1685-718.
- [11] Meng FG, Chae SR, Drews A, Kraume M, Shin HS, Yang FL. Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material. *Water Research* 2009;43(6):1489-512.
- [12] Gohari RJ, Halakoo E, Nazri NAM, Lau WJ, Matsuura T, Ismail AF. Improving performance and antifouling capability of PES UF membranes via blending with highly hydrophilic hydrous manganese dioxide nanoparticles. *Desalination* 2014;335(1):87-95.
- [13] Damodar RA, You SJ, Chou HH. Study the self cleaning, antibacterial and photocatalytic properties of TiO₂ entrapped PVDF membranes. *Journal of Hazardous Materials* 2009;172(2-3):1321-8.
- [14] Leo CP, Lee WPC, Ahmad AL, Mohammad AW. Polysulfone membranes blended with ZnO nanoparticles for reducing fouling by oleic acid. *Sep Purif Technol* 2012;89:51-6.
- [15] Celik-Madenli E, Cakmakci O, Isguder I, Yigit NO, Kitis M, Koyuncu I, et al. Effects of the solvent ratio on carbon nanotube blended polymeric membranes. In: Figoli A, Hoinkis, J., Altinkaya, S.A., Bundschuh, J., editor *Application of Nanotechnology in Membranes for Water Treatment*. London: CRC Press; 2017.
- [16] Aksu H. Türkiye'de İçmesuyu Arıtımında Membran Uygulamaları ve Uygulama Aşamasında Karşılaşılan İşletme Problemleri. Ankara: Tarım ve Orman Bakanlığı; 2019.
- [17] Rahimpour A, Jahanshahi M, Rajaeian B, Rahimnejad M. TiO₂ entrapped nano-composite PVDF/SPES membranes: Preparation, characterization, antifouling and antibacterial properties. *Desalination* 2011;278(1-3):343-53.
- [18] Bae TH, Kim IC, Tak TM. Preparation and characterization of fouling-resistant TiO₂ self-assembled nanocomposite membranes. *J Membrane Sci* 2006;275(1-2):1-5.
- [19] Ahmad AL, Sugumar J, Shoparwe NF. Antifouling Properties of PES Membranes by Blending with ZnO Nanoparticles and NMP-Acetone Mixture as Solvent. *Membranes-Basel* 2018;8(4).

- [20] Celik E, Park H, Choi H, Choi H. Carbon nanotube blended polyethersulfone membranes for fouling control in water treatment. *Water Research* 2011;45(1):274-82.
- [21] Celik E, Liu L, Choi H. Protein fouling behavior of carbon nanotube/polyethersulfone composite membranes during water filtration. *Water Research* 2011;45(16):5287-94.
- [22] Celik Madenli E, Yanar N, Choi H. Enhanced antibacterial properties and suppressed biofilm growth on multi-walled carbon nanotube (MWCNT) blended polyethersulfone (PES) membranes. *J Environ Chem Eng* 2021;9(2).
- [23] Celik E, Choi H. Carbon Nanotube/Polyethersulfone Composite Membranes for Water Filtration. In: Escobar I, Brugge B, editors. *Modern Applications in Membrane Science and Technology*. Washington DC: ACS Symposium Series, American Chemical Society; 2011, p. 257-69.
- [24] Celik Madenli E, Ciftci ZI. Effects of the carbon nanotube and polymer amounts on ultrafiltration membranes. *Environmental Engineering Research* 2022;27(4).
- [25] Gutul T, Rusu E, Condur N, Ursaki V, Goncarencu E, Vlazan P. Preparation of poly(N-vinylpyrrolidone)-stabilized ZnO colloid nanoparticles. *Beilstein J Nanotech* 2014;5:402-6.
- [26] Mullani SB, Tawade AK, Tayade SN, Sharma KKK, Deshmukh SP, Mullani NB, et al. Synthesis of Ni(2+) ion doped ZnO-MWCNTs nanocomposites using anin situsol-gel method: an ultra sensitive non-enzymatic uric acid sensing electrode material. *Rsc Adv* 2020;10(61):36949-61.
- [27] Bundit O, Wongsaprom K. Shape Control in Zinc Oxide nanostructures by Precipitation Method. *J Phys Conf Ser* 2018;1144.
- [28] Tripathy BK, Kumar S, Kumar M, Debnath A. Microwave induced catalytic treatment of brilliant green dye with carbon doped zinc oxide nanoparticles: Central composite design, toxicity assessment and cost analysis. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management* 2020;14:100361.
- [29] Liu XT, Wang MS, Zhang SJ, Pan BC. Application potential of carbon nanotubes in water treatment: A review. *J Environ Sci* 2013;25(7):1263-80.
- [30] Ding YY, Ma BW, Liu HJ, Qu JH. Effects of protein properties on ultrafiltration membrane fouling performance in water treatment. *J Environ Sci* 2019;77:273-81.
- [31] Ma BW, Yu WZ, Liu HJ, Yao JB, Qu JH. Effect of iron/aluminum hydrolyzed precipitate layer on ultrafiltration membrane. *Desalination* 2013;330:16-21.
- [32] Huner ID, Gulec HA. Fouling behavior of poly(ether)sulfone ultrafiltration membrane during concentration of whey proteins: Effect of hydrophilic modification using atmospheric pressure argon jet plasma. *Colloid Surface B* 2017;160:510-9.
- [33] Vanangarnudi A, Dumeé LF, Duke MC, Yang X. Nanofiber Composite Membrane with Intrinsic Janus Surface for Reversed-Protein-Fouling Ultrafiltration. *Acs Appl Mater Inter* 2017;9(21):18328-37.
- [34] Han MJ, Nam ST. Thermodynamic and rheological variation in polysulfone solution by PVP and its effect in the preparation of phase inversion membrane. *J Membrane Sci* 2002;202(1-2):55-61.
- [35] Huang ZQ, Chen K, Li SN, Yin XT, Zhang Z, Xu HT. Effect of ferrosulfate content on the performances of polysulfone-ferrosulfate ultrafiltration membranes. *J Membrane Sci* 2008;315(1-2):164-71.
- [36] Vankelecom IFJ, Gevers LEM. *Membrane Processes. Green Separation Processes: Fundamentals and Applications* 2005:251-70.
- [37] Ursino C, Castro-Munoz R, Drioli E, Gzara L, Albeirutty MH, Figoli A. Progress of Nanocomposite Membranes for Water Treatment. *Membranes-Basel* 2018;8(2).
- [38] Rajabi H, Ghaemi N, Madaeni SS, Daraei P, Astinchap B, Zinadini S, et al. Nano-ZnO embedded mixed matrix polyethersulfone (PES) membrane: Influence of nanofiller shape on characterization and fouling resistance. *Appl Surf Sci* 2015;349:66-77.
- [39] Li X, Li JS, Van der Bruggen B, Sun XY, Shen JY, Hana WQ, et al. Fouling behavior of polyethersulfone ultrafiltration membranes functionalized with sol-gel formed ZnO nanoparticles. *Rsc Adv* 2015;5(63):50711-9.
- [40] Kiran SA, Thuyavan YL, Arthanareeswaran G, Matsuura T, Ismail AF. Impact of graphene oxide embedded polyethersulfone membranes for the effective treatment of distillery effluent. *Chem Eng J* 2016;286:528-37.
- [41] Zinadini S, Zinatizadeh AA, Rahimi M, Vatanpour V, Zangeneh H. Preparation of a novel antifouling mixed matrix PES membrane by embedding graphene oxide nanoplates. *J Membrane Sci* 2014;453:292-301.
- [42] Toroghi M, Raisi A, Aroujalian A. Preparation and characterization of polyethersulfone/silver nanocomposite ultrafiltration membrane for antibacterial applications. *Polym Advan Technol* 2014;25(7):711-22.
- [43] Rehan ZA, Gzara L, Khan SB, Alamry KA, El-Shahawi MS, Albeirutty MH, et al. Synthesis and Characterization of Silver Nanoparticles-Filled Polyethersulfone Membranes for Antibacterial and Anti-Biofouling Application. *Recent Pat Nanotech* 2016;10(3):231-51.
- [44] Akar N, Asar B, Dizge N, Koyuncu I. Investigation of characterization and biofouling properties of PES membrane containing selenium and copper nanoparticles. *J Membrane Sci* 2013;437:216-26.
- [45] Sotto A, Boromand A, Balta S, Kim J, Van der Bruggen B. Doping of polyethersulfone nanofiltration membranes: antifouling effect observed at ultralow concentrations of TiO₂ nanoparticles. *J Mater Chem* 2011;21(28):10311-20.

Buğday Ruşeym Yağı ile Doğal Vakslar Kullanılarak Üretilen Oleojellerin Fizikokimyasal Özellikleri

Kübra CANPOLAT^{1*}, Tuğça BİLENLER KOÇ², İhsan KARABULUT³

^{1,2,3} Gıda Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

*¹ kguldemir@gmail.com, ² tugca.bilenler@inonu.edu.tr, ³ ihsan.karabulut@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 03/02/2023;

Kabul/Accepted: 10/07/2023)

Öz: Bu çalışmada, buğday ruşeym yağı (WGO) ile %3, 7 ve 10 oleojelator konsantrasyonlarında WGO oleojelleri üretilmiş ve yapısal özellikler bakımından en uygun oranların saptanmasına çalışılmıştır. Stabil jeller %3 kandelilla vaksı (CDW), %8 karnauba vaksı (CRW) ve %6 pirinç kepeği vaksı (RBW) oranlarıyla elde edilmiş olup, üretilen WGO oleojellerinin 3 ay süresince 4 ve 20 °C'deki depolanmasında kalite özellikleri belirlenmiştir. Oleojellerin 20 ve 35 °C'de ölçülen % katı yağ oranları (SFC) oleojelator oranına bağlı olarak artmıştır. Reoloji analizi sonuçlarına göre CDW ve RBW oleojellerinin depolama modüllerinin (G') kayıp modüllerden (G'') büyük olduğu ve elastik jelle ait özellikler taşıdıkları saptanmıştır. Bu çalışmada WGO'nun oleojelasyon ile yapılandırılması sonucu düşük maliyetli, depolama stabilitesi yüksek, oda sıcaklığında kıvamlı, trans yağ asidi içermeyen alternatif bir ürün başarıyla üretilmiştir.

Anahtar kelimeler: Buğday ruşeym yağı, kandelilla vaksı, karnauba vaksı, pirinç kepeği vaksı, oleojel.

Physicochemical Properties of Oleogels Made of Natural Wax with Wheat Germ Oil

Abstract: In this study, wheat germ oil (WGO) oleogels were produced using WGO at 3%, 7%, and 10% oleogelator concentrations, and the most suitable ratios in terms of structural properties were tried to be determined. Stable gels were obtained with 3% candelilla wax (CDW), 8% carnauba wax (CRW), and 6% rice bran wax (RBW), and the quality properties of the WGO oleogels were determined during storage at 4 and 20 °C for 3 months. The solid fat content (% SFC) of the oleogels measured at 20 and 35 °C increased depending on the oleogelator ratio. According to the results of the rheology analysis, it was determined that the storage modulus (G') of CDW and RBW oleogels were higher than the loss modulus (G''), and they have properties of the elastic gel. In this study, as a result of structuring WGO with oleogelation, an alternative product with low cost, high storage stability, viscous at room temperature, and no trans-fatty acid was successfully produced.

Keywords: Wheat germ oil, candelilla wax, carnauba wax, rice bran wax, oleogel.

1. Giriş

Yemeklik katı yağlar, gıda endüstrisinde işlenmiş ürüne fonksiyonel özellikler kazandırmak amacıyla kullanılan önemli bir gıda maddesi grubudur. Bu yağların stabilize edici ve kıvam verici özellikleri sayesinde gıdaların tekstürel özellikleri iyileştirilmekte ve istenilen özellikler kazandırılmaktadır. Katı yağların yapısal özellikleri bileşiminde var olan yağ asitlerinin zincir uzunluğu ve doymuşluk seviyesi, cis/trans izomer durumu ve yağ asitlerinin gliserol üzerindeki pozisyonu gibi etmenlerden şekillenen kristal yapısına bağlıdır. Ancak trans ve doymuş yağların tüketimi ile sağlık arasındaki ilişki son yirmi yılda yoğun bir şekilde tartışılmaktadır. Özellikle diyabet, kardiyovasküler hastalıklar, bazı kanser türleri, obezite ve buna bağlı olarak ortaya çıkan hastalıkların yağ tüketimiyle ilişkili olduğuna dair oldukça fazla veri bulunmaktadır. Trans ve doymuş yağ asitlerinin fazla miktarda tüketilmesi, “kötü kolesterol” olarak da adlandırılan düşük yoğunluklu lipoprotein (LDL) kolesterolün kandaki seviyelerinde bir artış, “iyi kolesterol” olarak bilinen yüksek yoğunluklu lipoprotein (HDL) kolesterol seviyelerinde ise bir düşüş ile ilişkilendirilmiştir. Her iki etki de koroner kalp hastalığı riskinin artmasına sebep olmaktadır. [1, 2]. Bu nedenle doymuş ve trans yağ içeriği düşük, yağ-bazlı gıda ürünlerinin üretimi için alternatif stratejiler geliştirmek amacıyla çalışmalar yapılmaya başlanmıştır [3]. Bu kapsamda, diyet içeriğinde katı yağların doymamış yağlarla ikame edilmesi önerilmektedir. Bunu sağlayabilmek için sıvı yağların besinsel kalitesini bozmadan, sadece fiziksel niteliğini modifiye ederek, onlara katı yağların fonksiyonel özelliklerine benzer özellikler kazandırmak için çalışmalar yürütülmüş ve çok farklı stratejiler geliştirilmiştir.

* Sorumlu yazar: kguldemir@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-7397-3335, ² 0000-0001-7831-6337, ³ 0000-0002-9014-8863

Henüz çok yeni ve hâlâ gelişmekte olan bir alternatif yapılandırma metodu olarak lipit organojelleri veya oleojeller dikkat çekmektedir. Oleojel, genel olarak üç boyutlu bir jel ağı içerisine hapsedilen, yenilebilir bitkisel yağ olarak tanımlanmaktadır. Oleojeller stabil, termo-dönüşümlü, viskoelastik ve susuz yapılardır. Mevcut tüketici talepleri, kaliteden ödün vermeden düşük oranda katı yağ içeren ürünlerin üretilmesi yönündedir ve bu beklentiyi karşılamak amacıyla düşük oranda katı yağ içeren işlenmiş gıdaların üretimi için oleojellerin kullanımının artırılması önerilmektedir [4].

Bir çalışmada RBW'nin %1.0 oranında zeytinyağını jelleştirdiği, bu oranın CDW için %2.0, CRW için %4.0 olduğu saptanmıştır. Bahsedilen oleojelatör konsantrasyonlarında 20 °C'de zeytinyağında jel oluşum sürelerinin RBW için 7–8 dk, CDW için 6–7 dk ve CRW için 13–14 dk olduğu bildirilmiştir [5]. CDW, CRW, RBW, ayçiçek ve balmumu ile soya yağı kullanılarak elde edilen oleojellerin hidrojene bitkisel yağlar, petrol vaksları ve gıda bazlı olmayan diğer jel ajanları ile kıyaslandığı bir çalışmada, soya yağında minimum jel oluşturma konsantrasyonlarının CDW için %2, CRW %4, RBW %1, balmumu için %2, olduğu bildirilmiştir. Buna ilaveten CRW'nin %3 ve altındaki konsantrasyonlarda zeytinyağında oleojel oluşumunun gözlemlenmediği rapor edilmiştir [6].

Buğday ruşeym yağı (WGO) sahip olduğu yüksek doymamışlık derecesi sonucu, düşük oksidatif dayanıma sahipken, bileşiminde yer alan tokoferoller, fitosteroller ve karotenoitler bakımından oldukça zengin olması ile dikkat çekmektedir. Ticari olarak WGO küçük miktarlarda (50-100 mL) şişelenerek gıda takviyesi olarak yüksek fiyatlarla satılmaktadır. WGO'nun içerdiği biyoaktif bileşenlere zarar verilmeden üretiminin gerçekleştirilmesi ve kullanım çeşitliliğinin artırılabilmesi için yenilikçi yöntemler ile muhafaza edilmesi gerekmektedir. Buradan hareketle, WGO'ya fonksiyonellik sağlayan bileşim unsurlarının ve WGO'da yer alan diğer yapıların oksidatif dayanıklılığı başta olmak üzere, raf ömrünün artırılması amacıyla yapılan bu çalışma kapsamında, farklı oleojelatörler kullanılarak en olumlu etkiyi sağlayan oleojel yapısı oluşturulmaya çalışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada kullanılan soğuk presleme ile üretilmiş ham WGO, Arı Mühendislik Ltd. Şti (Ankara) firması tarafından sağlanmıştır. CDW ile CRW Kahlwax Co. (Kahl GmbH & Co., Trittau, Almanya) ve RBW Agrakem (Barcelona, İspanya) şirketlerinden temin edilmiştir. Örneklerin analizinde kullanılan tüm kimyasallar analitik saflıkta olup, Sigma Chem. Co. (St. Louis, MO, USA) ve Merck Co. (Darmstadt, Germany) şirketlerinden temin edilmiştir.

2.1. Oleojellerin hazırlanması

Oleojel oluşumu için, 90 °C'deki su banyosunda tamamen eritilen vakslar (CDW, CRW, RBW), aynı sıcaklıktaki WGO ile homojen bir şekilde belirli oranlarda karıştırılmıştır. Bu oranlar yeni örneklerde yapılacak analizler için %3, %7 ve %10 olarak, depolanmış örneklerde yapılacak analizler için CDW (%3), CRW (%8) ve RBW (%6) (her oleojelatörün stabil jel meydana getirdiği oranlar seçilmiştir) olarak belirlenmiştir. Daha sonra elde edilen bu homojen sıvı karışım steril falkon tüplerine 50 g olacak şekilde doldurulmuş ve tüpler kapatılmıştır. Oleojel oluşumu için örnekler 24 saat boyunca 20 °C ve 4 °C'de bekletilmiş ve aynı sıcaklıklarda 3 ay boyunca depolanmıştır. Hazırlanan oleojeller kullanılarak gerçekleştirilen tüm analizler aksi belirtilmedikçe üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.

2.2. Yağ asidi kompozisyonu

Yağ asidi metil esterlerinin oluşturulmasında; American Oil Chemists' Society tarafından önerilen metot kullanılmıştır [7]. Cam tüplere tartılan yaklaşık 100 mg yağ örneği 2 mL hegzanda çözülmüş ve üzerine metanolde hazırlanmış 2 N KOH çözeltisinden 0.2 mL eklenmiştir. Tüpler 30 sn vortekslendikten sonra 3000 rpm' de 5 dk santrifüjlenmiştir. Üst kısımdaki hegzan fazı analiz edilmek üzere GC viallerine alınmıştır. Hazırlanan yağ asidi metil esterleri oto-enjektör (Agilent, 7683B) kullanılarak gaz kromatografisi cihazına (Agilent, 7890A) enjekte edilmiştir. Yağ asitlerinin tanımlanmasında yağ asidi metil esteri standartları karışımı (37 FAMES mixture, Steinheim, Sigma-Aldrich, Almanya) kullanılmıştır. Elde edilen kromatogramlarda her bir yağ asidinin pik alanı düzeltme yapılmadan, toplam pik alanı içindeki oranı şeklinde belirlenmiştir.

2.3. NMR ile katı yağ içeriği (SFC) analizi

Hazırlanan numunelerin % katı yağ oranı (SFC) ölçümleri NMR (Bruker NMR Analyzer mq20 The Minispec, Bruker Optics, Inc.) cihazı ile TS EN ISO 8292 metoduna göre gerçekleştirilmiştir [8]. Ölçüm sıcaklıklarında (20, 30 ve 35 °C) 30 dk bekletildikten sonra %SFC oranları belirlenmiştir.

2.4. Toplam antioksidan kapasite

Ekstraksiyon işlemi için 1 g oleojel 5 mL hekzan içerisinde tamamen çözülmüş, üzerine 5 mL metanol: su (80:20) karışımı eklenip 10 dk boyunca vortekslenildikten sonra 3500 rpm'de 10 dk 4 °C'de santrifüj edilmiştir. Santrifüjlenen tüpler içerisindeki berrak kısım alınarak toplam antioksidan aktivite ölçümünde kullanılmıştır [9]. Antioksidan kapasite belirlemesi ABTS tekniğine göre gerçekleştirilmiştir. Yöntemin esası yeşil renkli stabil bir bileşik olan ABTS [2.2-Azinobis-(3-Etibenzotiozidin-6-Sulfonik asit)] radikalinin indirgenmesi sonucu renkte oluşan azalmanın spektrofotometrik olarak ölçülmesine dayanmaktadır. Örneklerin antioksidan kapasitesi $\mu\text{mol TEAC}$ (trolox equivalent antioksidan kapasitesi) /g örnek ve % inhibisyon değerleri olarak belirlenmiştir. Bu amaçla E vitamini analogu olan Trolox kullanılarak hazırlanan kalibrasyon grafiği kullanılmıştır [10].

2.5. Reolojik özelliklerin belirlenmesi

Örneklerin reolojik davranışlarının ölçümünde Oh et al. (2017) tarafından uygulanan prosedür kullanılmıştır [11]. Bu amaçla frekans tarama (temperature ve frequency sweep) testleri TA reometre (AR 2000ex, Sussex, UK) ile paralel plakalı geometri (20 mm çapında ve 2 mm yüksekliğinde) kullanılarak yapılmıştır. Frekans tarama testleri 0.1-20 Hz arasında belirlenmiş ve depolama (G') ve kayıp (G'') modülüsleri tespit edilmiştir.

2.6. İstatistik

Uygulamalar arasındaki farklılıklar SPSS 16.0 kullanılarak One-Way ANOVA (tek yönlü varyans analizi) ile incelenmiştir. Sonuçlar ($p < 0.05$) önem seviyesinde değerlendirilmiştir.

3. Bulgular

3.1. Yağ asidi bileşimi

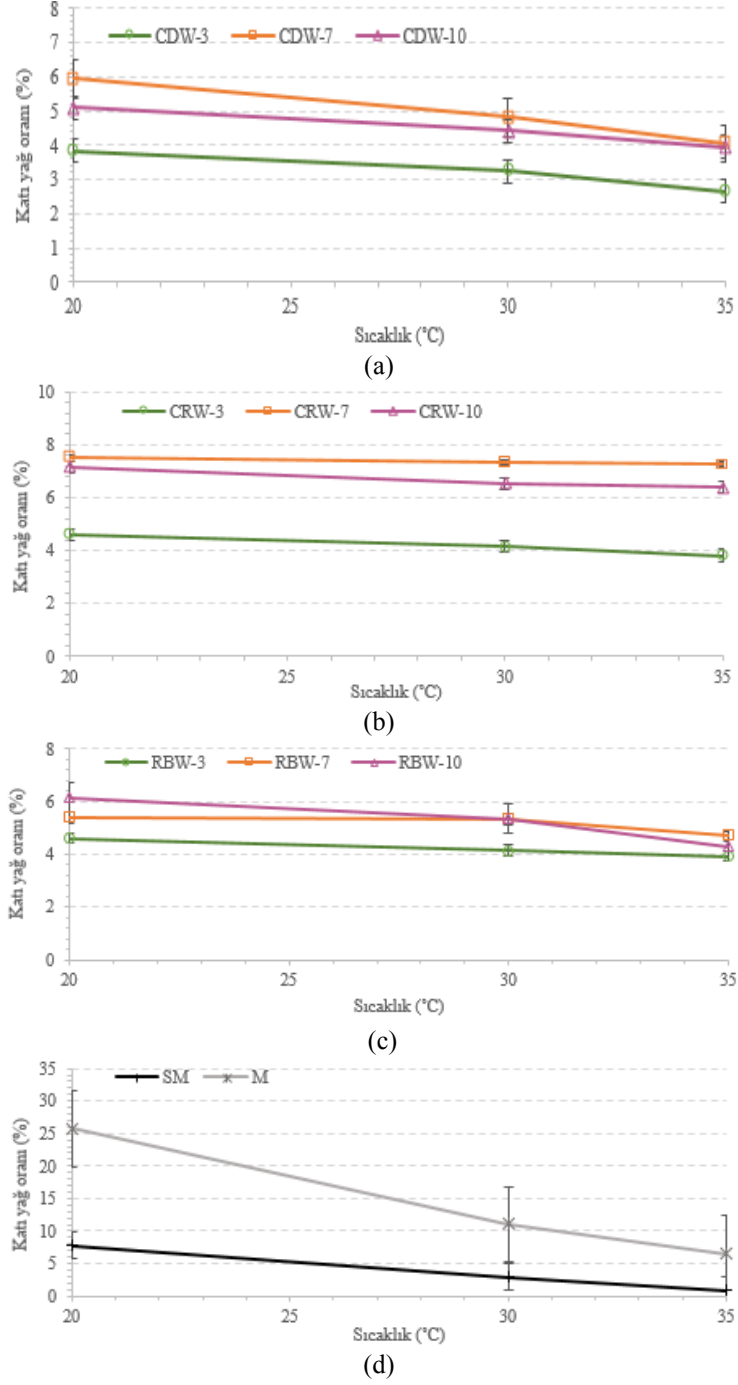
WGO'nun % yağ asidi bileşimi; palmitik asit (C16:0):17.29, palmitoleik asit (C16:1): 0.19, stearik asit (C18:0): 0.83, oleik asit (C18:1): 17.88, linoleik asit (C18:2): 55.14, linolenik asit (C18:3): 7.03, araşidik asit (C20:0): 1.50 ve gadoleik asit (C20:1): 0.14 olarak tespit edilmiştir (Tablo 1). Farklı buğday çeşitlerinden üretilen WGO'larda yağ asidi oranını belirlemek için yapılan bir çalışmada linoleik asit (C18:2) miktarı %56 olarak bulunmuştur [12]. Benzer şekilde yine WGO'nun yağ asidi kompozisyonunun tespit edilmesi için yapılan başka bir çalışmada, toplam yağ asitlerinin yarısına yakını linoleik asit, toplam doymuş yağ asitlerinin %73.5'i ise palmitik asit olarak bildirilmiştir [13]. Literatürde WGO için rapor edilen yağ asidi kompozisyonlarının farklı olmasının; buğdayın büyüme koşulları, depolama ve saklama şartları, ekstraksiyon veya analiz farklılığı gibi nedenlerden kaynaklandığı bildirilmiştir [14].

Tablo 1. WGO'nun yağ asidi kompozisyonu (%)

Yağ asidi	WGO
C16:0	17.29± 0.02
C16:1	0.19± 0.00
C18:0	0.83± 0.01
C18:1	17.88± 0.06
C18:2	55.14± 0.04
C18:3	7.03± 0.00
C20:0	1.50± 0.01
C20:1	0.14± 0.01

3.2. Katı yağ oranı (SFC)

Gıda özelliklerini, uygulamalarını ve farklı depolama, işleme ve tüketim koşullarındaki davranışlarını tanımlamak ve anlamak için belirlenen özelliklerden biride katı yağ oranıdır. Katı yağlardaki SFC değeri, katı yağlar için ürünün son kalitesini, kristalleşme eğilimini, elastik yapısını, sürülebilirliğini direkt etkileyen bir parametredir [15]. Farklı oranlarda (%3, 7, 10) oleojelator kullanılarak üretilen oleojellerin üç farklı sıcaklıkta (20, 30 ve 35 °C) belirlenen SFC'leri Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Örneklerin katı yağ içerikleri; (a) %3, 7, 10 konsantrasyonlarda CDW içeren oleojeller, (b) %3, 7, 10 konsantrasyonlarda CRW içeren oleojeller, (c) %3, 7, 10 konsantrasyonlarda RBW içeren oleojeller, (d) SM : Sürülebilir margarin, M : Mutfak margarini.

Üretilen oleojellerin %SFC'lerinin ne anlam ifade edebileceğini belirginleştirmek amacıyla piyasada en fazla satılan birer adet ticari margarin (M) ve sürülebilir margarinin (SM) de SFC'leri saptanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ölçüm yapılan üç sıcaklık derecesinde de genel olarak oleojeller arasında CRW ile üretilen oleojellerin daha yüksek %SFC'ye sahip olduğu görülmüştür.

CRW %7 ve %10 oranlarında üretilen oleojellerin 20 °C'deki %SFC'si ile SM'nin %SFC'lerinin oldukça yakın olduğu söylenebilir ($p>0.05$). Bu ölçüm sıcaklığında diğer iki oleojelatör (CDW ve RBW) ile üretilen oleojellerin %SFC'leri her iki margarine kıyasla oldukça düşük bulunmuştur ($p<0.05$).

Ayrıca ölçüm sıcaklığının artışına bağlı olarak çoğu durumda istatistiksel olarak önemsiz sayılabilecek ($p>0.05$) azalmaların olduğu görülmüştür. Bu durumun kullanılan oleojelatörlerin ergime noktalarının yüksek olması (CDW: 60-73 °C, CRW:80-85 °C ve RBW:78-82 °C) [16, 17, 5] ve oleojel üretiminde kullanılan konsantrasyonları ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Aspir yağı ve farklı konsantrasyonlarda (%0.5, 1 ve 3) CDW kullanılarak oleojel üretilen bir araştırmada üretilen oleojellerin 5 ve 25 °C'de 14 gün depolama süreci boyunca bazı özellikleri incelenmiştir. Çalışmada sonuç olarak %1 CDW içeren oleojelin 5 ve 25 °C'deki %SFC'lerinin sırasıyla %0.90 ve 0.59 olduğu belirtilmiştir.

Aynı çalışmada %3 CDW içeren oleojelin 5 ve 25 °C'deki %SFC'lerinin sırasıyla %2.57 ve %2.11 olduğu belirtilmiştir [18].

Aspir yağı ile CDW ve tripalmitin oleojelatörleri kullanılarak oleojellerin hazırlandığı bir çalışmada oleojellerin %SFC analizi yapılmıştır. Verilere göre %1 tripalmitin ve %3 CDW içeren oleojellerin sadece %3 CDW içeren oleojellere göre %SFC değerlerinin daha yüksek olduğu saptanmıştır. Oleojellerin %SFC'lerinin %2.25-3.69 arasında değiştiği bildirilmiştir [19]. Analiz bulguları literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında uyumluluk göstermektedir.

Bu bilgiler ışığında, sıcaklık yükseldikçe oleojellerin %SFC değerlerinde azalma olduğu ve oleojelatör konsantrasyonu arttıkça oleojellerin %SFC değerlerinin arttığı sonucuna varılmıştır. Bu değerlerin kullanılan yağın ve oleojelatörlerin çeşidine bağlı olarak değişebileceği görülmüştür [18, 19].

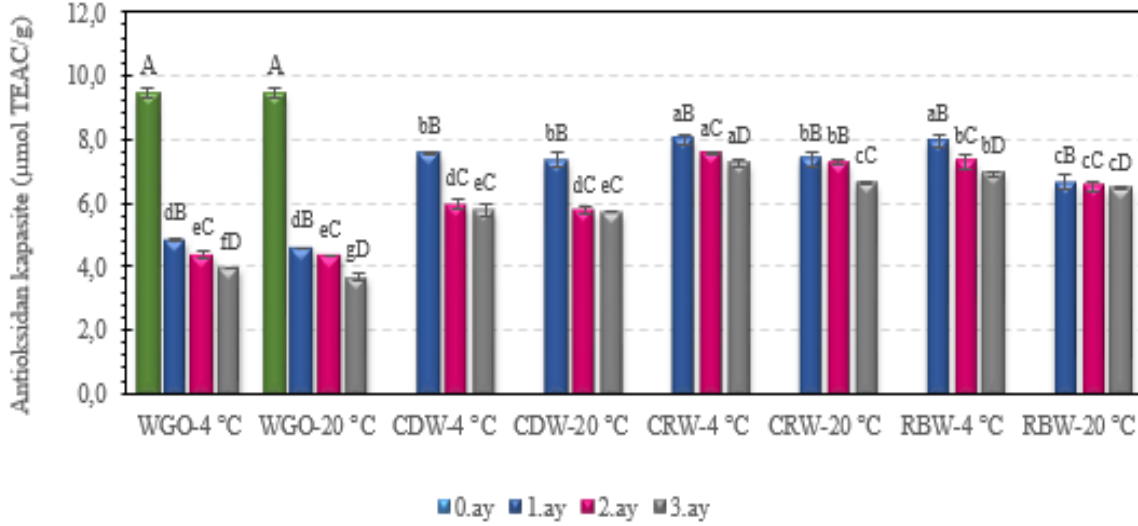
3.3. Toplam antioksidan kapasite

Antioksidanların vücudumuzdaki toksik özellikte olan serbest radikalleri azaltma ya da yok etme kabiliyetleri vardır. Oksidatif stresin sebep olduğu hastalıkları (kanser, kardiyovasküler hastalıklar vb.) ve serbest radikallerin olumsuz etkilerini önlemek için antioksidanların insan beslenmesinde rolü çok büyüktür. Antioksidanlar içerdikleri fitokimyasallarla oksidan ve antioksidan dengesini sağlayarak oksidatif stresin önüne geçmekte ve hastalıklara karşı koruyucu etki göstermektedir [20].

WGO ve üç farklı oleojelatör ile oleojel haline getirilen WGO'nun 2 farklı sıcaklıkta 3 ay boyunca depolanması sonucu antioksidan kapasitelerinde oluşan değişim Tablo 2 ve Şekil 2'de verilmiştir. Antioksidan kapasite açısından en avantajlı oleojellerin RBW-20 oleojelleri olduğu görülmektedir. Bu durum RBW'nin yapısında doğal olarak bulundurduğu antioksidan özelliğe sahip γ -orizanol bileşiğinden kaynaklanabilmektedir. WGO ve tüm oleojellerde 4 °C'deki değerlerin 20 °C'deki değerlere göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Ayrıca 90 günlük depolama sonunda WGO'nun antioksidan kapasitesinin üretilen diğer oleojellere göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Depolama sıcaklığına bakıldığında CDW-4 ve CDW-20 hariç ($p>0.05$) oleojeller arasında ve oleojellerin 4 °C'de ve 20 °C'deki antioksidan değerleri arasında anlamlı bir farklılık olduğu bulunmuştur ($p<0.05$). WGO'nun ABTS yöntemiyle antioksidan kapasitesinin incelendiği bir çalışmada WGO'nun antioksidan kapasitesi 6.43 $\mu\text{mol TEAC}/100\text{ g}$ olarak bulunmuş [21], benzer bir çalışmada 86.7 mg Trolox/ L yağ olarak bulunmuştur [22]. WGO'nun biyoaktif bileşenlerinin incelendiği bir çalışmada WGO'nun ABTS yöntemiyle yapılan antioksidan analizinde antioksidan kapasitenin 270 $\mu\text{mol Trolox/g}$ olduğu tespit edilmiştir [23]. Görüldüğü gibi literatürdeki sonuçlarla çalışmamızda elde edilen sonuçlar farklılık göstermektedir. Bu farklılıkların WGO'nun ekstraksiyon yöntemi, depolama şartları (sıcaklık-süre), depolama süresi boyunca meydana gelen oksidasyon bileşikleri, buğdayın yetiştiği iklim koşulları gibi nedenlerden dolayı olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca antioksidan aktivite analizi için hazırlanan ekstraktlarda değişik çözücüler kullanılması (metanol, etanol, hekzan, su vb.) ve bunların oranları da sonuçların farklı çıkmasına yol açmış olabilir. Bunların yanı sıra çalışmamızda WGO'nun oleojelasyon yöntemiyle yapılandırılması da WGO'yu bu bahsedilen biyoaktif bileşenlerin kaybına karşı koruyucu etki göstermiştir.

Tablo 2. Farklı oleojelatörler ile elde edilen WGO oleojellerinin depolama süresince antioksidan kapasitesindeki değişim ($\mu\text{mol TEAC/g}$) değişim.

Olejeller- Depolama sıcaklığı (°C)	Başlangıç	Depolama (gün)		
		30.	60.	90.
WGO-4	9.43 ± 0.14A	4.84 ± 0.02dB	4.37 ± 0.09eC	3.95 ± 0.02fD
WGO-20	9.43 ± 0.14A	4.60 ± 0.01dB	4.35 ± 0.02eC	3.69 ± 0.12gD
CDW-4	-	7.56 ± 0.04bB	5.94 ± 0.15dC	5.76 ± 0.19eC
CDW-20	-	7.35 ± 0.26bB	5.74 ± 0.12dC	5.72 ± 0.02eC
CRW-4	-	7.98 ± 0.15aB	7.53 ± 0.05aC	7.26 ± 0.11aD
CRW-20	-	7.37 ± 0.24bB	7.25 ± 0.08bB	6.62 ± 0.01cC
RBW-4	-	7.93 ± 0.20aB	7.28 ± 0.21bC	6.91 ± 0.08bD
RBW-20	-	6.65 ± 0.21cB	6.51 ± 0.14cC	6.46 ± 0.06cD

**Şekil 2.** Farklı oleojelatörler ile elde edilen WGO oleojellerinin antioksidan kapasitesinin değişimi ($\mu\text{mol TEAC/g}$). (Aynı kolonda gösterilen küçük harfler, farklı oleojel ve farklı depolama sıcaklığına bağlı olarak örnekler arasındaki farklılığı, büyük harfler ise aynı oleojel ve aynı depolama sıcaklığında depolama ayları arasındaki farklılığı göstermektedir ($p < 0.05$)).

3.4. Reolojik özelliklerin belirlenmesi

Reoloji, mekanik kuvvetlerin etkisi ile akışkan maddelerde oluşan akış ve deformasyonu inceleyen bir bilim dalıdır. Gıdaların fiziksel değişimlerinin ve reolojik karakterlerinin bilinmesi, proses ekipmanlarının doğru bir şekilde seçilmesini sağlar ve işlem verimliliğinin artmasına katkıda bulunur [24].

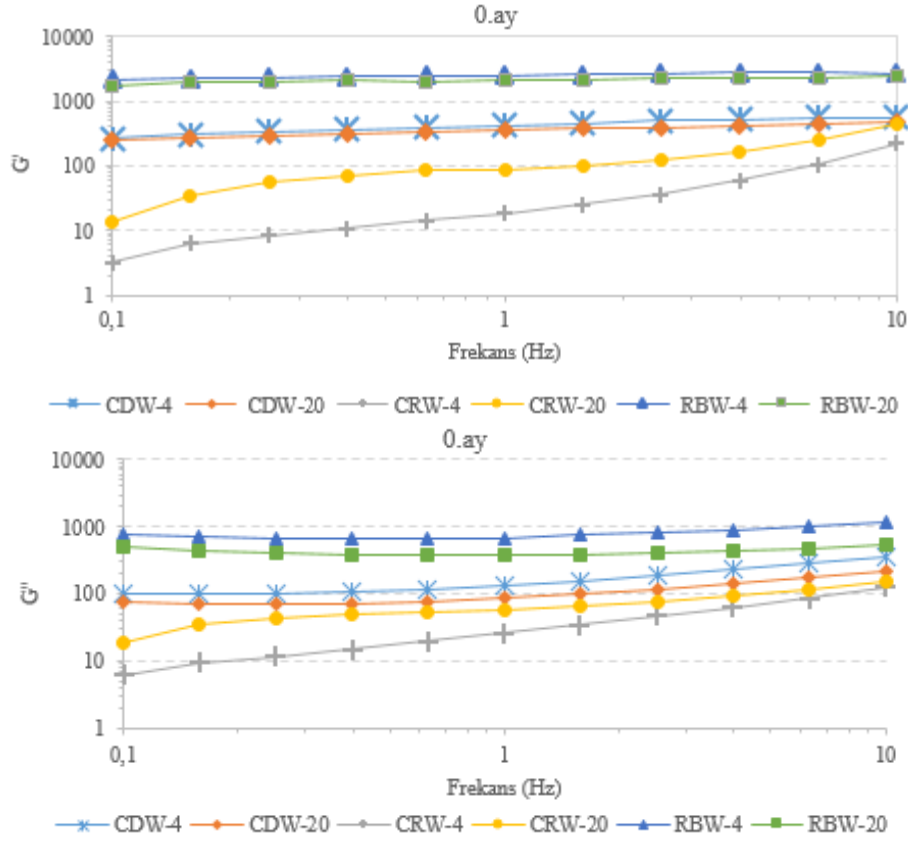
Bilindiği gibi depo modülü G' bir örneğin katı-benzeri viskoelastik özelliklerini ve kayıp modül G'' değeri likit-benzeri özelliklerini betimler. Bu iki parametre, deformasyon enerjisi ve içsel akışın ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Jel tipi örneklerde her zaman $G' > G''$ koşulunun sağlanması gerekmektedir.

Olejellerin reoloji sonuçları Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir. Tüm aylarda oleojellerin reoloji analizi sonuçlarına göre CDW ve RBW oleojellerinin depolama modüllerinin (G'), kayıp modüllerinden (G'') büyük olduğu görülmekte ve bu nedenle elastik bir yapıda olduğu ve jele ait özellikler taşıdığı görülmektedir. Ayrıca RBW oleojelinin depolama ve kayıp modülü CDW oleojelinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla RBW oleojelinin daha elastik bir yapıda olduğu saptanmıştır. CRW oleojellerinin ise en düşük depolama ve kayıp modülü değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

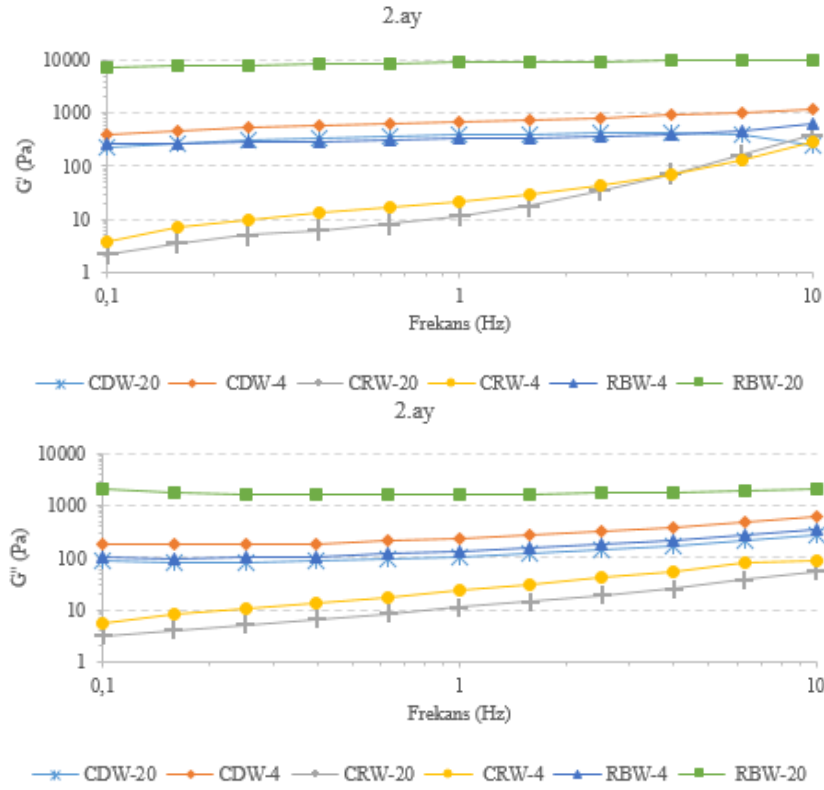
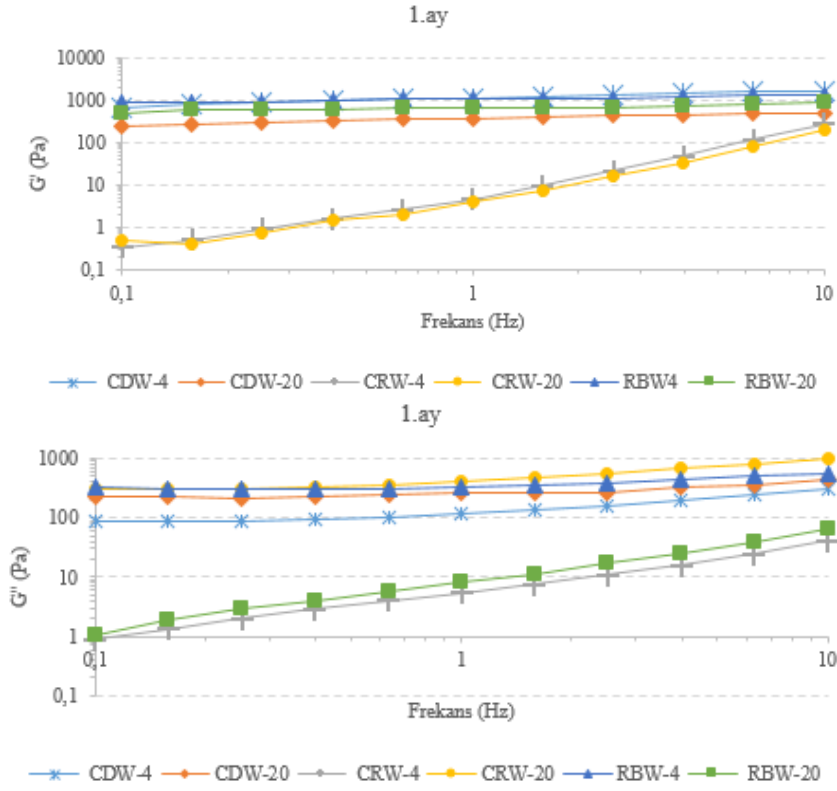
Bir çalışmada ayçiçek yağı ile hazırlanan ayçiçek vaksı, CRW ve RBW oleojellerinin frekansa karşı G' ve G'' değerleri incelenmiş ve G'' 'ye karşılık gelen değerlerin, G' değerlerinden yüksek olduğu ve örneklerin bir jel form gösterdiği belirtilmiştir [4].

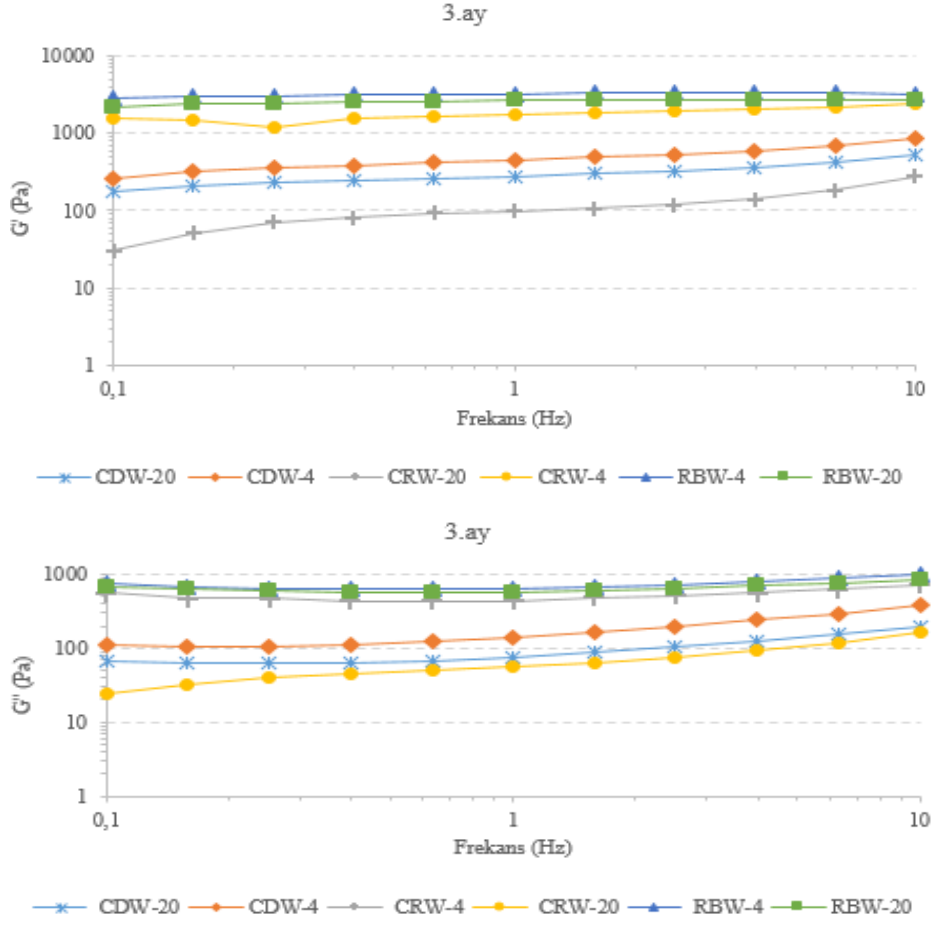
Literatürde yer alan sonuçlarda göz önünde bulundurulduğunda; bitkisel yağın oleojelator kullanılarak yapılandırılması, yağa viskoelastik yapı kazandırarak, gıda ürünlerinde katı yağa alternatif olarak kullanılabilmesini göstermiştir. Gıda endüstrisinde nihai ürünün (kek, hamur, dondurma) istenen kalitesini elde etmek için, ürünün formülasyonunun reolojik analizlerde elde edilen optimum özelliklere göre ayarlanmasının faydalı olabileceği düşünülmüştür. Tan delta değeri, viskoz modülüsün elastiklik modülüse oranıdır ve malzemeye uygulanan enerjinin malzeme içindeki kaybını temsil etmektedir [25]. Elastik özelliğin olmadığı, akışkanlık özelliğinin kuvvetli olduğu jeller için tan delta değeri 1'in üzerinde bir değere sahip olmaktadır. Tan delta değerinin artması akışkanlık karakterinin artması anlamına gelmektedir. Akışkanlık modülüsünün elastiklik modülüsüne göre daha yüksek olması durumunda, tan delta 1'in üstünde, tersi durumunda ise 1'in altında değerler almaktadır.

Oleojellerin faz açısı değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Elde edilen faz açısı ($\tan\delta$) değerleri incelendiğinde, faz açısı değerlerinin genellikle 1'den küçük olduğu saptanmıştır. Bu durum oleojellerin elastik özelliklerinin viskoz özelliğe göre daha baskın olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Oleojellerin 0.gün frekans tarama testi grafikleri.





Şekil 6. Oleojellerin 90.gün frekans tarama testi grafikleri.

Tablo 3. Oleojellerin faz açısı (Tan δ) değerleri.

Olejeller- Depolama sıcaklığı (°C)	Depolama (gün)			
	Başlangıç	30.	60.	90.
CDW-4	0.51 ± 0.07	0.55 ± 0.49	0.38 ± 0.13	0.35 ± 1.12
CDW-20	0.38 ± 0.75	0.49 ± 0.08	0.75 ± 0.87	0.31 ± 2.51
CRW-4	1.25 ± 0.12	1.23 ± 0.42	0.96 ± 0.18	0.29 ± 0.02
CRW-20	0.81 ± 0.28	1.42 ± 0.78	0.80 ± 0.26	0.6 ± 0.06
RBW-4	0.38 ± 0.53	0.55 ± 0.03	0.44 ± 2.58	0.22 ± 0.09
RBW-20	0.25 ± 0.41	0.47 ± 0.62	0.20 ± 2.98	0.25 ± 0.043

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, WGO'dan oleojelasyon tekniği ile üretilen oleojellerin, fizikokimyasal ve yapısal özellikleri ile kahvaltılık margarin/sürülebilir yağ olarak kullanım potansiyelleri incelenmiştir. Reoloji analizi sonuçlarına göre tüm oleojellerin (G')'lerinin (G'')'den büyük olduğu için elastik bir yapıda olduğu ve jele ait özellikler taşıdığı görülmektedir. Ayrıca en güçlü viskoelastik yapıya RBW oleojelinin sahip olduğu görülmüştür. Depolama süresi boyunca oleojellerin kalite özelliklerinin WGO'dan yüksek olduğu tespit edilmiştir. Antioksidan kapasite sonuçlarına göre, en yüksek antioksidan aktivitenin en yüksek RBW oleojellerinde olduğu saptanmıştır. Ayrıca olejel yapısının, WGO'nun antioksidan içeriğini koruduğu tespit edilmiştir. Üretilen oleojelin WGO'nun biyokimyasal özelliklerini ve besin kalitesini olumlu yönde etkilediği saptanmıştır. WGO'dan omega yağ

asitlerince zengin yağ asidi profili bozulmadan, yapılandırılmış yağ elde etmenin; tüketici sağlığı üreticilere yeni bir ürün sunulması ve literatürdeki boşluğun doldurulması bakımından katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmadan elde edilen veriler ile yağ sanayi için diğer yöntemlere kıyasla daha düşük maliyetli, depolamaya dayanıklı, oda sıcaklığında ve buz dolabı sıcaklığında kıvamlı, ancak tamamen likit yağ bazlı, trans yağ içermeyen alternatif ürünler sağlayabilecek yapılandırılmış yağ yönteminin uygunluğu ortaya konulmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma Kübra GÜLDEMİR (CANPOLAT)'ın doktora tez çalışmasından üretilmiş olup, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje No: FDK-2019-1910.

Kaynaklar

- [1] Mensink RP, Katan MB. Effect of dietary trans fatty acids on high-density and low-density lipoprotein cholesterol levels in healthy subjects. *The New England Journal of Medicine* 1990; 323: 439-445.
- [2] Mozaffarian D, Abdollahi M, Campos H, Houshiarrad A, Willett WC. Consumption of trans fats and estimated effects on coronary heart disease in Iran. *European Journal of Clinical Nutrition* 2006; 61(8): 1004-1010.
- [3] Marangoni AG, Garti N. An overview of the past, present and future of organogels, *Edible Oleogels: Structure and Health Implications*. AOCS Press, 2011.
- [4] Demirkesen İ. Farklı mumlarla oluşturulan oleojellerin reolojik ve tekstürel özellikleri. *Gıda* 2017; 42(1): 50-57.
- [5] Dassanayake L, Kodali D, Ueno S, Sato K. Physical properties of rice bran wax in bulk and organogels. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 2009; 86(12): 1163-1173.
- [6] Hwang HS, Singh M, Bakota EL, Kim S, Winkler-Moser J, Liu S. Margarine from organogels of plant wax and soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 2013; 90(11): 1705-1712.
- [7] Official and recommended methods of the American Oil Chemists' Society. *American Oil Chemists' Society, Champaign, Method Cd 8-53, Cd 18-90, Ce 2-66*, 1989.
- [8] Animal and vegetable fats and oils. Determination of solid fat content by pulsed NMR. ISO, 2012.
- [9] Papoti VT, Tsimidou MZ. Looking through the qualities of a fluorimetric assay for the total phenol content estimation in virgin olive oil, olive fruit or leaf polar extract. *Food Chemistry* 2009; 112(1): 246-252.
- [10] Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice-Evans C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine* 1999; 26(9-10): 1231-1237.
- [11] Oh IK, Amoah C, Lim J, Jeong S, Lee S. Assessing the effectiveness of wax-based sunflower oil oleogels in cakes as a shortening replacer. *LWT- Food Science and Technology* 2017; 86: 430-437.
- [12] Güven M. Farklı Buğday Çeşitlerinden Elde Edilen Ruşeym Yağlarının Yağ Asidi Dağılımları ve Antioksidan Aktiviteleri Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, 2012.
- [13] Shurpalekar SR, Rao PH. Wheat germ. *Advances in Food Research* 1977; 23: 187-304.
- [14] Ören D. Soğuk pres ve süper akışkan karbondioksit ekstraksiyon metodu ile elde edilen buğday ruşeym yağlarının fizikokimyasal özelliklerinin karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2013.
- [15] Kara S. Karnauba ve Balmumu Vaksları ile Hazırlanan Oleojellerin Dsc Ve Ft-İr Spektroskopisi ile Karakterizasyonu Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [16] Pehlivanoglu H, Demirci M, Toker OS. Rheological properties of wax oleogels rich in high oleic acid. *International Journal of Food Properties* 2017; 20(3): 2856-2867.
- [17] Vali SR, Ju YH, Kaimal, TNB, Chern YT. A process for the preparation of food-grade rice bran wax and the determination of its composition. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2005; 82(1): 57-64.
- [18] Toro-Vazquez JF, Morales-Rueda JA, Dibildox-Alvarado E, Charó-Alonso M, Alonzo-Macias M, González-Chávez MM. Thermal and textural properties of organogels developed by kandelilla wax in safflower oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 2007; 84(11): 989-1000.
- [19] Chopin-Doroteo M, Morales-Rueda JA, Dibildox-Alvarado E, Charó-Alonso MA, de la Peña-Gil A, Toro-Vazquez JF. The effect of shearing in the thermomechanical properties of kandelilla wax and kandelilla wax-tripalmitin organogels. *Food Biophysics* 2011; 6(3): 359-376.
- [20] Pathirana CM, Shahidi F. Importance of insoluble-bound phenolics to antioxidant properties of wheat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2005; 54(4): 1256-1264.
- [21] Zou Y, Gao Y, He H, Yang T. Effect of roasting on physico-chemical properties, antioxidant capacity and oxidative stability of wheat germ oil. *Food Science and Technology* 2018; 90: 246-253.
- [22] Velickovska SK, Letia GN, Čočevska M, Brühl L, Silaghi-Dumitrescu R, Mirhosseini H, Matthäus B. Effect of bioactive compounds on antiradical and antimicrobial activity of extracts and cold-pressed edible oils from nutty fruits from Macedonia. *Journal of Food Measurement and Characterization* 2018; 12(4): 2545-2552.
- [23] Rebolledo S, José GS, Luisa M, Sanz MT, Beltrán S, Solaesa ÁG. Bioactive compounds of a wheat bran oily extract obtained with supercritical carbon dioxide. *Foods* 2020; 9(5): 625.
- [24] Ibarz A, Barbosa-Cánovas GV. Unit operations in food engineering. CRC press, 2003.
- [25] Ehrenstein GW, Riedel G, Trawiel P. *Thermal Analysis of Plastics: theory and practice* München: Carl Hanser: Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 2004.

Koyunbaba Barajı'nın Hidrolojik Davranışının İncelenmesi

İsmael Ali MOHAMED¹, Eren YURDAKUL^{2*}, Cihan DOĞRUÖZ³

^{1,2,3} Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çankırı, Türkiye
¹ ismael.ali.med2@gmail.com, ² erenyurdakul@karatekin.edu.tr, ³ cihandogruoz@karatekin.edu.tr

(Geliş/Received: 17/04/2023;

Kabul/Accepted: 14/07/2023)

Öz: Koyunbaba Barajı, Çankırı ilinin Şabanözü ilçesinde yer alan ve sulama, evsel ve endüstriyel amaçlar için su kaynağı olarak hizmet veren bir su depolama tesisidir. Barajın su kaynağı potansiyeli, iklim değişikliği, arazi kullanım değişiklikleri ve diğer insan kaynaklı faaliyetler gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Su kaynaklarının en iyi şekilde kullanılmasını sağlamak için, barajın su mevcudiyetini doğru bir şekilde tahmin edebilecek ve su yönetimi kararlarına rehberlik edebilecek güvenilir bir hidrolojik model geliştirmek gerekmektedir. Bu çalışmada, Koyunbaba Barajı için bir hidrolojik model geliştirmek adına ArcGIS ve HEC-HMS kullanılmıştır. Çalışmada ilk adım, topografik veriler, arazi kullanım haritaları ve hidrolojik veriler de dahil olmak üzere barajın su toplama alanına ilişkin verilerin toplanmasını ve analizini içermektedir. Toplanan veriler, daha sonra ArcGIS ile bir sayısal yükseklik modeli (DEM) oluşturmak için kullanılmıştır. Bir sonraki adım ise geçmiş hidrolojik veriler kullanılarak HEC-HMS modelinin kalibrasyonunu ve doğrulanmasını içermektedir. Kalibre edilen model, kuraklık ve sel gibi farklı iklim senaryoları altında barajın su kaynağı potansiyelini simüle etmek için kullanılmıştır. Simülasyon sonucunda akışın pik zamanı, debisi ve hacim değerleri paylaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Hidrolojik modelleme, HEC-HMS simülasyonu, model kalibrasyonu, ArcGIS, su kaynağı.

Examination of Hydrological Behavior of Koyunbaba Dam

Abstract: Koyunbaba Dam is a water storage facility located in Şabanözü town of Çankırı city, Türkiye. The dam serves as a source of water supply for irrigation, domestic, and industrial purposes. The dam's water resource potential is subject to various factors such as climate change, land use changes, and other anthropogenic activities. In order to ensure the optimal utilization of water resources, it is necessary to develop a reliable hydrological model that can accurately predict the dam's water availability and guide water management decisions. In this study, ArcGIS and HEC-HMS were used to develop a hydrological model for Koyunbaba Dam. The first step involved collecting and analyzing data on the catchment area of the dam, including topographic data, land use maps and hydrological data. The collected data was then used to create a digital elevation model (DEM) using ArcGIS. The next step involved calibration and validation of the HEC-HMS model using historical hydrological data. The calibrated model was used to simulate the water resource potential of the dam under different climate scenarios such as drought and flood. Peak time, flow rate and volume values are given as a result of the simulation.

Key words: Hydrological modeling, HEC-HMS simulation, model calibration, ArcGIS, water resource.

1. Giriş

Su yönetimi, tarımdan insan tüketimine kadar tüm sektörlerde önemli bir zorluktur. Su kaynaklarının verimli kullanımını iyileştirmek ve çevresel sorunları azaltmak için barajlarda havza su kaynakları yönetimi küresel olarak giderek daha önemli hale gelmektedir [1]. Tüm su yönetimi uygulamalarının ayrılmaz bir parçası olan hidrolojik modelleme analizleri, karar vericilere bilimsel destek sağlamak ve mevcut finansman durumları için hedeflenen önlemlerde ve senaryo tabanlı tahminler kullanılarak problem çözmede hayati bir rol oynamaktadır. Ancak hidrolojik modeller mekânsal ve zamansal kısıtlamalarla sınırlıdır. Bu modeller, çıkıştaki yağışa bağlı olarak bir su havzasındaki akış bileşenlerini simüle etmektedir; bazıları akış zaman serileri oluşturabilirken diğerleri çıkış hidrografları sağlamak için yağış olaylarını işlemektedir [2].

HEC-HMS (Hidrolojik Mühendislik Merkezi – Hidrolojik Modelleme Sistemi) programı genel olarak havzaya dair hidrolojik modellemede kullanılan, literatüre katkı sunmuş bir programdır [3]. HEC-HMS kullanılarak yarı kurak bir bölgede hidrolojik modelleme çalışmasında, HEC-HMS modelinin güvenilirliğini ve verimliliğini değerlendirmek için 1978'den 2007'ye kadar kuzeybatı Çin'deki Hailiutu havzasındaki akış simülasyonu gerçekleştirilmiştir [4]. Bostanlı Havzası'ndaki yapısal taşkın kontrol önlemlerinin etkinliğini değerlendirmek için HEC-HMS modelini kullanmıştır. Yavuz vd. [5] tarafından yapılmış çalışmada, Yuvacık baraj rezervuarının yönetiminde yardımcı olmak üzere HEC-HMS hidrolojik modelinin bir tasarımı

* Sorumlu yazar: erenyurdakul@karatekin.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0009-0009-9391-5181, ² 0000-0001-9633-5005, ³ 0000-0002-7487-4822

uygulanmıştır. Oleyiblo ve Li [6] Çin'deki Misai ve Wan'an su havzaları için DEM (sayısal yükseklik modeli) ve yağış verilerine dayanarak bir HEC-HMS modeli oluşturmuştur. Bu model sel tahmininde başarıyla kullanılmıştır. Trambly [7] rezervuar yönetimini iyileştirmek amacıyla, Makhazine Barajı'nda gelen sellerin nicel tahmini için HEC-HMS modelini kullanmıştır. HEC-HMS modelinin, baraj gibi hidrolik yapıların davranışını modellemeyi mümkün kıldığını belirtmiştir. Modelde Makhazine Barajı, bir çıkışı ve depolanan su miktarını simüle etmeyi sağlayan bir rezervuarla temsil edilmiştir. Dourdour vd. [8] HEC-HMS modelini kullanarak Ain Sefra havzasının yarı kurak bölgesinde yağış-akış simülasyonu hazırlamıştır. Çalışmada, meteorolojik model için frekans fırtınası kullanılmış, kayıp oranını hesaplamak için SCS-CN (Toprak Koruma Servisi Eğri Numarası) seçilmiş ve akış oranını simüle etmek için SCS (Toprak Koruma Servisi) birim hidrograf yöntemi uygulanmıştır. Kalibrasyon ve doğrulama çalışmalarından sonra, simüle edilen pik deşarjların gözlenen değerlere çok yakın olduğu tespit edilmiştir.

ArcGIS, Esri tarafından geliştirilen güçlü bir Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) yazılımıdır ve son yıllarda hidrolojik modellemede giderek daha fazla kullanılmaktadır. ArcGIS'in sıklıkla kullanıldığı alanlardan biri de taşkın modellemesidir. Araştırmacılar, taşkın riskini analiz etmek [9], taşkın su baskınlarını modellemek [10] ve iklim değişikliğinin taşkın sıklığı ve yoğunluğu üzerindeki etkilerini simüle etmek [11] için ArcGIS programını kullanmaktadır. Ayrıca ArcGIS, sellerin mekânsal dağılımını analiz etmek [12], farklı sel yönetim stratejilerinin etkinliğini değerlendirmek [13] ve sel tehlikesi bölgelerini haritalamak [14] için kullanılmıştır.

Çalışmada, Koyunbaba Barajı baseni için pik deşarj hidrografi modellemesi HEC-HMS modeli kullanılarak geliştirilmiştir. Bu amaçla, ArcGIS kullanılarak havzanın fiziksel ve iklimsel özellikleri belirlenmiş ve daha sonra HEC-HMS modeli kullanılarak simülasyonlar oluşturulmuştur.

2. Çalışma Alanı

Koyunbaba Barajı, Ankara ve Çankırı illeri sınırında, Kızılırmak havzasının drenaj alanında yer almaktadır. Baraj, Terme Çayı beslemektedir. Baraj, Kalecik ilçesine bağlı Koyunbaba köyünün yaklaşık üç kilometre kuzeyinde 33°18'D – 40°10'K koordinatlarında inşa edilmiştir [15]. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası Şekil 1'de verilmektedir.

Kalecik ilçesinde Terme Çayı üzerinde inşa edilen 228 milyon m³ depolama kapasiteli Koyunbaba Barajı'nın 102.910 dekar araziye sulaması beklenmektedir. Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü tarafından 2011 yılında inşaatına başlanan baraj, 2014 yılında su tutmaya başlamıştır. Koyunbaba Barajı'nın teknik özellikleri Tablo.1'de verilmektedir. Baraj 51,32 m yüksekliğe ve 228 hm³ toplam depolama kapasitesine sahiptir.

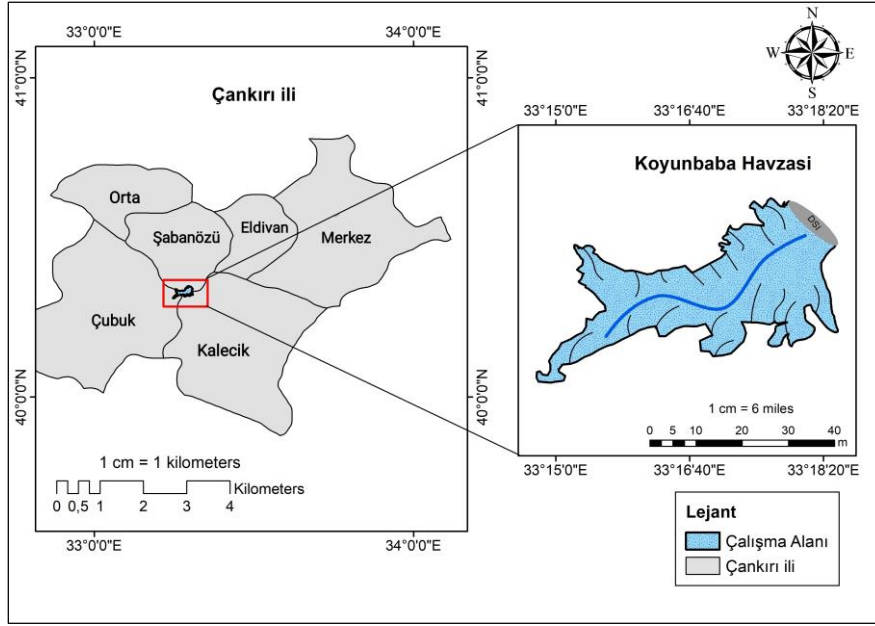
Tablo 1. Koyunbaba Barajı'nın teknik özellikleri.

Koyunbaba Barajı'nın teknik özellikleri	
Gövde tipi	Ön yüzü beton kaplı, kum-çakıl dolgu tipinde
Temelden yüksekliği	51,35 m
Dolgu hacmi	1,70 hm ³
Depolama hacmi	228 hm ³

3. Materyal ve Yöntem

3.1. Veriler

HEC-HMS hidrolojik modeli, ABD Ordusu Mühendisler Birliği'nin (USACE) Hidrolojik Mühendislik Merkezi (HEC) tarafından geliştirilmiştir. Model, infiltrasyon, birim hidrograflar ve hidrolojik yönlendirme gibi hidrolojik analiz prosedürlerini bir araya getirmektedir. HEC-HMS ayrıca evapotranspirasyon, kar erimesi ve toprak nemi hesabı gerektiren sürekli simülasyon yapabilmektedir.



Şekil 1. Çalışma alanı lokasyon haritası.

HEC-HMS, tüm havzayı hidrolojik ve hidrolik bileşenlerin birbirine bağlı bir sistemi olarak temsil ederek bir havzanın yağış-akış tepkisini simüle etmek için diğer girdilerle birlikte tasarım fırtınası heyetografını ve birim hidrograflarını kullanmaktadır. Ayrıca, çeşitli Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) verileriyle çalışmak ve hidrolik mühendisliğinde CBS teknolojisinin kullanımını kolaylaştırmak için tasarlanmıştır. HEC-HMS modelinde, hidrolik yapılar için farklı kısımları değerlendirmek amacıyla geçmiş veriler veya tasarım fırtınaları için oluşturulan veriler kullanılarak yağış tanımlanabilir. Kullanıcı tarafından belirlenen bir birim hidrograf, daha sonra yüzey akışını elde etmek için modelde kullanılabilir. HEC-Geo-HMS, ArcGIS yazılımının bir uzantısı olup, coğrafi verilerin türetilmesinde yardımcı olarak hizmet vermek üzere geliştirilmiştir [15]. HEC-Geo-HMS kullanılarak mekânsal analiz yapmak, alt havzaları ve akarsuları tanımlamak, hidrolojik modellere girdiler oluşturmak, raporlar hazırlamak ve arka plan harita dosyaları, raster parametre dosyaları ve doğrudan HEC-HMS modeline aktarılabilen toplu veya dağıtılmış havza modelleri oluşturmak mümkündür [16,17].

Bu çalışma için ihtiyaç duyulan ana veriler arazi kullanım bilgileri, sayısal yükseklik modeli, gözlemlenen yağış ve akış verileri ve havzanın hidrolik yapısının özellikleridir. Koyunbaba Barajı'nın gerekli özellikleri USGS (United States Geological Survey-ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu) web sitesinden dijital formatta elde edilmiştir. 1981-2021 yılları arasında Devlet Su İşleri tarafından bir meteoroloji istasyonu (D15A177) ve bir debi gözlem istasyonu eş zamanlı olarak işletilmiştir.

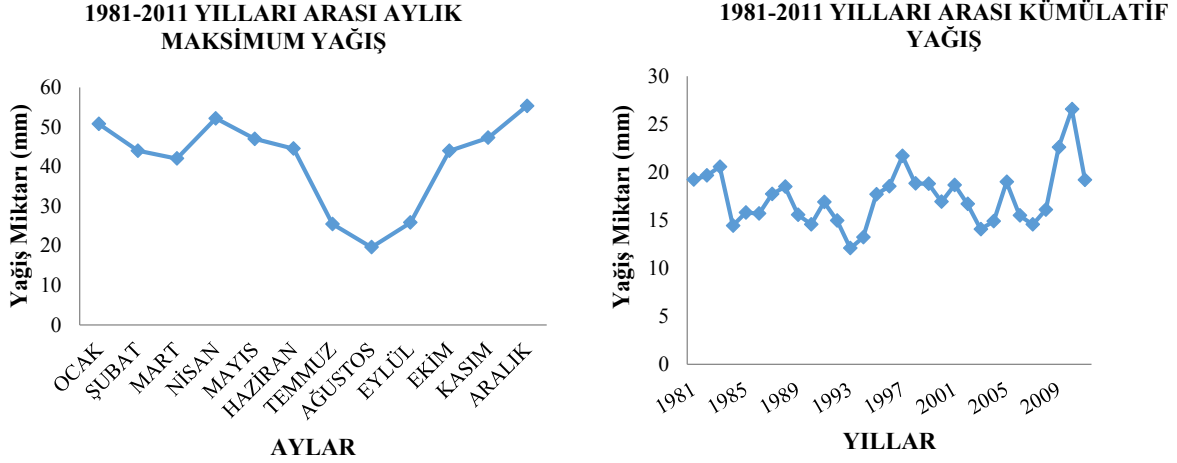
Tablo 2. Meteoroloji istasyonunun özellikleri.

İstasyon Adı	İşleten Kuruluş	Kotu(m)	Yıllık Ortalama Yağış(mm)	Gözlem Periyodu	Yıl Sayısı
D15A177	DSİ	778	106	1981-2021	40

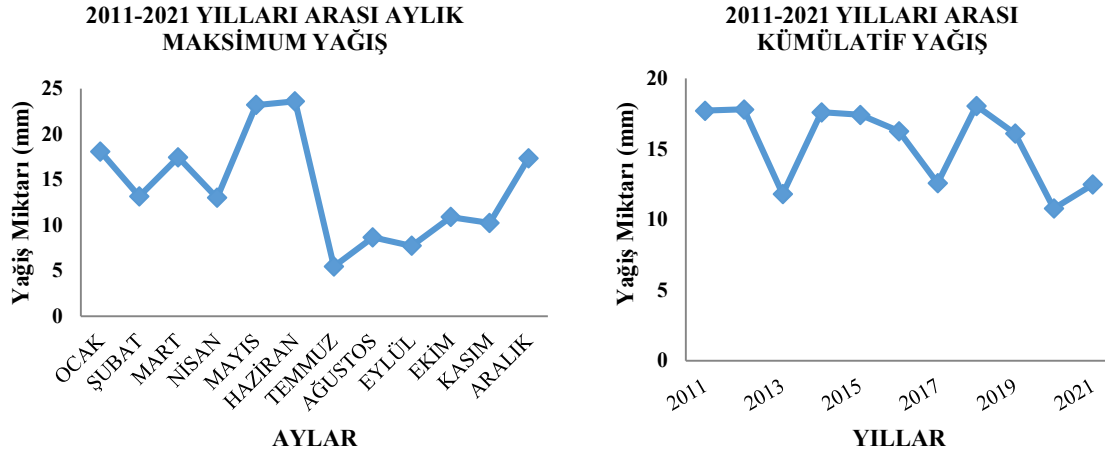
Koyunbaba'daki sıcaklık, yüzey akışı ve yağış miktarı aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Bu veriler AGİ (akım gözlem istasyonu) 'den elde edilmiştir. D15A177 AGİ'de yıllık ortalama yağış 1981-2011 yılları arasında 40,65 mm/gün ölçülmüştür. 15A177 AGİ'nin 1981-2011 yılları arasında aylık maksimum yağış miktarları Şekil 2'de ve 1981-2011 yılları arasında yıllık toplam yağış miktarları Şekil 3'te gösterilmiştir. D15A177 MGİ (meteoroloji gözlem istasyonu)'de yıllık ortalama sıcaklık 1981-2011 yılları arasında 8,20°C olarak ölçülmüştür. D15A177 MGİ'nin 1981-2011 yılları arası sıcaklık değerleri ve 2011-2021 yılları arası sıcaklık değerleri (°C) Şekil 4'te gösterilmiştir.

3.2. Yöntem

Bu çalışmada ilk adım ArcGIS kullanılarak havzanın nehir eğimi, havza merkezi, en uzun akış yolu, merkezi en uzun akış yolu ve havza drenaj alanı gibi fiziksel ve iklimsel özelliklerinin belirlenmesidir. ArcGIS model uzantısı olarak başlangıçta DEM kullanılmaktadır. Havzanın özellikleri ayrı ayrı ele alınmıştır. ArcGIS programı tarafından işletilen HEC-GeoHMS işlemleri sonucunda havzanın şeması oluşturulmuştur (Şekil 5).



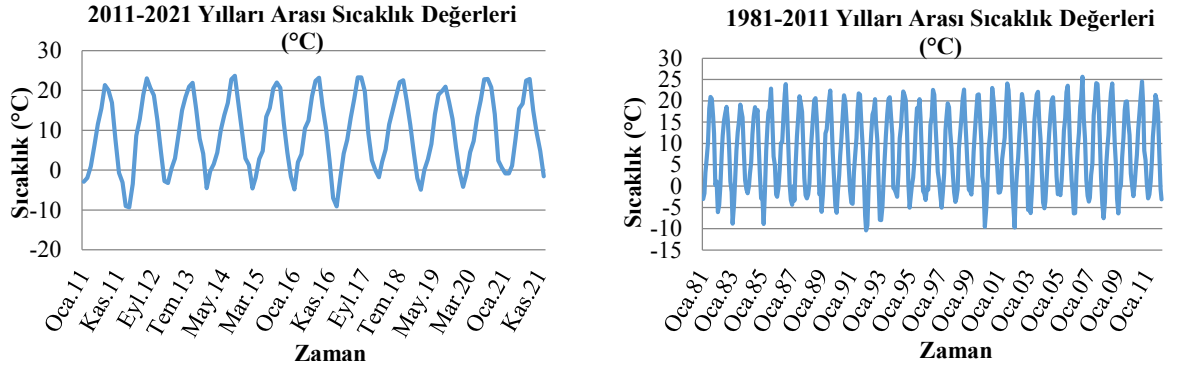
Şekil 2. 1981-2011 yılları arasında aylara göre maksimum yağış miktarları.



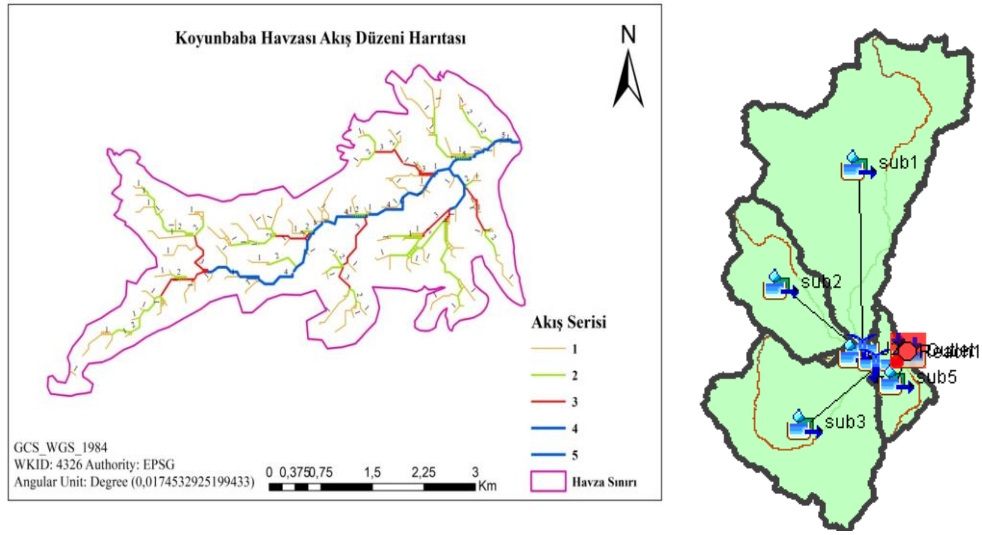
Şekil 3. 2011-2021 yılları arasında aylara göre maksimum yağış miktarları.

HEC-HMS model çalışması ile havzanın hidrolojik döngüsü kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Model için kullanılan yöntemler ile meteorolojik parametre ilişkilendirilerek debi tahmini oluşturulmuştur. Sonuçlar gerçek gözlemlerle karşılaştırılmış ve modelin performansı belirlenmiştir. HEC-HMS ile oluşturulan havza şeması Şekil 5'te görselleştirilmiştir.

Havzadaki kayıp oranlarını belirlemek için SCS-CN (Toprak Koruma Servisi Eğri Numarası) yöntemi seçilmiştir. SCS CN metodu, yağıştan kaynaklanan yüzeysel akış miktarını yaklaşık olarak belirlemek için etkili bir yöntemdir. Yöntem, yağış miktarı ve CN (eğri numarası) gerektirmektedir. CN, araştırma alanının hidrolojik toprak grubuna ve arazi kullanımına dayanmaktadır. Yağış miktarı ve CN katsayısına bağlı olarak oluşturulan modelden su miktarının hesabında yararlanılmıştır. Boyutsuz bir parametre olan CN, 0 ile 100 değerleri arasında değişmektedir. Ortalama CN yağış akış modeli Denklem 1 ve 2'de verilmiştir.



Şekil 4. 1981-2011 ve 2011-2021 yılları arası sıcaklık değerleri (°C).



Şekil 5. Havzanın akış düzeni ve fiziksel temsili.

$$Q = \frac{(P-la)^2}{(P-la)+S} \quad (1)$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (2)$$

Bu çalışma için CN değerleri çalışma alanının toprak haritasından belirlenmiştir. Bu değerler ArcGIS yazılımı kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 3. ArcGIS'dan çıkarılmış eğri numarası değerleri.

Adı	Bölge kodu	Alan (km ²)	CN (eğri sayısı)
Sub-1	1	370,83	82,091
Sub-2	2	113,24	81,915
Sub-3	3	220,97	80,185
Sub-4	4	7,1279	75,856
Sub-5	5	46,31	79,379

T_c (konsantrasyon zamanı), yüzey akışının su havzasındaki hidrolik olarak en uzak noktadan çıkışa ulaşması için gereken süredir. Çalışmada transform metot için lag time (gecikme süresi) Denklem 3 ile hesaplanmıştır. T_c ile lag time ilişkisini gösteren formül aşağıda verilmiştir.

$$T_c = \frac{l^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1.140V^{0.5}} \quad \text{Lag} = 0,6 \times T_c \quad (3)$$

Her bir havza için gecikme süresi hesaplamalarının sonuçları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Konsantrasyon süresi (T_c) ve lag time süresi hesaplamalarının sonuçları.

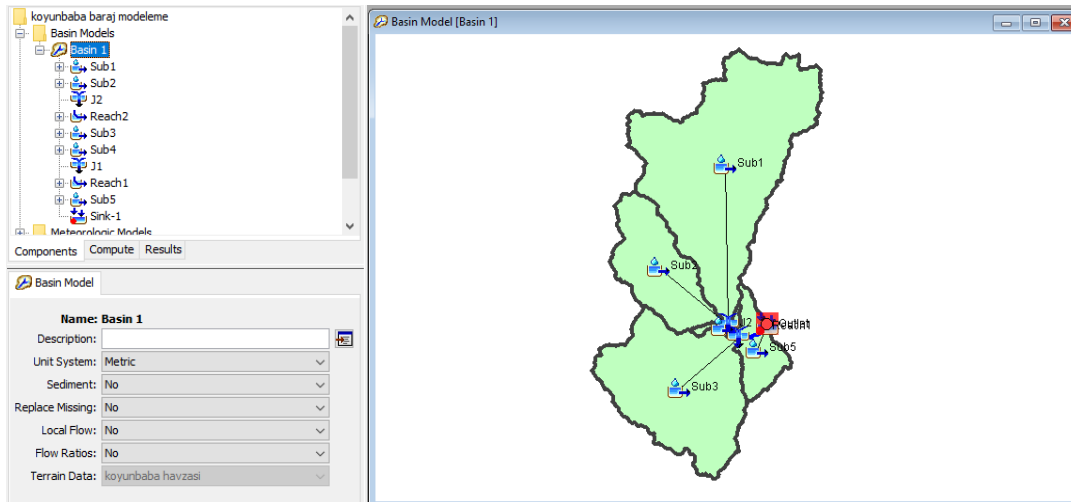
Name	CN	L (km)	Y (mm)	S	L (ft)	Y (%)	T_c	Lag (sa)	Lag (dk)
Sub-1	82,09	46,71	0,190	2,182	149894	19,02	6,251	3,750	225,04
Sub-2	81,91	25,22	0,261	2,208	80925	26,14	3,275	1,965	117,93
Sub-3	80,18	31,46	0,190	2,471	100944	18,98	4,848	2,909	174,54
Sub-4	75,86	7,53	0,126	3,183	24164	12,61	2,159	1,295	77,74
Sub-5	79,38	12,85	0,137	2,598	41233	13,68	2,861	1,716	103,00

Koyunbaba Barajı için HEC-HMS modelinde uygulanan yöntemler, girdi ve çıktı parametreleri aşağıda verilmiştir:

- Kayıp yöntemi (Loss Method): SCS Curve Number (Toprak Koruma Servisi Eğri Numarası)
- Dönüştürme yöntemi (Transform Method): SCS Unit Hydrograph (Toprak Koruma Servisi Birim Hidrografi)
- Yönlendirme yöntemi: Muskingum

4. Bulgular ve Tartışma

HEC-HMS, Koyunbaba havzasının çıkış noktasını baraj olarak kabul ederek havza alanını tanımlamak için kullanılmıştır. Sayısal Arazi Modeli'nin (DEM) HEC-HMS tarafından daha ileri düzeyde işlenmesi sonucunda Tablo 5 ve Şekil 6'da gösterildiği gibi beş alt havza, iki yönlendirme bölümü, iki bağlanma noktası ve havzanın ana fizyografik özellikleri elde edilmiştir.



Şekil 6. HEC-HMS ortamında havzanın fiziksel temsili (HEC-HMS, v.4.7.1).

Tablo 5'te 5 alt havzanın özellikleri verilmektedir. 1 numaralı alt havzanın 46,71 km²'lik bir alana sahip olduğu ve çok yüksek bir gecikme süresine sahip olduğu (225,05 dk) tablodan görülmektedir.

Tablo 5. Alt havzaların özellikleri.

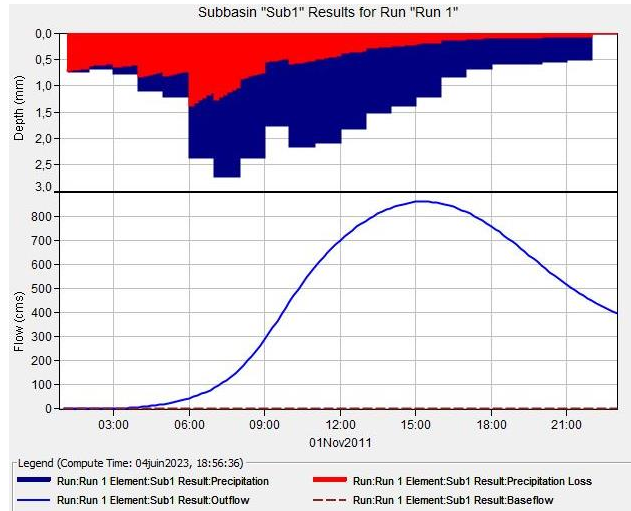
Alt havzalar	Yüzey alanı (km ²)	CN (eğri sayısı)	Lag-time (dk)	Eğim %
Sub-1	46,71	82,10	225,05	19,02
Sub-2	25,22	81,91	117,93	26,13
Sub-3	31,46	80,18	174,54	18,97
Sub-4	7,53	75,86	77,75	12,60
Sub-5	12,88	79,38	103,00	13,67

Şekil 7, birinci alt havzasının (Sub-1) taşkın hidrografını göstermektedir. Yükselme eğrisi 5 saat boyunca stabildir. Toprağın doygunluğunu ifade eden eğrinin hızlı bir şekilde yükselmesinden sonra, saat 15.00'te pik noktasına 987,00 m³/s'lik bir akışla ulaşmaktadır. Bu havza 46,71 km²'lik bir alana sahiptir.

Şekil 8 ise ikinci alt havzasının (Sub-2) taşkın hidrografını göstermektedir. Yükselme eğrisi 5 saat boyunca stabildir, toprağın doygunluğu anlamına gelen eğrinin hızlı bir şekilde yükselmesinden sonra, saat 13:10'da pik noktasına 327,00 m³/s'lik bir akışla ulaşır. Bu havza 25,22 km²'lik bir alana sahiptir. SUB2 alt havzasının pik zamanı SUB1 alt havzasının pik zamanından 1 saat 50 dakika daha öncedir. Şekil 9, 10 ve 11'de SUB3, SUB4 ve SUB5 havzalarının taşkın hidrograflarını göstermektedir.

Şekil 12, çıkıştaki taşkın hidrografını göstermektedir. Simüle edilen akış 1834,00 m³/s düzeyindedir ve pik zamanı saat 20:40'ı işaret etmektedir. Bu durum, Koyunbaba Baraj havzasının 124,798 km²'lik geniş yüzeyinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 6'da belirtildiği üzere, maksimum 1834 m³/s akış, Koyunbaba havzasında özellikle yoğun yağış dönemlerinde önemli taşkınlar yaşanabileceğini göstermektedir. En yoğun saat olan 20:40 için 74 mm'lik akış hacmi, havzanın bu dönemlerde önemli miktarda su biriktirebileceğine işaret etmektedir.

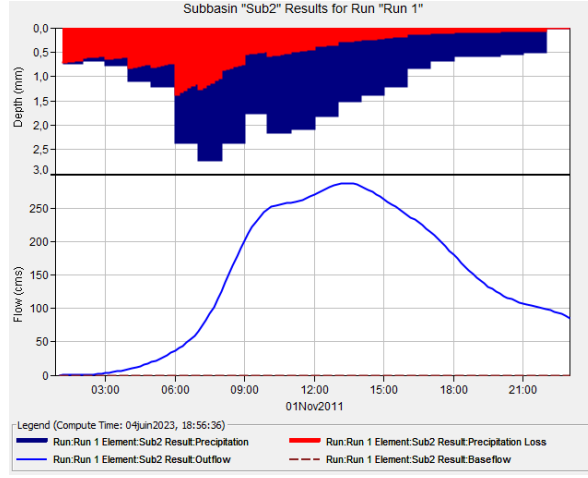


Şekil 7. Birinci alt havzada (Sub-1) gözlenen ve simüle edilen taşkın hidrografi.

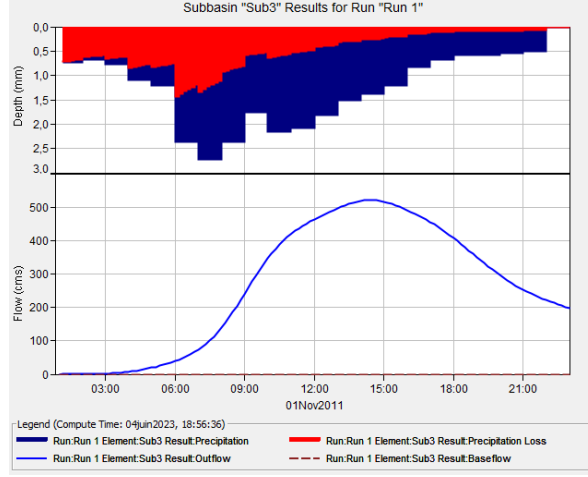
Tablo 6. Çıkıştaki akışın simülasyon sonuçları.

Pik Zamanı	Pik akış (m ³ /s)	Akış hacmi (mm)
20:40	1834,00	74,00

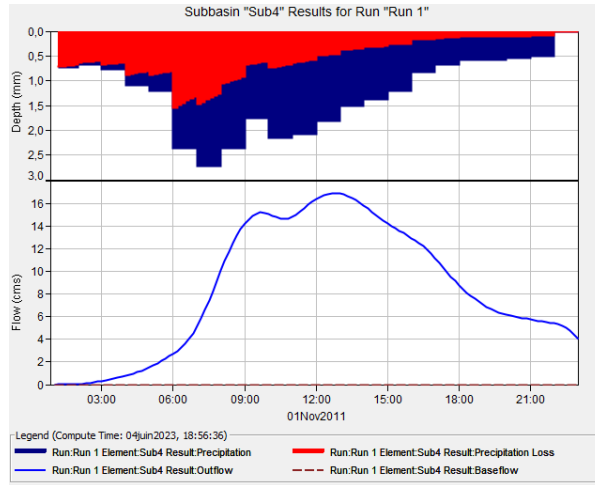
Koyunbaba Barajı'nın Hidrolojik Davranışının İncelenmesi



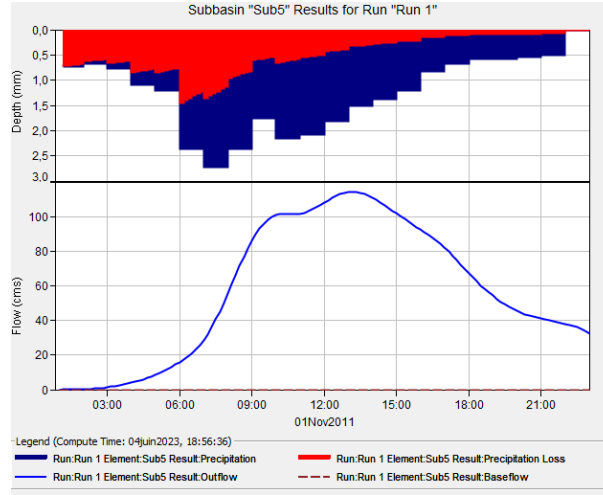
Şekil 8. İkinci alt havzada (Sub-2) gözlenen ve simüle edilen taşkın hidrografı.



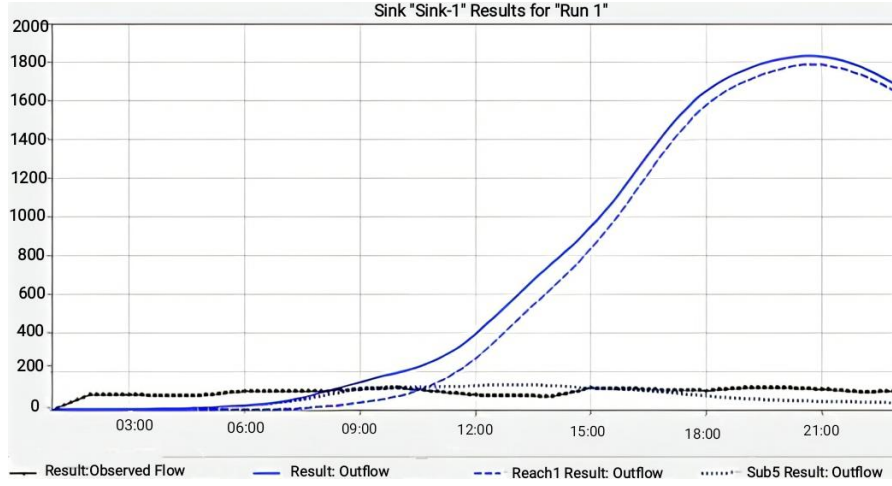
Şekil 9. Üçüncü alt havzada (Sub-3) gözlenen ve simüle edilen taşkın hidrografı.



Şekil 10. Dördüncü alt havzada (Sub-4) gözlenen ve simüle edilen taşkın hidrografı.



Şekil 11. Beşinci alt havzada (Sub-5) gözlenen ve simüle edilen taşkın hidrografı.



Şekil 12. Basen çıkışında gözlemlenen pik deşarj hidrografı.

4.1 Model kalibrasyonu

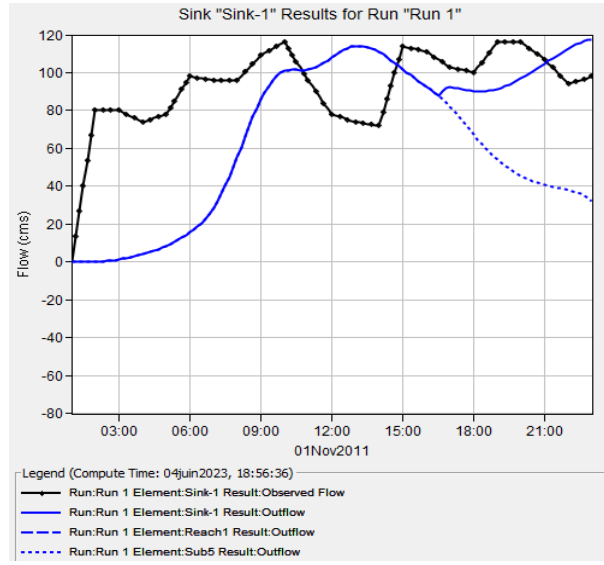
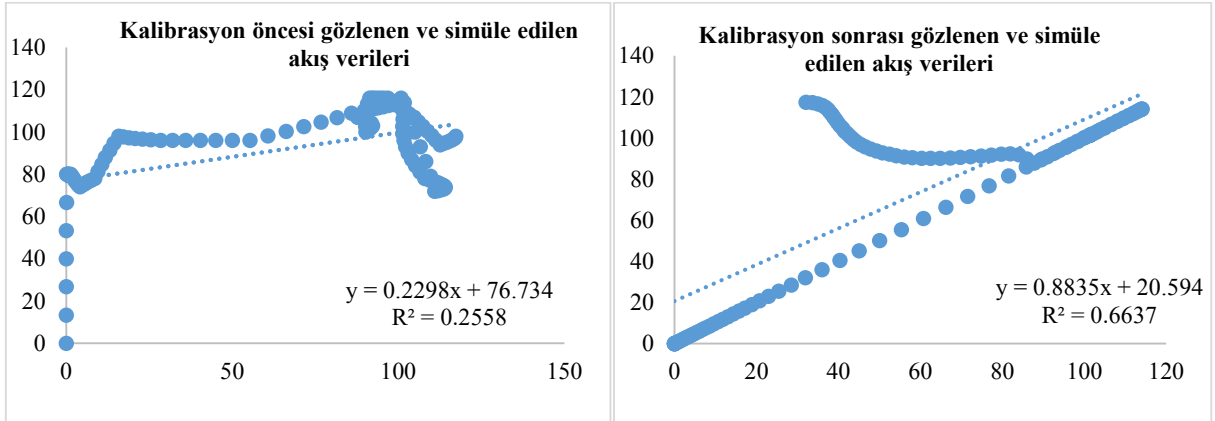
Model, Toprak Koruma Servisi Eğri Numarası (SCS CN) yöntemi kullanılarak kalibre edilmiştir. SCS CN yönteminde eğri sayısı ve Toprak Koruma Servisi birim hidrografı (SCS UH) dönüşüm yöntemindeki gecikme süresi hassas parametreler olarak belirlenmiş ve kalibrasyon bu değerlere göre yapılmıştır. Sonuç Tablo 7, 8, ve Şekil 13 ve 14'te özetlenmiştir.

Tablo 7. SCS CN kaybı yöntemi için kalibrasyon sonucu.

Ölçü	Simülasyon	Gözlenen	Fark
Toplam hacim (mm)	7,48	9,76	2,28
Pik akış (m ³ /s)	117,4	116,0	1,40
Pik zamanı	1 Kasım 2011,23:00	1 Kasım 2011,10:00	

Tablo 8. SCS CN kayıp oranı yöntemine göre kalibre edilmiş model parametreleri.

Alt havza	Eğri Numarası (CN)	Gecikme Süresi (Lag time-dk)
Sub-1	73,88	202,54
Sub-2	73,72	106,14
Sub-3	72,17	157,09
Sub-4	68,27	69,97
Sub-5	71,44	92,70

**Şekil 13.** Kalibrasyondan sonra SCS CN için simüle edilen ve gözlemlenen akış verileri.**Şekil 14.** Kalibrasyondan öncesi/sonrası gözlenen ve simüle edilen akış verilerinin korelasyonu.

SCS CN yöntemi kullanılarak HEC-HMS'de kalibre edilen hidrolojik model, 117,4 m³/s'lik bir pik deşarj ve 7,48 mm'lik bir hacim hesaplanan sonuçlar vermiştir. Gözlenen akışın pik deşarjı 116,0 m³/s ve hacmi 9,76 mm'dir. RMSE (Kök Ortalama Karekök Hatası) standart sapması 2,2 olup hesaplanan ve gözlenen değerler arasında bir fark olduğunu gösterirken Nash-Sutcliffe katsayısı 0,46 olup orta düzeyde bir uyum olduğunu göstermektedir. Modelin doğruluğunu artırmak için daha fazla araştırma ve iyileştirme yapılması gerekmektedir.

5. Sonuç

HEC-HMS kullanılarak geliştirilen hidrolojik model, havzadaki su akışını simüle ederek çevredeki değişikliklerden nasıl etkilenileceğine yönelik sonuçlar almamızı sağlamıştır. Model, yağış ve arazi kullanımı gibi çeşitli faktörlere ilişkin verilerin girilmesiyle suyun havza boyunca hareketini simüle etmiştir. Model, baraja akan su miktarını, taşkın olayları sırasında en yüksek akış hızını ve hacmini öngörmemizi sağlamıştır. 1834 m³/s'lik maksimum debi, Koyunbaba havzasında yoğun yağış dönemlerinde önemli taşkınlar yaşanabileceğini göstermektedir. Bu maksimum deşarjın yağış verilerine ve HEC-HMS modelinde kullanılan diğer değişkenlere dayanan bir tahmin olduğunu belirtmek önemlidir. Havzadaki gerçek koşullara bağlı olarak sonucun değişebileceği dikkate alınmalıdır.

En yoğun saat olan 20:40 için 74 mm'lik akış hacmi, havzanın bu dönemlerde önemli miktarda su biriktirebileceğini göstermektedir. Bu durum sel riskini artırabilir ve havzadaki arazilere ve altyapıya önemli ölçüde zarar verebilme potansiyeline sahiptir.

SCS CN kayıp oranı yöntemi kullanılarak HEC-HMS'de kalibre edilen hidrolojik model gerçeğe yakın sonuçlar göstermektedir, hesaplanan ve gözlemlenen değerler arasındaki farklar ise daha fazla iyileştirme ve araştırma yapılması gerektiğini göstermektedir. Tutarsızlıkların nedenlerinin ele alınması ve potansiyel iyileştirmelerin göz önünde bulundurulmasıyla, daha iyi su yönetimi kararları için modelin doğruluğu ve güvenilirliği artırılabilir.

Simülasyon sonuçları, Koyunbaba havzası için alınabilecek kararlarda kullanılmak üzere ilgili merciler tarafından kullanılabilir. Araştırma sonuçlarının, taşkın riskini en aza indirme ve bölgedeki insanları ve altyapıyı korumak konusunda alınacak kararlarda yardımcı bir unsur olacağı düşünülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Xiong, L, Guo S. A two-parameter monthly water balance model and its application. *J Hydrol* 1999; 216, 111-123.
- [2] Ogden FL, Garbrecht J, DeBarry, P A, Johnson LE. GIS and distributed watershed models. II: Modules, interfaces, and models. *Journal of Hydrologic Engineering* 2001; 6(6), 515-523.
- [3] Wang M, Zhang L, Baddoo TD. Hydrological Modeling in A Semi-Arid Region Using HEC-HMS. *Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering* 2016; 5(3), 105-115.
- [4] Gül GO, Harmancıoğlu N, & Gül A. A combined hydrologic and hydraulic modeling approach for testing efficiency of structural flood control measures. *Natural hazards* 2010; 54(2), 245-260.
- [5] Yavuz O, Uysal G, Sensoy A, Sorman AA, Akgun T, Gezgin T. Using HEC-HMS as a decision support system to minimize the downstream flooding risk in Yuvacık Dam basin. *Conf. on Water Observation and Information Systems*; 28 May 2012; Macedonia. 1-7.
- [6] Oleyiblo JO, Li ZJ. Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China. *Water Science and Engineering* 2010; 3(1), 14-22.
- [7] Trambly Y. Modelisation Des Crues Dans Le Bassin Du Barrage Makhazine 2012; Maroc.
- [8] Dourdour A, Bouanani A, Babahamed K. Hydrological modeling in semi-arid region using hec-hms model. Case study in Ain Sefra watershed, Ksour mountains (SW-Algeria). *Journal of Fundamental and Applied Sciences* 2017; 9(2), 1027-1049.
- [9] Ahiablame LM, Engel BA, Chaubey I, Fedders JM. Evaluating the impacts of urbanization on flooding in a rural-urban watershed using ArcGIS. *Environmental Modeling & Assessment* 2017; 22(3), 219-231.
- [10] Zhang J, Wu S, Li J, Li H, Li Y. A GIS-based flood inundation model for small-scale urban catchment with an inlet. *J Hydrol* 2019; 11(10), 205-215.
- [11] Mekonnen G, Yasuda H, Takeuchi K. Assessment of climate change impacts on the frequency and intensity of flood hazards in a tropical river basin in Ethiopia. *Hydrol Earth Syst Sci* 2018; 22(11), 5813-5828.
- [12] Gonzalez MR, Galarza M, Santillan D. Spatial and temporal distribution of floods in a tropical Andean basin. *Nat Hazard* 2017; 87(1), 183-201.
- [13] Sun H, Wang J, Wei J, Liu Y. Integrated flood risk assessment using multi-criteria decision-making methods and GIS: A case study in Luanhe River Basin. *China Environmental Earth Sciences* 2018; 77(3), 109.
- [14] Shahid S, Chung ES, Wang XJ. Mapping of flood hazard zones in the Jakarta Metropolitan area, Indonesia, using ArcGIS. *Nat Hazard* 2018; 90(3), 1223-1240.
- [15] Köle MM. Koyunbaba Barajı'ndan Akış Aşağıya Bırakılması Gereken Çevresel Akış Miktarının Değerlendirilmesi. *Coğrafi bilimler dergisi* 2014; 12(2), 149-159.
- [16] Feldman AD. Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual. Davis, USA: US Army Corps of Engineers (USACE) Hydrologic Engineering Center, 2000.
- [17] Bedient PB, Huber WC. *Hydrology and Floodplain Analysis*. NY, USA: Prentice Hall, 2019.

Motor Yataklarında Meydana Gelen Arızaları Tespit Etmek için Yeni Bir Tek Boyutlu Konvolüsyonel Sinir Ağı Modeli

Merve ERTARĞIN^{1*}, Özal YILDIRIM², Ahmet ORHAN³

¹ Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Munzur Üniversitesi, Tunceli, Türkiye

² Yazılım Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

³ Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ merveboydak@munzur.edu.tr, ² ozal@firat.edu.tr, ³ aorhan@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 04/05/2023;

Kabul/Accepted: 14/07/2023)

Öz: Elektrik motorları, çeşitli işlemleri otomatikleştirme ve kolaylaştırma yeteneklerinden dolayı endüstride önemli bir yere sahiptir. Elektrik motorlarında meydana gelen arızalar, cihazın veya sistemin çalışmasını etkileyebilmekte ve büyük maddi kayıplara neden olabilmektedir. Bu nedenle arızaların erken aşamada tespit edilmesi kritik bir öneme sahiptir. Arızaların tespitinde bilgisayar destekli yazılımlar kullanılması maliyetten ve zamandan tasarruf etme potansiyeli nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada, motor yatağı arıza türlerini tespit etmek için derin öğrenme tabanlı bir model önerilmiştir. Tek boyutlu konvolüsyonel sinir ağı (1D-CNN) mimarisi kullanan bu model ile sadece titreşim verileri kullanılarak arıza tipi tespiti sağlanmaktadır. Önerilen mimari, titreşim sinyallerini motor arıza teşhisinde hızlı ve güvenilir olarak kullanan etkin bir modeldir. Çalışma kapsamında farklı hız senaryoları kullanılarak eğitim ve test aşamalarının detaylı performans değerlendirmeleri sağlanmıştır. Genelleme kabiliyeti yüksek olan bu model ile, farklı senaryolarda yüksek doğruluk oranları ile arıza tespiti yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Derin öğrenme, konvolüsyonel sinir ağı, motor arıza tespiti.

A New One-Dimensional Convolutional Neural Network Model for Detecting Motor Bearing Failures

Abstract: Electric motors have an important place in industry due to their ability to automate and facilitate various processes. Faults that occur in electric motors may affect the operation of the device or system and cause great financial losses. It is therefore critical to detect faults at an early stage. The use of computer-aided software in the detection of faults comes to the fore due to its cost and time saving potential. In this study, a deep learning-based model is proposed to detect engine bearing failure types. With this model, which uses one-dimensional convolutional neural network (1D-CNN) architecture, fault type detection is provided by using only vibration data. The proposed architecture is an efficient model that uses vibration signals to diagnose engine faults quickly and reliably. Within the scope of the study, detailed performance evaluations of the training and testing stages were provided by using different speed scenarios. With this model, which has a high generalization ability, fault detection has been made with high accuracy rates in different scenarios.

Key words: Deep learning, convolutional neural network, motor fault detection.

1. Giriş

Elektrik motorları, birçok farklı tesisat ve cihazda, güç üretim tesislerinde kullanılır ve bu tesislerin çalışması için gereklidir. Elektrik motorları, endüstriyel makine ve ekipmanların çalışması için gerekli olan gücü sağlar. Ayrıca, elektrik makineleri, endüstriyel üretimde kullanılan sistemlerin ve cihazların çalışmasını otomatikleştirir ve bu sayede üretim hızını ve verimliliğini artırır. Endüstride üretim aşamasında birçok kullanım alanına sahip elektrik makineleri zaman zaman elektriksel ve mekaniksel arızalara maruz kalırlar. Meydana gelen bu arızalar üretimin devamlılığı konusunda sıkıntı yaratabilir. Sistemin dengesinin ve güvenilirliğinin sağlanması açısından, makina arızalarının yerinin ve şiddetinin erken tespit edilmesi önemlidir.

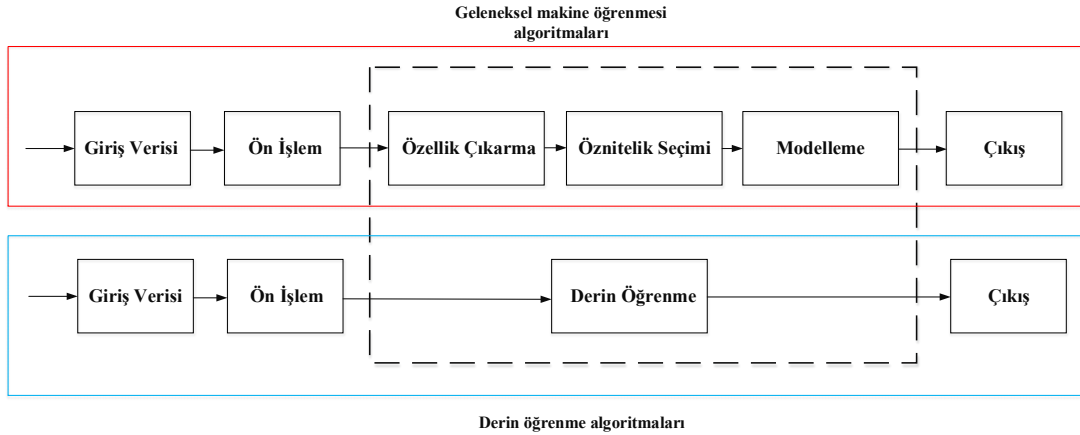
Son yıllarda, bilgisayar destekli yazılımların motor arızalarının tespitinde kullanılmasına yönelik yapılan çalışmalar önem kazanmıştır. Bu yazılımlar, motorun çalışma verilerini toplar ve bu verileri analiz eder. Analiz sonucunda, motorun hangi parçasında arıza olduğu tespit edilebilir. Bilgisayar destekli yazılımlar sayesinde arızanın tespiti ve tamir süreci çok daha hızlı ve etkin bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu yazılımlar, aynı zamanda

* Sorumlu yazar: merveboydak@munzur.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-4493-7260, ² 0000-0001-5375-3012, ³ 0000-0003-1994-4661

motorun önceden arıza olma olasılığını tahmin etme ve bu sayede arızayı önleyici önlemler alma imkânı da sağlar. Bu nedenle, motor arızalarının tespitinde bilgisayar destekli yazılımların kullanılması oldukça önemlidir.

Elektrik motorlarında medana gelen arızaları tanımlamak ve sınıflandırmak amacıyla frekans [1], akım [2, 3, 9, 13], titreşim [4, 7, 8, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 25, 26] gibi bazı giriş verileri kullanılır. Titreşim sinyalleri, mekanik sisteme ait önemli bilgiler sağlamasından ve kullanım kolaylığından dolayı arıza teşhisinde yaygın olarak tercih edilmektedir [4]. Genel olarak, giriş verisi boyutunun büyüklüğü arızaların doğru olarak belirlenmesi açısından avantaj sağlar [5]. Ancak, veri ne kadar büyükse o kadar karmaşık olduğu söylenebilir [6]. Yapay zeka tekniklerini makine sağlık durumlarını ayırt etmede kullanan akıllı arıza teşhis yöntemleri ile bu büyük ve karmaşık veriler kolaylıkla işlenebilir ve arızaların otomatik olarak tespit edilmesi sağlanabilir.

Akıllı arıza teşhis yöntemlerinden olan klasik makine öğrenmesi ile motor arıza tespiti, özellik çıkarımı ve arıza tespiti için faydalı özniteliklerin seçimi aşamalarını içerir. Dalgacık tabanlı öznitelik çıkarımı (Wavelet-Based Feature Extraction) [7, 8], Sınır analizi (Boundary Analysis) [9], Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (Short Time Fourier Transform-STFT) [10, 11], Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform-FFT) [19,22] öznitelik çıkarma yöntemlerinin bazılarıdır. Sınıflandırma için kullanılan sinyalleri karakterize etmek amacıyla doğru öznitelikleri seçmek kritik ve aynı zamanda zahmetlidir. Manuel olarak seçilen özellikler, motor yatak verilerini en iyi şekilde tanımlamayabilir [5]. Ayrıca, belirli bir sinyal için hangi özelliklerin çıkarılmasının en uygun olduğu sorusu bugüne kadar cevapsız kalmıştır [12, 13]. Derin öğrenme modelleri ile yapılan arıza tespitinde bu aşamalar otomatikleştirilmiş ve bir uzmana olan ihtiyaç minimuma indirilmiştir. Makine öğrenmesi teknikleri, önce problem ifadelerini farklı parçalara ayırmaya ve son olarak sonuçlarını birleştirmeye ihtiyaç duyarken derin öğrenme teknikleri uçtan uca öğrenme yapısına sahiptir. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları Şekil 1'de bir blok diyagramı ile gösterilmiştir.



Şekil 1. Geleneksel makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları

Sinir ağlarının bir çeşidi olan Konvolüsyonel Sinir Ağı (Convolutional Neural Network-CNN) görüntü ve ses işleme, biyomedikal gibi birçok alanda teşhis ve sınıflandırmada başarılı olduğu kanıtlanmış bir yapıdır [31]. Motor arızalarını tespit etmek için de araştırmacılar tarafından tercih edilen bir mimari olmuştur [14-19]. Shen ve ark. yaptıkları çalışmada fiziksel bilgiyi 1D-CNN modele dahil eden bir yaklaşım geliştirmişlerdir [16]. Özelleştirilmiş veri ve fizik güdümlü bir kayıp fonksiyonu kullanarak modeli gerçekleştirmiş değişik hata sınıfları ve seviyeleri için başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Hu ve ark. veri toplama için yenilikçi bir şekilde kablosuz sensör ağı kullanmıştır [17]. Toplanan zaman alanı sinyallerini, görüntü sinyallerine dönüştürmüş ve kablosuz ağ yapısını optimize ederek rulman arıza teşhisini CNN modeli kullanarak %99.8 doğruluk oranı ile gerçekleştirmiştir.

Derin İnanç Ağı (Deep Belief Network-DBN), bir tür çok katmanlı sinir ağıdır ve girdi verilerini çok sayıda katman arasında işleyerek öğrenme yapar. Makinalarda oluşan arızaların DBN ile etkili bir biçimde tespit edildiği araştırmacılar tarafından yapılmış çalışmalarla ispatlanmıştır [20-23].

Seyrek Otomatik Kodlayıcı (Sparse Auto Encoder-SAE), bir tür oto-kodlayıcıdır ve veri setlerinden özetler çıkararak bu veri setlerinin özelliklerini kodlar. [24,25]. [25]'teki çalışmada asenkron motor arıza teşhisi için SAE tabanlı bir derin sinir ağı yaklaşımı sunulmuştur. Bu yaklaşımda, SAE kısa ve öz özellikleri denetimsiz bir şekilde yüksek boyutlu verilerden otomatik olarak öğrenir. Özellik öğrenmenin sağlamlığını artırmak için SAE'nin

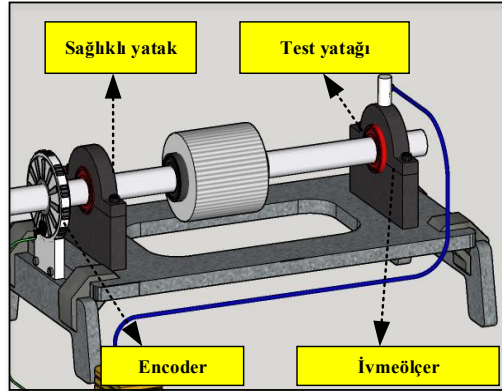
girişine bir gürültü giderici kodlama eklenmiştir. Elde edilen %97.61 doğruluk oranı, SAE tabanlı derin sinir ağının, asenkron motorun arıza teşhisi için iyi bir kararlılığa sahip olduğunu göstermektedir.

Uzun Kısa Süreli Bellek (Long short-term memory-LSTM) ağları, girdi verilerinin zamana göre değişim gösterdiği durumlarda özellikle etkilidir ve çok sayıda girdi verisini birbirleriyle bağlantılı olarak işleyebilir. [26]'daki çalışmada, üç eksenli ham titreşim verilerini kullanarak gerçek zamanlı motor arıza tespiti yapılmıştır. Önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında bu çalışma, titreşim verileri ile gerçek zamanlı yatak arıza tespiti için Raspberry-Pi mikrobilgisayarındaki derin öğrenme algoritmalarını kullanmıştır. Sınıflandırmada kullanılan LSTM modelinin performansını iki farklı veriseti kullanılarak test edilmiştir. %75.33 ve %88.08 doğruluk oranıyla motor yatakları sağlıklı ve arızalı olmak üzere sınıflandırılmıştır.

Bu çalışmada, motor yatak arızası teşhisi için derin öğrenme mimarilerinden olan CNN tabanlı yeni bir model tasarlanmıştır. Önerilen modelde giriş verisi olarak titreşim sinyalleri kullanılmıştır. Bu model ile iç yatak yüzeyi ve dış yatak yüzeyinde oluşan hatalar ile bilyelerde meydana gelen hataların tespiti sağlanmıştır. Önerilen modelin performansı farklı senaryolar oluşturularak test edilmiş ve arıza tespitinde kullanılacak genelleme yeteneği yüksek ve güvenilir bir model olduğu görülmüştür.

2. Motor Arıza Veri Seti

Çalışmada kullanılan motor arıza veri seti, Ottawa Üniversitesi tarafından oluşturulmuştur [27]. Sağlıklı, dış yatak yüzeyi arızası, iç yatak yüzeyi arızası, bilye arızası, iç yatak yüzeyi-dış yatak yüzeyi-bilye üzerindeki birleşik arızalar olmak üzere beş sınıfta veriler toplanmıştır. Veri seti oluşturulurken kullanılan deney şeması Şekil 2'de gösterilmiştir. Şaftı desteklemek için sola sağlıklı ve sağa test yatağı olmak üzere iki ER16K bilyalı rulman monte edilmiştir. Test yatağındaki titreşim sinyallerini toplamak amacıyla bir ivmeölçer (ICP ivmeölçer, Model 623C01) yerleştirilmiştir. Ayrıca şaftın dönüş hızını ölçmek amacıyla bir encoder kullanılmıştır.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan motor arıza veri setinin elde edilmesi için kurulan deney düzeneğine ait temsili bir gösterim.

Her veri kümesi için yatak sağlık durumu ve değişen hız durumu olmak üzere iki deney ayarı vardır. Veri setine ait kısaltmalarda bulunan *C1* sembolü sağlıklı duruma ait verileri, *C2* sembolü iç yüzey hatası olan duruma ait verileri ve *C3* sembolü dış yüzey hatası olan duruma ait verileri, *C4* sembolü bilye hatası olan duruma ait verileri ve *C5* sembolü iç yatak yüzeyi-dış yatak yüzeyi-bilye üzerindeki birleşik hatalı verileri içermektedir. Kısaltmalarda *A* sembolü artan hıza ait verileri, *B* sembolü azalan hıza ait verileri, *C* sembolü artıp ardından azalan hıza ait verileri ve *D* sembolü azalıp ardından artan hıza ait verileri içermektedir.

Deney süresince 200 kHz örnekleme frekansında 10 saniye boyunca titreşim sinyalleri ivmeölçer ile elde edilmiştir. Elde edilen toplam veride $200 \text{ kHz} \times 10 \text{ sn} = 2,000,000$ örnek bulunmaktadır. Bu çalışmada, orijinal sinyaller segmentasyon işleminden geçirilerek her sinyal için 0.01 saniyelik segmentler oluşturulmuştur. Böylece tek bir kayıttan 2000 (2,000,000/1000) örnek elde edilmiştir. Daha sonra, orijinal veri setindeki *C1-A-1*, *C1-A-2* ve *C1-A-3* verileri *C1A* olarak birleştirilmiş olup toplam 6000 örnek içermektedir. Aynı işlem diğer sağlık ve hız durumları için tekrarlanmıştır. Tablo 1'de, sağlık durumları ve değişen hız durumlarında alınan veriler ve bu verilere ait sayısal bilgiler gösterilmiştir.

Tablo 1. Her sınıf için segmentlere ayrılmış veri seti ve örnek sayıları.

Hız durumları		Artan hız	Azalan hız	Artıp ardından azalan hız	Azalıp ardından artan hız	Örnek Sayıları
Sınıflar		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	
Sağlıklı	<i>C1</i>	6000	6000	6000	6000	24000
İç yüzeyi hatası	<i>C2</i>	6000	6000	6000	6000	24000
Dış yüzey hatası	<i>C3</i>	6000	6000	6000	6000	24000
Bilye hatası	<i>C4</i>	6000	6000	6000	6000	24000
Birleşik hata	<i>C5</i>	6000	6000	6000	6000	24000
Toplam		30000	30000	30000	30000	120000

3. Materyal ve Metod

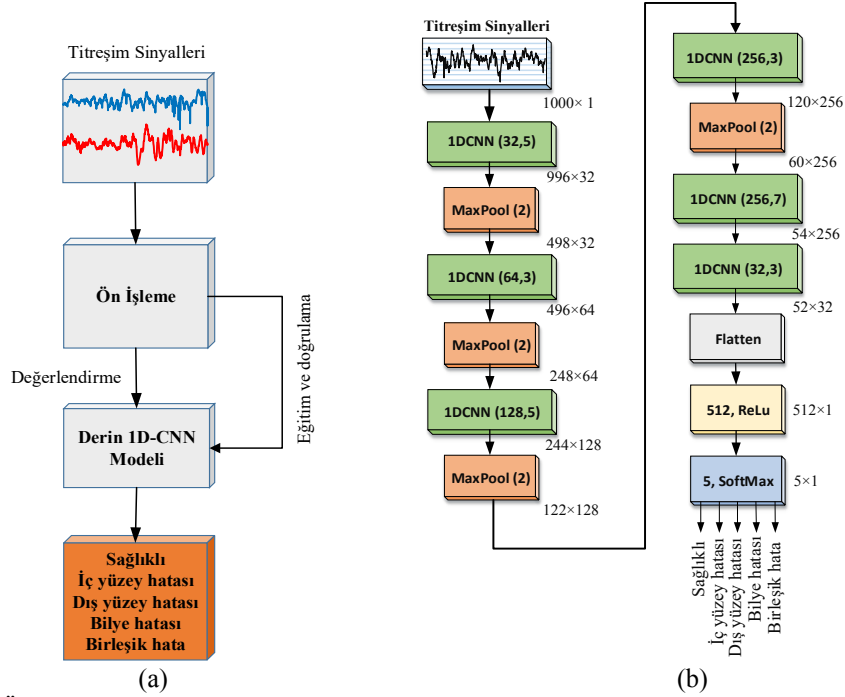
Bu çalışmada, motor sağlık durumunu değerlendirmek amacıyla 1D-CNN yapısı kullanılmıştır. Tasarlanan derin ağ modeli, öznelik çıkartma veya öznelik seçimi adımı gerektirmeden uçtan uca bir yapı ile otomatik olarak sınıflandırma sağlar [28-30]. 13 katmanlı olarak tasarlanan bu model farklı hız koşulları altında motor sağlık durumunu yüksek doğrulukla sınıflandırdığı için genelleme yeteneğinin yüksek olduğu söylenebilir. Şekil 3 (a)'da, çalışmada kullanılan yöntemin blok şeması verilmiştir.

3.1. Önerilen CNN modeli

Sinir ağlarının bir çeşidi olan CNN; konvolüsyon katmanı, aktivasyon katmanı ve havuzlama (pooling) katmanlarını içeren, birçok alanda teşhis ve sınıflandırmada başarılı olduğu kanıtlanmış bir yapıdır [31]. CNN modelinde, ağırlıkların paylaşılmasıyla tanı modellerindeki eğitim parametrelerinin sayısı azaltılarak yakınsama hızlandırılabilir ve aşırı öğrenme azaltılabilir [32]. Bu nedenlerden dolayı çalışma kapsamında CNN yapısı tercih edilmiştir.

Titreşim sinyalleri bir boyutlu olduğu için çalışma kapsamında 1D-CNN ağı tercih edilmiştir. Tasarlanan derin ağ modeli 13 katmandan meydana gelmektedir. Model, 1D Konvolüsyon (1DCNN), MaxPooling (MaxPool), flatten ve dense katmanlarına sahiptir. Şekil 3 (b)'de motor arıza tespiti için önerilen 1D-CNN modeline ait bir blok gösterim verilmiştir.

Modelin ilk katmanında giriş olan titreşim sinyallerine 5 çekirdek boyutlu 32 adet filtre ile 1D konvolüsyon gerçekleştirilir. 1D MaxPool katmanında, önceki konvolüsyon katmanından gelen özellik haritaları üzerinde maksimum değerler alınarak daha düşük boyutlu özellik haritası oluşturulur. Pooling katmanı, önceki katmana göre özellik haritalarının boyutunu küçülterek derin öğrenme yapısının hesaplama maliyetini azaltmak için eklenmiştir. Üçüncü katmanda çekirdek boyutu 3 olan 64 filtre ile konvolüsyon uygulanan sinyallere dördüncü katmanda tekrar 1D MaxPool uygulanarak kaydırma değişkeni değerine bağlı olarak boyut yarıya düşürülür. Bu işlemler sonraki 1DCNN ve 1D MaxPool katmanlarında tekrarlanır. Önerilen derin ağ, 11. katmanda bir flatten katmana sahiptir, böylece 10. katmandan elde edilen özellik haritaları, ağın sonraki katmanlarına girdi olarak uygun boyuta dönüştürülebilir. Bu katman, çok boyutlu girdi özellik vektörlerini tek boyutlu çıktı verilerine dönüştürür. Flatten katmandan elde edilen öznelikler, 512 birimlik dense katmanına beslenir. Bu dense katmanının aktivasyon fonksiyonu yaygın olarak kullanılan Doğrultulmuş Doğrusal Ünite (Rectified Linear Unit-ReLU) olarak belirlenmiştir. Ağın son katmanı olan 13. katmanda, softmax katmanı kullanılarak girdi sinyallerinin ait olduğu sınıfın tahmini gerçekleştirilir.



Şekil 3. (a) Önerilen uçtan uca öğrenme yapısını oluşturmak için akış şemasının gösterimi (b) Önerilen 1D-CNN modeline ait bir blok gösterim.

3.2. Deneysel kurulum

Bu çalışmada üç farklı durum ile önerilen CNN modelin motor arıza tespitindeki performansı test edilmiştir.

- **Durum 1:** Tüm verilerin %80'i eğitim; %10'u doğrulama ve kalan %10'u test için kullanılmıştır.
- **Durum 2:** Artan (A) ve azalan (B) hızda alınan tüm verilerin %90'ı eğitim, %10'u doğrulama için kullanılmıştır. Test aşaması için üç farklı durum söz konusudur. Test için ilk olarak, önce artıp sonra azalan hızdaki (C) veriler kullanılarak modelin performansı değerlendirilmiştir. İkinci olarak, önce azalıp sonra artan hızdaki (D) verilerle modelin doğruluğu test edilmiştir. Son olarak bu iki durum birleştirilerek test aşaması tamamlanmıştır.
- **Durum 3:** Üçüncü durumda önce artıp sonra azalan hızdaki (C) ve önce azalıp sonra artan hızdaki (D) tüm verilerin %90'ı eğitim, %10'u doğrulama için kullanılmıştır. Test aşaması için üç farklı durum söz konusudur. İlk olarak, artan hızdaki (A) veriler kullanılarak modelin performansı değerlendirilmiştir. İkinci olarak azalan hızdaki (B) verilerle modelin doğruluğu test edilmiştir. Son olarak bu iki durum birleştirilerek test aşaması tamamlanmıştır.

Yukarıda anlatılan durumlar Tablo 2'de özetlenmiştir.

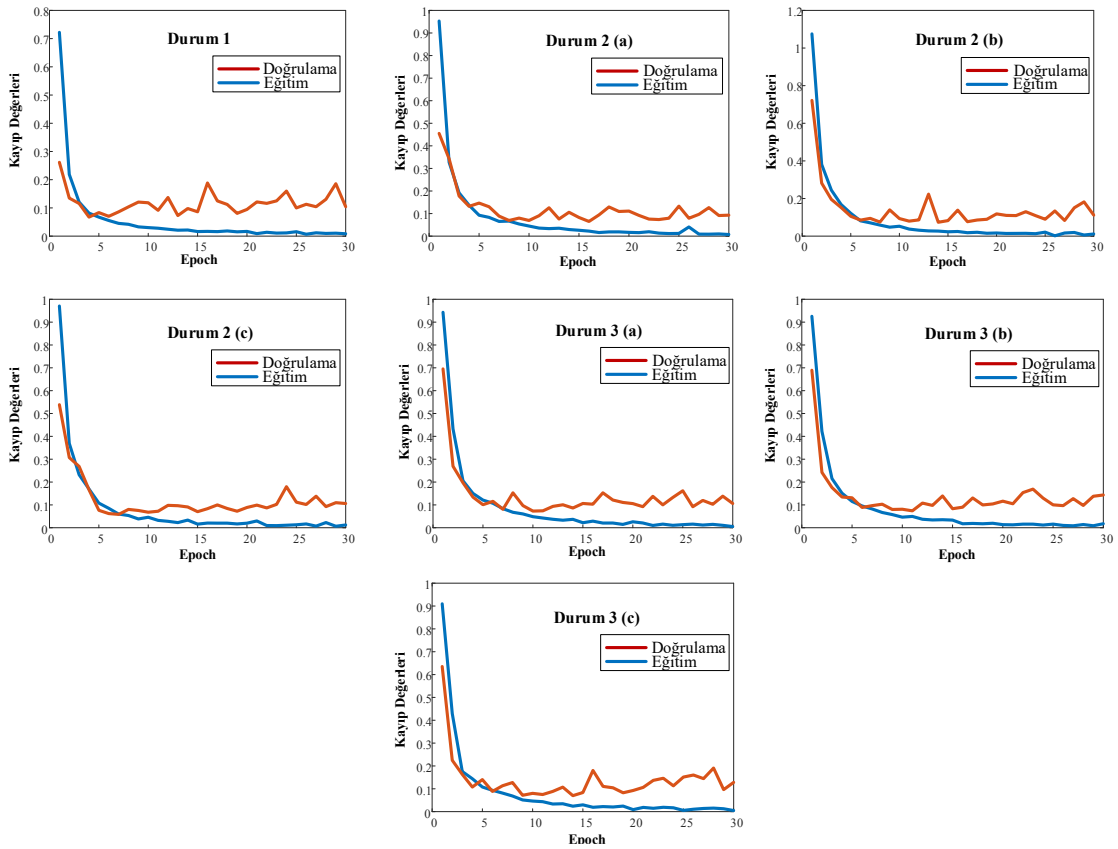
Tablo 2. Önerilen uçtan uca öğrenme yapısı için kullanılan verilerin dağılımı

Durumlar	Eğitim+Doğrulama	Test
Durum 1	A+B+C+D (%80 eğitim, %10 doğrulama)	A+B+C+D (%10 test)
Durum 2	A+B (%90 eğitim, %10 doğrulama)	(a) C (b) D (c) C+D
Durum 3	C+D (%90 eğitim, %10 doğrulama)	(a) A (b) B (c) A+B

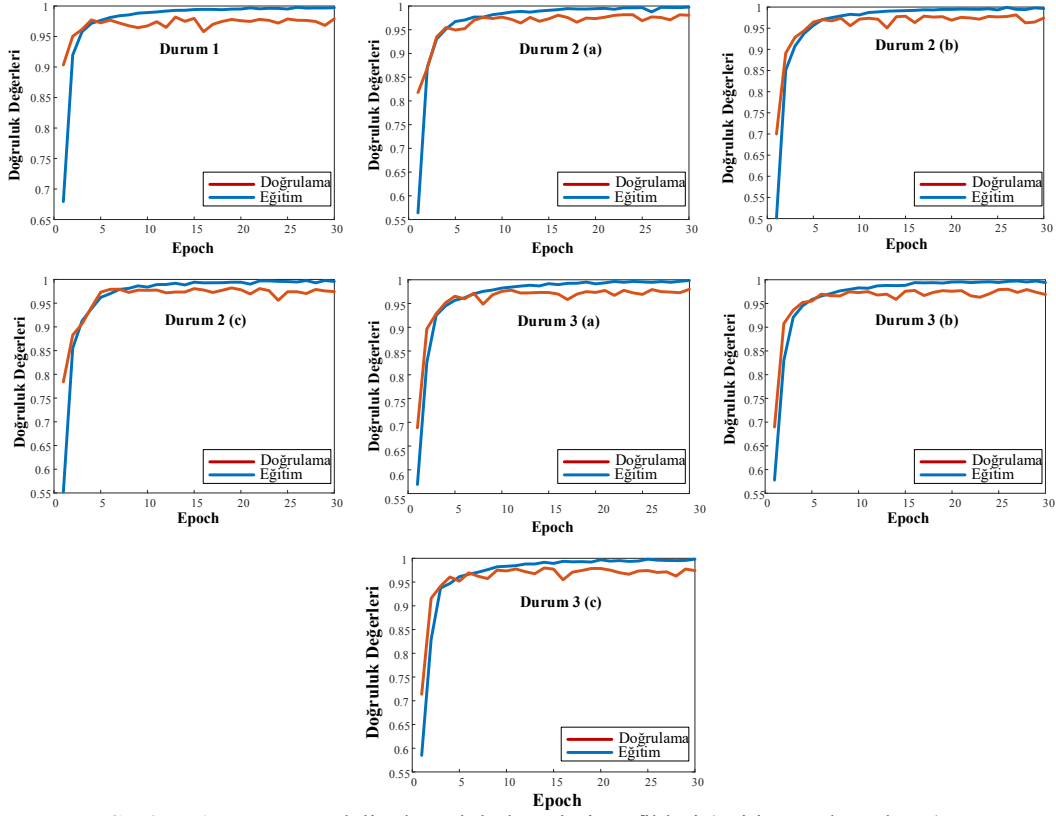
Çalışmada önerilen derin öğrenme modeli, Python programlama dili ve Keras derin öğrenme kütüphanesi kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmanın tamamı Intel Core i7-7700HQ 2.81 GHz CPU ve NVIDIA GeForce GTX 1050 grafik kartına sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Önerilen modelin hiperparametreleri için öğrenme oranı $1e-3$ olarak ayarlanmıştır, optimizasyon algoritması için “adam optimizer” ve kayıp fonksiyonu olarak “categorical cross entropy” tercih edilmiştir. 128 yığın boyutu ile 30 tur (epoch) boyunca sonuçlar alınmıştır.

3.3. Deneysel sonuçlar

Belirlenen tüm durumlar için deneysel çalışmalar hiçbir parametre değiştirilmeden aynı 1D-CNN modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4’te, 30 tur için modelin kayıp değerlerindeki değişiklikler verilmiştir. Bu grafiklere bakılarak veri setleri üzerinde modelin öğrenmesinin gerçekleştiği söylenebilir. Şekil 5, beş sınıflı verileri sınıflandırmak için önerilen modelin doğruluk grafiklerini göstermektedir. Performans grafiklerine bakıldığında modelin aşırı uyum sorunu olmadığı görülmektedir.



Şekil 4. 1D-CNN modelin kayıp değerleri grafikleri (eğitim ve doğrulama)



Şekil 5. 1D-CNN modelin doğruluk değerleri grafikleri (eğitim ve doğrulama)

Şekil 6, beş sınıflı verileri sınıflandırmak için önerilen modelin hata matrisini göstermektedir. Önerilen modelin %90.54 doğruluk oranı ile en düşük performans gösterdiği Durum 3 (a)'nın hata matrisi incelendiğinde, bilye arızasına sahip 6000 örneğin 2301'inin yanlış sınıflandırıldığı görülmektedir. Bu durumda, bilye hatasına sahip 2104 örnek iç yüzey hatasına sahip olarak etiketlenmiştir.

1D-CNN model en yüksek performansı %98.19 doğruluk oranıyla Durum 2 (a)'da göstermiştir. Model en iyi performansı birleşik hataya sahip verileri sınıflandırırken göstermiştir. Birleşik hataya sahip 6000 verinin yalnızca 67'sini yanlış sınıflandırmıştır. Bu durumda en fazla hata, iç yüzey hatasına sahip 95 veri birleşik hatayla karıştırılarak yapılmıştır.

Modelin performansını ayrıntılı olarak değerlendirmek için kullanılan bazı kriterler vardır. Hata matrisi kullanılarak hesaplanan bu değerler gerçek pozitif (TP), gerçek negatif (TN), yanlış pozitif (FP) ve yanlış negatif (FN) ile ilgilidir. Modele ait kesinlik değeri Denklem 1, duyarlılık değeri Denklem 2, F1-Score değeri Denklem 3, özgüllük değeri Denklem 4 ve doğruluk değeri Denklem 5'te verilen formüllerle hesaplanır.

$$\text{Kesinlik (\%)} = \frac{TP}{TP+FP} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Duyarlılık (\%)} = \frac{TP}{TP+FN} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{F1 - Score} = \frac{(\text{recall}) \times (\text{kesinlik}) \times 2}{(\text{recall}) + (\text{kesinlik})} \quad (3)$$

$$\text{Özgüllük (\%)} = \frac{TN}{TN+FP} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Doğruluk (\%)} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \times 100 \quad (5)$$

Yukarıdaki formüller kullanılarak hesaplanan performans değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

		Durum 1					Durum 2 (a)					Durum 2 (b)				
Gerçek	C1	2273	16	13	30	1	5909	36	24	31	0	4486	339	300	854	21
	C2	10	2428	0	13	2	30	5833	17	25	95	27	5747	23	165	38
	C3	22	8	2392	6	17	12	0	5929	2	57	53	22	5748	106	71
	C4	31	16	2	2261	9	62	39	2	5854	43	33	20	4	5918	25
	C5	1	21	27	15	2386	1	4	50	12	5933	0	3	63	26	5908
		Tahmin edilen					Tahmin edilen					Tahmin edilen				
		Durum 2 (c)					Durum 3 (a)					Durum 3 (b)				
Gerçek	C1	10826	649	59	464	2	5792	14	13	169	12	5760	1	4	232	3
	C2	77	11817	11	79	16	18	5906	5	32	39	230	5545	0	211	14
	C3	125	66	11676	88	45	43	5	5900	1	51	473	43	5409	13	62
	C4	164	184	10	11625	17	128	2104	11	3699	58	469	110	16	5325	80
	C5	30	112	290	207	11361	16	29	37	44	5874	19	39	72	16	5854
		Tahmin edilen					Tahmin edilen					Tahmin edilen				
		Durum 3 (c)														
Gerçek	C1	11192	16	10	767	15										
	C2	143	11198	1	612	46										
	C3	379	45	11340	46	190										
	C4	382	1898	30	9323	367										
	C5	10	43	51	120	11776										
		Tahmin edilen														

Şekil 6. Önerilen modelin hata matrisleri

Tablo 3. Önerilen 1D-CNN modelin performans değerleri

Durumlar	Koşullar	Kesinlik (%)	Duyarlılık (%)	F1-Skor (%)	Özgüllük (%)	Doğruluk (%)
Durum 1	-	%97.82	%97.82	%97.82	%99.45	%97.83
Durum 2	(a)	%98.20	%98.19	%98.19	%99.54	%98.19
	(b)	%93.21	%92.69	%92.52	%98.17	%92.69
	(c)	%95.61	%95.50	%95.50	%98.87	%95.51
Durum 3	(a)	%91.97	90.57	%90.24	%97.64	%90.54
	(b)	%93.40	%92.97	%93.04	%98.24	%92.98
	(c)	%91.45	%91.38	%91.32	%97.84	%91.38

Bu çalışmada aşağıdaki sınırlamalar mevcuttur:

- Kullanılan veri seti içerisindeki kayıtlar sınırlı olduğu için segmentasyon ile veri sayısı artırılmıştır. Daha fazla kayıt elde edilmesi durumunda daha yüksek ve güvenilir doğruluk değerlerine ulaşılabilir.
- Kullanılan derin öğrenme modellerinin eğitimleri GPU gibi yüksek özellikte donanıma ihtiyaç duymaktadır.

4. Sonuç

Bu çalışmada, bir motordaki yataklardan farklı hızlar altında alınan titreşim verileri ile beş sınıfa kapsayan bir sınıflandırma yapmak amacıyla 1D-CNN model önerilmiştir. Önerilen yöntem uçtan uca öğrenme yapısında olduğundan öznitelik çıkarımı veya seçimi süreçleri için herhangi bir uzman müdahalesine gerek duymadan otomatik olarak arıza tespiti sağlamıştır. Farklı durum ve koşullar oluşturularak model performansı değerlendirilmiş ve önerilen modelin %90.54 ile %98.19 arasında doğruluk oranlarıyla motor yatak ve bilyelerindeki arıza tespitini sağladığı görülmüştür. Bu doğruluk oranları, modelin motor arızası tespitinde kullanılabilir etkin bir yapıda olduğunu göstermektedir. 1D-CNN ile titreşim verilerinin analizi ve sınıflandırılmasının son derece basit olması ve sonuçların verimliliği bu modelin farklı motorlardan farklı yataklar için alınan sinyallerde uygulanabilirliğini denetlemek için motive edicidir.

Kaynaklar

- [1] Jia F, Lei Y, Lin J, Zhou X, Lu N. Deep neural networks: A promising tool for fault characteristic mining and intelligent diagnosis of rotating machinery with massive data. *Mechanical systems and signal processing* 2016; 72: 303-315.
- [2] Kao IH, Wang WJ, Lai YH, Perng JW. Analysis of permanent magnet synchronous motor fault diagnosis based on learning. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2018; 68(2): 310-324.
- [3] Hoang DT, Kang HJ. A motor current signal-based bearing fault diagnosis using deep learning and information fusion. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2019; 69(6): 3325-3333.
- [4] Jing L, Zhao M, Li P, Xu X. A convolutional neural network based feature learning and fault diagnosis method for the condition monitoring of gearbox. *Measurement* 2017; 111: 1-10.
- [5] Neupane D, Seok J. Bearing fault detection and diagnosis using case western reserve university dataset with deep learning approaches: A review. *IEEE Access* 2020; 8: 93155-93178.
- [6] Akbani R, Kwek S, Japkowicz N. Applying support vector machines to imbalanced datasets. In: *European conference on machine learning*; September 2004; Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 39-50.
- [7] Lou X, Loparo KA. Bearing fault diagnosis based on wavelet transform and fuzzy inference. *Mechanical systems and signal processing* 2004; 18(5): 1077-1095.
- [8] Zhu H, He Z, Wei J, Wang J, Zhou H. Bearing fault feature extraction and fault diagnosis method based on feature fusion. *Sensors* 2021; 21(7): 2524.
- [9] Aydin I, Karakose M, Akin E. An approach for automated fault diagnosis based on a fuzzy decision tree and boundary analysis of a reconstructed phase space. *ISA transactions* 2014; 53(2): 220-229.
- [10] Banerjee TP, Das S. Multi-sensor data fusion using support vector machine for motor fault detection. *Information Sciences* 2012; 217: 96-107.
- [11] Bera A, Dutta A, Dhara AK. Deep learning based fault classification algorithm for roller bearings using time-frequency localized features. In: *2021 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)*; 19-20 February 2021; Greater Noida, India. pp. 419-424.
- [12] Smith WA, Randall RB. Rolling element bearing diagnostics using the Case Western Reserve University data: A benchmark study. *Mechanical systems and signal processing* 2015; 64: 100-131.
- [13] Ince T, Kiranyaz S, Eren L, Askar M, Gabbouj M. Real-time motor fault detection by 1-D convolutional neural networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2016; 63(11): 7067-7075.
- [14] Lu C, Wang Z, Zhou B. Intelligent fault diagnosis of rolling bearing using hierarchical convolutional network based health state classification. *Advanced Engineering Informatics* 2017; 32: 139-151.
- [15] Janssens O, Slavkovikj V, Vervisch B, Stockman K, Locuffier M, Verstockt S, ... & Van Hoecke S. Convolutional neural network based fault detection for rotating machinery. *Journal of Sound and Vibration* 2016; 377: 331-345.
- [16] Shen S, Lu H, Sadoughi M, Hu C, Nemani V, Thelen A, ... & Kenny S. A physics-informed deep learning approach for bearing fault detection. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2021; 103: 104295.
- [17] Hu J, Deng S. Rolling bearing fault diagnosis based on wireless sensor network data fusion. *Computer Communications* 2022; 181: 404-411.
- [18] Oh JW, Jeong J. Data augmentation for bearing fault detection with a light weight CNN. *Procedia Computer Science* 2020; 175: 72-79.
- [19] Chen Z, Li C, Sanchez RV. Gearbox fault identification and classification with convolutional neural networks. *Shock and Vibration* 2015; 2015.

- [20] Wang X, Qin Y, Zhang A. An intelligent fault diagnosis approach for planetary gearboxes based on deep belief networks and uniformed features. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 2018; 34(6): 3619-3634.
- [21] Zhao H, Liu H, Xu J, Guo C, Deng W. Research on a fault diagnosis method of rolling bearings using variation mode decomposition and deep belief network. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2019; 33(9): 4165-4172.
- [22] Liu S, Xie J, Shen C, Shang X, Wang D, Zhu Z. Bearing fault diagnosis based on improved convolutional deep belief network. *Applied Sciences* 2020; 10(18): 6359.
- [23] Shao H, Jiang H, Zhang X, Niu M. Rolling bearing fault diagnosis using an optimization deep belief network. *Measurement Science and Technology* 2015; 26(11): 115002.
- [24] Lei Y, Jia F, Zhou X, Lin J. A deep learning-based method for machinery health monitoring with big data. *Journal of Mechanical Engineering* 2015; 51(21): 49-56.
- [25] Sun W, Shao S, Zhao R, Yan R, Zhang X, Chen X. A sparse auto-encoder-based deep neural network approach for induction motor faults classification. *Measurement* 2016; 89: 171-178.
- [26] Soother DK, Ujjan SM, Dev K, Khowaja SA, Bhatti NA, Hussain T. Towards soft real-time fault diagnosis for edge devices in industrial IoT using deep domain adaptation training strategy. *Journal of Parallel and Distributed Computing* 2022; 160: 90-99.
- [27] Huang H, Baddour N. Bearing vibration data collected under time-varying rotational speed conditions. *Data in brief* 2018; 21: 1745-1749.
- [28] Yıldırım Ö, Pławiak P, Tan RS, Acharya UR. Arrhythmia detection using deep convolutional neural network with long duration ECG signals. *Computers in biology and medicine* 2018; 102: 411-420.
- [29] Bengio Y. *Learning deep architectures for AI*. Now Publishers Inc., 2009.
- [30] Goodfellow I, Bengio Y, Courville A. *Deep learning*. MIT press., 2016.
- [31] Chollet, F. *Deep learning with Python*. Simon and Schuster, 2021.
- [32] Lei Y, Yang B, Jiang X, Jia F, Li N, Nandi AK. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2020; 138: 106587.

Müşteri Duyarlılığını Keşfetmek İçin Yapay Zeka Destekli Analiz ile Çevrimiçi Ürün İncelemelerinden Anlamlı Bilgiler Elde Etme

Özge CÖMERT^{1*}, Nurcan YÜCEL²

¹ Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Samsun Üniversitesi, Samsun, Türkiye

² İşletme Bölümü, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ ozge.comert@samsun.edu.tr, ² nyucel@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 29/05/2023;

Kabul/Accepted: 18/07/2023)

Öz: E-Ticaret, internet aracılığıyla ürün ve hizmetlerin alım-satım işlemlerinin gerçekleştirildiği bir dijital ticari model olarak bilinmektedir. İnternetin yaygınlaşması ve internete erişimin kolaylaşması ile e-ticaret, daha geniş bir müşteri kitlesine ulaşma, maliyetleri azaltma ve işlem hızını artırma gibi avantajları nedeniyle günümüz iş dünyasında vazgeçilmez bir rol oynamaktadır. E-Ticaret sitelerindeki müşteri ürün incelemeleri, işletmeler açısından önemli bir pazarlama aracı olarak görülmektedir. Doğru yönetildiğinde, olumlu ürün incelemeleri satışları artırırken; olumsuz incelemeler ise potansiyel müşterilerin kaybına yol açabilmektedir. Bununla birlikte, müşteri ürün incelemeleri ürün kalitesi ve müşteri hizmeti hakkında fikir vermekle birlikte, güvenilirliği ve müşteri sadakatini arttırmaktadır. Bu nedenle, e-ticaret sitelerinin müşteri ürün incelemelerini dikkate almaları, doğru bir şekilde yönetmeleri ve müşteri memnuniyetini arttırmak için geri bildirimlere dikkat etmeleri gerekmektedir. Bu çalışmada, çevrimiçi müşteri ürün incelemelerinden anlamlı bilgiler elde etmek için yapay zekâ destekli bir analiz gerçekleştirilip, müşteri duyarlılığı keşfedilmektedir. Bu kapsamda, e-ticaret sitelerinde herkese açık olarak yayımlanmış olan ve toplamda 2000 adet müşteri incelemesi içeren bir veri seti araştırma kapsamında oluşturuldu. Oluşturulan veri seti üzerinde müşteri duyarlılığını analiz etmek üzere, derin öğrenme modellerinden biri olan Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) modeli ve metin kodlamaya dayalı yeni bir model önerisi yapıldı. Denetimli öğrenme yaklaşımı ile geliştirilen model üzerinde yapılan analizler neticesinde %91,50 doğruluk elde edildi. Bir başka ifadeyle, müşteri duyarlılığını oldukça yüksek bir doğruluk oranı ile tahmin edebilen, yüzlerce hatta binlerce müşteri incelemesinin yer aldığı ürün sayfalarında, bu incelemelerden anlamlı sonuçlar üretebilen bir yapay zekâ modeli geliştirildi. Çalışmada, işletmelerin müşteri memnuniyetini arttırmak, çeşitli ürün pazarlama stratejileri geliştirmek, çevrimiçi pazarlama süreçlerini yönetmek ve farklı iş modelleri uygulamak üzere yapay zekâ destekli algoritmalarından faydalanılabileceğine işaret etmektedir.

Anahtar kelimeler: E-ticaret, duyarlılık analizi, makine öğrenmesi, sınıflandırma

Mining Meaningful Insights from Online Product Reviews with AI-Powered Analytics to Discover Customer Sentiment

Abstract: E-Commerce is a digital commercial model in which the purchase and sale of products and services are realized through the internet. With the widespread use of the Internet and easier access to the Internet, e-commerce has an essential role in today's business world due to its advantages such as reaching a wider customer base, reducing costs and increasing transaction speed. Customer product reviews on e-commerce sites are an important marketing tool for companies. When managed correctly, positive product reviews can increase sales, while negative reviews can lead to the loss of potential customers. In addition, customer product reviews provide insight into product quality and customer service, and increase trustworthiness and customer loyalty. Therefore, e-commerce sites need to consider customer product reviews, manage them properly, and pay attention to feedback to increase customer satisfaction. This study explores customer sentiment by performing an artificial intelligence-supported analysis to extract meaningful information from online customer product reviews. In this context, a dataset containing a total of 2000 customer reviews published publicly on e-commerce sites was created within the scope of the research. In order to analyze customer sentiment on the created dataset, a new model based on the Long Short Term Memory (LSTM) model, one of the deep learning models, and text encoding was proposed. As a result of the analysis on the model developed with the supervised learning approach, 91.50% of accuracy was obtained. In other words, an artificial intelligence model that can predict customer sentiment with a very high accuracy rate and produce meaningful results from these reviews on product pages with hundreds or even thousands of customer reviews has been developed. This study indicates that businesses can benefit from artificial intelligence-supported algorithms to increase customer satisfaction, develop various product marketing strategies, manage online marketing processes and implement different business models.

Key words: E-commerce, sentiment analysis, machine learning, classification.

* Sorumlu yazar: ozge.comert@samsun.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-7419-1848, ² 0000-0002-6845-1284

1. Giriş

E-ticaret, ticari faaliyetlerin internet üzerinden yürütülmesi ve bu şekilde ürünlerin ve hizmetlerin dijital olarak pazarlanması, satışını ve teslimatını kapsayan ticari bir iş modelidir [1]. Bu iş modeli, alışveriş sürecinin dijital olarak gerçekleşmesine imkân vermekte ve tüketicilere kolay, hızlı ve güvenli bir alışveriş deneyimi sunmaktadır. E-ticaret iş modelleri, çeşitli türdeki ürünlerin ve hizmetlerin pazara sunulmasını sağlamakta ve tüketicilerin ihtiyaçlarını giderebileceği ürünlere ve hizmetlere daha kolay bir şekilde erişmelerine olanak vermektedir [2]. İnternet kullanımının yaygınlaşması, internete erişimin kolaylaşması, mobil cihazların ve mobil uygulamaların sayısının artması, avantajlı fiyatlar, 7/24 kesintisiz hizmetlerin sağlanması, ürün seçeneklerinin ve alternatiflerinin sunulması, kolay iade opsiyonu vb. birçok etki ile birlikte e-ticaretin giderek artan bir şekilde tercih edildiği görülmektedir [3].

İşletmeler, rekabet güçlerini geliştirmek ve müşterilerinin gereksinimlerini karşılamak için geri bildirim toplama ve analiz etme işlemine giderek daha fazla önem vermektedir. Müşterilerin geri bildirimleri, işletmelerin ürünlerini ve hizmetlerini geliştirmelerine, müşteri memnuniyetini artırmalarına ve müşteri sadakatini sağlamalarına yardımcı olmaktadır [4]. Bu amaçla işletmeler destek hatları, anketler, şikâyet formları ve sosyal medya etkileşimleri kullansalar da; bu çerçevedeki en önemli veri kaynaklarından biri de ürünlere yapılan çevrimiçi müşteri yorumları bir başka ifadeyle çevrimiçi müşteri ürün incelemeleridir. Müşteri ürün incelemeleri, ürünlerin kalitesi, performansı, fiyatı ve müşteri hizmetleri gibi konularda işletmelere değerli bilgiler sağlamaktadır. Ayrıca, ürünlerin diğer müşteriler tarafından satın alma davranışlarını da etkileyebilmektedir. Müşteriler, ürünleri satın almadan önce ürünün kalitesi, performansı ve kullanıcı deneyimi hakkında bilgi sahibi olmak isteyebilmektedir. Müşteri yorumları, ürün hakkında farklı bakış açıları sunarak, diğer müşterilerin satın alma kararını etkileyebilmektedir. Olumlu yorumlar, ürünün satın alınmamasına neden olabilmektedir. Ağızdan ağıza elektronik iletişim (word of mouth) kavramı ile açıklanan bu durum, benzer ürünlere veya hizmetlerle ilgilenen potansiyel müşterilerin elektronik bir platform üzerinden iletişim kurması, ürünlere ya da hizmetlere ilişkin görüşlerini ve deneyimlerini paylaşmasına dayanmaktadır [5]. Dolayısıyla işletmeler, müşteri yorumlarını takip ederek, ürünlerini geliştirebilmekte ve müşteri memnuniyetini arttırabilmektedirler.

En çok kullanılan e-ticaret iş modellerine bakıldığında; İşletmeden Tüketiciciye (Business-to-Consumer B2C) e-ticaret modeli, bir işletmenin doğrudan tüketicilere ürün veya hizmet satışı yapmasıdır. Bu modelde, işletme tüketicilerle doğrudan etkileşime girer ve ürün veya hizmetlerini tüketicilere sunar. Bu tür e-ticaret, tüketicilerin internet üzerinden ürünleri veya hizmetleri kolayca satın almalarını sağlar. Amazon, eBay, Airbnb, Alibaba, Hepsiburada, Netflix, N11 ve Trendyol B2C iş modeline örnektir. Hepsiburada, N11 ve Trendyol gibi kuruluşlar B2C (işletmeden doğrudan tüketiciciye) iş modeline örnek olsa da, aynı zamanda bir B2B (işletmeden işletmeye) iş modeline de sahiptir.

Yapay zekâ teknolojileri, büyük veri kümelerindeki yorumları otomatik olarak analiz ederek, işletmelere ürünlerinin kalitesi, performansı ve müşteri memnuniyeti hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Böylece işletmeler, müşteri geri bildirimlerinden daha hızlı ve etkili bir şekilde yararlanabilirler [3]. Bu çerçevede literatürde çok sayıda çalışmanın yapıldığı görülmektedir. İşletme veri tabanında yer alan müşteri yorumları örneklem seçilerek, mevcut yorumları şikâyet, talep ve teşekkür şeklinde sınıflara ayıran ve karar ağacına dayanan bir model önerisi yapılmıştır. Araştırma bulguları metin üzerinden sınıflandırma yapmak üzere karar ağaçlarının kullanılabilirliğine işaret etmektedir [6]. Bir diğer çalışmada, Kahramanmaraş'ta bulunan işletmelere yönelik yapılan müşteri yorumları dikkate alınmıştır. Bu çerçevede sosyal ağlar kategorisinde değerlendirilebilecek Tripadvisor uygulaması kullanılmıştır. Yorumlar dikkate alınarak müşteri şikâyetlerinin ağırlıklı olarak hangi kategoriler altında yer aldığı ortaya çıkarılmıştır [7]. Türkiye'nin önde gelen üç tüketici elektroniği perakende firması için yapılan şikâyetler bir diğer çalışmada dikkate alınmıştır. Bu çerçevede şikâyetlerin otomatik kategorilere ayrılması sağlanmış ve analiz gerçekleştirilmiştir. İade/değişim ve geri ödeme, teslimat/kargo, müşteri ilişkileri ve hizmetleri ve son olarak garanti ve servis olmak üzere dört kategori dikkate alınmıştır. Lojistik regresyon (LR), doğrusal destek vektör makineleri (DVM) ve olasılıksal dereceli azalma yöntemleri çalışma kapsamında kullanılmıştır. Sonuç olarak %80 doğruluk oranı ile en iyi sonuç LR algoritması ile elde edilmiştir [8]. Müşteri incelemeleri sürecinde şikâyet tespiti ve sınıflandırması için yinelemeli bir sinir ağı olan uzun kısa süreli bellek bir diğer çalışmada dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda F_1 puanı 0,85 olarak elde edilmiştir. Bir diğer çalışmada, ürün, film ve restoran yorumlarını içeren farklı veri setleri kullanılarak veri madenciliği teknikleriyle duygu analizi gerçekleştirilmiştir. DVM, k-en yakın komşu (k-EK), Naive Bayes, karar ağacı (KA) ve rastgele orman (RO) algoritmaları ilgili çalışmada kullanılmıştır. En iyi genelleştirme performansı DVM algoritmasıyla elde edilmiştir [9]. LR aracılığı ile faydalı tüketici yorumlarının tahmini bir diğer çalışmada dikkate alınmıştır. Türkçe metinler için önceden eğitilmiş ve BERT kütüphanesine dayanan bir model çalışmada

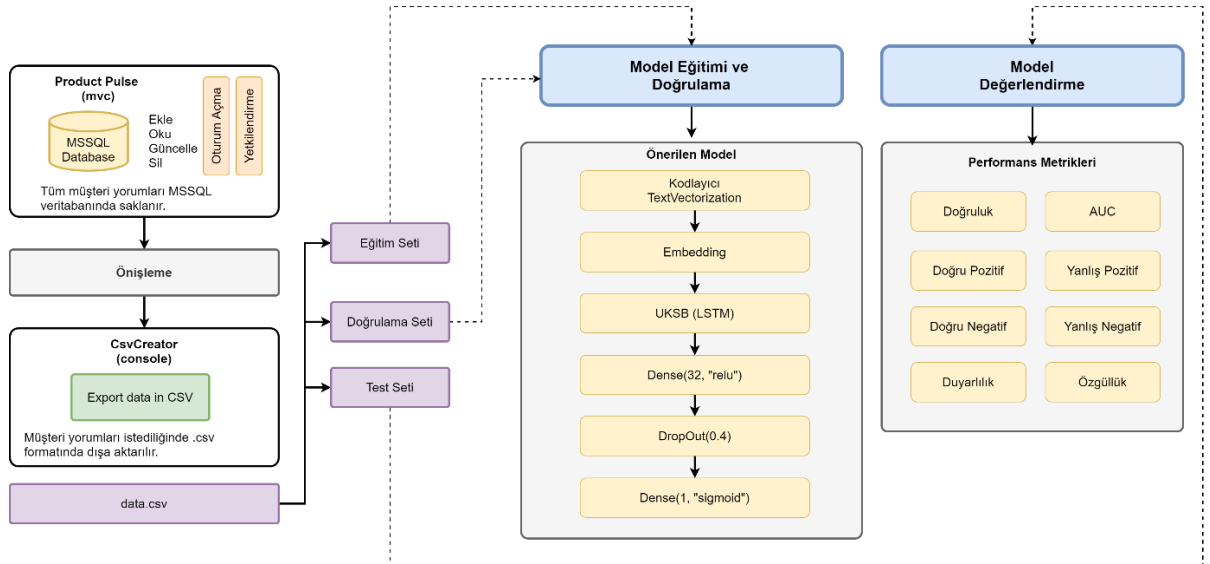
kullanılmıştır. Araştırma sonucunda %94,03 sınıflandırma doğruluğu raporlanmıştır [10]. BERTopic konu modelleme tekniği üzerinde yapılan bir araştırmada müşteri şikâyetlerinin kategorize edilmesi sağlanmıştır. Araştırma sonucunda en fazla şikâyet alanları; kargolama, televizyon, cep telefonu, dizüstü bilgisayar, kulaklık gibi ürünlere yoğunlaşmıştır [11]. Tüketici yorumları üzerinde boyut indirme yaklaşımlarına odaklanan araştırmada, tekil değer ayrışımı (TDA) ve genelleştirilmiş lineer model (GLM) dayalı bir model önerisi gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonucunda, boyut indirgeme yaklaşımının modellerin genelleştirme performansı ortalama %6 katkı sağladığı rapor edilmiştir [12]. Sözlük tabanlı SentiTFIDF yöntemi, Türkçe otel yorumlarını içeren bir veri seti üzerinde kullanılmıştır ve araştırma sonucunda RO algoritmasıyla %89'luk bir AUC değeri rapor edilmiştir [13]. Sözlük tabanlı önerilen bir diğer araştırmada, %77,50 sınıflandırma doğruluğu rapor edilmiştir ve önerilen modelin Türkçe metinler için iyi bir genelleştirme performansı sağladığı vurgulanmıştır [14]. Bir diğer araştırmada, sosyal medya uygulamalarında kullanıcı yorumlarının sınıflandırılmasını sağlamak üzere Bayes algoritmasına dayanan bir mobil uygulama çalışması gerçekleştirilmiştir ve çalışma sonucunda %88 sınıflandırma başarımına ulaşılmıştır [15].

Bu çalışmada; müşteri duyarlılığını keşfetmek üzere yapay zeka destekli bir model sunulmaktadır. İlgili model ile aynı zamanda çevrimiçi müşteri ürün incelemelerinin analizi gerçekleştirilmektedir. Çalışma kapsamında Türkiye'de yaygın olarak kullanılan üç farklı e-ticaret sitesinden, farklı ürünler için yapılan müşteri incelemeleri toplanmıştır. Yarısı pozitif ve diğer yarısı negatif olmak üzere toplamda 2000 adet müşteri ürün incelemesinden oluşan bir veri seti araştırma kapsamında oluşturulmuştur. Oluşturulan veri seti açık erişimli olarak araştırmacıların kullanımına sunulmuştur. Bu çalışmada; öncelikle metin girdi uzunluğundan bağımsız olarak çalışabilen ve girdi metinlerini sabit bir vektör uzayında temsil eden, bir başka ifadeyle metin uzunluğundan bağımsız olarak çalışabilen bir model önerisi yapılmıştır. İlgili model, derin öğrenme algoritmalarından biri olan Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) modeli üzerine inşa edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda yüksek bir genelleştirme başarımına erişilmiştir.

Bu çalışmanın geriye kalan bölümleri şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2'de materyal ve metotlar özetlenmiştir. Bölüm 3'de bulgular ve tartışma gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4'de ise sonuç cümlelerine yer verilmiştir.

2. Materyal ve Metotlar

Şekil 1'de önerilen modelin blok diyagramına yer verilmiştir. ProductPulse veri toplama aracı ile depolanan tüm müşteri yorumları yapay zeka destekli analiz öncesinde ön işleme adımından geçirilerek .csv formatına, yani virgül ile ayrılmış değerlere dönüştürülmüştür.



Şekil 1. Önerilen modelin blok diyagramı

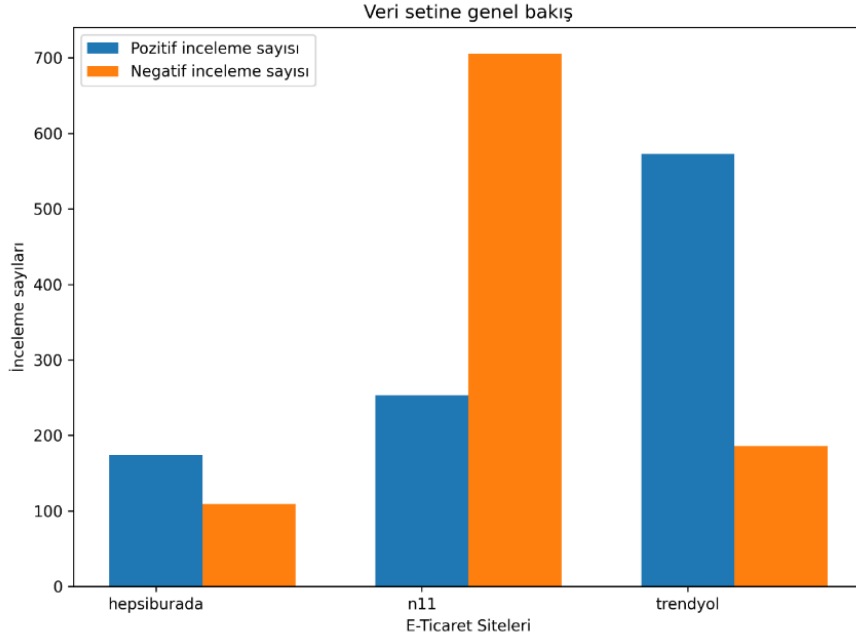
Tüm veri seti; eğitim, doğrulama ve test olmak üzere üç parçaya ayrılmıştır. Eğitim ve doğrulama setleri model eğitim aşamasında kullanılırken; test veri seti modelleri değerlendirmek üzere dikkate alınmıştır. Model geliştirme ortamı için Python dili kullanılmıştır. Google tarafından geliştirilen ve açık kaynak kodlu olan

TensorFlow (sürüm: 2.12.0) kütüphanesi model geliştirme ve değerlendirme çalışmaları kapsamında kullanılmıştır.

2.1. Veri seti

Müşteri yorumlarının (ürün incelemelerinin) toplanması model eğitimi için önemli bir adımdır. Bu adımı gerçekleştirmek için Türkiye’de tanınmış ve yaygın bir şekilde kullanılan hepsiburada.com, n11.com ve trendyol.com e-ticaret sitelerindeki gerçek müşteri yorumları dikkate alınmıştır. Tüm ürün kategorilerine yapılan müşteri yorumları rastgele seçilerek veri seti oluşturulmuştur.

Müşterilerin yorumlarını toplamak ve işlemek için "ProductPulse" adlı bir veri toplama aracı geliştirilmiştir. Bu araç ASP.NET Core MVC proje şablonu üzerine inşa edilmiştir ve verilerin kalıcı olarak depolanmasını sağlamak için MSSQL veritabanını kullanacak şekilde tasarlanmıştır. Model-View-Controller (MVC), bir mimari desendir ve web tabanlı uygulamalar geliştirirken yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [16]. MVC deseni ile inşa edilen ProductPulse çevrimiçi olarak kullanılacak şekilde tasarlandığından, ilgili uygulama kullanılarak her an yeni müşteri yorumlarının girilmesi, var olan müşteri yorumlarının güncellenmesi ve silinmesi gibi temel işlevler internet üzerinden kolayca yapılabilmektedir. Bununla birlikte, veri güvenliğini sağlamak amacıyla geliştirilen veri toplama aracı, oturum açma ve yetkilendirme mekanizmalarıyla da donatılmıştır.



Şekil 2. Verileri dağılımı

Şekil 2’de toplanan verilerin dağılımına yer verilmiştir. Görüldüğü üzere; 1000 pozitif ve 1000 negatif olmak üzere toplamda 2000 çevrimiçi müşteri ürün incelemesi toplanmış ve dengeli bir veri seti elde edilmiştir. Bu kayıtlardan 283 tanesi hepsiburada.com’dan, 958 tanesi n11.com’dan ve 759 tanesi ise trendyol.com e-ticaret sitesinden alınmıştır. Platformlardan hepsiburada.com’dan alınan verilerin 174 tanesi pozitif iken, 109 tanesi negatif olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, n11.com’dan alınan verilerin 253 tanesi pozitif iken, 705 tanesi negatiftir. Son olarak, trendyol.com sitesinden alınan verilerin 573 tanesi pozitif iken, 186 tanesi negatiftir.

2.2. Önişleme

Makine öğrenmesi ya da derin öğrenme gibi algoritmalar kullanılmadan önce, verinin işlenebilir hale dönüştürülmesini sağlamak üzere gerçekleştirilen işlemler önişleme olarak ifade edilir. Bu adımda, veri setindeki hatalar, eksik veriler ve aykırı değerler gibi sorunlar giderilir [17]. Önişleme adımı doğru bir şekilde yapılmadığında, sonuçlar yanıltıcı olabilir ve yanlış kararlar alınabilir. Bu nedenle, önişleme adımı, veri bilimindeki en önemli adımlardan biridir ve dikkatle yapılması gerekmektedir [18].

ProductPulse veri toplama aracı ile elde depolanan tüm müşteri yorumları yapay zeka destekli analiz öncesinde ön işleme adımından geçirilerek .csv formatına, yani virgül ile ayrılmış değerlere dönüştürülmüştür. Bu çalışmada doğrudan müşteri yorumları dikkate alındığından ön işleme adımı oldukça basit tutulmuştur. Bu adımda öncelikle cümlelerin başındaki ve sonundaki boşluklar metinden izole edilmiştir. Sonrasında tırnak ifadesi içeren karakterler metinden atılmıştır ve tüm metinler küçük harfe çevrilmiştir.

Ön işleme adımı sonrasında bir etiket (Label) ve bir de metin olmak (Text) üzere 2000×2 boyutunda bir matris elde edilmiştir.

2.3. Önerilen model ve katmanların işlevi

Ardışıl (Sequential) katmanlardan oluşan bir model önerisi yapılmıştır. Bu çerçevede temelde metin kodlayıcı (TextVectorization), gömme (Embedding), yoğun (Dense) ve bırakma (Dropout) katmanları kullanılmıştır.

Metin vektörlendirme (text vectorization), doğal dil işleme (NLP) alanında, metin verilerini matematiksel vektörlere dönüştürme işlemidir. Bu dönüşüm, makine öğrenimi algoritmalarının metin verilerini işlemesi ve analiz etmesi için gereklidir. Bu sayede, metinlerdeki kelime ve cümle yapıları, sayısal verilerle ifade edilebilir ve daha kolay bir şekilde işlenebilir hale getirilir [19]. Model önerisinde yer alan TextVectorization katmanı, bu nedenle kullanılmıştır. Bu katman, öncelikle metin verilerindeki kelimeleri token olarak ifade edilen bir yapıya ayırır. Daha sonra, bu token yapıları sayısal vektörlere dönüştürür. Bu katmanın bir diğer işlevi metin verilerindeki farklı uzunlukları normalleştirerek, tüm metin verilerinin aynı boyutta temsil edilmesini sağlamasıdır. Böylece girdi uzunluğundan bağımsız olarak modelin çalışması sağlanabilmektedir. Bu, metin verilerinin daha verimli bir şekilde işlenmesine olanak tanınması açısından önemli bir niteliktir. Metin kodlayıcı katmanı, önceden belirlenmiş bir kelime dağarcığı kullanır ve burada veri setindeki kelimelerin kullanım sıklığıyla sıkı bir ilişki bulunmaktadır.

Embedding katmanı, özellikle doğal dil işleme işlemlerinde kullanılan bir katmandır. Bu katman, metin verilerindeki farklı kelimeleri vektörlere dönüştürerek verilerinin sayısal olarak temsil edilmesini sağlar. Bu vektörler, kelimelerin anlamsal olarak benzer olduğu durumlarda benzer vektörlere sahip olur. Bu sayede, Embedding katmanı, metin verilerindeki anlamsal ilişkileri yansıtabilir [20]. Örneğin, "araba" ve "otomobil" kelimeleri anlamsal olarak benzer olduğu için, Embedding katmanı, bu kelimeleri benzer vektörlere dönüştürür. Bu vektörler, kelimelerin anlamsal olarak benzer olduğunu yansıtır.

Uzun-Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory, LSTM) katmanı, özellikle doğal dil işleme ve zaman serisi verileri ile çalışan modellerde kullanılan bir tür Recurrent Neural Network (RNN) katmanıdır. LSTM, gelen verilerdeki uzun vadeli bağımlılıkları modellemek için kullanılır ve bu katman, özellikle zaman serisi verilerindeki trendleri ve doğal dil işleme işlemlerindeki cümle yapısını modellemek için kullanışlıdır [21]. Bu katman gelen verilerin önceki adımlarından (tarihlerinden) bilgi alarak, o anki adımın çıktısını hesaplar. Bu amaçla, hafıza hücreleri ve kapıları kullanır. Bir başka ifadeyle, hafıza hücreleri, LSTM'nin önceki adımlarından gelen bilgileri depolarken kapılar ise, hafıza hücrelerine ne kadar bilgi eklenmesi gerektiğini kontrol eder. LSTM katmanındaki kapılar; unutma (forget), girdi (input) ve çıkış (output) kapılarıdır. Unutma kapısı, hafıza hücrelerindeki bilginin ne kadarının unutulacağını belirler. Girdi kapısı, yeni bilginin hafıza hücrelerine ne kadar ekleneceğini belirler. Çıkış kapısı ise, hafıza hücrelerindeki bilginin ne kadarının çıktı olarak kullanılacağını belirler [22].

Bellek bloğunda bulunan unutma kapısı, aşağıdaki gibi tanımlanan bir aktivasyon fonksiyonu kullanılarak basit bir tek katmanlı sinir ağı yardımıyla kontrol edilir:

$$f_t = \sigma(W[x_t, h_{t-1}, C_{t-1}] + b_f) \quad (1)$$

Burada, giriş dizisi, önceki bloğun çıkışı, önceki LSTM bloğunun hafızası ve sapma vektörü sırasıyla x_t , h_{t-1} , C_{t-1} , ve b_f ile gösterilmiştir. W , herbir giriş vektörü için tanımlanan ağırlık vektörü ve σ logistic sigmoid aktivasyon fonksiyonudur [23]. Bu aktivasyon fonksiyonu, önceki hafıza bloğunun eleman-bilgi çarpımı kullanılarak mevcut LSTM üzerindeki etkisini belirlemek için önceki hafıza bloğuna uygulanır. Önceki bellek, çıkış aktivasyon vektörünün değerinin sıfıra yakın olup olmadığı göz önünde bulundurularak unutulur.

Giriş kapısında, yeni hafıza önceki hafıza bloğunun etkisi ve tanh aktivasyon fonksiyonunun her ikisi de dikkate alınarak temel bir sinir ağı tarafından aşağıdaki gibi tanımlanarak oluşturulur:

$$i_t = \sigma(W[x_t, h_{t-1}, C_{t-1}] + b_i) \quad (2)$$

$$C_t = f_t C_{t-1} + i_t \tanh(W[x_t, h_{t-1}, C_{t-1}] + b_c) \quad (3)$$

Burada i_t giriş kapısının çıktısını ifade eder. W ağırlık vektörünü gösterirken; b_i sapma vektörünü gösterir. h_{t-1} ve C_{t-1} sırasıyla önceki bloğun çıktısı ve önceki LSTM hafızasına karşılık gelir. Aktivasyon parametresi ise σ ile gösterilir.

Çıkış kapısı ise aşağıda verilen denklemler dikkate alınarak mevcut LSTM bloğunun çıkışının oluşturulduğu bir bölümdür:

$$o_t = \sigma(W[x_t, h_{t-1}, C_t] + b_0) \quad (4)$$

$$h_t = \tanh(C_t) \cdot o_t \quad (5)$$

Aktivasyon fonksiyonu diğer kapılarda olduğu gibi σ ile gösterilir ve çıkışın 0 ve 1 arasında olmasını sağlar. \tanh aktivasyon fonksiyonu ise çıkış değerlerini -1 ve 1 arasına indirger. Bu fonksiyonlar modelin doğrusal olmayan yapısını destekler.

2.4. Performans değerlendirme

Denetimli öğrenme yöntemiyle geliştirilmiş sınıflandırma modellerinin performansını ölçmek için temelde karmaşıklık (hata) matrisi kullanılır. Bu matris doğru pozitif (DP), doğru negatif (DN), yanlış pozitif (YP) ve yanlış negatif (YN) olmak üzere temelde dört göstergeye bağlı olarak oluşturulur. Hata matrisi kullanılarak çeşitli performans göstergeleri modellerin genelleştirme performansını değerlendirmek üzere kullanılır [24].

$$\frac{DP+DN}{DP+YP+YN+DN} \quad (6)$$

Denklemin 6'da doğruluk (accuracy) metriğine yer verilmiştir. Bu metrik, modelin doğru tahminlerinin toplam veri noktalarına oranını verir. Diğer bir ifadeyle, doğru sınıflandırılan örneklerin toplam örnek sayısına oranını ifade eder. Doğruluk, modelin genel performansını ölçer.

$$\frac{DP}{DP+YP} \quad (7)$$

Denklemin 7'de hassasiyet (precision) metriğinin matematiksel modeline yer verilmiştir. Bu metrik, modelin bir sınıfı doğru tahmin etme oranını ifade eder. Hassasiyet, yanlış pozitiflerin önemli olduğu durumlarda kullanışlıdır.

$$\frac{DP}{DP+FN} \quad (8)$$

Denklemin 8'de hatırlatma (Recall) metriğine yer verilmiştir. Bu metrik, gerçekte pozitif olan örneklerin ne kadarının doğru şekilde pozitif olarak sınıflandırıldığını gösterir. Recall, özellikle yanlış negatiflerin önemli olduğu durumlarda kullanışlıdır. Recall değeri, hassasiyet (precision) ile birlikte kullanıldığında, modelin sınıflandırma performansını daha iyi anlamamıza yardımcı olur. Hassasiyet, doğru sınıflandırılmış pozitif örneklerin, yanlış sınıflandırılmış pozitif örneklerle birlikte toplam pozitif tahmin sayısına oranını ifade eder. Hassasiyet, yanlış pozitiflerin önemli olduğu durumlarda kullanışlıdır.

Model değerlendirme yaparken kullanılan bir diğer verimli metrik Area Under the Curve (AUC) olarak ifade edilir. AUC sınıflandırma problemlerinde kullanılan bir performans ölçütüdür. ROC (Receiver Operating Characteristic) eğrisi altındaki alanı ifade eder ve DP oranının YP oranına karşı performansını ölçer. AUC değeri, 0 ile 1 arasında değişir ve 1 yaklaşması beklenir. Yüksek AUC değerleri, modelin doğru sınıflandırma oranının yüksek olduğunu gösterirken, düşük AUC değerleri ise modelin sınıflandırma performansının düşük olduğunu ifade eder [25].

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, Türkiye'de hizmet veren e-ticaret sitelerinde herkese açık olan müşteriler tarafından yapılan ürün yorumları toplanarak; 1000 adet pozitif ve 1000 adet negatif olmak üzere toplam 2000 adet örnekten oluşan

bir veri seti oluşturulmuştur. Hazırlanan veri seti ve önerilen model bir GitHub deposunda açık erişimli olarak araştırma çıktısı olarak paylaşılmıştır.

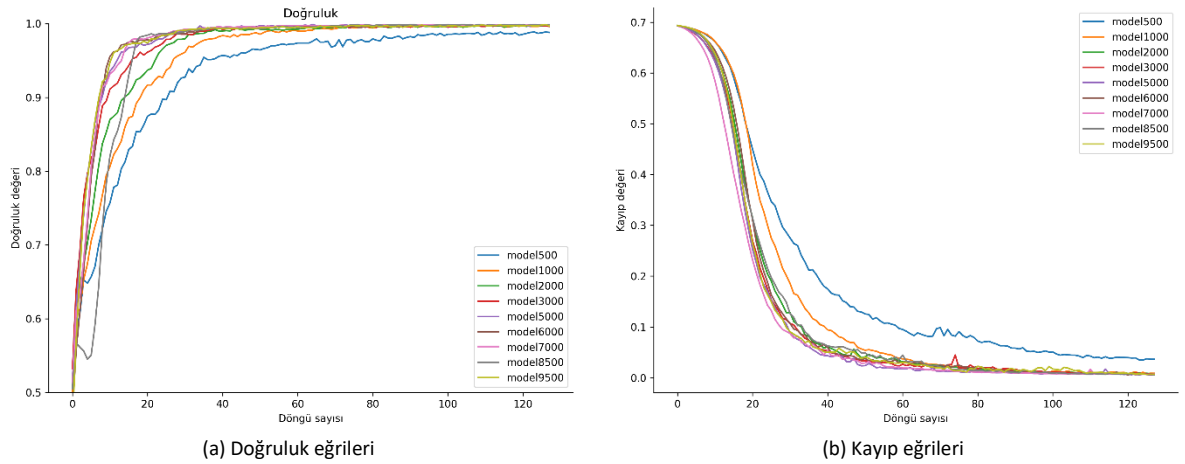
Veri seti model geliştirme aşamasından önce eğitim, doğrulama ve test olmak üzere üç parçaya ayrılmıştır. Bu çerçevede veri setinin, %80'i eğitim (yaklaşık 1600 adet) ve %10'u doğrulama (yaklaşık 200) ve geriye kalan %10'u (yaklaşık 200) ise test adımı için kullanılacak şekilde ayarlanmıştır.

Önerilen modeldeki en kritik katman, TextVectorization katmanıdır. Bu katman metin ile beslenen modelin, en fazla kaç kelime ile besleneceğini belirler. Bu parametre yardımıyla modeli beslemek üzere kullanılan metinlerin boyutu sınırlanır ve aşırı öğrenme önlenir. Girdi boyutu olarak kullanılacak maksimum kelime dağarcığı, token sayısı ile ifade edilir. Deneysel çalışmada ilk adımda token sayısının tespitini sağlamak üzere 500 ve 10000 arasında değişken token sayısına bağlı olarak, bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla model eğitimi için kullanılan parametrelere ve parametrelerin değerlerine Tablo 1'de yer verilmiştir.

Tablo 1. Model parametreleri

Katman (Tipi)	Çıkış ve Şekil	Parametre Sayısı
Text Vectorization	(None,None)	0
Embedding	(None,None,32)	201856
LSTM	(None,32)	8320
Dense	(None,32)	1056
Dropout	(None,32)	0
Dense	(None,1)	33
Toplam Parametre Sayısı	211,265	
Eğitilebilir Parametre Sayısı	211,265	
Döngü Sayısı (Epochs)	128	

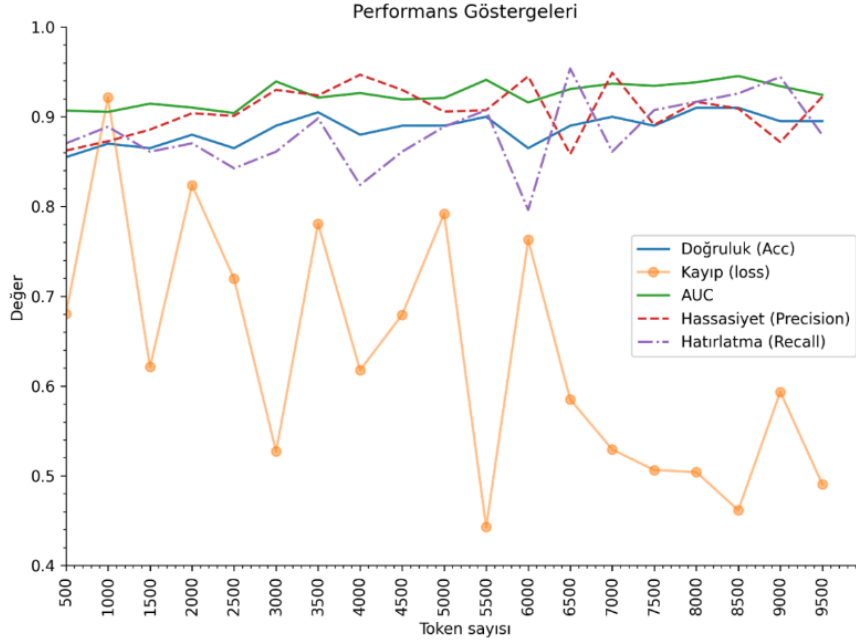
Şekil 3'de eğitim sırasında elde edilen doğruluk ve kayıp eğrilerine yer verilmiştir. Görüldüğü üzere token sayısı arttıkça model sınıflandırma başarımının da kademeli olarak arttığı gözlenmiştir. Eğitim için çağ/döngü (epochs) sayısı 128 olarak belirlenmiştir. Eğitimin belirli ölçütlere bağlı olarak erken bir şekilde tamamlanmasını sağlamak üzere herhangi bir geri çağırma fonksiyonu bu aşamada kullanılmamıştır. Bu noktadaki temel amaç; model eğitiminin tamamen gerçekleştirildiğinden emin olmaktır.



Şekil 3. Eğitim kümesine göre modellerin doğruluk ve kayıp eğrileri

Model eğitimi gerçekleştirilirken kayıp fonksiyonunu minimize etmek amacıyla optimizasyon algoritmalarından faydalanılır. İdeal token sayısını belirlemek üzere yapılan deneysel çalışma kapsamında Adam optimizasyon algoritması kullanılmıştır ve bu algoritmanın girdi parametreleri varsayılan değerleriyle kullanılmıştır [26]. Öğrenme oranının başlangıç değeri 0,001 olarak atanmıştır.

Deneysel çalışma kapsamında elde edilen sonuçların bir bölümüne Tablo 2'de yer verilmiştir. İlaveten Şekil 4'de ilgili verilere ilişkin bir grafik sunulmuştur. Deneysel çalışmalar maksimum token sayısı için en uygun değer 8500 olduğunu göstermektedir. Bu noktada kayıp değeri 0.4615, sınıflandırma doğruluğu 0,9100 AUC 0,9454, hassasiyet 0,9090 ve hatırlatma metriği 0.9259 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4. Token sayısına bağlı olarak model performansı

Tablo 2. Maksimum token sayısına ilişkin performans sonuçları

Metrikler	Maksimum Token Sayısı								
	500	1000	2000	3000	5000	6000	7000	8500	9500
Kayıp	0.6804	0.9215	0.8237	0.5270	0.7920	0.7682	0.5292	0.4615	0.4950
Doğruluk	0.8550	0.8700	0.8800	0.8900	0.8900	0.8650	0.9000	0.9100	0.8950
AUC	0.9069	0.9053	0.9102	0.9393	0.9208	0.9159	0.9368	0.9454	0.9244
Hassasiyet	0.8623	0.8727	0.9038	0.9300	0.9056	0.9450	0.9489	0.9090	0.9223
Hatırlama	0.8703	0.8888	0.8703	0.8611	0.8888	0.7962	0.8611	0.9259	0.8796

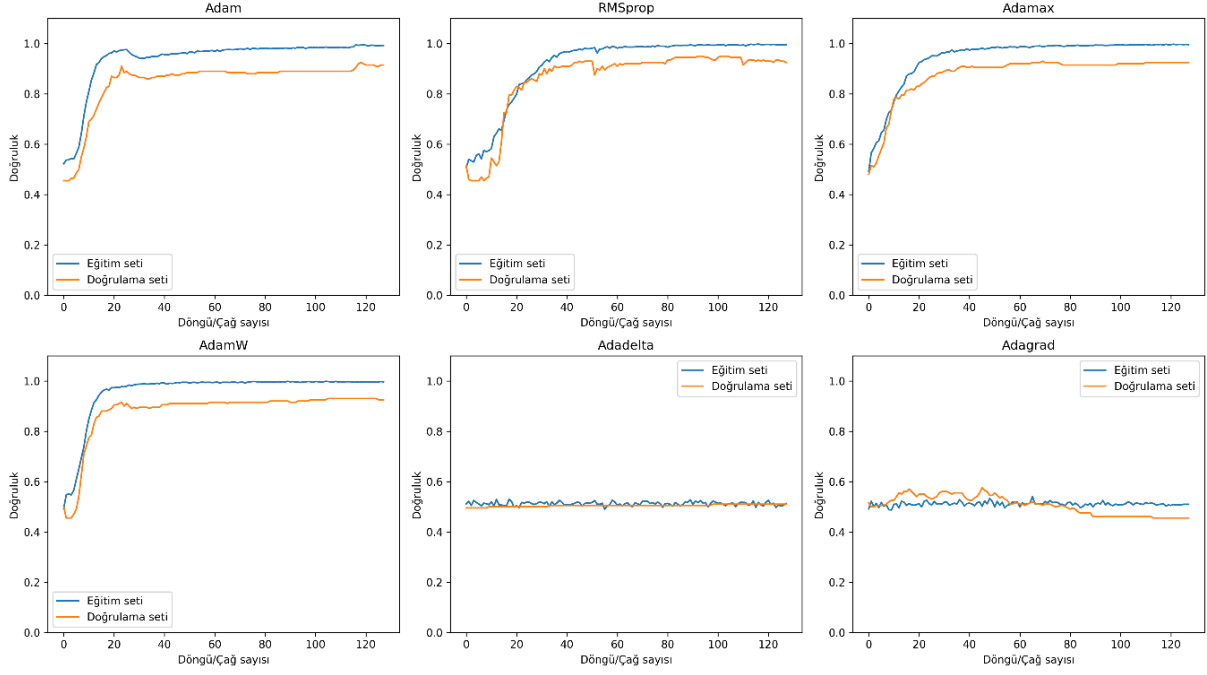
Deneysel çalışmanın ikinci adımında, optimizasyon algoritmalarının keşfi için bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çerçevede öğrenme oranı (learning rate) 0.001 değeri için Adam, RMSprop, Adamax, AdamW, Adadelat ve Adagrad algoritmaları dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3’de rapor edilmiştir.

Tablo 3. Optimizasyon sonuçları

Optimizasyon Algoritması	Kayıp	Doğruluk	AUC	Hassasiyet	Hatırlatma
Adam	0.3393	0.8950	0.9556	0.8541	0.9213
RMSprop	0.4399	0.8850	0.9453	0.8235	0.9438
Adamax	0.6609	0.9150	0.9591	0.8750	0.9438
AdamW	0.2640	0.9000	0.9581	0.8484	0.9438
Adadelat	0.6927	0.4650	0.6276	0.4510	0.9325
Adagrad	0.6935	0.4450	0.5669	0.4450	1.0000

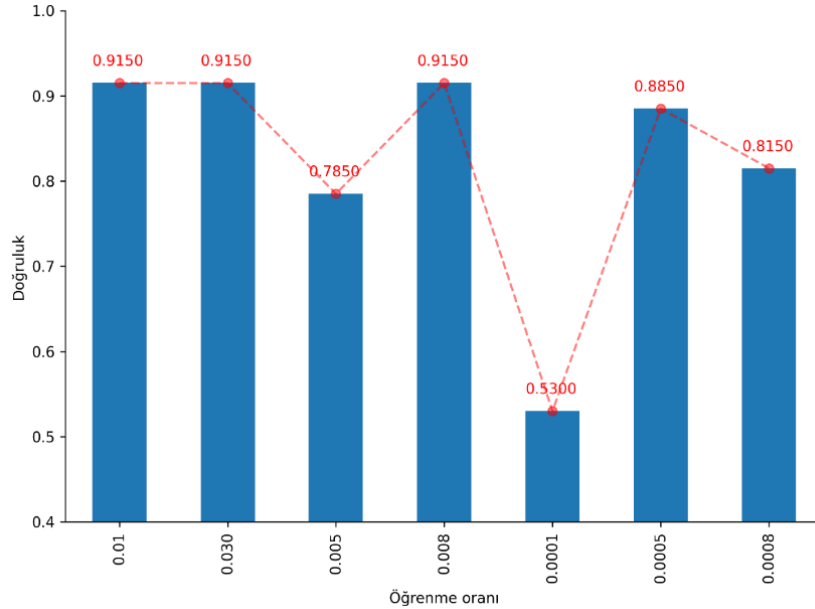
Görüldüğü üzere en iyi sınıflandırma performansını sağlayan optimizasyon algoritması Adamax olarak belirlenmiştir ve algoritmanın sınıflandırma doğruluğu 0,9150, AUC 0,9591, hassasiyeti 0,8750 ve hatırlatma metriği ise 0,9438 olarak elde edilmiştir.

Şekil 5’de ise optimizasyon algoritmalarının eğitim ve doğrulama seti üzerindeki başarımına yer verilmiştir. Görüldüğü üzere Adam, RMSprop, Adamax ve AdamW algoritmaları problemi hızlıca öğrenebilmiştir ancak Adadelat ve Adagrad algoritmalarının mevcut parametreler ile problemi öğrenemediği ve iyi bir genelleştirme performansı sağlayamadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Optimizasyon algoritmalarının eğitim ve doğrulama seti üzerindeki başarıları

DeneySEL çalışma sonucunda en verimli optimizasyon algoritması Adamax olarak elde edilmiştir. İlgili algoritma farklı öğrenme oranları kullanılarak yeniden eğitilmiştir. Bu eğitim aşamasında eğitim sürecini özelleştirmek, aşırı uyumu engellemek, model eğitim süresini kısaltmak ve eğitim sürecini izlemek üzere geri çağırma (callback) metotları dikkate alınmıştır. Geri çağırma metotları modelin ezberleme sorununun önüne geçtiği gibi; öğrenme oranının dinamik olarak değişmesini sağlayarak eğitimin daha kısa sürede tamamlanmasına da olanak sağlamaktadır.

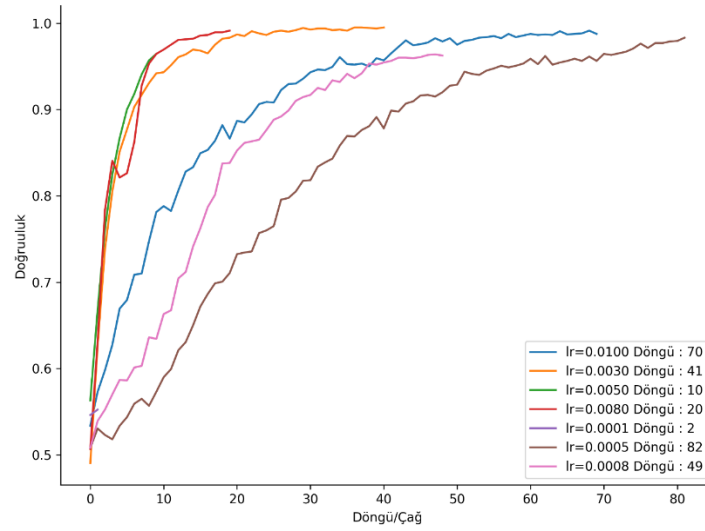


Şekil 6. Farklı öğrenme oranlarına göre modelin eriştiği doğruluk oranları

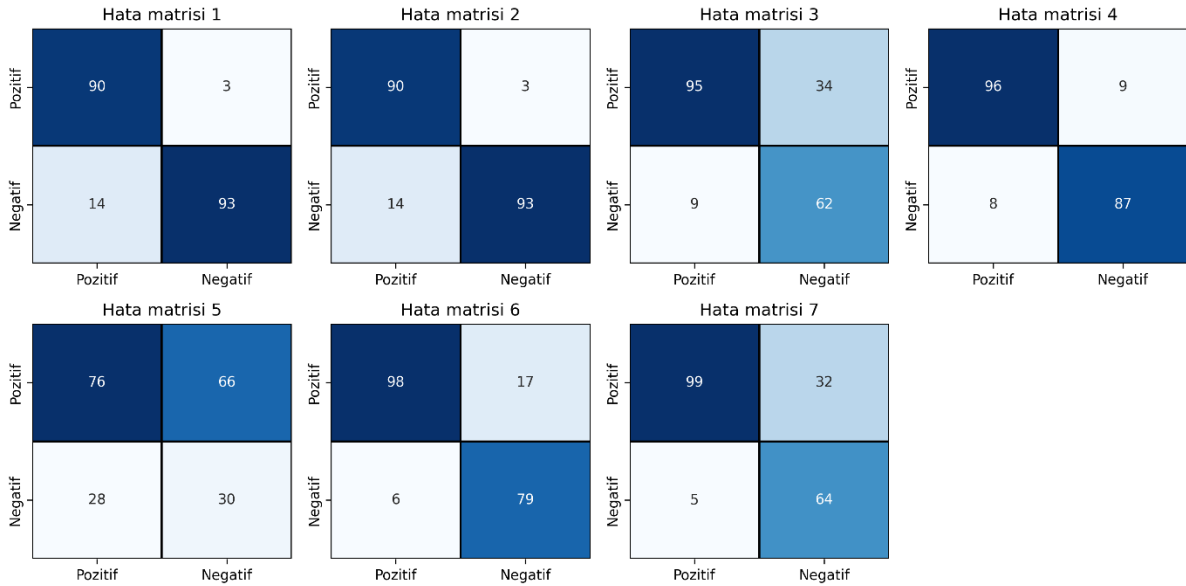
Gerİ çağırma işlevleri kapsamında tanımlanan ilk işlev, *ReduceLROnPlateau* geri çağırma işlevidir. Bu işlev, model eğitimi sırasında öğrenme hızını dinamik olarak değiştirmek için kullanılır. Bir başka ifadeyle, model

eğitimi sırasında izlenen bir ölçüt (metrik) değerinin belirli bir sayıdaki döngü/çağ boyunca gelişmediği durumlarda öğrenme hızını azaltır. Böylece, modelin daha iyi sonuçlar elde etmek için daha fazla iterasyon yapmasına olanak tanınır. Bu çerçevede iki parametre önem kazanır; bunlar *factor* ve *patience* parametreleridir. Deneysel çalışmada ilgili parametrelere sırasıyla 0,5 ve 5 değerleri verilmiştir. Öğrenme hızının azaltılma oranı *factor* parametresi ile kontrol edilirken, ölçütün yani performans metriğinin iyileşmediği/gelişmediği döngü ya da çağ sayısı ise *patience* parametresi ile kontrol edilir.

Geri çağırma işlevleri kapsamında tanımlanan ikinci işlev, *EarlyStopping* geri çağırma işlevidir. Bu işlev, belirtilen bir performans metriğini izler. Hangi performans metriği, izleneceği monitör parametresi ile belirtilir. İzlenen metrik üzerinde minimum değişim miktarı *min_delta* parametresi ile bildirilir. Bu durumda belirtilen performans metriğinde, belirtilenden daha az miktarda bir değişim olması durumunda modelde bir gelişme olmadığını kabul ederek eğitimi durdurabilir. Şekil 6'da farklı öğrenme oranlarına göre modellerin sağladığı doğruluk değerlerine yer verilmiştir. Bu kapsamda öğrenme oranı 0,01, 0,003 ve 0,008 iken; model test veri seti üzerinde 0,9150 doğruluk oranına eriştiği gözlemlenmiştir. Şekil 7'de farklı öğrenme oranlarına karşılık elde edilen eğitim eğrilerine yer verilmiştir.



Şekil 7. Öğrenme oranlarına bağlı olarak eğitim grafikleri



Şekil 8. Hata matrisleri

0,01, 0,003 ve 0,008 öğrenme oranında aynı doğruluk oranını yakalayan modellerin eğitim eğrileri incelendiğinde; ideal öğrenme oranının 0,008 olarak ayarlanmasının eğitimi en kısa sürede yani 20 döngüde/çağda sonuçlanmasını sağladığı görülmektedir. Öğrenme oranı, bir makine öğrenmesi algoritmasının problemi ne ölçüde hızlı öğrendiğini ve probleme ne kadar hızlı uyum sağladığını belirler. Doğru öğrenme oranının seçilmesi, hem algoritmanın hızını hem de doğruluğunu etkiler. Çok yüksek bir öğrenme oranı, algoritmanın doğru sonuçlara ulaşma olasılığını azaltabilirken; çok düşük bir öğrenme oranı ise algoritmanın eğitim sürecini yavaşlatabilir ve aşırı uyumu, yani ağır problemi ezberlemesini teşvik edebilir. Bu nedenle, doğru öğrenme oranını seçmek, makine öğrenmesi modelinin başarısı için önemlidir. Şekil 8’de farklı öğrenme oranlarına bağlı olarak elde edilen hata matrislerine yer verilmiştir. Hata matrislerinden türetilen performans metriklerine bağlı olarak elde edilen performans göstergeleri ise Tablo 4’de raporlanmıştır. Bu doğrultuda gerek pozitif müşteri ürün incelemelerini ve gerekse negatif müşteri ürün incelemelerini ayırt etme konusunda modelin yanlış davranmaması, yani her iki sınıfı da doğru bir şekilde ayırt etmesi gerekir. Bu noktada verilerin dengeli dağılımı da dikkate alındığında, hem duyarlılık ve özgüllük metriklerinin birlikte yorumlanması ya da F1 skor metriğine göre karar vermek mantıklı olur. Sonuçlar irdelendiğinde; en iyi F1-skor değerinin öğrenme oranı 0,008 olarak ayarlandığı durumda elde edildiği görülmektedir.

Tablo 4. Modelin farklı öğrenme oranlarına göre performans sonuçları

Öğrenme Oranı	Doğruluk	Hata	Duyarlılık	Özgüllük	Hatırlatma Geri Çağrı	F1-Skor	AUC
0.01	0.9150	0.0850	0.9677	0.8692	0.8635	0.9137	0.9728
0.003	0.9150	0.0850	0.9677	0.8692	0.8665	0.9137	0.9606
0.005	0.7850	0.2150	0.7364	0.8732	0.9134	0.8155	0.9146
0.008	0.9150	0.0850	0.9142	0.9063	0.9230	0.9187	0.9510
0.0001	0.5300	0.4700	0.5352	0.5172	0.7307	0.6179	0.4939
0.0005	0.8850	0.1150	0.8521	0.9294	0.9423	0.8950	0.9413
0.0008	0.8150	0.1850	0.7557	0.9275	0.9519	0.8426	0.9162

4. Sonuç

E-Ticaret, ürünlerin ve hizmetlerin internet üzerinden alınıp satılabildiği dijital bir iş modelidir. İnternetin yaygınlaşması, internete erişimin kolaylaşması, mobil cihazların kullanımının artması, dijital ödeme teknolojilerinin gelişmesi gibi pek çok faktöre bağlı olarak e-ticaret sürekli olarak gelişmeye devam etmektedir. Müşteri ürün incelemeleri, e-ticaretin önemli bir parçasıdır çünkü müşterilerin alacakları ürün hakkında bilgi edinmelerini ve diğer müşterilerin deneyimlerinden faydalanmalarını sağlamaktadır. Bu incelemeler, müşterilerin satın alma kararlarını etkilemekte ve satıcıların ürün kalitesini artırarak müşteri memnuniyetini sağlamalarına yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada, çevrimiçi müşteri ürün incelemelerinin otomatik olarak gerçekleştirilmesini sağlayan hesaplamalı bir model önerisi yapılmıştır. Önerilen model derin öğrenme algoritmalarından biri olan LSTM modeli ve metin kodlayıcı algoritmalarına dayanarak geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin genelleştirme performansını arttırmak üzere çok sayıda deneysel çalışma yapılmıştır. Sonuç olarak, oldukça umut vadeden ve genelleştirme performansı tatmin edici bir model geliştirilmiş ve geliştirilen model ile %91,50 sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen veri seti ve geliştirilen model açık erişimli bir kod deposunda araştırmacılar ile paylaşılmıştır.

Araştırma, işletmelerin müşteri memnuniyetini arttırmak, çeşitli ürün pazarlama stratejileri geliştirmek, çevrimiçi pazarlama süreçlerini yönetmek ve farklı iş modelleri uygulamak üzere yapay zekâ destekli algoritmalarla faydalanılabileceği doğrulamaktadır. Gelecek çalışmamızda, yapay zekâ algoritmaları kullanılarak müşteri ürün incelemelerini gerçek zamanlı olarak sınıflayabilen ve müşteri ürün incelemeleri için otomatik olarak skor üretebilen bir model çalışmasının yapılması planlanmaktadır.

Veri Erişimi

Bu çalışma kapsamında kullanılan veri setine ve üretilen modele GitHub üzerinden erişim sağlanabilir.

<https://github.com/ozgekervan/Turkish-Online-Customer-Reviews-Dataset>

Kaynaklar

- [1] Demirdöğmez, M.; Gültekin, N.; Taş, Y. Türkiye’de E-Ticaret Sektörünün Yıllara Göre Gelişimi. Uluslararası Toplum Araştırmaları Derg. 2018, 8, 2217–2237.
- [2] Soydal, H. Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmelerde E-Ticaret. J. Selcuk Univ. Social Sci. 2006, 539–552.
- [3] Güven, H.; Ayvaz, G.; Türkan, E. Use of Artificial Intelligence Applications in E-Commerce. Int. J. Manag. Adm. 2023, 7, 69–94.

- [4] Marangoz, M.; Yeşiladağ, B.; Saltık, I.A. E-Ticaret İşletmelerinin Web Ve Sosyal Ağ Sitelerinin İçerik Analizi Yöntemiyle İncelenmesi. *İnternet Uygulamaları ve Yönetimi Derg.* 2012, 3, 53–78.
- [5] Aydın, İ.; Çelik, Z. Drone İle Teslimata Yönelik Algılanan Güvenin Kullanım Niyeti Üzerindeki Etkisinde Algılanan Risk Ve Ağızdan Ağıza İletişimin Aracılık Rollerinin Araştırılması. *J. Econ. Bus. Polit. Stud.* 2023, 10, 49–67.
- [6] Aytekin, Ç.; Sütçü, C.S.; Özfıdan, U. Karar Ağacı Algoritmasıyla Metin Sınıflandırma: Müşteri Yorumları Örneği. *Uluslararası Sos. Araştırmalar Derg.* 2018, 11, 782–792.
- [7] HülyaTaştan, O. Kahramanmaraş'ta Bulunan Yiyecek İçecek İşletmelerine Yönelik Tripadvisor.Com'da Paylaşılan Şikayetlerin Sınıflandırılması. *Journal* 2017, 26, 270–284.
- [8] Kutankoruyan, A. Classification of Customer Complaints with Machine Learning. *Journal* 2022, 13, 168–183.
- [9] Çelik, E.; Dal, D.; Aydın, T. Duygu Analizi İçin Veri Madenciliği Sınıflandırma Algoritmalarının Karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknol. Derg.* 2021, 27, 880–889.
- [10] Akbıyık, A.; Arı, O. Forecasting Useful Customer Reviews via Logistic Regression. *J. Res. Bus.* 2022, 7, 15–32.
- [11] Koruyan, K. Classification of Customer Complaints Using BERTopic Topic Modelling Technique. *Journal* 2022, 4, 66–79.
- [12] Yücel, A. Tüketici Yorumları Üzerine Bir Metin Madenciliği ve Veri Boyutu İndirgeme Yaklaşımı. *Zeki Sist. Teor. ve Uygulamaları Derg.* 2021, 1, 8–16.
- [13] Oğul, B.B.; Ercan, G. Sentiment Classification on Turkish Hotel Reviews. In *Proceedings of the 2016 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU)*; 2016; pp. 497–500.
- [14] Demir, Ö.; Chawai Baban, A.I.; Doğan, B. Türkçe Metinlerde Sözlük Tabanlı Yaklaşım ile Duygu Analizi. *Int. Period. Recent Technol. Appl. Eng.* 2019, 58–66.
- [15] Dandıl, E.; Karakurt, B. Sosyal Medya Uygulamalarında Kullanıcı Yorumlarının Metin Madenciliği İle Sınıflandırılması. In *Proceedings of the International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Application*; 2019; pp. 203–207.
- [16] Akçay, M.; Taşdelen, Z.; Kasım, Ö. ASP.NET Ve MVC Temelli Responsive Web Uygulaması. *J. Estud. Inf.* 2021, 2, 34–41.
- [17] Çetin, V.; Yıldız, O. A Comprehensive Review on Data Preprocessing Techniques in Data Analysis. *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.* 2022, 28, 299–312, doi:10.5505/pajes.2021.62687.
- [18] Hark, C.; Uçkan, T.; Karıcı, A. A New Multi-Document Summarisation Approach Using Saplings Growing-up Optimisation Algorithms: Simultaneously Optimised Coverage and Diversity. *J. Inf. Sci.* 2022, 01655515221101841, doi:10.1177/01655515221101841.
- [19] Yang, X.; Yang, K.; Cui, T.; Chen, M.; He, L. A Study of Text Vectorization Method Combining Topic Model and Transfer Learning. *Processes* 2022, 10.
- [20] Ramasubramanian, K.; Singh, A. Deep Learning Using Keras and TensorFlow BT - Machine Learning Using R: With Time Series and Industry-Based Use Cases in R. In; Ramasubramanian, K., Singh, A., Eds.; Apress: Berkeley, 2019; pp. 667–688 ISBN 978-1-4842-4215-5.
- [21] Öncül, A.B. LSTM-GRU Based Deep Learning Model with Word2Vec for Transcription Factors in Primates. *Balk. J. Electr. Comput. Eng.* 2023, 11, 42–49.
- [22] Daldal, N.; Sengur, A.; Polat, K.; Cömert, Z. A Novel Demodulation System for Base Band Digital Modulation Signals Based on the Deep Long Short-Term Memory Model. *Appl. Acoust.* 2020, 166, 107346, doi:https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107346.
- [23] Budak, Ü.; Cömert, Z.; Rashid, Z.N.; Şengür, A.; Çıbuk, M. Computer-Aided Diagnosis System Combining FCN and Bi-LSTM Model for Efficient Breast Cancer Detection from Histopathological Images. *Appl. Soft Comput.* 2019, 85, 105765, doi:10.1016/j.asoc.2019.105765.
- [24] Cömert, Z.; Kocamaz, A.F.; Subha, V. Prognostic Model Based on Image-Based Time-Frequency Features and Genetic Algorithm for Fetal Hypoxia Assessment. *Comput. Biol. Med.* 2018, 99, 85–97, doi:10.1016/J.COMPBIOMED.2018.06.003.
- [25] 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, doi:https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107703.
- [26] Zou, F.; Shen, L.; Jie, Z.; Zhang, W.; Liu, W. A Sufficient Condition for Convergences of Adam and RMSProp. 2018, 11127–11135.

Elektrikli Araç Teknolojisinde Kullanılan Kurşun Asit ve Li-iyon Bataryaların Galvanostatik Test Sonuçlarının Karşılaştırılması

Esra BALCI^{1*}, Gürkan GÜNDÜZ², Sebahat ALTUNDAĞ³, Serdar ALTIN⁴

¹ Fizik Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

² Enerji ve Teknolojileri Anabilim dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

^{3,4} Fizik Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

*¹ eesra0122@gmail.com, ² grkngndz123@gmail.com, ³ sebahat.altundag@inonu.edu.tr, ⁴ serdar.altin@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 29/05/2023;

Kabul/Accepted: 24/07/2023)

Öz: Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekliliğini sağlamak ve içten yanmalı motorlar yerine elektrikli araçların kullanılması çevre ve yaşam kalitesini direkt etkilemektedir. Farklı metaller katkılanarak geliştirilmesi amaçlanan bataryalar üzerinde çalışmalar hala sürmektedir. Yüksek performans sergileyen ve uzun hizmet ömrü sunabilen bataryalar günümüzde her alanda talep edilmektedir. Bu çalışmada Li-iyon bataryalar ve kurşun-asit aküler hakkında genel bilgilendirme sunulması hedeflenmiştir. Pillerin elektrokimyasal davranışlarının analizi galvanostatik yöntem kullanılarak (100 çevrimde; sabit akım altında) gerçekleştirilmiştir. Hazır üretim olan pillerin; kapasite-döngü sayıları ile şarj-deşarj eğrileri incelendiğinde; Li-iyon türü batarya grubunda yer alan pilin (Sony VTC5) daha yüksek kapasite sergileyerek daha uzun hizmet ömrü sunacağını göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Kurşun asit aküler, Li - iyon bataryalar, Galvanostatik, EA.

Comparison of Galvanostatic Test Results of Lead Acid and Li-ion Batteries Used in Electric Vehicle Technology

Abstract: Ensuring the continuity of renewable energy sources and using electric vehicles instead of internal combustion engines directly affects the environment and quality of life. Studies on batteries that are intended to be developed by adding different metals are still in progress. Batteries with high performance and long service life are demanded in every field today. It also contains important information about the style of writing. In this study, it is aimed to provide general information about Li-ion batteries and lead-acid batteries. The analysis of the electrochemical behavior of the batteries was carried out using the galvanostatic method (100 cycles; under constant current). Fabricated batteries; When the capacity-cycle numbers and charge-discharge curves are examined; It has been shown that the battery (Sony VTC5) in the Li-ion type battery group will offer a longer service life by exhibiting a higher capacity.

Key words: Lead acid batteries, Li - ion batteries, Galvanostatic, EV.

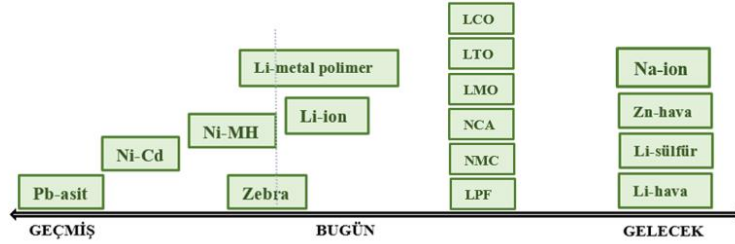
1. Giriş

Günümüzde hızla ilerleyen teknoloji ve bunu destekleyen enerji kaynaklarına ilave olarak düşünülen yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar artmaktadır. Enerji depolama görevi yapan tüm sistemler insan varlığının devam etmesi konusunda oldukça önemli rol oynamaktadır [1]. Aküler; elektrik enerjisini depolamada kullanılan en önemli ve verimli yollardan biri olarak kabul edilmektedir. Endüstrinin hemen hemen her alanında kullanılan pek çok farklı pil çeşiti mevcuttur, içerdikleri elektrot ve seçilen elektrolitlerine bağlı olarak her biri farklılık göstermektedir. Şekil 1'de gösterildiği gibi elektrikli araçların (EA) pil (Pb-asit: kurşun-asit, Ni-Cd: nikel-kadmium, NiMH: nikel-metal hidrit, Zebra: sıfır emisyon batarya araştırma faaliyeti, Li-iyon: lityum-iyon, LCO: lityum-kobalt-oksit, LMO: lityum-manganez-oksit, LTO: lityum-titanat, NMC: lityum-nikel-manganez-kobalt, NCA: lityum-nikel-kobalt-alüminyum, LPF: lityum-demir-fosfat, Na-ion: sodyum iyon, Li-hava: lityum hava, Li-sülfür: lityum sülfür, Zn-hava: çinko hava bataryalar) gelişimlerinin zaman çizelgesindeki temsili gösterimi verilmektedir [2].

Her akünün ise kendine özgü farklı pil kimyaları bulunmaktadır. Piller ise; kimyasal enerjiyi içerisinde barındıran ve depolamış olduğu kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen araçlardır [3]. Uygulanabilen bu dönüşümler tek yönlü ise birincil (primer) piller, çift yönlü (yani tersinir dönüşüm özelliğine de sahip) ise ikincil

* Sorumlu yazar: eesra0122@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-0127-7602, ² 0000-0002-3067-6576, ³ 0000-0002-4777-8376, ⁴ 0000-0002-4590-907X

(secondar) piller olarak tanımlanır. İkincil piller genellikle; Kurşun-asit (Pb-asit), Nikel-kadmiyum (Ni-Cd), Nikel-demir (Ni-Fe), Gümüş-çinko (Ag-Zn), Nikel-çinko (Ni-Zn), Çinko-mangan (Zn-Mn), Gümüş-kadmiyum (Ag-Cd), Nikel- metal hidrit (Ni-MH) ve Lityum-iyon (Li-ion) formunda olacak şekilde üretimleri gerçekleştirilmektedir [4]. Talepler doğrultusunda daha yüksek düzeyde geliştirilen batarya sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaçlar özellikle endüstriyel alanda elektrikli araçlar ve çoğu elektrikli küçük, taşınabilir cihazlar olmak üzere sıralanabilir. Benzinli araçların, EA yerine tercih edilmesinin nedenleri arasında bunların daha yavaş ve daha maliyetli olmaları, menzillerinin daha az olmaları ve pil ömürlerinin düşük enerji yoğunluğu, az dayanıklılık ve uzun şarj gerektirmesi gibi durumlardır [5-7]. Ancak yaşanan petrol krizleri ve fosil yakıt kaynaklarının sınırlı hale gelmesi, EA üzerine olan çalışmalarını tetiklemiştir [8, 9]. Elektrikli araçların üretimine yönelik çalışmalar 1800'lü yıllardan beri sürmektedir [10].



Şekil 1. Elektrikli araçlarda kullanılan pillerin temsili zaman çizgileri [2]

Kurşun-asit aküler hem otomotiv hem de endüstriyel uygulamalarda enerji depolamak için kullanılırken, teknolojik gelişmelerle birlikte Li-iyon batarya sistemleri, sodyum-kükürt aküleri gibi yeni teknolojiler kurşun akülerin yerini almaya başlamıştır. Her iki sisteminde kazandırmış olduğu avantajlardan faydalanılırken sistemlerde kullanım amaçlarına ve yerlerine göre bazen bazı dezavantajlarda var olabilir. Günümüzde içten yanmalı motorlara sahip olan çoğu aracın, elektrikli araçlara (EA) dönüşmesi ekolojik, sağlık ve maddi kazanç sağlaması bakımından önemlidir [11-13]. Kurşun- asit (Pb-asit) piller ya da kurşun asit aküler olarak tanımlanan bu grup piller ıslak pillerdir. 1859 yılında kurşun-asit piller Fransa' da Gaston Plente tarafından icat edilmiştir [14]. Kurşun-asit aküler uzun döngü ve raf ömrüne sahiptir. Elektrokimyasal bir enerji depolama sistemi olarak kullanılan kurşun piller, güvenilir ve düşük maliyetli olmasıyla önem arz eder [15]. Son yıllarda, pilin tam şarjlı duruma getirilmediği koşullarda bile daha uzun döngü ömürlerine sahip olacak şekilde geliştirilmiştir. Kısa süreli depolamalar için yüksek verimlilik kurşun pillerle karşılanabilir. Kurşun en verimli şekilde geri dönüştürülen metallere dendir ve kurşun akülerin %99'undan fazlası Avrupa ve ABD'de toplanıp geri dönüştürülmektedir [16-21]. Genellikle otomotiv aküleri ve endüstriyel akülerde kullanılmaktadır. Kısa süreli enerji depolamaları için istenilen yüksek verimliliğin kurşun pillerle karşılanması mümkündür. Kurşun asit batarya sistemleri kullanılırken negatif plakaları üzerinde korozyon meydana gelmesinden dolayı akülerin hizmet ömrünü azaltabilir [22, 23].

Lityum iyon bataryalar (Li-ion) bir çeşit yeniden doldurulabilir pil grubundandır. Lityum- iyon bataryaların temeli 1970 yıllarında M.Stanley Whittingham tarafından ortaya çıkmıştır [24]. Depolayabildiği enerji miktarı, birim hacmine göre oldukça yüksek verimlilik sağlayan bu grup bataryalar genellikle cep telefonları, müzik çalarlar, dizüstü bilgisayarlar gibi taşınabilir cihazlarda kullanılır [25]. Günümüzde ise ilave teknolojiler sayesinde BMW İ3, Tesla, Nissan gibi elektrikli araçlarda kullanımı mevcuttur [26]. Verebildikleri yüksek kapasitedeki enerji ile en iyi batarya çeşitleri arasında yer almakla beraber, günümüzde kullanımı oldukça yaygın hale gelmektedir [27]. Hafif olmaları, diğer bataryalara göre onlara avantaj kazandırır. Bu da onları küçük ve taşınabilir yapar. Ayrıca bu grup bataryaları şarj etmek için tam olarak boşalmalarını beklemek gerekmemektedir. Bu batarya gruplarının EA'larda kullanımı sera gazı emisyonlarını önemli derecede azaltacağı düşünülmektedir [28]. Li-iyon bataryalarda hafıza etkisi yoktur ve kullanılmadıkları zamanlarda enerji kayıpları Nikel bazlı şarj edilebilir pillere göre daha yavaştır. Bununla birlikte uygunsuz kullanılmaları halinde tehlikeli olabilirler. Eğer gerekli önlemler alınmaz ise diğer pil türlerine göre ömürleri daha kısa olabilir. Lityum iyon bataryaların en belirgin kusuru kullanım ömürlerinin üretim tarihlerinden itibaren başlamasıdır. Üretildiklerinden sonra şarj edilseler de edilmeseler de ömürleri üretim tarihinden itibaren azalmaya başlamaktadır. %100 şarj seviyesindeki ve çoğunlukla 25 °C derece sıcaklıkta bulunan tam dolu tipik bir dizüstü bilgisayar pili, geri dönüşü olmayacak şekilde her yıl kapasitesinin %20 sini kaybeder [22, 29].

Bu çalışmada EA teknolojisinde yaygın olarak kullanılan Kurşun asit akülerin ve Li-iyon bataryaların geliştirilmesi ile kazandırılan özellikler sonucunda; elektrokimyasal performans analiz testinden elde edilen sonuçlar ile her iki batarya üzerindeki avantaj ve dezavantajlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

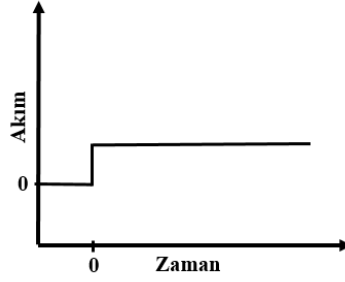
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada kullanılan; Sony VTC5 batarya ve Orbus 6V7Ah pil hazır üretimdir. Tablo 1’de verildiği üzere; Sony VTC5 batarya ve Orbus 6V7Ah pil hakkında genel özellikler verilmiştir.

Tablo 1. Sony VTC5 batarya ve Orbus 6V7Ah pil genel özellikleri [30].

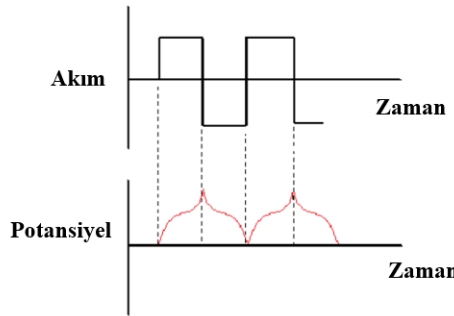
Marka	Sony VTC5	Orbus 6V 7Ah
Kimyası	Şarjlı pil – Li-iyon	Kuru akü- Kurşun-asit
Ölçüler	65x18,25 mm	150x34x94 mm
Voltaj	3,7 V	6 V
Kapasite	2,5 Amper	7 Amper
Ağırlık	48,50 gr	1250 gr

Çalışmada kullanılan pillerin elektrokimyasal test analizleri için gerçekleştirilen şarj- deşarj testleri galvanostatik yöntem ile uygulanmıştır. Galvanostatik test yöntemleri, temelinde kronopotansiyometrik (en temel sabit akım deneyi) yöntemi içinde barındıran bir tekniktir. Sabit bir akım elektrokimyasal hücre yardımıyla uygulanırken elde edilen grafikler referans olarak ele alınan elektrota göre potansiyelinde meydana gelen bir değişimin zamana karşı fonksiyonudur. Şekil 2’de gösterildiği üzere kronopotansiyometreye göre uygulanan akımın zamana bağlı değişiminin temsili gösterimi verilmektedir [31].



Şekil 2. Kronopotansiyometreye göre uygulanan akımın zamana bağlı değişimi [31].

Başka bir ifade ile üretilen piller, açık devre voltajından başlanarak (OCP) deşarj edilirler. Sabit bir akım değerinde, belirlenen voltaj değerleri arasında pillerin şarj ve deşarjı gerçekleştirilir. Bu işlem istenilen sayıda uygulanabilir. İşlemler sonucunda elde edilen sonuçlara göre elektrotların kapasitesi birim yüzey alanı ya da birim ağırlık cinsinden tanımlanabilir. Bu sonuçlara ilave olarak; voltaj-zaman-kapasite ya da kapasite- çevrim sayısı gibi grafiklerde elde edilebilir. Şekil 3’te gördüğü gibi temsili olarak bir galvanostatik şarj-deşarj yönteminde uygulanan akıma karşı potansiyel değişim grafiği verilmiştir [32].



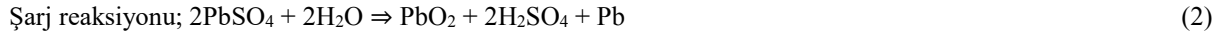
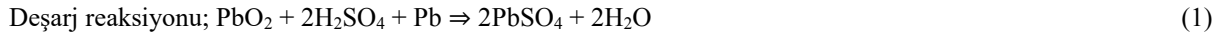
Şekil 3. Galvanostatik şarj-deşarj yönteminde uygulanan akıma karşı temsili potansiyel değişim grafiği [32].

Bu çalışmada elektrokimyasal çalışmaların genelinde kullanılan Gamry Reference tipi analiz cihazı kullanılmıştır. Sony VTC5 ve Orbus 6V7Ah bataryaların galvanostatik şarj-deşarj profilleri; 100 devire kadar sabit akım altında (CC) tutularak gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

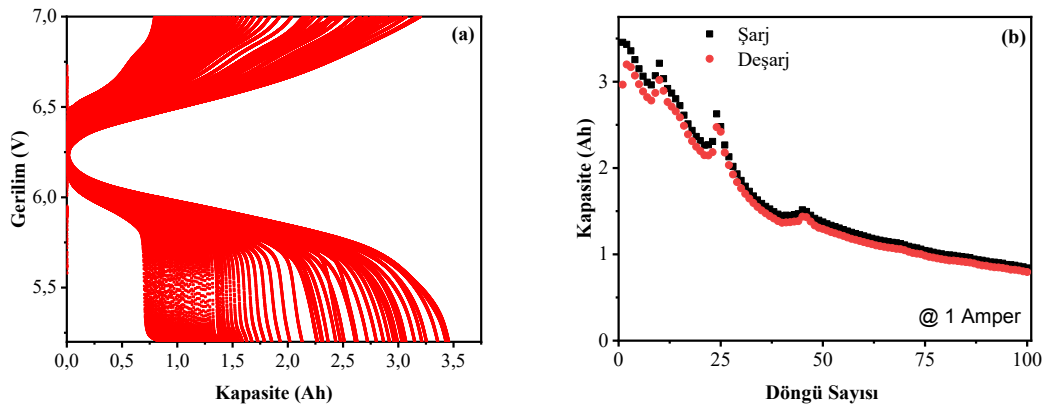
3.1. Kurşun asit teknolojisi ve batarya performans analizleri

Genellikle EV, botlar, motosikletlerde ve çoğu endüstriyel uygulama alanlarının çalışma, aydınlanma ve başlatılmasında kullanılan sistematiği için oluşturulan bu batarya grubu; yapısal olarak içinde barındırmış olduğu sülfirik asit elektrolitlerini içine alan Pb elektrotlarından meydana gelmektedir. Katot plakada kurşun oksit (PbO_2), anot plakada ise kurşun bulunmaktadır [33]. Bu grupta yer alan bir akünün şarj vedeşarj reaksiyonları sırasıyla Denklem 1 ve Denklem 2'deki gibi ifade edilir.



Bu pil gruplarının Dünya üzerinde geniş bir alanda kullanılmasının temel nedenleri arasında üretimlerinin kolay ve maliyetlerinin az olmasıdır. Diğer pil gruplarına göre daha küçük, ergonomik boyutlarda olması, neredeyse hiç bakım istememeleri onları daha güvenli ve tercih edilir yapmaktadır [34]. Yakıt ekonomisinde tasarruf ve sera gazı emisyonlarını en aza indirmek için Pb-asit akülerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar hızla artmaktadır. Kullanılan araçların hareketleri esnasında motor birçok kez çalışır ve durur. Aküler ise sürekli olarak döngüye girmektedir. Motor ve çalışan aküler arasında uyum sağlanmadığı sürece kullanılan pilin ömrü bir müddet sonra azalır [35]. Ömürleri ortalama 1200 ile 1800 şarj-deşarj döngüsü içerisinde kalmakla birlikte 5-15 yıl arasında değişim gösterir [36]. Bir Pb-asit pilinin anma gerilimi 2V kadar olup, %85 ile %90 oranında yüksek enerji verimliliği göstermektedir [37].

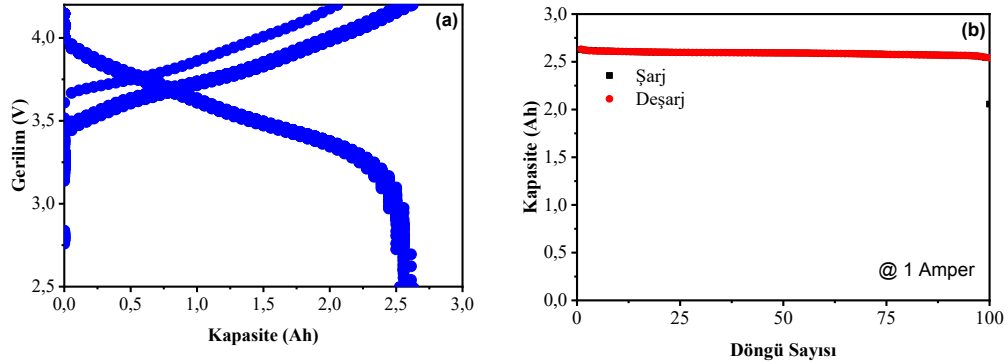
Şekil 4(a) ve (b)'de gösterildiği gibi Orbus 6V 7Ah pili için elektrokimyasal performans analiz testinden elde edilen grafikler verilmiştir. Şekil 4(a)'da verilen Orbus 6V 7Ah pili için 0,5 C kapasite test grafiği, Şekil 4(b)'de ise verilen Orbus 6V 7Ah pili için kapasiteye karşı-döngü sayıları gösterilmiştir. Buradan elde edilen sonuçla; 5,5 ile 7 volt aralığında gerilim-kapasite grafiğinde bu pilin kapasite değerinin 3,4 Ah'e kadar uzandığı ve doldurma-boşaltma eğrilerinde döngü sayısının artmasıyla kapasitesindeki düşüş açıkça görülmektedir. 100 döngüye kadar alınan bu ölçümlere göre, şarj-deşarj eğrilerinin döngü sayısı arttıkça, kapasite değerinin düşmesi; pilin kullanım ömrünün kısa olacağını ön görmektedir.



Şekil 4. (a) Orbus 6V 7Ah pili için 0,5 C kapasite test grafiği, (b) Orbus 6V 7Ah pili için kapasiteye karşı - döngü sayıları

3.2. Lityum İyon bataryalar ve batarya performans analizleri

Deşarj süreleri %5 oranında oldukça düşük olan bu bataryalar, 1500 döngüye kadar uzanan pil ömrüne sahip olan Li-iyon bataryaların [7], ana bileşenleri katot (örneğin; $\text{LiCoO}_2, \text{LiMn}_2\text{O}_4$) ve anot (örneğin; grafit) olan elektrotlar, ayırıcı ve sulu bir elektrolittir (örneğin; E2C) [38]. Elektrolitler, katot ve anot arasında artı yüklü iyonları taşıma görevi üstlenmektedir. Seperatör yani ayırıcı olarak kullanılan bölümde ise, sıvı elektrolitin kuruması sonucunda anot ve katot plakaların kısa devre olması ihtimalini ortadan kaldırmak için sistemde yer edinmektedir. Şekil 5(a) ve (b)'de gösterildiği gibi Sony VTC5 bataryası için elektrokimyasal performans analiz testinden elde edilen grafikler verilmiştir. Şekil 5(a)'da gösterildiği gibi Sony VTC5 bataryası için 0,5 C kapasite test grafiği, Şekil 5(b)'de ise verilen Sony VTC5 bataryası için kapasiteye karşı - döngü sayıları gösterilmiştir. Buradan elde edilen sonuçla; 2,5 ile 4,3 volt aralığında gerilim-kapasite grafiğinde bu pilin kapasite değerinin 2,7 Ah'e kadar uzandığı ve doldurma-boşaltma eğrilerinde döngü sayısının artmasıyla kapasitesindeki düz eğriler oldukça önemlidir. 100 döngüye kadar alınan bu ölçümlere göre, şarj-deşarj eğrilerinin döngü sayısı arttıkça, kapasite değerinin hemen hemen her noktada sabit kalması; pilin kullanım ömrünün uzun olacağını ön görmektedir.



Şekil 5 (a). Sony VTC5 bataryası için 0,5 C kapasite test grafiği, (b) Sony VTC5 bataryası için kapasiteye karşı - döngü sayıları.

Yapılan taramalar ve kapasite grafikleri de göz önüne alınarak, genel çerçevede Sony VTC5 ve Orbus 6V 7Ah bataryanın avantaj ve dezavantajlarını gösteren bilgiler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Li-iyon bataryalar ve Kurşun-asit pillerin genel olarak avantaj ve dezavantajları [39].

Sony VTC5/ Orbus 6V7Ah	Li-iyon Bataryalar	Kurşun-Asit Piller
	Avantaj	Dezavantaj
Çevresel Etki	+	-
Yüksek Verimlilik	+	+
Çevrim Ömrü	+	-
Kapasite	+	-
Bakım Gereksinimi	+	-
Taşınabilirlik ve Hafiflik	+	-
Maliyet	-	+
Enerji İsrافی	+	-

Elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar işgal edeceği hacim ve uzun hizmet ömrü sunabilmeleri için gereken kapasite açısından kilit faktör olarak rol oynar. Elektrikli araçlarda istenilen güç ya da enerji ihtiyacını karşılamak için akü modülleri paralel veya seri olarak istenilen şekilde bağlanabilir. 100 çevrim döngüsüne kadar alınan bu ölçümlerde ağırlıkları 1250 gramı bulan kurşun-asit akülerin 7 amper ve 6 volta kadar uzanan bu kapasite değeri; Li-iyon batarya grubunda yer alan Sony VTC5 türü 3 pili 2'ser gruplar halinde paralel ve bu gruplar da kendi

aralarında seri bağlanırsa; toplamda 7,5 amper ve 7,4 volt değerinde kapasiteleri yükselir, toplamdaki ağırlığı ise 291 grama kadar düşürülmesi mümkündür.

4. Sonuç

İlerleyen teknoloji ile daha yüksek verimlilik, az maliyet ve daha az bakım gerektiren yeni batarya türleri; farklı metaller ile katkılanarak günümüzde geliştirilmeleri son hızda devam edilmektedir. Sadece elektrikli araçların motor bölümleri değil, araçların teknik gereksinimlerini karşılamak içinde bataryalar oldukça önemli rol oynar. Kurşun-asit akülerin uzun zamandan beri kullanılıyor olması, maliyetlerinin düşük ve uzun raf ömrüne sahip olmalarından dolayıdır. Li-iyon bataryalar ise; yüksek verimlilik, daha uzun çevrim ömrü, daha az bakım gereksinimi, sera gazı emisyonunu düşürmesi ile çevreye olumlu etkisi, taşınabilirlik ve ağırlık açısından kurşun-asit akülere göre kullanımını ön plana çıkartmıştır. Bu çalışmada Li-iyon bataryalar ve kurşun-asit aküler hakkında genel bilgilendirme sunulması hedeflenmiştir. Pillerin elektrokimyasal davranışlarının analizi galvanostatik yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiş ve kapasite ile şarj-deşarj eğrileri incelendiğinde; Li-iyon türü batarya grubunda yer alan pilin daha yüksek kapasite sergileyerek daha uzun hizmet ömrü sunacağını göstermiştir. Lityum piller mevcut en hızlı şarj olan pil gruplarından bazılarıdır. Lityum piller ayrıca diğer pillere göre daha az yerleştirme sorununa sahiptir. Saklanması ve çok az endişe ile paketlenmesi kolaydır. Bakımı iyi yapılmış bir lityum pil paketi, 2000 ile 5000 döngü arasında herhangi bir yerde dayanabilme özelliğine sahiptir. Ayrıca; Lityum pil paketlerine sahip cihazların satın alınması, bu cihazların daha uzun süre tam kapasitede çalışmasına yardımcı olabileceği sonucuna varılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi (Proje No: FYL-2022-2852) tarafından desteklenmiştir. Bu makale, Gürkan Gündüz'ün mevcut yüksek lisans çalışmasının bir parçasıdır. Bu çalışmaya olan katkılar sırasıyla; S.A. fikir sahibidir, G.G. ve S.A deneyleri gerçekleştirmiştir E.B., G.G. ve S.A. sonuçları yorumlamıştır, E.B. ve G.G. makaleyi yazmıştır.

Kaynaklar

- [1] Tang W, Liu L, Tian S, Li L, Yue Y, Wu Y, Guan S, and Zhu K. Nano-LiCoO₂ as cathode material of large capacity and high rate capability for aqueous rechargeable lithium batteries, *Electrochemistry Communications* 2010; 12: 1524-1526.
- [2] Catenacci M, Fiorese G, Verdolini E, and Bosetti V. Going electric: Expert survey on the future of battery technologies for electric vehicles, in *Innovation under Uncertainty*, Edward Elgar Publishing 2015; 6:110-138.
- [3] Brodd R. What are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors, *Chemical Reviews* 2005; 105: 1021.
- [4] Turan D, and Yönetken A. Enerji depolama sistemlerinin araştırılması ve analizi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2016; 16: 113-121.
- [5] Nor J.K. Art of charging electric vehicle batteries. In *Proceedings of Wescon'93. IEEE 1993*; San Francisco, CA, USA:293.
- [6] Xiao Q, Li B, Dai F, Yang L, and Cai M. Application of lithium ion battery for vehicle electrification, *Electrochemical Energy: Advanced Materials and Technologies* 2015;1-29.
- [7] Özcan Ö.F, Karadağ T, Altuğ M, and Özgüven Ö. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması, *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation* 2021;8: 276-298.
- [8] Lukic S.M, Cao J, Bansal R.C, Rodriguez F, and Emadi A. Energy storage systems for automotive applications, *IEEE Transactions on industrial electronics* 2008;55: 2258-2267.
- [9] Muratoğlu Y. and Alkaya A. Elektrikli Araç Teknolojisi ve Pil Yönetim Sistemi-İnceleme, *Elektrik Mühendisliği* 2016;458: 10-14.
- [10] Chan C. An overview of electric vehicle technology, *Proceedings of the IEEE* 1993;8: 1202-1213.
- [11] Etacheri V, Marom R, Elazari R, Salitra G, and Aurbach D. Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: a review, *Energy & Environmental Science* 2011; 4: 3243-3262.
- [12] Demir U. and Akuner M. Design and optimization of in-wheel asynchronous motor for electric vehicle, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 2018; 33: 1517-1530.

- [13] Güneş D, Tekdemir İ.G, Karaarslan M.Ş, and Alboyacı B. Assessment of the impact of electric vehicle charge station loads on reliability indices, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 2018; 33: 1073-1084.
- [14] Soloveichik G.L. Battery technologies for large-scale stationary energy storage, *Annual review of chemical and biomolecular engineering* 2011; 2: 503-527.
- [15] Daniel C. and Besenhard J.O. *Handbook of battery materials*, John Wiley & Sons 2012.
- [16] Palizban O. and Kauhaniemi K. Energy storage systems in modern grids—Matrix of technologies and applications, *Journal of Energy Storage* 2016; 6: 248-259.
- [17] Luo X, Wang J, Dooner M, and Clarke J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation, *Applied energy* 2015; 137: 511-536.
- [18] Tan X, Li Q, and Wang H. Advances and trends of energy storage technology in microgrid, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2013; 44: 179-191.
- [19] Chen H, Cong T, Yang W, Tan C, Li Y, and Ding Y. Progress in electrical energy storage system: A critical review 2009; 19: 291-312.
- [20] Ibrahim H, Ilinca A, and Perron J. Energy storage systems—Characteristics and comparisons, *Renewable and sustainable energy reviews* 2008;12:1221-1250.
- [21] Hall P.J. and Bain E.J. Energy-storage technologies and electricity generation, *Energy policy* 2008; 36: 4352-4355.
- [22] Moseley P.T. and Garche J. *Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing*, Newnes 2014.
- [23] Pavlov D. *Lead-acid batteries: science and technology*, Elsevier 2011.
- [24] Yoshino A. The birth of the lithium-ion battery, *Angewandte Chemie International Edition* 2012; 51: 5798-5800.
- [25] Lin D, Liu Y, and Cui Y. Reviving the lithium metal anode for high-energy batteries, *Nature nanotechnology*, 2017; 12: 194-206.
- [26] Vidyanandan K. *Batteries for electric vehicles*, Power Management Institute 2019.
- [27] Tarascon J.M. and Armand M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries, *nature* 2001; 414: 359-367.
- [28] Vikström H, Davidsson S, and Höök M. Lithium availability and future production outlooks, *Applied energy* 2013; 110: 252-266.
- [29] Kruse R.E. and Huls T.A. *Development of the federal urban driving Schedule* 1973.
- [30] Traub L.W. Calculation of constant power lithium battery discharge curves, *Batteries* 2016; 2: 17.
- [31] Kılıç, R. Farklı elektrokimyasal yöntemlerle sentezlenen poli (1-5, diaminonaftalin) filmlerinin süperkapasitör özelliklerinin incelemesi, Ph.D. thesis, ESOGÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü 2014.
- [32] Amanov A, Cho I.S, Kim D.E, and Pyun Y.S. Fretting wear and friction reduction of CP titanium and Ti–6Al–4V alloy by ultrasonic nanocrystalline surface modification, *Surface and Coatings Technology* 2012; 207: 135-142.
- [33] Vest H. *Fundamentals of the Recycling of Lead-Acid Batteries*, Gate Information Service 2002;6: 1-2.
- [34] Canis B. *Battery manufacturing for hybrid and electric vehicles: Policy issues*, Congressional Research Service Washington, DC, USA 2013.
- [35] Moseley P.T, Rand D.A, and Peters K. Enhancing the performance of lead–acid batteries with carbon–In pursuit of an understanding, *Journal of Power Sources* 2015; 295: 268-274.
- [36] Cano Z.P, Banham D, Ye S, Hintennach A, Lu J, Fowler M, and Chen Z. Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets, *Nature Energy* 2018; 3: 279-289.
- [37] Hadjipaschalis I, Poullikkas A, and Efthimiou V. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications, *Renewable and sustainable energy reviews* 2009; 13: 1513-1522.
- [38] Duffner F, Mauler L, Wentker M, Leker J, and Winter M. Large-scale automotive battery cell manufacturing: Analyzing strategic and operational effects on manufacturing costs, *International Journal of Production Economics* 2021; 232: 107982.
- [39] Gençten M, Kurşun asit akülerin performanslarının artırılması, Ph.D. thesis, Anadolu University (Turkey) 2016.

Orman ve Tarım Atıklarından Sürdürülebilir Bitkisel Lifli Düşük Yoğunluklu Kompozit İzolasyon Levhası Üretimi

Mehmet YAŞAR^{1*}, Mustafa ALTUNOK²

¹ Endüstriyel Tasarım Bölümü, Dinar UBYO, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye

² Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

*¹ myasar@aku.edu.tr, ² altinok@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 21/06/2023;

Kabul/Accepted: 28/07/2023)

Öz: Orman ve tarım atıklarının kaynak oluşturma seviyesini iyileştirmek amacıyla fidan dikiminde kullanılmak üzere tohumları alınmış çam kozalakları ile hasat süreci tamamlanmış ayçiçeğinin sonraki ürün ekilebilmesi için tarladan uzaklaştırılması gereken ayçiçeği saplarının tercihiyle lifli organik izolasyon bileşenleri kullanılması amaçlanmıştır. Kompozit panel ürünlerinin hammaddesi olma potansiyeli fikrinden yararlanmak için birçok araştırmalar yapılmaktadır. Bu makalede, orman ve tarım atıklarından olan çam kozalağı ile ayçiçeği sapı, sürdürülebilir bitkisel lifli geri dönüştürerek yapısal faaliyetlerde uygulanabilir çevre dostu kompozit düşük yoğunluklu izolasyon levhası üretimi amaçlanmıştır. En yüksek, ısı iletkenlik katsayısı çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı katkılı 40 mm kalınlığındaki örneklerde 147,67 W/mK; ısı geçirgenlik katsayısı çam kozalağı 50 mm kalınlığındaki örneklerde 2,94 W/m²K tespit edilmiştir. En yüksek eğilme direnci çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı katkılı 40 mm kalınlığındaki örneklerde 162,21 N/mm²; elastikiyet modülü çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı katkılı 40 mm kalınlığındaki örneklerde 292,05 MPa; yüzeye dik çekme direnci çam kozalağı 50 mm kalınlığındaki örneklerde 81,89 N/mm²; vida tutma direnci çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı katkılı 50 mm kalınlığındaki örneklerde 68,89 N/mm² tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sürdürülebilirlik, kompozit, atık, çam kozalağı, ayçiçeği sapı

The Production of Sustainable Low Density Composite Insulation Boards with Vegetable Fibre from Forestry and Agricultural Wastes

Abstract: In order to improve the resource generation level of forest and agricultural wastes, it was aimed to use fibrous organic isolation components by choosing pinecones whose seeds have been removed to be used in planting saplings and sunflower stems which need to be removed from the field in order to plant the next crop of sunflower after completing harvesting process. A lot of research is carried out to take advantage of the raw material potential of composite panel products. This study aims to produce an environmentally friendly composite low-density insulation board which can be utilized in structural activities by recycling pinecones and sunflower stems with sustainable vegetable fiber from forestry and agricultural wastes. The highest coefficient of thermal conductivity was found as 147,67 W/mK in samples with a thickness of 40 mm in pinecones with added sunflower stems; the thermal conductivity coefficient was determined as 2,94 W/m²K in samples with a thickness of 50 mm in pinecone. The highest adhesive strength was determined as 162,21 N/mm² in samples with a thickness of 40 mm in the pinecone with added sunflower stems. The modulus of elasticity was found as 292,05 MPa in samples with a thickness of 40 mm in the pinecone with added sunflower; vertical adhesive strength of the pinecone was determined as 81.89 N/mm² in samples with a thickness of 50 mm; screw withdrawal resistance was determined as 68,89 N/mm² in samples with a thickness of 50 mm in pinecones with added sunflower stems.

Key words: Sustainability, composite, waste, pine cone, sunflower stalk.

1. Giriş

Günümüzde izolasyon malzemelerinin üretimine yönelik teknolojik çözümler, çoğunlukla silis kaynaklarından elde edilen cam elyafına veya petrolden elde edilen diğer sentetik elyaflara dayalı, büyük miktarda yenilenemeyen doğal kaynakları kullanır. İzolasyon levhası üretiminde enerji tüketimi ve CO₂ salınımı doğal hammaddelerin kompozit yapı malzemesi olarak tercihlerinde önemli etkenlerdendir [1,2]. 21. yüzyılın en önemli zorluklarından biri, her düzeyde enerji kaynağı ve çevresel bağlamda sürdürülebilirliği sağlamaktır [3].

Yeni Sürdürülebilir Kalkınma Gündemi, dögüsel bir ekonomi stratejisi ile yaşam döngüsünün sonundaki bir ürünün üretim sürecine geri döndürülerek, malzeme girdisini azaltmayı, atık oluşumunu ve enerji kullanımını en aza indirilerek bir ürünün uzun süreli değerini korumayı amaçlar. Bitkisel hammaddelerden üretilen ekolojik

* Sorumlu yazar: myasar@aku.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-7699-6663, ² 0000-0002-2048-1994

yalıtım panellerinin yapı sektöründe kullanımının giderek artmasıyla doğada ciddi bir sorun olan bertaraf edilme problemi de olmaktan kalkmaktadır [4]. Tarımsal atıklar olarak vasıflandırılan ürünlerin yeniden değerlendirilmelerine ve atıktan ikincil ham maddeye dönüştürülmeleri sağlanmaya imkan verir. İnşaat sektöründe, bu malzemelerin hammadde olarak kolay kullanılabilirliği, basitliği, uygulanabilirliği, düşük maliyeti, termal ve akustik özellikleri sayesinde sürdürülebilir atık değerlendirme amaçlarına ulaşılmaktadır [5-6]. Doğal maddelerden buğday samanı kil ve su bazlı boya kullanılarak doğa dostu yalıtım malzemeleri geliştirilmiştir [7]. Termal, higrometrik ve biyolojik özelliklerini değerlendirmek sıkıştırılmış saman balyası için ham koyunyünü, ağaç lifi, kenevir, keten ve gibi bazı doğal malzemelerle çeşitli testler yapılmıştır. Buğday samanı esaslı yalıtım malzemelerinin ısı iletkenliğinin test sonuçlarında mineral yüne göre %25 daha yüksek olduğu görülmüştür. Özellikle keten ve kenevir lifleri çok düşük bir termal iletkenliğe (0,052 W/mK) ulaşmıştır [8]. Sürdürülebilir bir bina yapımında saman balyasının, sıva uygulaması ile potansiyel kullanımına ilişkin niceliksel bir değerlendirmesini veren çok katmanlı bir yapı malzemesi geliştirilmiştir [9]. Saman balyası ve toprak gibi doğal malzemeler, işlenmiş malzemelerden daha az somutlaşmış enerjiye sahiptir. Bunların binalarda kullanılmasıyla sürdürülebilirliğe değerli bir katkı sağlanabilir [10-12]. Soğuk iklimin hakim olduğu yerleşim alanlarında çevre dostu ısı yalıtımı sağlamak amacıyla atmosfere salınan CO₂ emisyonlarının azaltılması dikkate alınarak, saman-keten nimet levhalarının kullanılıp kullanılmayacağı test edilmiştir. En iyi termofiziksel ve mekanik performans, optimum yapısını sağlamaya olanak tanıyan, farklı boyut ve şekle sahip liflerden oluşan termal kompozit yapıya sahip yalıtım malzemelerde elde edilmiştir [13]. Agregata olarak geri dönüştürülmüş cam ve çimentonun kısmi ikamesi olarak yakılmış lağım çamuru külü (ISSA) kullanarak yeşil bir beton bölme duvar bloğu oluşturulmuştur. Bölme duvar bloklarının inşası için atık cam ve ISSA uygulamaları, yalnızca atıkların yeniden kullanılması için alternatif bir yaklaşım sağlamakla kalmayıp aynı zamanda iyi bir termal performans sağladığı tespit edilmiştir [14]. Kilden çok hafif tuğla üretiminden kaynaklanan toz kalıntısı, asetilen üretiminden sönmüş kireç atığı ve atölyelerden gelen atık alüminyum tozları karıştırılarak elde edilen levhalarda 0,26 W/mK den daha düşük bir termal iletkenlik katsayısı elde ediliyor [15]. Ahşap malzemenin yapışma kalitesi ve mukavemeti, yapısal ve dış mekan uygulamaları için önemlidir [16]. Günümüzde ahşap plastik kompozitlerin birbirinden farklı ortamlarda kullanıldığı belirtilmiştir. Ahşap plastik kompozitlerin imalatında talaş tozu ile bir polimer belirli oranlarda karıştırılarak ekstruder makinesinden geçirilip son haline dönüştürülmüştür [17].

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Çalışmada Afyon ve Dinar orman fidanlık şefliklerinden tohumları alınmış karaçam (*Pinus nigra* Arnold) ve kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) kozalağı ile Afyonkarahisar ili Sandıklı ilçesi Sorkun köyünde hasat işlemi tamamlanmış ayçiçeğinin (*Helianthus annuus* L.) sapı kullanılmıştır. Ülkemizdeki ibreli orman varlığı 10.969.246 ha. [18] ve ayçiçeği üretimi 2 milyon ton ve ekim alanı 728 bin ha. [19] olarak tarım ve orman bakanlığı verilerinde tespit edilmiştir. Üre formaldehit tutkalı, tutkalın sertleştirilmesinde katalizör olarak amonyum sülfat ve parafin Gentaş AŞ bayisinden temin edilmiştir. İzolasyon levhası üretiminde kullanılan çam kozalağı ve ayçiçeği sapının kimyasal özelliklerine ilişkin bilgiler Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. Çam kozalağı [20] ve ayçiçeği sapının [21-22] kimyasal bileşimi

Çam kozalağı kimyasal özellikleri	İçerik	Ayçiçeği sapı kimyasal özellikleri	İçerik
Glikoz (%)	46,2	Holoselüloz (%)	66,9
Mannoz (%)	24,6	%1 NaOH çözümleri (%)	50,4
Klason lignin (%)	23,8	α -selüloz (%)	37,6
Etanol/toluen ekstraktifleri (%)	6,4	Sıcak suda çözümler (%)	22,1
Galaktoz (%)	4,0	Lignin (%)	10,8
Ksiloz (%)	3,5		
Asitte çözümler lignin (%)	0,7		
Kül (%)	0,4		
Arabinoz (%)	0,01		

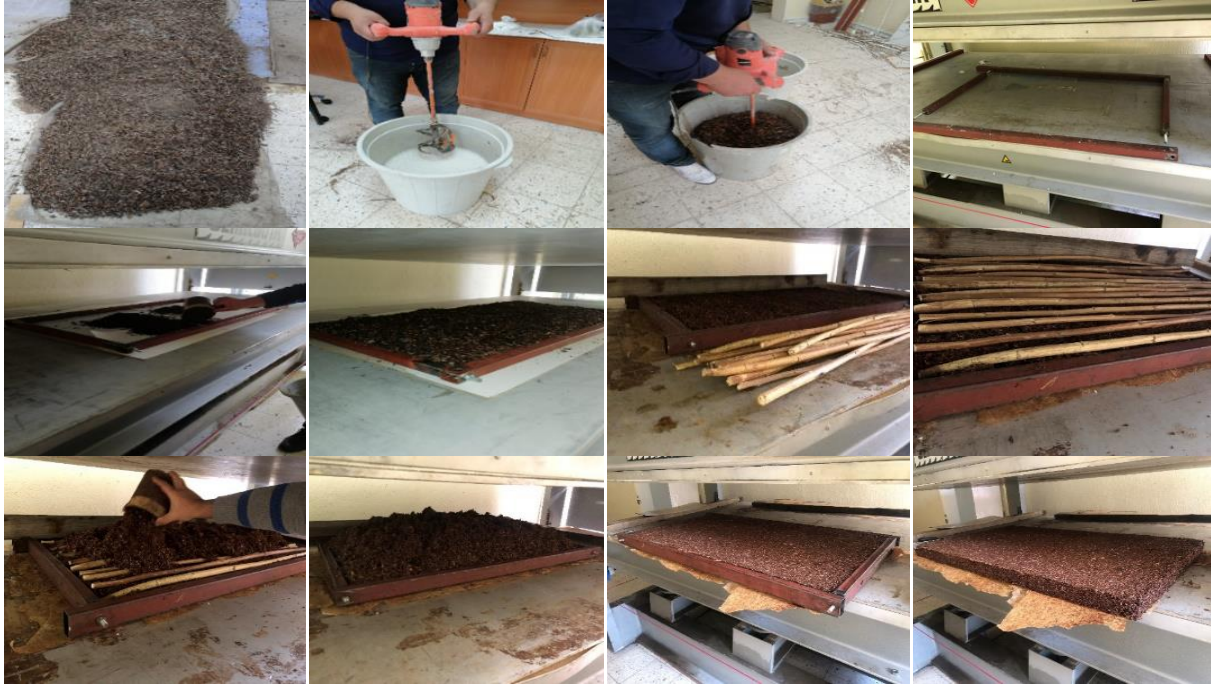
İzolasyon levhalarının üretiminde kullanılan tutkal türünün kimyasal özellikleri, parafinin kimyasal özellikleri ve sertleştiricini kimyasal özellikleri ilişkin veriler Tablo 2 de verilmiştir.

Tablo 2. İzolasyon levhasının üretiminde kullanılan kimyasalların özellikleri

Özellikler	1,12 mol ÜF	Parafin	Sertleştirici
Yoğunluk (20 °C g/cm ³)	1.205	0,92	0,90
Katı madde	60±1	55	20
pH değeri	7-8,5	8-9	7
Vizkosite (25 °C cps) (sn)	15-45	15-30	-
Raf ömrü (gün)	75	45	-
Metilol grups (%)	12-15	-	-
Jel zamanı (100°C) (20% (NH ₄) ₂ SO ₄) (sn)	20-55	-	-
Serbest formaldehit (%) (max)	0,18	-	-

2.2. Metot

Kompozit izolasyon 0,4 gr/cm³ yoğunluklu levhaların üretimi için boyu 1000 mm eni 500 mm kalınlıkları 30 mm, 40 mm ve 50 mm olan kalıplar hazırlanmıştır. Firmanın önerileri doğrultusunda PH değeri 5 olan su ile (formaldehit ile aynı oranda) üre ve formaldehit 1/2 mol oranında karıştırılmak suretiyle tutkal çözeltisi elde edilmiştir. Öğütülmüş çam kozalaklarına ağırlıkça %11 oranın tutkal eklenerek 5 dakika süre ile kısıtlanmak koşuluyla homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Cemil Usta firmasına ait SSP 80 model sıcak preste 100 °C sıcaklık ve 100 ton baskı gücü altında 30 dakika süre ile hazırlanan karışım kalıp içerisine serilip dozajlama yapıldıktan sonra presleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çam kozalağına %6 oranında ayçiçeği sapı ilaveli olarak basılacak levhalarda hazırlanan çam kozalağı tutkal karışımının yarısı kalıba serilmiş ve üzerine ayçiçeği sapları levhanın tek sıralı olma şartıyla boyuna ve enine yönde aralarında 3 cm boşluk olacak şekilde sıralanmıştır. 2,5-3 cm çapındaki ayçiçeği sapları sıralandıktan sonra üzerine çam kozalağı tutkal karışımının kalan yarısı serilip dozajlama işlemi gerçekleştirildi. Levhaların hava kurusu yoğunluk, rutubet oranı, ısı iletkenlik katsayısı, ısı geçirgenlik katsayısı, eğilme direnci, elastikiyet modülü, basınç direnci, yüzeye dik çekme direnci ve yüzeye dik vida tutma direnci değerleri tespit edilmiştir.

**Şekil 1.** Kompozit levhaların hazırlık aşamaları

2.2.1. Fiziksel ve Mekanik özelliklerin belirlenmesi

Çalışmada yapılan fiziksel, termal ve mekanik özellikler ile standartları Tablo 3 de yer almaktadır.

Tablo 3. Fiziksel, termal ve mekanik özellikler ile standartlar

Özellikler	Standartlar
Hava Kuru Yoğunluk	TS EN 323, 1999 [23]
Rutubet Belirleme	TS EN 322, 1999 [24]
Isı İletkenlik Katsayısı	TS EN 12667, 2003 [25]
Isı Geçirgenlik (Yalıtım) Katsayısı	TS EN 12667, 2003 [25]
Eğilme Direnci	TS EN 310, 1999 [26]
Elastikiyet Modülü	TS EN 310, 1999 [26]
Yüze Dik Çekme Direnci	TS EN 319, 1999 [27]
Yüze Dik Vida Tutma Direnci	TS EN 13446, 2005 [28]

2.2.2. İstatistik hesaplarının yapılması

Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler Excel programında kaydedilip her test için aritmetik ortalamalar, standart sapmalar ile varyasyon katsayıları hesaplanmış ve ilgili tablolara aktarılmıştır. İstatistik hesaplamalar MSTAT-C paket programında yapılmıştır. Gruplar arasındaki farklılıkların incelenmesinde LSD ve Duncan testleri, tek faktörlü ve çok faktörlü varyans analizi yapılmıştır.

3. Bulgular

Çam kozalağı ve çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı ilaveli levhaların fiziksel ve termal özelliklerin ortalama değerleri Tablo 4 de ve ilgili görseller Şekil 2' de verilmiştir.

Tablo 4. Fiziksel ve termal özelliklerin ortalama değerleri

Levha Türü	Levha Kalınlığı	x	Sx	v		
Hava Kuru Yoğunluk	Çam Kozalağı	30 mm	0,41	0,02	0,06	
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli	40 mm	0,41	0,02	0,04	
		50 mm	0,43	0,02	0,04	
		30 mm	0,41	0,01	0,03	
	Rutubet Miktarı	Çam Kozalağı	40 mm	0,42	0,01	0,03
			50 mm	0,43	0,02	0,04
30 mm			12,02	0,03	0,002	
Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli		40 mm	12,17	0,05	0,004	
		50 mm	12,43	0,08	0,01	
		30 mm	12,02	0,01	0,001	
Isı İletkenlik Katsayısı	Çam Kozalağı	40 mm	12,17	0,02	0,001	
		50 mm	12,42	0,02	0,002	
		30 mm	83,27	8,66	0,10	
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli	40 mm	86,58	8,24	0,10	
		50 mm	146,94	14,52	0,10	
		30 mm	84,67	5,39	0,06	
Isı Geçirgenlik Katsayısı	Çam Kozalağı	40 mm	147,67	62,67	0,42	
		50 mm	127,50	25,08	0,20	
		30 mm	2,50	0,64	0,26	
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli	40 mm	2,38	0,63	0,27	
		50 mm	2,94	0,29	0,10	
		30 mm	2,59	0,50	0,19	
Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli	40 mm	2,49	0,22	0,09		
	50 mm	2,60	0,15	0,06		

Hava kurusu haldeki (%12) ortalama yoğunluk miktarları en yüksek 0,43 gr/cm³ ile çam kozalağı ve çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı ilaveli 50 mm kalınlığındaki örneklerde saptanmıştır. En düşük ise çam kozalağı 30 mm ile 40 mm kalınlığındaki örnekler ile çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı ilaveli 30 mm kalınlığındaki örneklerde 0,41 gr/cm³ olarak bulunmuştur. Rutubet miktarı en yüksek %12,02 ile çam kozalağından 50 mm kalınlığındaki örneklerde en düşük ise %12,02 olarak çam kozalağı ve çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı ilaveli 30 mm kalınlığındaki örneklerde tespit edilmiştir. Isı iletkenlik katsayısı en yüksek çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı ilaveli 40 mm kalınlığındaki örneklerde 147,67 W/mK iken en düşük çam kozalağı 30 mm kalınlığındaki örneklerde 83,27 W/mK bulunmuştur. Ayçiçeği sapı ve 4 mm mdf kullanılarak yapılan çalışmada hava kurusu yoğunluk 0,22–0,33 gr/cm³, rutubet miktarı ise %4,47-%15,07, ısı iletkenlik katsayısı 0,036-0,076 W/mK olarak verilmiştir [29]. Isı geçirgenlik katsayısı çam kozalağından 50 mm kalınlığındaki örneklerde 2,94 W/m²K tespit edilirken en düşük çam kozalağından 40 mm kalınlığındaki örneklerde 2,38 W/m²K saptanmıştır. Doğan 2021, ısı iletkenlik katsayısı 104,9–130,9 W/mK ve ısı geçirgenlik katsayısını 5,84–7,21 W/m²K arasında bulunmuştur [30]. Karton ve ahşap esaslı yapmış olduğu levhalardan elde etmiş olduğu örneklerde hava kurusu yoğunluğu 0,65–0,70 gr/cm³, rutubet miktarı %6-%7, ısı iletkenlik katsayısı 0,078 - 0,094 W/mK, ısı geçirgenlik katsayısı değerleri ise ortalama 4,170-5,530 W/m²K arasında hesaplanmıştır [31].



Şekil 2. Fiziksel ve termal özelliklerin belirlenmesi

Yapılan varyans analizi sonucunda; çam kozalağı ve %6 ayçiçek sapı ilaveli levhalardan hazırlanan deney numunelerinin, levha türü, levha kalınlığı ve etkileşimleri ile hava kurusu yoğunluk miktarları arasında önemli (0,05) farklılıklar bulunduğu belirlenmiştir (Tablo 5).

Tablo 5. Hava kurusu yoğunluk değerlerine ilişkin varyans analizi

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	Pr>F
Levha Türü (A)	1	0,065	0,065	8,6970	0,0086*
Levha Kalınlığı (B)	2	0,089	0,044	13,6123	0,0000*
Etkileşim (AB)	2	0,063	0,031	9,6271	0,0004*
Hata	36	0,118	0,003		
Toplam	59	0,470			

*: Fark, 0,05' e göre anlamlı Ns: Önemsiz

Tablo 5'e göre; levha türü ve kalınlığı ile ikili etkileşimleri istatistiksel olarak önemli çıkmıştır ($P \leq 0,05$). Farklılığın hangi şartlarda önemli olduğunu belirlemek için yapılan Duncan testi sonuçları Tablo 6'de verilmiştir.

Levha türü bakımından hava kurusu yoğunluk değeri en yüksek 0,57 gr/cm³ ile çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli örneklerde tespit edilmiştir. Levha kalınlığı bakımından hava kurusu yoğunluk değeri en yüksek 0,59 gr/cm³ ile 50 mm kalınlıktaki örneklerde saptanmıştır. İkili etkileşimde hava kurusu yoğunluk değeri en yüksek 0,62 gr/cm³ ile çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli 50 mm kalınlıktaki örneklerde belirlenmiştir (Tablo 6).

Yapılan varyans analizi sonucunda; çam kozalağı ve çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli levhalardan hazırlanan deney numunelerinin, levha türü, levha kalınlığı ve etkileşimleri ile rutubet miktarları arasında önemli (0,05) farklılıklar bulunduğu belirlenmiştir (Tablo 7).

Tablo 7'ye göre; levha türü, levha kalınlığı ve ikili etkileşimleri istatistiksel olarak önemli çıkmıştır ($P \leq 0,05$), Farklılığın hangi uygulamalarda önemli olduğunu belirlemek için yapılan Duncan testi sonuçları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 6. Hava kurusu yoğunluk değerleri Duncan testi sonuçları ve homojenlik grupları

Faktör		Xort	HG
Levha Türü	Çam Kozalağı	0,51	B
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli	0,57	A
LSD:± 0,02830			
Levha Kalınlığı	30 mm	0,50	B
	40 mm	0,53	B
	50 mm	0,59	A
LSD:± 0,3466			
Levha Türü + Levha Kalınlığı	Çam Kozalağı + 30 mm	0,51	C
	Çam Kozalağı + 40 mm	0,45	D
	Çam Kozalağı + 50 mm	0,56	B
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli + 30 mm	0,50	CD
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli + 40 mm	0,60	AB
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli + 50 mm	0,62	A
LSD:± 0,04901			

Tablo 7. Rutubet miktarı değerlerine ilişkin varyans analizi

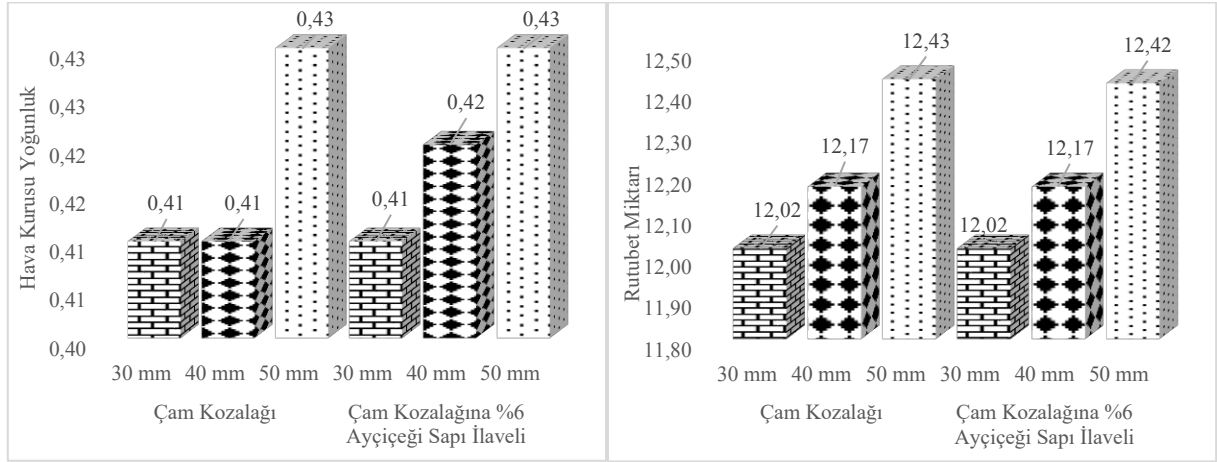
Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	Pr>F
Levha Türü (A)	1	2,368	2,368	11,2690	0,0035*
Levha Kalınlığı (B)	2	10,166	5,083	31,0238	0,0000*
Etkileşim (AB)	2	2,816	1,408	8,5939	0,0009*
Hata	36	5,898	0,164		
Toplam	59	25,032			

*: Fark, 0,05' e göre anlamlı Ns: Önemsiz

Tablo 8. Rutubet miktarı değerleri Duncan testi sonuçları ve homojenlik grupları

Faktör		Xort	HG
Levha Türü	Çam Kozalağı	12,83	B
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli	13,22	A
LSD:± 0,2092			
Levha Kalınlığı	30 mm	13,26	A
	40 mm	12,45	B
	50 mm	13,37	A
LSD:± 0,2563			
Levha Türü + Levha Kalınlığı	Çam Kozalağı + 30 mm	12,81	C
	Çam Kozalağı + 40 mm	12,22	D
	Çam Kozalağı + 50 mm	13,45	AB
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli + 30 mm	13,71	A
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli + 40 mm	12,67	C
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli + 50 mm	13,29	B
LSD:± 0,3624			

Levha türü bakımından rutubet miktarı değeri en yüksek %13,83 ile çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli örneklerde tespit edilmiştir. Levha kalınlığı bakımından rutubet miktarı değeri en yüksek %13,37 ile 50 mm kalınlıktaki örneklerde saptanmıştır. İkili etkileşimde rutubet miktarı değeri en yüksek %13,71 ile çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli 30 mm kalınlıktaki örneklerde belirlenmiştir (Tablo 8). Çam kozalağı ve çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı ilaveli levhaların hava kurusu (%12) yoğunluk ve rutubet miktarı ortalama değerleri Şekil 3' de verilmiştir.



Şekil 3. Hava kuruğu (%12) yoğunluk ve rutubet miktarı ortalama değeri

Yapılan varyans analizi sonucunda; çam kozalağı ve çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli levhalardan hazırlanan deney numunelerinin, levha türü, kalınlığı ve ikili etkileşimleri ile ısı iletkenlik katsayısı arasında önemli (0,05) farklılıklar bulunduğu belirlenmiştir (Tablo 9).

Tablo 9. Isı iletkenlik katsayısı değerlerine ilişkin varyans analizi

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	Pr>F
Levha Türü (A)	1	3089,986	3089,986	9,3815	0,0067*
Levha Kalınlığı (B)	2	28922,703	14461,351	26,1126	0,0000*
Etkileşim (AB)	2	17476,001	8738,000	15,7781	0,0000*
Hata	36	19937,053	553,807		
Toplam	59	75354,426			

*: Fark, 0,05' e göre anlamlı Ns: Önemsiz

Tablo 9'ya göre; levha türü, levha kalınlığı ve ikili etkileşimleri istatistiksel olarak önemli çıkmıştır ($P \leq 0,05$), Farklılığın hangi uygulamalarda önemli olduğunu belirlemek için yapılan Duncan testi sonuçları Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Isı iletkenlik katsayısı değerleri Duncan testi sonuçları ve homojenlik grupları

Faktör		Xort	HG
Levha Türü	Çam Kozalağı	105,6	B
	Çam Kozalağına Ayçiçeği Sapı İlaveli	119,9	A
LSD:± 12,16			
Levha Kalınlığı	30 mm	83,97	C
	40 mm	117,1	B
	50 mm	137,2	A
LSD:± 14,89			
Levha Türü + Levha Kalınlığı	Çam Kozalağı + 30 mm	83,27	B
	Çam Kozalağı + 40 mm	86,57	B
	Çam Kozalağı + 50 mm	146,9	A
	Çam Kozalağına Ayçiçeği Sapı İlaveli + 30 mm	84,67	B
	Çam Kozalağına Ayçiçeği Sapı İlaveli + 40 mm	147,7	A
	Çam Kozalağına Ayçiçeği Sapı İlaveli + 50 mm	127,5	A
LSD:± 21,06			

Levha türü bakımından ısı iletkenlik katsayısı değeri en yüksek 119,9 W/mK ile çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli örneklerde tespit edilmiştir. Levha kalınlığı bakımından ısı iletkenlik katsayısı değeri en yüksek 137,2 W/mK ile 50 mm kalınlıktaki örneklerde saptanmıştır. İkili etkileşimde ısı iletkenlik katsayısı değeri en yüksek 147,7 W/mK ile çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli 40 mm kalınlıktaki örneklerde belirlenmiştir (Tablo 10).

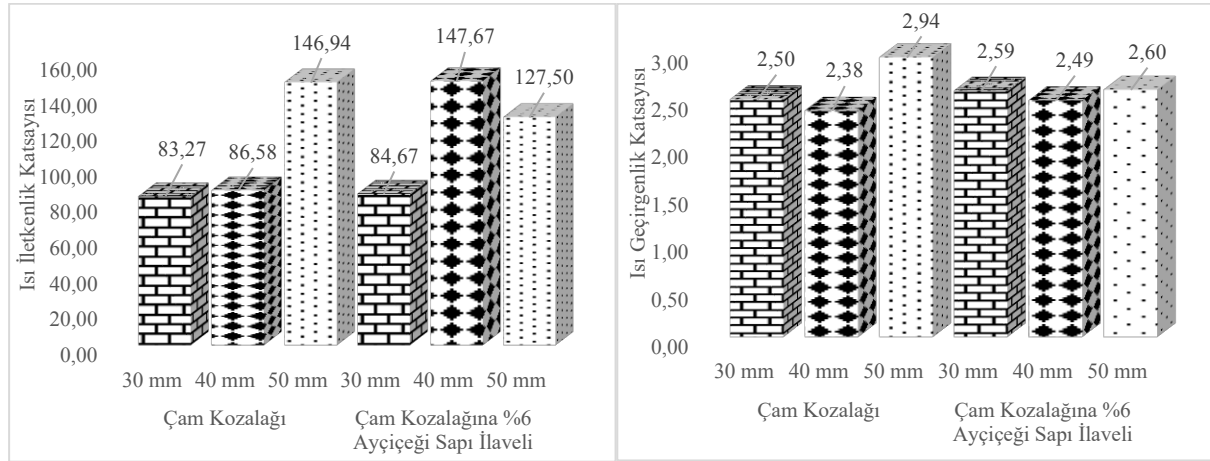
Yapılan varyans analizi sonucunda; çam kozalağı ve çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli levhalardan hazırlanan deney numunelerinin, levha türü, levha kalınlığı ve etkileşimleri ile ısı geçirgenlik katsayısı değerleri arasında önemsiz (0,05) farklılıklar bulunduğu belirlenmiştir (Tablo 11).

Tablo 11. Isı geçirgenlik katsayısı değerlerine ilişkin varyans analizi

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	Pr>F
Levha Türü (A)	1	0,038	0,038	0,9958	-----
Levha Kalınlığı (B)	2	1,111	0,555	2,3120	0,1136ns
Etkileşim (AB)	2	0,683	0,341	1,4209	0,2547ns
Hata	36	8,647	0,240		
Toplam	59	11,165			

*: Fark, 0,05' e göre anlamlı ns: Önemsiz

Tablo 11'a göre; levha türü, levha kalınlığı ve ikili etkileşimleri istatistiksel olarak önemsiz çıkmıştır ($P \leq 0,05$). Çam kozalağı ve çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı ilaveli levhaların ısı iletkenlik katsayısı ve ısı geçirgenlik katsayısı ortalama değerleri Şekil 4' te verilmiştir.



Şekil 4. Isı iletkenlik katsayısı ve ısı geçirgenlik katsayısı ortalama değerleri

Çam kozalağı ve çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı ilaveli levhaların mekanik özelliklere ilgili görseller Şekil 5'de ve ortalama değerler Tablo 12'de verilmiştir.

Eğilme direnci ortalama değerleri en yüksek, 162,21 N/mm² ile çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı ilaveli 40 mm kalınlığındaki örneklerde, en düşük ise çam kozalağı 40 mm kalınlığındaki örneklerde 55,20 N/mm² olarak tespit edilmiştir. Elastikiyet modülü ortalama değerleri en yüksek çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı ilaveli 40 mm kalınlığındaki örneklerde 292,05 MPa ile en düşük ise çam kozalağı 40 mm kalınlığındaki örneklerde 94,40 MPa ile bulunmuştur. Yüzeye dik çekme direnci çam kozalağı ortalama değerleri en yüksek 81,89 N/mm² ile 50 mm kalınlığındaki örneklerde, en düşük ise 17,47 N/mm² ile çam kozalağı 30 mm kalınlığındaki örneklerde saptanmıştır. Yüzeye dik vida tutma direnci ortalama değerleri en yüksek çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı ilaveli 50 mm kalınlığındaki örneklerde 68,89 N/mm² ile en düşük ise çam kozalağı 30 mm kalınlığındaki örneklerde 28,41 N/mm² olarak tespit edilmiştir. Tarımsal atıklar ile odun artıkları çeşitli oranlarda kompozit levha üretimi yaptığı çalışmada eğilme direnci 13,11-18,01 N/mm², elastikiyet modülü 2819-4620,8 N/mm², yüzeye dik çekme direnci 0,55-0,97 N/mm² ve yüzeye dik vida tutma direnci 908-1089,4 N/mm² değerleri arasında bulunmuştur [32]. Selülozik esaslı hammaddelere alçı katılarak üretimini gerçekleştirilen kompozit levhalarda eğilme direnci 0,97-6,98 N/mm², elastikiyet modülü 113-6117 N/mm², yüzeye dik çekme direnci 0,11-0,60 N/mm² değerleri

arasında saptanmıştır [33]. Levha üzerine rulo kaplama yapılan çalışmada eğilme direncini $12,63 \text{ N/mm}^2$, yüzeye dik çekme direncini $3,73 \text{ N/mm}^2$ ve yüzeye dik vida tutma direncini $50,50 \text{ N/mm}^2$ olarak tespit etmiştir [34].



Şekil 5. Mekanik özelliklerin belirlenmesi

Tablo 12. Mekanik özelliklerin ortalama değerleri

Levha Türü	Levha Kalınlığı	x	Sx	v	
Eğilme direnci	Çam Kozalağı	30 mm	117,14	27,05	0,23
		40 mm	55,20	0,39	0,01
		50 mm	100,87	39,53	0,39
	Çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı ilaveli	30 mm	106,18	40,51	0,38
		40 mm	162,21	51,59	0,32
		50 mm	138,57	22,69	0,16
Elastikiyet modülü	Çam Kozalağı	30 mm	270,53	112,73	0,42
		40 mm	94,40	0,67	0,01
		50 mm	153,27	68,18	0,45
	Çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı ilaveli	30 mm	95,62	43,32	0,45
		40 mm	292,05	131,71	0,45
		50 mm	248,64	101,03	0,41
Yüzeye dik çekme direnci	Çam Kozalağı	30 mm	17,47	4,58	0,26
		40 mm	26,71	5,23	0,20
		50 mm	81,89	20,42	0,25
	Çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı ilaveli	30 mm	46,46	16,34	0,35
		40 mm	33,39	24,45	0,73
		50 mm	30,59	7,02	0,23
Yüzeye dik vida tutma direnci	Çam Kozalağı	30 mm	28,41	5,87	0,21
		40 mm	39,20	6,01	0,15
		50 mm	49,34	11,99	0,24
	Çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı ilaveli	30 mm	38,46	10,56	0,28
		40 mm	63,68	16,12	0,25
		50 mm	68,89	17,64	0,26

Yapılan varyans analizi sonucunda; çam kozalağı ve çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli levhalardan hazırlanan deney numunelerinin, levha türü, kalınlığı ve ikili etkileşimleri ile eğilme direnci arasında önemli (0,05) farklılıklar bulunduğu belirlenmiştir (Tablo 13).

Tablo 13. Eğilme direnci değerlerine ilişkin varyans analizi

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	Pr>F
Levha Türü (A)	1	29810.646	29810.646	54.1420	0.0000*
Levha Kalınlığı (B)	2	1300.104	650.052	1.0851	0.3487ns
Etkileşim (AB)	2	35150.289	17575.145	29.3382	0.0000*
Hata	36	21565.928	599.054		
Toplam	59	97737.788			

*: Fark, 0,05' e göre anlamlı Ns: Önemsiz

Tablo 13'ya göre; levha türü ve ikili etkileşimleri istatistiksel olarak önemli çıkmıştır ($P \leq 0,05$). Farklılığın hangi uygulamalarda önemli olduğunu belirlemek için yapılan Duncan testi sonuçları Tablo 14'de verilmiştir.

Tablo 14. Eğilme direnci değerleri Duncan testi sonuçları ve homojenlik grupları

	Faktör	Xort	HG
Levha Türü	Çam Kozalağı	91,07	B
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli	135,7	A
LSD:± 12,65			
Levha Türü + Levha Kalınlığı	Çam Kozalağı + 30 mm	117,1	BC
	Çam Kozalağı + 40 mm	55,20	D
	Çam Kozalağı + 50 mm	100,9	C
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli + 30 mm	106,2	C
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli + 40 mm	162,2	A
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli + 50 mm	138,6	B
LSD:± 21,90			

Levha türü bakımından eğilme direnci değeri en yüksek 135,7 N/mm² ile çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli örneklerde tespit edilmiştir. İkili etkileşimde eğilme direnci değeri en yüksek 162,2 N/mm² ile çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli 40 mm kalınlıktaki örneklerde belirlenmiştir (Tablo 14).

Yapılan varyans analizi sonucunda; çam kozalağı ve çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli levhalardan hazırlanan deney numunelerinin, levha türü, levha kalınlığı ve ikili etkileşimleri ile elastikiyet modülü arasında önemli (0,05) farklılıklar bulunduğu belirlenmiştir (Tablo 15).

Tablo 15. Elastikiyet modülü değerlerine ilişkin varyans analizi

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	Pr>F
Levha Türü (A)	1	23250,348	23250,348	5,8317	0,0266*
Levha Kalınlığı (B)	2	3217,603	1608,801	0,3732	-----
Etkileşim (AB)	2	370523,963	185261,982	42,9759	0,0000*
Hata	36	155189,909	4310,831		
Toplam	59	623945,674			

*: Fark, 0,05' e göre anlamlı Ns: Önemsiz

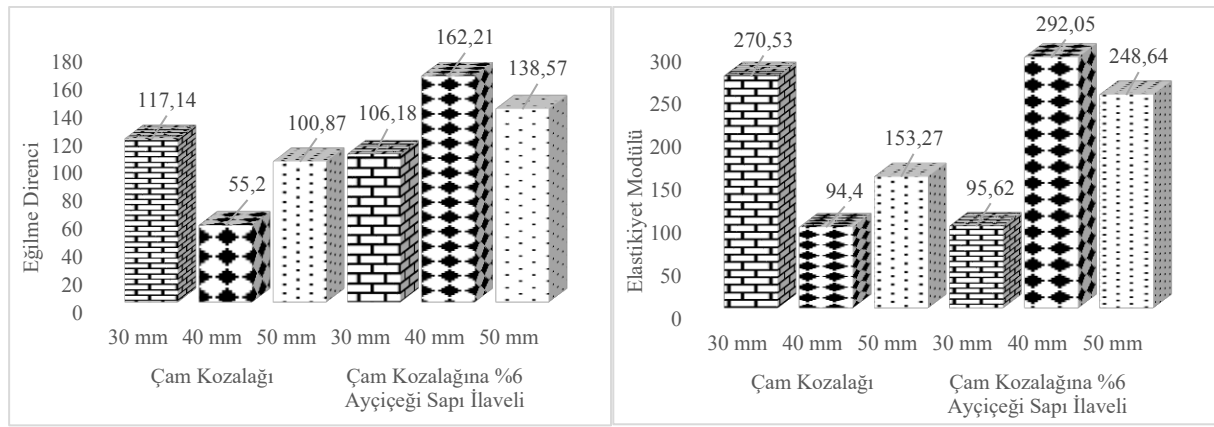
Tablo 15'e göre; levha türü ve ikili etkileşimleri istatistiksel olarak önemli çıkmıştır ($P \leq 0,05$). Farklılığın hangi uygulamalarda önemli olduğunu belirlemek için yapılan Duncan testi sonuçları Tablo 16'da verilmiştir.

Levha türü bakımından elastikiyet modülü en yüksek 212,1 MPa ile çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli örneklerde tespit edilmiştir. İkili etkileşimde elastikiyet modülü en yüksek 292,1 MPa ile çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli 40 mm kalınlıktaki örneklerde belirlenmiştir (Tablo 16). Çam kozalağı ve çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı ilaveli levhaların eğilme direnci ve elastikiyet modülü ortalama değerleri Şekil 6' de verilmiştir.

Yapılan varyans analizi sonucunda; çam kozalağı ve çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli levhalardan hazırlanan deney numunelerinin, levha türü, levha kalınlığı ve ikili etkileşimleri ile yüzeye dik çekme direnci arasında önemli (0,05) farklılıklar bulunduğu belirlenmiştir (Tablo 17).

Tablo 16. Elastikiyet modülü değerleri Duncan testi sonuçları ve homojenlik grupları

	Faktör	Xort	HG
Levha Türü	Çam Kozalağı	172,7	B
	Çam Kozalağına Ayçiçeği Sapı İlaveli	212,1	A
LSD:± 33,92			
Levha Türü + Levha Kalınlığı	Çam Kozalağı + 30 mm	270,5	A
	Çam Kozalağı + 40 mm	94,40	C
	Çam Kozalağı + 50 mm	153,3	B
	Çam Kozalağına Ayçiçeği Sapı İlaveli + 30 mm	95,62	BC
	Çam Kozalağına Ayçiçeği Sapı İlaveli + 40 mm	292,1	A
	Çam Kozalağına Ayçiçeği Sapı İlaveli + 50 mm	248,6	A
LSD:± 58,75			

**Şekil 6.** Eğilme direnci ve elastikiyet modülü ortalama değerleri**Tablo 17.** Yüze dik çekme direnci değerlerine ilişkin varyans analizi

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	Pr>F
Levha Türü (A)	1	407,109	407,109	3,6940	0,0706
Levha Kalınlığı (B)	2	8527,106	4263,553	29,8727	0,0000*
Etkileşim (AB)	2	17173,676	8586,838	60,1639	0,0000*
Hata	36	5138,066	142,724		
Toplam	59	33229,697			

*: Fark, 0,05' e göre anlamlı

Tablo 17'ye göre; levha kalınlığı ve ikili etkileşimleri istatistiksel olarak önemli çıkmıştır ($P \leq 0,05$). Farklılığın hangi uygulamalarda önemli olduğunu belirlemek için yapılan Duncan testi sonuçları Tablo 18'de verilmiştir.

Levha kalınlığı bakımından yüze dik çekme direnci en yüksek 56,24 N/mm² ile 50 mm kalınlıktaki örneklerde saptanmıştır. İkili etkileşimde yüze dik çekme direnci en yüksek 81,89 N/mm² ile çam kozalağı 50 mm kalınlıktaki örneklerde belirlenmiştir (Tablo 18).

Yapılan varyans analizi sonucunda; çam kozalağı ve çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli levhalardan hazırlanan deney numunelerinin, levha türü, levha kalınlığı ve ikili etkileşimleri ile yüze dik vida tutma direnci arasında önemli (0,05) farklılıklar bulunduğu belirlenmiştir (Tablo 19).

Tablo 19'e göre; levha türü, levha kalınlığı ve ikili etkileşimleri istatistiksel olarak önemli çıkmıştır ($P \leq 0,05$). Farklılığın hangi uygulamalarda önemli olduğunu belirlemek için yapılan Duncan testi sonuçları Tablo 20'ye verilmiştir.

Tablo 18. Yüzeye dik çekme direnci değerleri Duncan testi sonuçları ve homojenlik grupları

	Faktör	Xort	HG
Levha Kalınlığı	30 mm	31,96	B
	40 mm	30,05	B
	50 mm	56,24	A
LSD:± 7,560			
Levha Türü + Levha Kalınlığı	Çam Kozalağı + 30 mm	17,47	D
	Çam Kozalağı + 40 mm	26,71	CD
	Çam Kozalağı + 50 mm	81,89	A
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli + 30 mm	46,45	B
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli + 40 mm	33,39	C
	Çam Kozalağına %6 Ayçiçeği Sapı İlaveli + 50 mm	30,59	C
LSD:± 10,69			

Tablo 19. Yüzeye dik vida tutma direnci değerlerine ilişkin varyans analizi

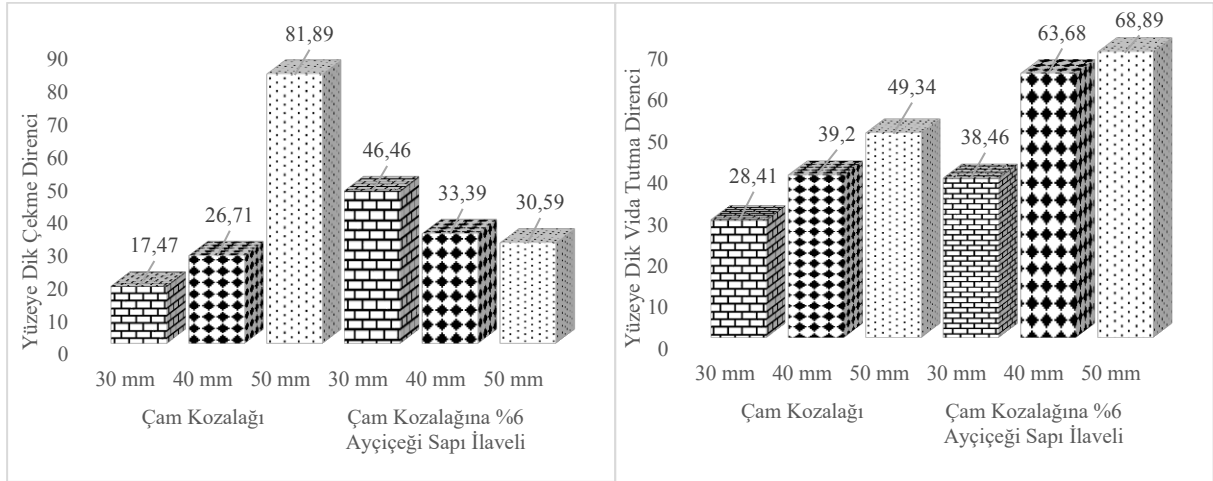
Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	Pr>F
Levha Türü (A)	1	4873,509	4873,509	37,9899	0,0000*
Levha Kalınlığı (B)	2	6950,029	3475,015	47,3131	0,0000*
Etkileşim (AB)	2	538,555	269,278	3,6663	0,0355*
Hata	36	2644,096	73,447		
Toplam	59	17315,308			

*: Fark, 0,05' e göre anlamlı Ns: Önemsiz

Tablo 20. Yüzeye dik vida tutma direnci değerleri Duncan testi sonuçları ve homojenlik grupları

	Faktör	Xort	HG
Levha Türü	Çam Kozalağı	38,98	B
	Çam Kozalağına Ayçiçeği Sapı İlaveli	57,01	A
LSD:± 4,428			
Levha Kalınlığı	30 mm	33,44	C
	40 mm	51,44	B
	50 mm	59,11	A
LSD:± 5,423			
Levha Türü + Levha Kalınlığı	Çam Kozalağı + 30 mm	28,41	D
	Çam Kozalağı + 40 mm	39,20	C
	Çam Kozalağı + 50 mm	49,34	B
	Çam Kozalağına Ayçiçeği Sapı İlaveli + 30 mm	38,46	C
	Çam Kozalağına Ayçiçeği Sapı İlaveli + 40 mm	63,68	A
	Çam Kozalağına Ayçiçeği Sapı İlaveli + 50 mm	68,89	A
LSD:± 7,669			

Levha türü bakımından yüzeye dik vida tutma direnci en yüksek 119,9 N/mm² ile çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli örneklerde tespit edilmiştir. Levha kalınlığı bakımından yüzeye dik vida tutma direnci en yüksek 137,2 N/mm² ile 50 mm kalınlıktaki örneklerde saptanmıştır. Levha türü + levha kalınlığı bakımından yüzeye dik vida tutma direnci en yüksek 147,7 N/mm² ile çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli 40 mm kalınlıktaki örneklerde belirlenmiştir (Tablo 20). Çam kozalağı ve çam kozalağına %6 ayçiçeği sapı ilaveli levhaların yüzeye dik çekme direnci ve yüzeye dik vida tutma direnci ortalama değerleri Şekil 7' de verilmiştir.



Şekil 7. Yüze dik çekme direnci ve yüze dik vida tutma direnci ortalama değeri

4. Sonuçlar ve Öneriler

Çam kozalağı ve çam kozalağına %6 ayçiçek sapı ilaveli levhalarda kalınlık miktarı artıca levhaların mekanik özelliklerinin gözlemlenmiştir. Tohumları alınmış çam kozalakları genellikle yakacak malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Hasadı yapılan ayçiçeklerin saplarının sonraki hasat için tarladan kökleriyle sökülmesi aynı zamanda maliyetli bir süreçtir. Atık olarak adlandırılabilen bu ürünlerin izolasyon levhası üretimiyle ekonomiye katkı sağlanması amaçlanmıştır. Ayçiçeği saplarının levhanın mekanik özelliklerini iyileştirmeler yaptığı gözlenmektedir. Çam kozalağı ve ayçiçeği sapının birlikte muhtelif oranlarda katılmak sureti ile hammadde olarak kullanılabildeğini göstermiştir. Çam kozalağı ve ayçiçeği sapının izolasyon levhası endüstrisi için bir alternatif olarak değerlendirilmesi önerilebilir. Çam kozalağı ve ayçiçeği sapından üretilen levhaların ahşap kökenli levhalardan mekanik özelliklerinin düşük olması ve piyasa yaygın kullanılan izolasyon levhalarına görsel özellikte olmamasından dolayı bu levhaların çatı altlarında, iç mekânlarda duvar ve taban ara bölümlerinde, prefabrik evlerde vb. yapılarda ses ve ısı izolasyonunda izolasyon levhası şeklinde kullanımı tavsiye edilebilir.

Teşekkür

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Prof. Dr. Mustafa ALTUNOK danışmanlığında Mehmet YAŞAR tarafından hazırlanmış doktora tezinden üretilmiştir. MY, deney tasarımının yapılması, hammadde temini, levhaların basılması, verilerin elde edilmesi, verilerin analiz edilmesi ile sonuçların yorumlanması ve makalenin yazılması. MA, çalışma konusunun belirlenmesi, fikir sahibi, kontrol ve tez danışmanı.

Kaynaklar

- [1] Perez-Lombard L, Ortiz J, Pout C, A review on buildings energy consumption information. Energy Building. 2008, 40, 394–398
- [2] Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council. Indication by labelling and standard product information of the consumption of energy and other resources by energy-related products. Off. J. Eur. Union 2010, 153, 1–2.
- [3] International Energy Agency, Key World Energy Statistics; International Energy Agency: Strasbourg, France, 2006.
- [4] Gaspar F, Bakatovich, A, Davydenko N, Joshi A, Building insulation materials based on agricultural wastes. In Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction; Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering; Woodhead Publishing: Duxford, UK, 2020, pp. 149–170.
- [5] Islam S, Bhat G, Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles. J. Environ. Manag., 2019, 251, 109536.
- [6] Ricciardi P, Belloni E, Cotana F, Innovative panels with recycled materials: Thermal and acoustic performance and life cycle assessment. Appl. Energy, 2014, 134, 150–162.

- [7] Erkmen J, Yavuz, HI, Kavci E, Sari M, A new environmentally friendly insulating material designed from natural materials. *Constr. Build. Mater.*, 2020, 255, 119357.
- [8] Volf M, Diviš J, Havlík F, Thermal, moisture and biological behaviour of natural insulating materials. *Energy Procedia*, 2015, 78, 1599–1604.
- [9] Cornaro C, Zanella V, Robazza P, Belloni E, Buratti C, An innovative straw bale wall package for sustainable buildings: Experimental characterization, energy and environmental performance assessment. *Energy Build.*, 2020, 208, 109636. Directive, C. (2010).
- [10] Mamo S, Skaar C, Gradeci K, Labonnote N, Assessment of greenhouse gas emissions of ventilated timber wall constructions based on parametric LCA. *J. Clean. Prod.*, 2018, 197, 34–46.
- [11] Yepes V, Martí V, Pons JJ, Penad V, Life cycle assessment of earth-retaining walls: An environmental comparison. *J. Clean. Prod.*, 2018, 192, 411–420.
- [12] Ricciardi P, Torchia F, Belloni E, Lascaro E, Buratti C, Environmental characterisation of coffee chaff, a new recycled material for building applications. *Constr. Build. Mater.*, 2017, 147, 185–193.
- [13] Bakatovich A, Davydenko N, Gaspar F, Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste. *Energy Build.*, 2018, 180, 72–82.
- [14] Lu J, Zhou Y, He P, Wang S, Shen P, Poon, CS, Sustainable reuse of waste glass and incinerated sewage sludge ash in insulating building products: Functional and durability assessment. *J. Clean. Prod.*, 2019, 236, 117635.
- [15] El-Naggar KAM, Amin SK, El-Sherbiny SA, Abadir MF, Preparation of geopolymer insulating bricks from waste raw materials. *Constr. Build. Mater.*, 2019, 222, 699–705.
- [16] Perçin O, Cam elyaf file ile güçlendirilen tabakalı kaplama kerestenin (TKK) bazı mekanik özellikleri üzerine bir araştırma, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 2022, 5 (1), 17-28.
- [17] Bal BC, Lineer düşük yoğunluklu polietilen (LDYPE) ve odun unu ile üretilen kompozit malzemenin bazı mekanik özellikleri üzerine bir araştırma, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 2022, 5 (1), 40-49.
- [18] Türkiye Orman Varlığı 2020, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Orman Genel Müdürlüğü Orman İdaresi ve Planlama Dairesi Başkanlığı, 2021, ISBN 978-605-7599-68-1.
- [19] Ayçiçeği Tarım Ürünleri Piyasaları Raporu 2022, Hazırlayan / Prepared By: P. BOZER, F. Tuğba ÇÖTELİ, Nihal GÜLAÇ, Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü / TEPGE, <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/tepge>, 2022.
- [20] Micales JA, Han JS, Davis JL, Young RA, Chemical composition and fungitoxic activities of pine cone extractives, *Biodeterioration Research* 4, Edited by G.C. LLEWELLYN et al., Plenum Pres, 1994, 317-332.
- [21] Kaymakçı A, Ayrılmış N, Güleç T, (2013), Sunflower filled PP, *BioResources*, 2013, 8(1), 592-602.
- [22] López F, Eugenio ME, Díaz MJ, Nacimiento, JA, García, MM, and Jiménez L, Soda pulping of sunflower stalks: Influence of process variables on the resulting pulp,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2005, 11, 387-394.
- [23] TS EN 323, Ahşap esaslı levhalar, Birim hacim ağırlık tayini, TSE, 1999.
- [24] TS EN 322, Ahşap esaslı levhalar, Rutubet tayini, TSE, 1999.
- [25] TS EN 12667, Yapı malzemeleri ve mamullerinin ısı performansını-Mahfazalı sıcak plaka ve ısı akış sayacı metodlarıyla ısı direnci tayini Yüksek ve orta ısı dirençli mamuller, TSE 2003.
- [26] TS EN 310, Ahşap esaslı levhalar, Eğilme dayanımı ve eğilme elastikiyet modülünün tayini, TSE, 1999.
- [27] TS EN 319, Levha yüzeyine dik çekme dayanımı tayini, TSE, 1999.
- [28] TS EN 13446, Ahşap esaslı levhalar bağlayıcıların geri çıkma kapasitesinin tayin, TSE, 2005.
- [29] Efe FT, Ayçiçeği bitkisi (*Helianthus Annuus L.*) saplarının izolasyon levha üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, ss 201, 2011.
- [30] Doğan NN, Doğal ağaç taneni ile modifiye edilmiş bazı ağaç türlerinde ısı geçirgenliğinin incelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, ss 85, 2021.
- [31] Şen Hİ, Karton ve ahşap esaslı malzemeler ile üretilen panellerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, ss 74, 2023.
- [32] Uğur C, Endüstriyel lignoselülozik artıklardan çevreye duyarlı kompozit malzeme üretiminin araştırılması, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, ss 147, 2021.
- [33] Demir İ, Bazı selülozik esaslı sekonder lifsel hammaddeler katılarak üretilmiş alçı esaslı kompozitlerin teknolojik özelliklerinin araştırılması, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, ss 113, 2019.
- [34] Altınok M, Kılıç A, Rulo laminatı (Continue press lamimate) ile kaplanmış yonga levhanın bazı mekanik performanslarının belirlenmesi, G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 16(3): 559-566, 2003.

İzolatörlerde Buzlanmanın Yüzeysel Kaçak Akımlar Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Muhammed Buğracan ÖZKÜÇÜK^{1*}, Muhsin Tunay GENÇOĞLU²

¹ Elektrik - Elektronik Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye

² Elektrik - Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ bugracan.ozkucuk@ozal.edu.tr, ² mtgencoglu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 16/05/2023;

Kabul/Accepted: 27/07/2023)

Öz: Dünya nüfusunun artmasıyla birlikte enerji üretimi ve dağıtımının önemi de artmaktadır. Elektrik iletim ve dağıtım hatlarının güvenirliliği ve sürekliliğinde en etkin rol oynayan elemanlardan biri izolatörlerdir. İzolatörlerden kaynaklanan arızalar güç sistemi arızalarının en yüksek oranını oluşturmaktadır. Buzlanma ve sonrasında oluşan izolator arızaları, yoğun kış koşullarının gerçekleştiği bölgelerde izolator yüzeyinde atlamalara neden olarak elektrik kesintilerine ve büyük sosyoekonomik sonuçlara yol açmaktadır. Sızıntı akımları buzla kaplı izolatorlerin yüzey özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada farklı malzemelerden yapılmış izolatorler laboratuvar ortamında buzlandırılmış ve buzlanma derecelerine göre izolatorlere şebeke frekanslı alternatif gerilim uygulanarak sızıntı akımları incelenmiştir. LabVIEW programı yardımıyla veriler elde edilmiş ve porselen, cam ve silikon izolatorlerin sızıntı akımları karşılaştırılmıştır. İzolatörün bulunduğu ortam sıcaklığı ve nem değerleri ölçülerek, bu değerlerle sızıntı akımları arasında ilişkiler belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: İzolatör, Buzlanma, Sızıntı akımı, LabVIEW.

Investigation of the Effect of Icing on Insulators on Surface Leakage Currents

Abstract: With the increasing world population, energy production and distribution has a very important place today. Insulators are one of the elements that play the most active role in the reliability and continuity of electrical transmission and distribution lines. Faults from insulators account for the highest rate of power system failures. Icing and subsequent insulator failures cause flashover on the insulator surface in areas where intense winter conditions occur, leading to power outages and major socioeconomic consequences. Leakage currents are directly related to the surface properties of ice-coated insulators. In this study, the surface of insulators made of different materials were iced in a laboratory environment and leakage currents were studied by applying an alternating voltage with a network frequency to the insulators according to the degree of icing. Data were obtained with the help of LabVIEW program and leakage currents of porcelain, glass and silicon insulators were compared. The relationship between the leakage current was established by measuring the ambient temperature and humidity values of the insulator.

Key words: Insulator, Icing, Leakage current, LabVIEW.

1. Giriş

Elektrik iletim ve dağıtım hatlarının temel elemanlarından biri olan izolatörler, güç sistemlerinin güvenliği için önemli bir rol oynamaktadır. İzolatörlerin performanslarının yüksek olması güç sisteminin güvenliğini ve kararlılığını arttırmaktadır. İzolatörlerdeki arızaların tespiti, güç sistemlerindeki kararsızlığı ve ekonomik kayıpları azaltabilmektedir. Elektriksel atlama olayı izolatorlerde sıklıkla karşılaşılan bir problemdir. Atlama olayı, biriken kir, buz, buz yoğunluğu, buzun sıcaklığı vb. çevresel sorunlara bağlıdır. Sızıntı akımları buzla kaplı izolatorlerin yüzey özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Sızıntı akımının ölçümüyle izolatorlerin buzlanma durumu ve atlamalar analiz edilebilir. Buzlanma olayı, izolator yüzeyinde elektriksel alanı etkileyerek yalıtım özelliğinin kaybolmasına, kısmi deşarjlara ve atlamalara neden olmaktadır.

Dünya üzerinde kış aylarının yoğun geçtiği ve buzlanma olayının sık yaşandığı çeşitli ülkelerde, izolator atlaması ile ilgili arızaları içeren olaylar bildirilmiştir [1-2]. Bu raporlara göre, izolator yüzeyinde buz veya kar birikmesinin ardından ortam sıcaklığının 0 °C'nin üzerine çıkmasıyla, erime durumu ile birlikte elektriksel atlama olaylarının sayısı artmaktadır. Uluslararası Yapıların Atmosferik Buzlanması Çalıştayı (IWAIS) gibi özel konferanslarda, 1982'den beri bu konuya ayrılmış oturumlar düzenlenmektedir. Ayrıca ISH (Uluslararası Yüksek Gerilim Mühendisliği Sempozyumu), ICHVE (Uluslararası Yüksek Gerilim ve Uygulama Konferansı) ve IEEE

* Sorumlu yazar: bugracan.ozkucuk@ozal.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-1466-2502, ² 0000-0002-1774-1986

Elektrik Yalıtımı Konferansı vb. yüksek gerilim ve yalıtım konulu konferanslarda elektriksel atlama olayının buzlanma üzerinde etkileri düzenli olarak ele alınmaktadır.

Farzaneh vd. tarafından, buzla kaplı bir izolatörün çapının atlama gerilimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmaya göre, izolator çapı arttıkça dayanım gerilimi azalmıştır. Dayanım gerilimindeki azalma, izolator buz tabakasındaki direncin azaldığını göstermektedir. Bir zincir izolator dizisinin altında meydana gelen ark ile mesnet izolatorün üst kısmında oluşan ark karşılaştırıldığında, arkın buz yüzeyi boyunca zincir izolatorün üst kısmına doğru yayılma olasılığının daha yüksek olduğu görülmektedir. Arkın kendisi tarafından oluşturulan termal kaldırma kuvveti nedeniyle, izolatorün üst kısmında oluşan bir ark için atlama sabitinin değerinin alt kısmında oluşan arkta daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır [3].

Jiang vd. tarafından, kirlenmiş ve buzlu zincir izolatorün alternatif akımda atlama gerilimi üzerine etkisi incelenmiştir. Buzla kaplı bir zincir izolatorün atlama performansının, buzlanma seviyesinin yanı sıra kirlilik seviyesiyle de ilgili olduğu görülmüştür. Buz tabakası iletkenliğinin ürünü olarak tanımlanan ISP ve kuru ark mesafesinin santimetre başına buz tabakası ağırlığı, buzla kaplı bir zincir izolatorün atlama gerilimi üzerindeki buz birikimlerinin ve kirlenmenin etkisini belirlemek amacıyla karakteristik bir parametre olarak alınmıştır. Buzla kaplı zincir izolatorün atlama gerilimi, ISP karakteristik parametresinin artmasıyla azalmıştır. Buzla kaplı izolatorde atlama gerilimi, izolator üzerinde biriken buzun direnç özelliği nedeniyle izolator uzunluğunun artmasıyla doğrusal olarak artmıştır [4].

Zhang vd. tarafından, alternatif akım (a.a.) atlama gerilimi altında farklı buzlanma koşulları ile buzlu zincir izolatorün değişiklik gösteren konumlandırılması üzerine çalışılmıştır. Zincir izolatorün potansiyel dağılımının, daha büyük çaplı izolatorlerle değiştiği gözlemlenmiştir. Daha büyük çaplı eteklere sahip her bir izolator üzerindeki dayanma gerilimi, normal izolator üzerindeki dayanma geriliminden çok daha yüksek olmuştur. Ancak büyük çaplı izolator üzerindeki en yüksek gerilim, dikey olarak asılı yüksek gerilim iletkeni ile doğrudan bağlanan zincir izolatorünkünden daha düşük olmuştur [5].

Farzaneh tarafından, izolator buzlanma atlamalarının, buz tipi ve yapısı, hava sıcaklığındaki değişiklikler gibi meteorolojik ve bazı çevresel faktörlerden etkilendiği göz önünde bulundurularak, matematiksel modeller eşliğinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Elektrik alanının buz sarkıtlarının büyümesini ve morfolojisini etkilediği sonucuna varılmıştır. Buz sarkıtlarının daha yüksek elektrik alanlarında radyal olarak dışa doğru büyüme eğiliminde olduğu görülmüştür. Buzlanma koşulları için ark sabitleri ve kirlilik tabakası direnci oluşturulmuştur. Buz yüzeyindeki ark kökünün yarıçapı, izolator yüzeyindeki çok noktalı bir temasın gerilim düşümünü temsil etmektedir. Arkın bu ark kökü dışında havada buz yüzeyinin üzerinde aktığı belirtilmiştir [6].

Xu vd. tarafından, izolatorlerin elektriksel performansının buzlanma ve kirlilikle birlikte izolator yapısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İzolator yüzeyinde su damlacıkları soğutularak yapay bir şekilde buz oluşturulmuş ve izolator -10 °C hava sıcaklığı altında enerjilendirilmiştir. Atlama gerilimleri ve kaçak akım, buz erime rejimi sırasında kirliliğe maruz izolatorler üzerinde yapılan testlerle elde edilmiştir. Birikmiş tuz yoğunluğunun (SDD) artmasıyla atlama geriliminin azaldığı görülmüştür. İzolator çapının arttığı ve buzlanma koşullarının aynı kaldığı durumda buzlanma alanı artacağından izolator yüzeyinde daha küçük bir direnç oluşacaktır. Bu nedenle SDD'nin sabit, ortalama çapın artmasıyla atlama gerilimi azalmış, ancak atlama öncesi kaçak akım daha büyük olmuştur [7].

Yin vd. tarafından, kompozit izolatorlerin atlama performansını etkileyen faktörleri bulmak için buzla kaplı, enerjili ve enerjisiz deneyler yapılmıştır. İzolatorlerin enerjili veya enerjisiz koşullar altında farklı şekilde buzlandıkları gözlemlenmiştir. Enerjisiz durumda, buz sarkıtları dikey olarak aşağı doğru büyümüş ve izolatorlerin etek aralıkları, ağır buzlanmada buz sarkıtları ile köprülenmiştir. Enerjili durumda ise, buz sarkıtları aşağı doğru ve izolatorün eksenine doğru büyümüş olup ısı etkisi nedeniyle izolator eteklerinin köprülenmesi zor olmuştur. Kaçak akım yolu uzunluğunun atlama gerilimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kaçak akım yolu uzunluğunun fazla olduğu durumlarda atlama gerilimi daha iyi performans sergilerken, küçük olduğu durumlarda atlama geriliminin daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır [8].

Jiang vd. tarafından, buzlu porselen, cam ve kompozit izolatorlerde, buz kalınlığı, kirlilik, hava basıncı vb. çeşitli faktörlerin atlama performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Buz kalınlığının, kirliliğin ve basıncın artmasıyla üç tip izolatorün de atlama gerilimi azalmıştır. Buz kalınlığının ve atmosfer basıncının buzlanma atlama gerilimine etkisi, kompozit izolatorlerde porselen ve cam izolatore göre daha belirgin olmuştur [9].

Shu vd. tarafından, atlama ark yoluna bağlı olarak farklı etek aralıklarına sahip buzla kaplı kompozit izolatorlerin a.a. atlama gerilimlerini tahmin etmek için "çok arklı, çok buz tabakalı" matematiksel bir model önerilmiştir. Birden fazla çapta değişen eteklere sahip buzla kaplı kompozit izolatorler için, her sarkıtın ucundaki ark deşarjı iki farklı yol boyunca değişik konumlarda oluşturulmuştur. Bu durum farklı buzlanma dereceleri altındaki izolatorlerde değişkenlik göstermiştir. Bu değişkenlikler, atlamının oluşmasını önemli ölçüde etkilemiş ve dolayısıyla buzla kaplı kompozit izolatorlerin atlama gerilimleri üzerinde etkiye sahip olmuştur [10].

Porkar ve Farzaneh tarafından, dikey, yatay ve eğimli şekilde yerleştirilen zincir izolatörlerin buzlanma atlamaları, laboratuvar koşullarında matematiksel modeller kullanılarak sistematik bir şekilde incelenmiştir. Uygulanan su iletkenliği $\sigma = 60 \mu\text{S/cm}$ için, yatay bir pozisyon olarak yerleştirilen ağır buzlanma koşullarında 4 elemanlı bir zincir izolatörün minimum atlama geriliminin, $\theta = 60^\circ$ 'lik bir salınım açısına sahip eğimli bir pozisyon için %62 ve dikey pozisyon için %100 daha yüksek olduğu gösterilmiştir [11].

Tian vd. tarafından, porselen ve cam izolatörlerde, buzlanma birikmesi, buz şekli, sıcaklık, rüzgâr vb. parametreler gözetilerek testler uygulanmıştır. Porselen ve cam izolatörlerin buzlanma şeklinin benzer olduğu gözlenmiştir. İzolatörlerde rüzgârın estiği yönde daha çok buz birikmesi olmuştur. Rüzgâr hızının büyüklüğü su damlacıklarının çarpışmasını etkileyeceğinden rüzgâr hızının artmasıyla buz birikmesi de daha çok gerçekleşecektir. Sıcaklığın, havadaki aşırı soğumuş su damlacıklarının şekli ve izolatördeki yoğunlaşmalar üzerinde etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır [12].

Li vd. tarafından, izolatörlerin buzlanma atlamaları tahmini için sızıntı akımının dönüşümü ve analizi yapılmıştır. Sızıntı akımının karakteristik miktarındaki değişiklik, buzla kaplı izolatörlerin yüzey özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Sızıntı akımının ölçümüyle izolatörlerin buzlanma durumu analiz edilmiş ve atlamalar tahmin edilmiştir. Sızıntı akımı, dalgacık analizi kullanılarak gürültüden arındırılmış ve buzlanma sürecinin her aşamasında akım detayları, bileşenleri ve yüzey deşarj özellikleri analiz edilmiştir. Buzlanma sırasında izolatörün sızıntı akımı ve yüzey deşarj özellikleri incelenmiş ve deşarj frekansının negatif gerilimlerde daha fazla olduğu bulunmuştur [13].

Zong vd. tarafından, sır buzla kaplı izolatörlerin doğal ortamda a.a. atlama özellikleri ve ark gelişim süreci incelenmiştir. İzolatöre enerji verilip verilmediğine bakılmaksızın, rüzgar tarafındaki buz birikimi, tipik bir asimetric dağılım sergileyen rüzgar altı taraftakinden çok daha fazla olmuştur. Daha kalın çaplı buz sarkıtları, enerjisi kesilen bir izolatör üzerinde dikey olarak büyümüşür. Enerjili buzlanma durumunda, küçük çaplı buz sarkıtları izolatör eksenine doğru büyümüşür. Elektrik alanın buzlanma üzerindeki etkisi esas olarak korona deşarjının frekansına yansımakta ve uygulanan gerilimin artmasıyla kısmi ark artmaktadır. Enerji verilmiş izolatörün buz kalitesi, gerilimsiz izolatörünkünden daha düşük olmuştur. Uygulanan gerilim ne kadar yüksek olursa, sırlı buz kalitesi ve saçağın çapı o kadar küçük olmaktadır. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında buzlu izolatörün doğal koşullardaki atlama gerilimi laboratuvar koşullarına göre yaklaşık %14-%17 daha yüksek olmuştur. Bunun nedeni, odadaki buzlu izolatöre gerilim uygulanmadan önce sıcaklığın 0°C 'den yüksek olmasıdır [14].

Qiao vd. tarafından, farklı doğal ortamlarda buzlu ve kirli kompozit izolatörlerin a.a. arıza gerilimi incelenmiştir. Atlama geriliminin farklı ortamlarda büyük ölçüde değiştiğini görülmüştür. Ayrıca, hem kırağı buzu hem de kuru atlama gerilimi ve eşdeğer tuz birikintisi yoğunluğu (ESDD) birbirinden bağımsız olduğu belirlenmiştir. Ancak doğal ortamda hem kirlilik hem de sırlı buzlanma gerilimi ile ESDD arasında negatif bir güç fonksiyonu (NPF) ilişkisi olduğu görülmüştür. Üstel fonksiyon ile karşılaştırıldığında, güç fonksiyonu sır buzlu atlama gerilimi ve sır buz ağırlığı arasındaki uyum fonksiyonu için daha uygun olmuştur [15].

Son yıllarda izolatörlerdeki buzlanma durumu gelişen teknoloji ile birlikte makine öğrenmesine dayalı olarak görüntü izleme teknolojisiyle de incelenmiştir. Yapılan çalışma iki aşamalıdır. İlk olarak izolatörlerin buzlanma atlamasını etkileyen ana faktörler analiz edilip, buzlanma tipi, buzlanma miktarı, buzlanma uzunluğu, köprülenme durumu, izolatör kirliliği vb. buzlu izolatörlerin morfolojik özellikleri derinlemesine incelenmiştir. Bu özellikler buzlanma atlama risk tahmin modelinde girdi parametreleri olarak kullanılmıştır. İkinci olarak, buzlu izolatörün izleme yöntemleri analiz edilip karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, görüntü izleme teknolojisinin buzlanma atlama tahmininde avantajlara sahip olduğunu göstermiştir [16].

Bu çalışmada, porselen, cam ve silikon izolatörlerin yüzeyinde, bir deney kabini içerisinde hafif buzlu ve buzlu olarak nitelendirilen kalınlıklarda buz biriktirilmiştir. İzolatörlere buzsuz, hafif buzlu ve buzlu durumlarda, buz eriyene kadar 15° er dakikalık periyotlarla, 5, 10, 15 ve 20 kV değerlerinde gerilim uygulanmıştır. Deney kabini içerisindeki nem değerleri ve sıcaklık değerleri kaydedilerek izolatör yüzey kaçak akımları incelenmiştir.

2. Buzla Kaplı İzolatör Yüzeyinde Atlama Sürecinin Matematiksel Modellenmesi

Genel olarak buzlu izolatör yüzeyindeki elektriksel atlama süreci, d.a. kullanılarak oluşan atlamalar için Obenaus yaklaşımına uyarlanmıştır. Bu model a.a.'da arkin yeniden oluşma koşullarındaki değişiklikler dikkate alınarak adapte edilmiştir. Bu durum, ark sabitleri, yüzey iletkenliği ve yeniden ark oluşma koşullarını doğrudan laboratuvar ölçümlerine dayandırmaktadır [16]. Bu yaklaşım, kirli yüzeylerde atlama için bulunan matematiksel modellerden sistematik olarak farklı değerlere yol açmaktadır.

2.1. Buzla kaplı izolatörlerin DA atlama modeli

Buzla kaplı izolatörler için matematiksel model, dağıtılmış bir kirlilik tabakası ile bir hava boşluğunun varlığına dayanmaktadır. Uygulanan sabit d.a. için, toplam besleme gerilimi üç bileşenin toplamıdır [17].

$$V = V_e + A \cdot K_p \cdot x \cdot I^{-n} + IR(x) \quad (1)$$

Denklem (1)'de; V_e elektrotların gerilim düşümü (V), A ve n ark sabitleri, x ark kökünün sızıntı yolu boyunca konumu (cm), K_p havadaki kısmi ark uzunluğunun ark kök konumuna oranı, $R(x)$ x konumundan diğerine sızıntı yolu boyunca direnç (Ω), I akım (A) ve V gerilimdir (V).

Denklem (1)'deki K_p değeri, buzla kaplı izolatörlerde d.a. atlama üzerindeki ark yollarına dayalı olarak d.a. atlama modeline eklenmiştir. K_p katsayısı izolatör yüzeyinde biriken buzun kalınlığına göre farklılık göstermektedir. Bu katsayı d.a. için 1,2 ile 1,4 arasında değişmekte olup buzun izolatör yüzeyini tam köprülemesi durumunda ortalama değer 1,3 olarak önerilmiştir [17].

Toplam kaçak sızma yolu uzunluğu (L), orta ve yoğun buz için kuru ark mesafesine yaklaşık olarak eşittir. Soğuk sis koşulları vb. çok hafif buzlanma durumlarında ise kaçak mesafesine eşittir. Genel olarak, tek tip bir kirlilik katmanı için $R(x) = r_p(L - x)$ (Ω/cm) olarak verilir. Neumärker, bunu kullanarak Denklem (1)'in türevini almış ve kritik ark uzunluğunu elde etmiştir [18].

$$X_c = \frac{L}{n+1} \quad (2)$$

Düzgün kirlilik katmanı ile arkın X_c konumuna ulaşması için yeterli gerilim varsa, kaçak mesafesinin geri kalanında atlama işlemini tamamlamak için yeterli potansiyel vardır. Tipik olarak, n değeri yaklaşık 0.5'dir. Böylece, toplam kaçak sızma yolu uzunluğu X_c değerinin yaklaşık üçte ikisi kadardır. Denklem (1)'i I 'ya göre farklılaştırarak ve sifıra eşitleyerek, atlamada kritik akım I_c ve kritik gerilim V_c 'yi oluşturmak da mümkündür

$$I_c = \left(\frac{A}{r_p}\right)^{1/(n+1)} \quad (3)$$

$$V_c = L \cdot A^{1/(n+1)} \cdot r_p^{n/(n+1)} \quad (4)$$

Yüzey iletkenliği (γ_e) değeri d.a. için incelenmiş ve 0 - 300 $\mu S/cm$ aralığında, polarite ve uygulanan su iletkenliği (σ_{20}) ile arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [15].

$$\gamma_{e1} = 0.0599\sigma_{20} + 2.59 \text{ dc}^- \quad (5)$$

$$\gamma_{e2} = 0.082\sigma_{20} + 1.79 \text{ dc}^+ \quad (6)$$

Denklem (5) ve (6)'daki katsayılar, iletkenliği 300 $\mu S/cm$ olan su için yaklaşık 0,6 - 0,8 mm'lik bir "yarı-su" tabakası kalınlığını ifade etmektedir. D.a. atlama hesaplanmasının son adımı, arka seri olan buz tabakasının direncinin değerlendirilmesidir. Bu durum denklem (7) ile ifade edilmiştir.

$$R(x) = \frac{10^6}{2\pi\gamma_e} \left[\frac{4(L-x)}{D+2t} + N \ln \left(\frac{D+2t}{4r} \right) \right] \quad (7)$$

Denklem (7)'de, $R(x)$ x konumundan diğerine sızıntı yolu boyunca direnç (Ω), L ark yolunun uzunluğu (cm), x ark kökünün sızıntı yolu boyunca pozisyonu (cm), D izolatör çapı (cm), t buz kalınlığı (cm), N buz yüzeyindeki toplam ark kökü sayısı ve r ark kökü yarıçapıdır (cm).

2.2. Buzla kaplı izolatörlerin AA atlama modeli

Denklem (1)'deki d.a. koşullarını a.a. koşullarına uyarlamak için birkaç değişiklik gerekmektedir. Elektrot gerilim düşümü (V_e), d.a.da a.a.ya göre daha düşüktür ve bu durumda diğer terimlerin hesaplanmasını etkilemektedir. A.a.da gerilim değerinin tepe noktasında atlama oluşma eğilimi olduğundan analiz yapılırken

maksimum gerilim ve maksimum akımın tepe değerleri kullanılmaktadır. Bu durum denklem (8) ile ifade edilmektedir.

$$V_m = AK_p x. I_m^n + I_m R(x) \quad (8)$$

Denklem (8)'de V_m , uygulanan a.a. geriliminin tepe değeri (V), I_m a.a. akımının tepe değeri (I), A ve n ark sabitleridir.

A.a.da yüzey iletkenliği denklem (9)'daki gibi ifade edilir.

$$\gamma_e = 0.0675\sigma_{20} + 2.45 \quad (9)$$

Denklem (8)'de yer alan direnç ifadesini ($R(x)$) hesaplamak için denklem (9)'dan ve ark köklerinin sayısı N ve ark kök yarıçapı r ile birlikte kullanmak gerekir. Bu durum denklem (10) ile ifade edilmiştir.

$$R(x) = \frac{10^6}{2\pi\gamma_e} \left[\frac{4(L-x)}{D+2t} + (N' + N'') \ln \left(\frac{D+2t}{4r} \right) \right] \quad (10)$$

Denklem (10)'da; x konumundan toprak elektroduna kaçak yolu boyunca direnç (Ω), γ_e eşdeğer yüzey iletkenliği (μS), L ark yolunun uzunluğu (cm), X ark kökünün sızıntı yolu boyunca pozisyonu (cm), D izolatör çapı (cm), t buz kalınlığı (cm), N' bir metal elektrottan buz yüzeyine kadar olan toplam ark sayısı, N'' buz yüzeylerinden buz yüzeylerine kadar olan hava boşluklarındaki toplam ark sayısı ve r ark kökü yarıçapıdır (cm).

Buz yüzeyi boyunca ark kökünün her konumundaki durum göz önünde bulundurularak a.a.da arkın yeniden oluşma koşulu denklem (11)'deki gibi ifade edilmiştir.

$$V_m \geq \frac{k.K_{px}}{I_m^b} \quad (11)$$

Denklem (11)'de k ve b, ark yeniden oluşma sabitleri, K_{px} , sızıntı yolu boyunca x konumunda kısmi arkın uzunluğu, V_m , uygulanan gerilimin tepe değeri (V) ve I_m , akımın tepe değeridir (A).

Buz yüzeyindeki arkın yeniden oluşma süreci, normalde kirli yüzeyler için kullanılanlardan farklı katsayılara sahiptir [19]. Ayrıca buzlu yüzeylerdeki ark yayılma hızı kirli yüzeylerdekinden biraz daha yavaştır. Bu durum buzlu yüzeylerdeki ark yeniden oluşma sürecinin neden kirli yüzeylerde bulunanlardan farklı katsayılara sahip olduğunu açıklamada sıcaklığa alternatif bir faktör olabilmektedir.

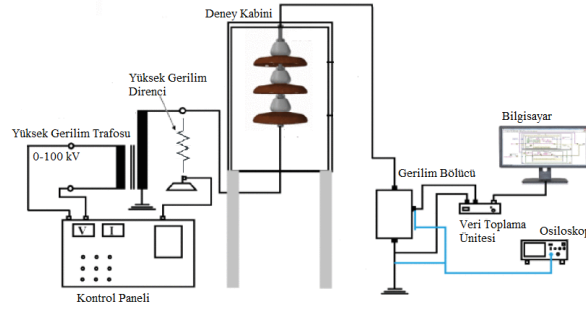
3. Materyal ve Metot

İzolatörler güç sistemlerinde arızaların en sık gerçekleştiği elemanlardan biridir. İzolatör arızalarında kirlilik ve buzlanma durumları önemli bir yer almaktadır. Buzlanma sorunu, izolatör yüzeyinde yer alan aşırı soğumuş su damlacıklarının neden olduğu yalıtkan yüzeyinin köprülenmesiyle, izolatör eteğinin elektrik alan dağılımının bozulmasından kaynaklanan bir sorundur. Buzlanma nedeniyle, nominal çalışma geriliminde izolatör yüzeyi boyunca atlamalar meydana gelebilir. Bu durum büyük elektrik kesintilerine ve hatta yangınlara neden olabilmektedir. Bu nedenle izolatörlerde buzlanma olayı detaylı incelenmesi gereken bir konudur. Bu çalışmada, porselen, cam ve silikon izolatörlere laboratuvar şartlarında buzlandırma işlemi Şekil 1'deki gibi uygulanmıştır.



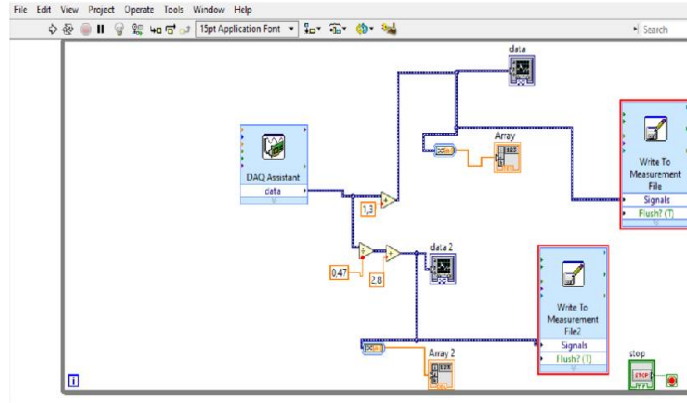
Şekil 1. Buzlandırma işlemi

Buzlanan izolatlara Şekil 2’de gösterilen deney düzeneğinde yüksek gerilim uygulanmış ve yüzeysel kaçak akımlar ölçülmüştür.



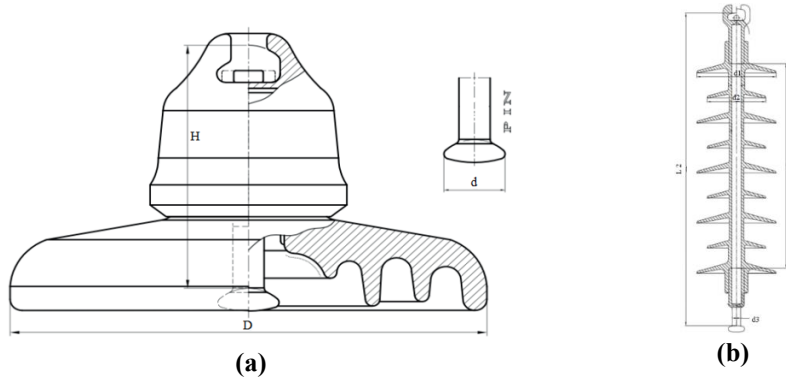
Şekil 2. Deney düzeneği

İzolator yüzeyindeki sızıntı akımlarını ölçmek için LabVIEW programında Şekil 3’te gösterilen bağlantı şeması kullanılmıştır.



Şekil 3. LabVIEW bağlantı şeması

Deneylerde kullanılan porselen, cam ve silikon izolatlara ait kesitler Şekil 4’te, cam ve porselen izolatorlerin bir elemanına ait karakteristik değerler Tablo 1’de, silikon izolatöre ait büyüklükler ise Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 4. (a) Porselen ve cam izolator kesiti (b) Silikon izolator kesiti

Tablo 1. Porselen ve cam izolatöre ait karakteristik değerler

İzolator Tipi	Çap (D) (mm)	Yükseklik (H) (mm)	Pin çapı (d) (mm)	Kaçak akım yolu uzunluğu (mm)
U100 BL (K3) Porselen	255	146	16	280
U100 Cam	255	146	16	280

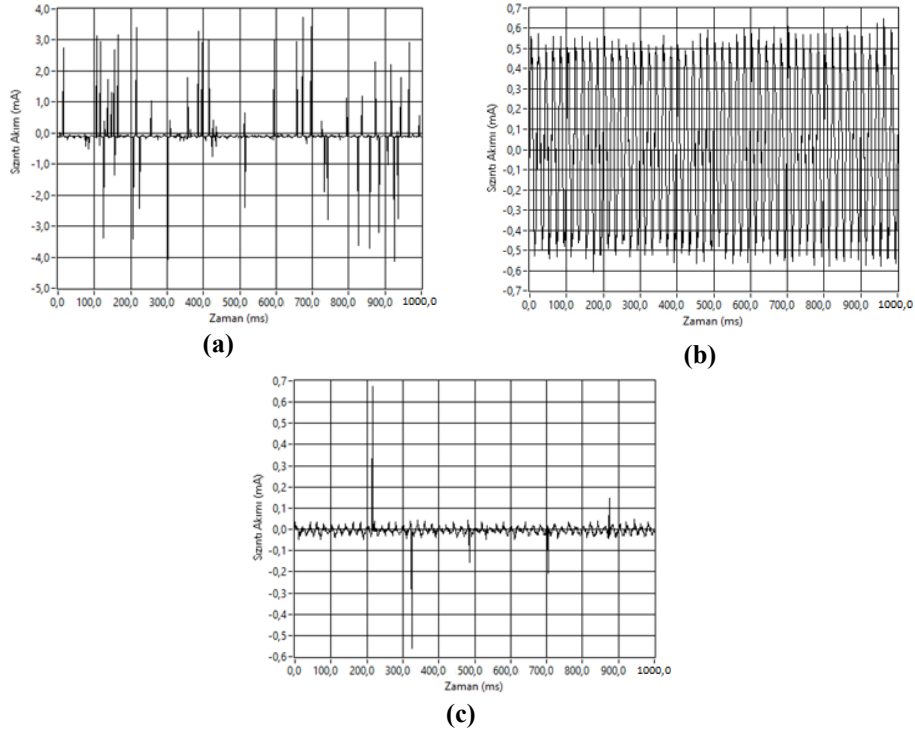
Tablo 2. Silikon izolatöre ait karakteristik değerler

İzolator Tipi	L1 (mm)	L2 (mm)	d1 (mm)	d2 (mm)	d3 (mm)	Kaçak akım yolu uzunluğu (mm)
Silikon (K2)	248.8	440	120	90	17	900

4. Deneysel Çalışma ve Sonuçlar

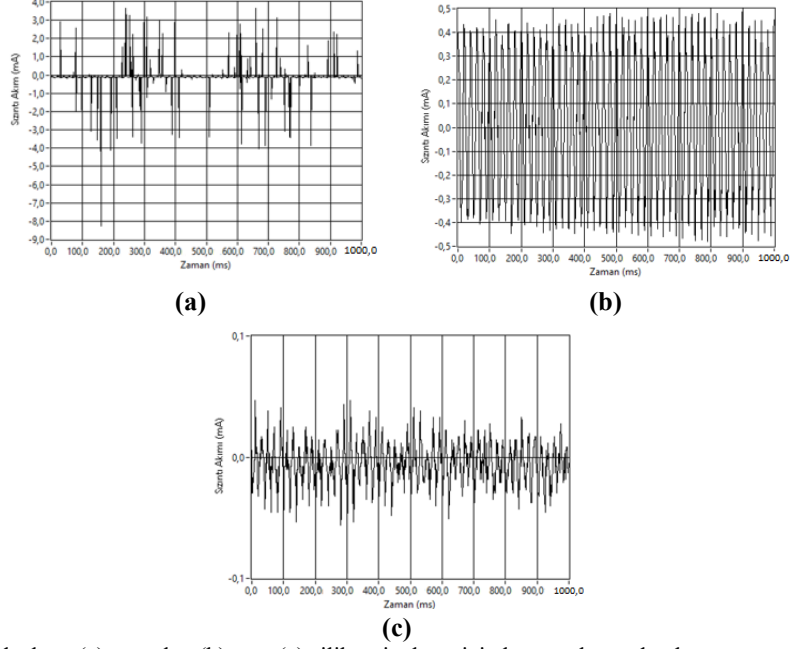
Gerçekleştirilen çalışmada, porselen, cam ve silikon izolatörlere buzlandırma kabini içinde hafif buzlu ve buzlu olarak nitelendirilen kalınlıklarda buzlanma işlemi gerçekleştirilmiştir. Buzlanan izolatörlere 5, 10, 15 ve 20 kV'luk gerilimler, izolator yüzeyindeki buz eriyene kadar 15'er dakikalık aralıklarla uygulanmıştır. Gerilim uygulanırken veri toplama ünitesi yardımıyla, gerilim bölücünün çıkışına bağlanan direnç üzerindeki gerilim değeri ölçülerek, LabVIEW programı vasıtasıyla daha detaylı ve akım sıklığının analizde etkin olması için 100 ms periyotlarla sızıntı akımları elde edilmiştir. Ortam sıcaklığı ve nem değerleri elde edilerek sızıntı akımları ile ilişkisi yorumlanmıştır.

Şekil 5'te hafif buzlu olan porselen, cam ve silikon izolatöre buzlandırma kabini çıkarıldıktan hemen sonra uygulanan 5 kV gerilimle elde edilen sızıntı akımları yer almaktadır.



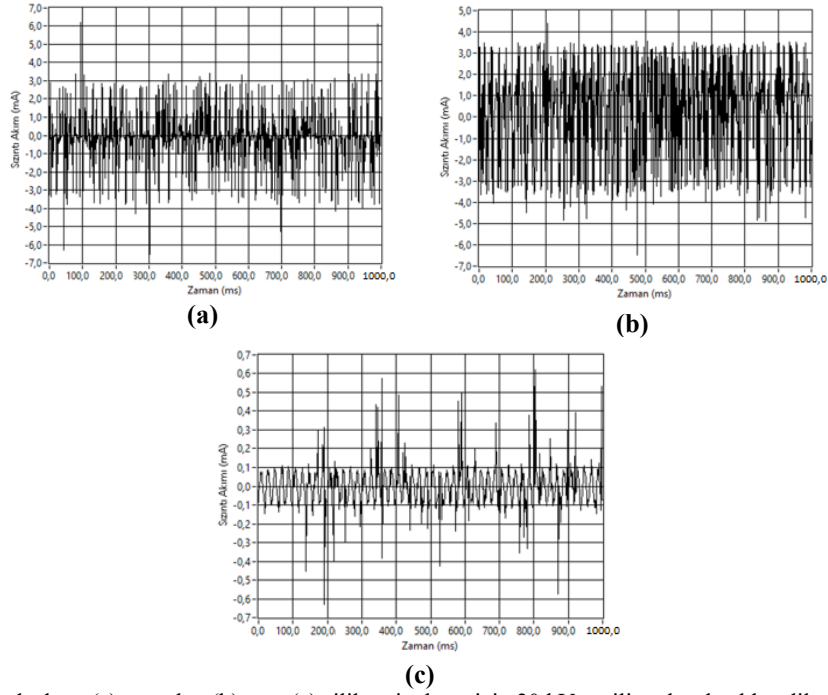
Şekil 5. Hafif buzlandırılmış (a) porselen (b) cam (c) silikon izolator için 5 kV gerilim altında elde edilen sızıntı akımları

Şekil 6'da hafif buzlu olan porselen, cam ve silikon izolatöre erimeye yakın uygulanan 5 kV gerilimle elde edilen sızıntı akımları yer almaktadır. Hafif buzlu durumda tüm izolatör çeşitlerinde 15 dakika sonra izolatör yüzeyindeki buz tabakasının sıvı duruma yakın olduğu gözlemlenmiştir.



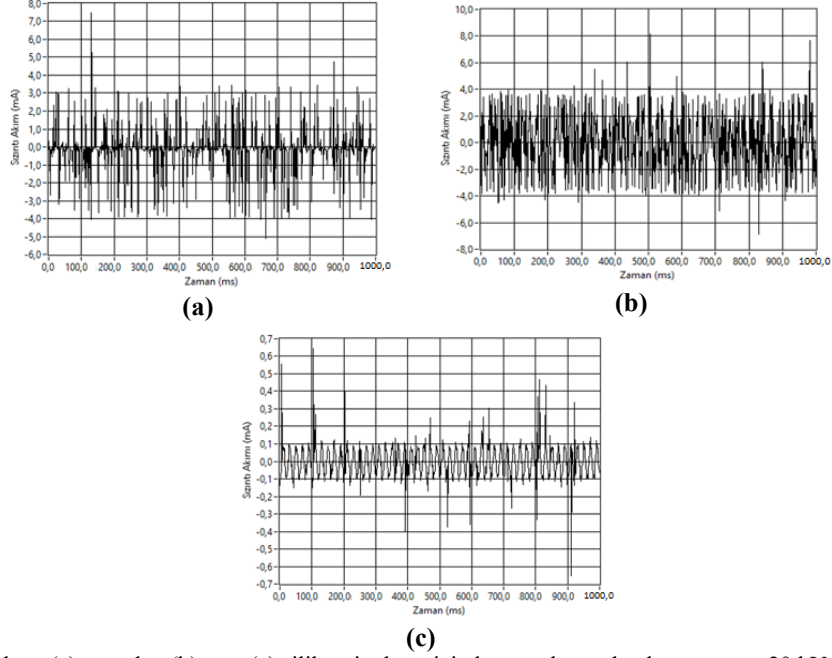
Şekil 6. Hafif buzlandırılmış (a) porselen (b) cam (c) silikon izolatör için buz sıvılaşmadan hemen önce, 5 kV gerilim altında elde edilen sızıntı akımları

Şekil 7'de buzlu olan porselen, cam ve silikon izolatöre buzlandırma kabininden çıkarıldıktan hemen sonra uygulanan 20 kV gerilimle elde edilen sızıntı akımları yer almaktadır.



Şekil 7. Buzlandırılmış (a) porselen (b) cam (c) silikon izolatör için 20 kV gerilim altında elde edilen sızıntı akımları

Şekil 8'de buzlu olan porselen, cam ve silikon izolatöre erimeye yakın uygulanan 20 kV gerilimle elde edilen sızıntı akımları yer almaktadır. Buzlu durumda, cam izolatörde 15 dakika, porselen izolatörde 45 dakika ve silikon izolatörde 30 dakika sonra izolatör yüzeyindeki buz tabakasının sıvı duruma yakın olduğu gözlemlenmiştir.

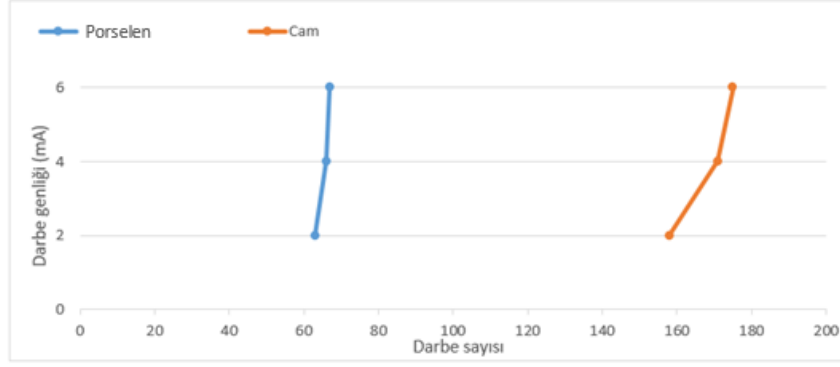


Şekil 8. Buzlandırılmış (a) porselen (b) cam (c) silikon izolatör için buz sıvılaşmadan hemen önce 20 kV gerilim altında elde edilen sızıntı akımları

Cam izolatörde hafif buzlanma durumunda, 15 dakika sonra gerilim uygulandığında, ilk duruma göre sızıntı akımlarının genliğinde porselen izolatörün hafif buzlanma durumuna göre çok büyük fark oluşmadığı görülmüştür. Porselen izolatörün hafif buzlu durumuyla kıyaslandığında cam izolatörün sızıntı akımlarının sıklığının daha fazla olduğu belirlenmiştir. Silikon izolatörde hafif buzlanma durumunda sızıntı akımı 2 mA'yi geçmemiştir. Silikon izolatörde, porselen ve cam izolatörün hafif buzlu durumuna kıyasla sızıntı akımı oldukça azdır. Porselen izolatörlerde buzlanma durumunda izolatöre beklemeden gerilim uygulandığında sızıntı akımı kısmen hafif buzlanmaya benzerlik gösterse de buzsuz duruma göre akım sıklığı artmaktadır. Bu durum buz tabakasının direnci ile ilgilidir. Buz tabakasının direnci buz tabakasının kalınlığı ile ters orantılıdır. Buz tabakasının kalınlığı buzun artık direncini azaltacak, bu da sızıntı akımının artmasına neden olacaktır. Buzlanma durumunda 20 kV'da sızıntı akımı genliği yaklaşık olarak 8 mA'yi bulmaktadır. Bekleme süresi arttıkça buzun erimesi ile beraber sızıntı akımı sıklığı genel olarak artmaktadır.

Cam izolatörde buzlanma durumunda, izolatöre beklemeden ve 15 dakika beklendikten sonra gerilim uygulandığında, yüzeysel sızıntı akımının buzsuz durum ve hafif buzlanmaya göre daha belirgin olduğu görülmüştür. Buzlanma durumunda, 20 kV'da sızıntı akımı genliği yaklaşık olarak 8 mA'yi bulmaktadır. Porselen zincir izolatöre göre buzlanma durumundaki sızıntı akımı daha belirgindir. Silikon izolatörde buzlu durumda buzun yüzeye tutunmasından dolayı erime durumu daha geç gerçekleşmektedir. Silikon izolatör için porselen ve cam izolatöre kıyasla buzlu durumda sızıntı akımları daha azdır. İzolatörlere uygulanan alternatif gerilimle birlikte izolatör yüzeyinin iletkenliğinin artmasıyla yalıtkan yüzeyinde oluşan arklar darbe olarak nitelendirilmektedir. Porselen izolatör ve cam izolatörün 20 kV'da, saniyedeki darbe sayılarının karşılaştırılması Şekil 9'da yer almaktadır.

Porselen izolatörde, saniyedeki darbe sayısı, 2 mA'de 63, 4 mA'de 66 ve 6 mA'de 67 olurken cam izolatörde, saniyedeki darbe sayısı, 2 mA'de 158, 4 mA'de 171 ve 6 mA'de 175 olmuştur. Cam izolatörde, porselen izolatöre göre daha fazla darbe oluşmuştur. Buzlandırılan izolatör için zamana bağlı olarak ölçülen, ortam nem ve sıcaklık değerleri Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 9. Porselen izolatör ve cam izolatörün darbe sayılarının karşılaştırılması

Tablo 3. İzolatöre gerilim uygulanırken zamana bağlı olarak ortam nem ve sıcaklık değerleri

Zaman (dk)	Nem (%)	Sıcaklık (C)
0	37	21.6
15	43	20.2
30	47	20
45	50	19.8

İzolatörün buzlanma durumunda 15'er dakikalık periyotlarda buzun erimesi ile beraber ortamın nem değeri yükselmiş sıcaklık değeri ise kısmen düşmüştür.

5. Sonuçlar

İzolatörlerin yüzeyinden akan sızıntı akımları; izolatör yüzeyindeki buz kalınlığı, bulunduğu ortamın sıcaklığı, nemi vb. çevresel faktörlere, izolatörlerin büyüklüğü, etek aralığı, etek çapı ve izolatörün yapıldığı malzeme vb. mekaniksel durumlara bağlıdır.

İzolatörlere uygulanan gerilimin genliğinin artması sızıntı akımının genliğinin artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda sızıntı akımının genliği izolatör yüzeyinde biriken buzun oranına da bağlıdır. Buz kalınlığı arttığında ve buzun erimeye başladığı andan sıvı hale geçinceye kadar sızıntı akımının sıklığı artmaktadır. Buz erimeye başladığı anda izolatörün bulunduğu ortamın nemi artmaktadır. Bu durum sızıntı akımını etkileyen bir durum olarak ele alınmalıdır.

Cam izolatörün sızıntı akımının sıklığı porselen ve silikon izolatöre göre daha fazladır. Porselen, cam ve silikon izolatörlerin yüzeylerinde buzun en erken olgunlaşması ve en geç erimesi silikon izolatörde olmaktadır. Buzun sıvı hale geçmeye başladığı andan itibaren uygulanan gerilimin genliği arttıkça ark sayısı da artmaktadır.

İzolatörlerin tasarımı gerçekleştirilirken bulunduğu bölgenin iklim şartlarına göre buzlanma seviyesi, sıcaklık ve nem değerleri göz önüne alınarak, etek çapı, etek aralığı, etek sayısı, yapıldığı malzeme vb. mekaniksel özelliklerin dikkate alınması buzlanmadan dolayı oluşabilecek sorunları azaltmaya yardımcı olacaktır.

Dünya üzerinde doğa olaylarının çevreye etkisinin tamamen yok olması söz konusu değildir. Bu yüzden izolatörlerde buzlanma olayının ve bununla birlikte çevresel faktörlerin enerji nakil hatlarına olan olumsuz etkileri devam edecektir. Bu durum ile beraber ülkemizin coğrafi durumu ve karasal iklimin yoğun yaşandığı kırsal kesim göz önünde bulundurulduğunda izolatörlerde buzlanmadan dolayı gerçekleşen arızalar oldukça fazladır. Bu arızalar, enerji kesintileri ile birlikte oluşan bakım ve onarım maliyetleri ile ülke ekonomimize büyük zararlar vermektedir. Ancak oluşacak olan olumsuz koşulların etkilerini minimize etmek mümkündür. İzolatörlerde buzlanma olayının etkisini azaltmak için gelecekteki çalışmalarda, sinyal işleme veya görüntü işleme teknikleri daha etkin bir şekilde kullanılabilir. Erken uyarı sistemi ile izolatörlere zamanında müdahale edilerek arızaların oluşması engellenebilir. Böylece enerji kesintileri ve onarımlar azaltılarak ekonomiye katkı sağlanabilir.

Teşekkür

Bu çalışma FÜBAP MF.21.68 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Farzaneh M, Kiernicki J. Flashover problems caused by ice build up on insulators. *IEEE Electr Insul Mag* 1995; 11(2): 5–17.
- [2] Chisholm WA. North American operating experience: Insulator flashovers in cold conditions. *CIGRE Study Committee 33 Colloq* 1997; 1–4.
- [3] Farzaneh M, Zhang J and Volat C. Effect of insulator diameter on AC flashover voltage of an ice-covered insulator string. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul* 2006; 13(2): 264–271.
- [4] Jiang X, Wang S, Zhang Z, Xie S, and Wang Y. Study on AC Flashover Performance and Discharge Process of Polluted and Iced IEC Standard Suspension Insulator String. *IEEE Trans Power Delivery* 2007; 22(1): 472–480.
- [5] Zhang Z, Jiang X, Sun C, Hu J, Huang H and Gao DW. Influence of insulator string positioning on AC icing flashover performance. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul* 2012; 19(4): 1335–1343.
- [6] Farzaneh M. Insulator icing flashover. 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena; 2013; Chenzhen, China. 1–15.
- [7] Xu Z, Xu T, Yao T, Li X, Li J, Chen J, ... & Jia R. Flashover performance of UHV amp; EHV post insulators under icing conditions. 2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP); 2014; Des Moines, IA, USA. 295–298.
- [8] Yin F, Jiang X, & Farzaneh M. Electrical performance of composite insulators under icing conditions. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul* 2014; 21(6): 2584–2593.
- [9] Jiang X, Xiang Z, Zhang Z, Hu J, Hu Q and Shu L. Comparison on ac icing flashover performance of porcelain, glass, and composite insulators. *Cold Reg Sci Technol* 2014; 100: 1–7.
- [10] Shu L, Wang S, Jiang X, Hu Q, Liang J, Yin P & Chen J. Modeling of AC flashover on ice-covered composite insulators with different shed configurations. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul* 2014; 21(6): 2642–2651.
- [11] Porkar B & Farzaneh M. Ac Flashover Performance of a Horizontal Insulator String Under Heavy Icing Conditions. The 20th International Symposium on High Voltage Engineering; 2017; Buenos Aires, Argentina.
- [12] Tian L, Zhang Z, Jiang X, Shu L, Hu J & Qin H. Study on the Icing Accretion Characterization of Porcelain and Glass Insulator. 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE); 2018; Athens, Greece. 1–4.
- [13] Li C, Liu Y, Wang Z, Li Q, Farzaneh M and Du B. X. Transformation and Analysis of Leakage Current for Icing Flashover Prediction of HVDC Outdoor Insulators. 2023 IEEE 4th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE); 2023; Shanghai. pp. 1-4.
- [14] Zong C, Hu Y, Jiang X, Xian R, Liu Z, & Sun J. AC flashover characteristics and arc development process of glaze ice-covered insulators in natural environment. *Int J Electr Power Energy Syst* 2022; 135, 107559.
- [15] Qiao X, Zhang Z, Jiang X, Sundararajan R, Ma X, & Li X. AC failure voltage of iced and contaminated composite insulators in different natural environments. *Int J Electr Power Energy Syst* 2020; 120, 105993.
- [16] Zhu Y, Zhou R, Zhang Y, Dong X, & Huang X. Review on flashover risk prediction method of iced insulator based on icing monitoring technology. *Cold Reg Sci Technol* 2021; 185, 103252.
- [17] Rizk FA. Mathematical models for pollution flashover. *Electra* 1981; 78(5): 71–103.
- [18] Farzaneh M, Zhang J, Chaarani R & Fikke SM. Critical conditions of AC arc propagation on ice surfaces. in Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.00CH37075) 2000; 211–215.
- [19] Neumarker G. Verschmutzungszustand und kriechweg. *Monatsber D Deut Akad* 1959; 1: 352–359.
- [20] Farzaneh M, Chisholm W. A. Insulators for icing and polluted environments. Canada: John Wiley & Sons, 2009.

Bir Boyutlu Evrişimsel Sinir Ağı Yardımıyla Faz Kilitleme Değeri ve Diferansiyel Entropi Özellikleri Kullanılarak EEG Sinyallerinde Duygu Tanınması

Hakan UYANIK^{1*}, Salih Taha Alperen ÖZÇELİK², Abdulkadir ŞENGÜR³

¹ Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Munzur Üniversitesi, Tunceli, Türkiye

² Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye

³ Elektrik Elektronik Mühendisliği Teknolojileri, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ hakanuyanik@munzur.edu.tr, ² sozcelik@bingol.edu.tr, ³ ksengur@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 25/01/2023;

Kabul/Accepted: 28/07/2023)

Öz: Duygu analizi günümüz bilim dünyasında üzerinde en çok araştırma yapılan alanların başında gelmektedir. Özellikle insan-bilgisayar etkileşimi gibi günlük hayatımıza her geçen gün daha çok dahil olan alanların yanı sıra nörobilim ve psikoloji gibi bilim dallarının da yakından incelediği bir konudur. Duygu analizi için konuşma sinyalleri, mimikler, vücut dili, yüz ifadeleri gibi yöntemler kullanılsa da bu yöntemler manipülasyona açık oldukları için biyolojik sinyaller kadar güvenilir sonuçlar vermezler. Bu çalışmada sanal gerçeklik (SG) teknolojisi yardımıyla hazırlanmış, biyoelektriksel bir sinyal olan elektroensefalografi (EEG) sinyalleri ile duygu tanıma için yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde EEG sinyallerinin alt bantlarının diferansiyel entropi (DE) ve faz kilitleme değeri (FKD) özellikleri, tasarlanan bir boyutlu evrişimsel sinir ağı (1B-ESA) yardımı ile pozitif ve negatif duyguların tanınması için kullanılmıştır. Her iki özellik yardımıyla elde edilen özellik matrisleri on defa teste tâbi tutularak ortalama başarı değerleri elde edilmiştir. Bu testler sonucunda DE ve FKD özellikleri ile en yüksek ortalama başarı puanları, tüm alt bant özellik matrislerinin birleştirilmesi ile sırasıyla %74,061±1,41 ve %63,7590±1,72 olarak elde edilmiştir. Ayrıca çalışmada elde edilen yüksek frekanstaki sinyal bileşenlerine ait testlerin başarı oranlarının düşük frekans bantlarına göre daha yüksek elde edilmesi daha önce bu alanda yapılan benzer çalışmaların sonuçlarını destekler nitelikte olmuştur.

Anahtar kelimeler: Duygu tanıma, elektroensefalografi, diferansiyel entropi, faz kilitleme değeri, bir boyutlu evrişimsel sinir ağı.

Emotion Recognition in EEG Signals Using Phase Lock Value and Differential Entropy Features with the Help of One-Dimensional Convolutional Neural Network

Abstract: Emotion recognition is one of the most researched fields in today's scientific world. It is a subject that is closely examined by disciplines such as neuroscience and psychology, and it is more and more involved in our daily lives, especially in human-computer interaction area. Although methods such as speech signals, facial expressions, body language, and facial expressions are used for emotion analysis, these methods do not give as reliable results as biological signals because they are open to manipulation. In this study, a new method for emotion recognition with electroencephalography (EEG) signals, which is a bioelectrical signal prepared with the help of virtual reality (VR) technology, is proposed. In this method, differential entropy (DE) and phase-locking value (PLV) properties of sub-bands of EEG signals were used to recognize positive and negative emotions with the help of a designed one-dimensional convolutional neural network (1D-CNN). The feature matrices obtained with the help of both features were tested ten times and average accuracy values were obtained. As a result of these tests, the highest average accuracy scores with DE and FKD features were obtained as 74.061±1.41% and 63.7590±1.72%, respectively, by combining all sub-band feature matrices. In addition, the higher accuracy rates of the tests of the high-frequency signal components obtained in the study compared to the low-frequency bands, supported the results of similar studies carried out in this area before.

Key words: Emotion recognition, electroencephalography, differential entropy, phase locking value, one dimensional convolutional neural network.

1. Giriş

Düşünce ve duygu kavramları içsel dünyamızı oluşturan soyut yapılardır. Bu iki kavram birbirleri ile bağlantılıdır ve kişisel deneyimler oldukları için dışarıdan doğrudan gözlemlenemezler. Öte yandan bu iki kavram çevre ile etkileşim halindedir [1-3]. Bilişsel nörobilimci Ralph Adolphs'e göre duygular, bir avcıdan kaçmak veya

* Sorumlu yazar: hakanuyanik@munzur.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-6870-7569, ² 0000-0002-7929-7542, ³ 0000-0003-1614-2639

avına saldırmak gibi belirli karmaşık davranışların nedensel açıklamalarını sağlayan beynin işlevsel durumlarıdır [4-6].

İnsan duygularının tespiti için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Duygular konuşma sinyallerinden [7-9], vücut dilinden [10], EEG sinyallerinden [11-14], mimiklerden [15,16], yüz ifadelerinden [17,18], fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme (fMRI) verilerinden [19,20], yakın kızılötesi spektroskopi (NIRS) verilerden [21,22] ve daha birçok farklı yöntem ile tespit edilebilir. Duygu tanıma için EEG sinyallerinin kullanımı bu yöntemler arasında en çok tercih edilen, en güvenilir ve en pratik yöntemlerden birisidir. Güvenilir olmasının ardında yatan sebep, bu sinyallerin doğrudan duyguların meydana geldiği otonom sinir sisteminin merkezi olan beyinden elde edilmesinden dolayıdır. Dolayısıyla bu sinyaller manipülasyona kapalıdır. Örneğin yüz ifadeleri veya vücut dili verileri kişilerce olduğundan farklı gösterilebilirken, EEG ve diğer biyolojik sinyallerde bu durum aynı değildir.

EEG sinyalleri ile duygu tanıma için kullanılan veri setleri çeşitli uyarılar yardımıyla oluşturulurlar. Bu uyarılar kimi zaman bir ses kaynağıyken, kimi zaman görsel bir uyarı olabilir. Birçok veri setinde ise her iki uyarı tipi bir arada kullanılmıştır. Günümüzde en popüler iki EEG sinyal veri seti DEAP [23] ve SEED [24] veri setleridir. Bu iki veri seti ses ve görüntü uyarıları yardımıyla oluşturulmuştur. Kullanılan görüntü uyarıları ise iki boyutludur.

İsmael ve ark. [25] nolu çalışmalarında DEAP veri setinde EEG tabanlı duygu sınıflandırması için iki aşamalı bir yöntem önermişlerdir. Yazarlar çalışmalarında gürültü eliminasyonu için düşük geçişli filtreleme yöntemi kullanmış ve ritim çıkarımı için bant geçiren filtreleme adımlarını EEG sinyallerine uygulamışlardır. Her ritim için en iyi performans gösteren EEG kanallarını dalgacık bazlı entropi özelliklerini ve fraktal boyut tabanlı özellikleri kullanarak k-En Yakın Komşuluk (k-EYK) sınıflandırıcısı yardımıyla belirlemişlerdir. Daha sonra, her EEG ritmi için nihai tahmini elde etmek için çoğunluk oylamasında en iyi beş EEG kanalını dikkate almışlardır. Önerilen çalışmada yüksek değerlik (HV) ve düşük değerlik (LV) sınıflandırmasında %86,3 başarı puanına karşılık, yüksek uyarılma (HA) ve düşük uyarılma (LA) sınıflandırmasında ise %85,0 başarı puanı elde etmişlerdir.

Örneğin, Arı ve ark. [26] nolu çalışmalarında, EEG sinyalleri ile duygu tanıma için yeni bir veri artırma yaklaşımı (Extreme Learning Machine Wavelet Auto Encoder) önermişlerdir. GAMEEMO [27] veri setini kullanan yazarlar başlangıçta EEG sinyallerini sürekli dalgacık dönüşümü (CWT) kullanarak zaman-frekans görüntülerine dönüştürmüşlerdir. Daha sonra elde ettikleri bu görüntüleri önerdikleri veri artırma yöntemini kullanarak çoğaltmışlardır. Son olarak, sınıflandırma için ResNet-18'e bir takım ince ayar uygulayarak % 99.6 başarı puanı elde etmişlerdir.

Joshi ve ark. ise [28] nolu çalışmada SEED ve DEAP veri setlerini bir arada kullanmışlardır. Yazarlar özellik çıkarımı için giriş EEG sinyallerinin doğrusal ve Gaussian olmayan karakteristiklerini elde etmek için Diferansiyel Entropinin Doğrusal Formülasyonunu (LF-DfE) kullanmışlardır. Daha sonra elde ettikleri özelliklerin sınıflandırılması için Çift Yönlü Uzun Kısa Süreli Bellek (BiLSTM) yaklaşımının kullanıldığı EEG tabanlı bir duygu tanıma yöntemi önermişlerdir. Çalışmada sırasıyla %80,64 ve %76,75 doğruluk puanları elde etmişlerdir.

Gelişen teknoloji ile araştırmacılar bugün üç boyutlu uyarılar yardımıyla veri setleri oluşturmayı başarmışlardır. Araştırmacılar bu veri setlerinin oluşturulması aşamasında sanal gerçeklik teknolojilerinden yararlanmışlardır. Sanal gerçeklik alanında insan bilgisayar etkileşimi için oldukça önemli bir yöntemdir. Çünkü teknolojinin hedeflediği konulardan birisi de insan zihni ile kontrol sistemlerinin geliştirilmesidir.

Morales ve ark. [29] EEG sinyalleri toplanırken daha gerçekçi uyarılarla bu işlemi yapmak için üç boyutlu uyarılardan yararlanmışlardır. 4 sanal oda kullanılarak 60 katılımcıdan hem EEG hem de EKG sinyallerinin kaydedildiği bir veri seti oluşturmuşlardır. Dört odadan ikisi olumlu duyguları, geri kalan iki oda ise olumsuz duyguların uyarıldığı düzeneklerle ayarlanmıştır. Giriş sinyallerinden özellikleri çıkarmak için güç spektral yoğunluğu (PSD), faz bağlantısı ve kalp atış hızı değişkenliği özelliklerinin kullanan yazarlar, sınıflandırma amacıyla bir destek vektör makinesi (SVM/DVM) sınıflandırıcısı kullanmışlardır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, önerilen şema ile değerlik sınıfı için %71,21 doğruluk puanı ve uyarılma sınıfı için %75 doğruluk puanı oluşturmuştur.

Suhani ve ark. [30] nolu çalışmalarında benzer olarak sanal gerçeklik gözlüklerini kullanarak EEG sinyallerini kaydetmişlerdir. Çalışmalarında mutluluk, korku, sakinlik ve sıkılma türünde duyguları araştırmışlardır. Özellik çıkarımı için doğrusal interpolasyon ve spline interpolasyonu yöntemlerini kullanmış ve sınıflandırma adımında bir DVM sınıflandırıcısı tercih etmişlerdir. Deneysel çalışmalar, dört duygunun sınıflandırılması aşamasında %85,01'lik bir doğruluk puanına ulaşmıştır.

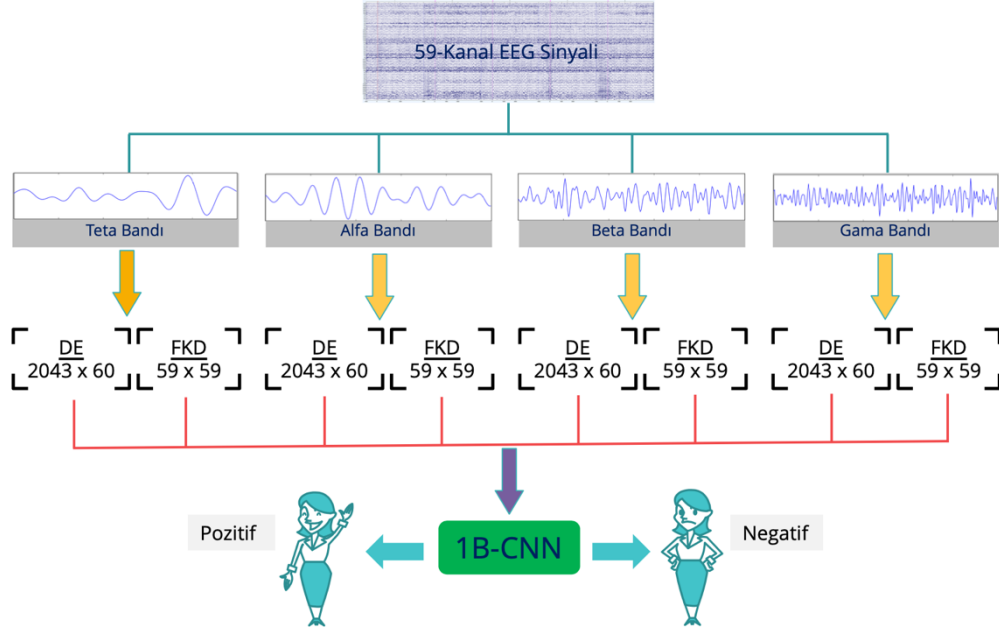
EEG duygu tanıma alanında sıklıkla tercih edilen yöntemlerden birisi de DE metodudur. [31-34] nolu çalışmalar bu özellik yardımıyla gerçekleştirilmiş bazı başarılı çalışmalardır. Örneğin Zheng ve ark. [35] duygu tanıma için 6 farklı özellik çıkarma yöntemi (PSD, DE, Diferansiyel Asimetri (DASM), Rasyonel Asimetri, Asimetri (RASM), Diferansiyel Nedensellik) kullanarak EEG sinyalleri ile duygu tanıma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, DEAP ve SEED veri setlerinde sırasıyla k-EYK, Lojistik Regresyon (LR), DVM

ve GELM (Generalized Extreme Learning Machine) olmak üzere dört farklı sınıflandırma yöntemiyle kullanmışlardır. Tüm deneyler sonucunda DE özellikleri diğer beş farklı özelliğe göre daha yüksek doğruluk puanı ve daha düşük standart sapma değeri üretmiştir. En iyi ortalama başarı puanları, DEAP ve SEED veri setlerinde DE özelliklerine sahip ayırmacı GELM ile sırasıyla % 69,67 ve % 91,07 olarak elde etmişlerdir.

Bu çalışmada sanal gerçeklik tabanlı oluşturulan bir EEG veri seti [36] ile duygu tahmini yapan bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde giriş EEG sinyalleri başlangıçta gürültü giderme ve taban çizgisi ayarlaması için MATLAB programında EEGLAB [37] araç kutusu yardımıyla birtakım ön işlemlere tâbi tutulmuştur. Bu işlemlerin ardından sinyallerin alt bantlara ayrılması için dalgacık dönüşümü uygulanmıştır. Bu ayrışma sonrasında elde edilen teta, alfa, beta ve gama bantları daha sonra özellik çıkarma işlemleri için kaydedilmiştir. Bu alt bantlar için DE ve FKD olmak üzere iki tür özellik çıkarım işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen özellik matrisleri rastgele şekilde %70'i eğitim verisi ve kalan %30'luk kısmı ise test seti olacak şekilde ayarlanarak tasarlanan 1B-ESA'na girdi olarak verilmiş ve iki tür duygunun (pozitif-negatif) tahmini yapılmıştır. Bu işlemler tüm veri seti için her bir özellik çıkarım yöntemi için on defa tekrarlanmış ve elde edilen sonuçların ortalama değeri ve standart sapması hesaplanmıştır. Bu çalışmanın literatüre kazandırdığı en belirgin özgün katkı, bu veri setinde ilk defa bir derin öğrenme metodunun kullanılmasıdır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada önerilen yönteme ait şema Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada önerilen yöntemin şeması [38].

Şekil 1'de görüldüğü üzere başlangıçta 59 kanallı EEG sinyalleri alt ritim bantlarına ayrılarak işlemlere devam edilmekte. Burada kullanılan dört alt bant sırasıyla teta, alfa, beta ve gama bantlarıdır. Bu dört banttan teta bandı, 4 ile 8 Hz arasında salınım yapan alt banttır. Bu bandın aktivitesi meditasyon ve uyusukluk anlarında yüksektir. Temel ritim olarak adlandırılan alfa bandı ise 8 ile 13 Hz arasında salınım gösterir. Bu banttaki aktivite uyanıkken ve gözler açıkken yüksektir. Görsel dikkatin ve zihinsel çabanın arttığı anlarda bu bandın aktivitesi düşer. Başın üst kısımlarında ölçülen aktivitesi diğer bölgelere göre daha yüksektir. Beta bandı 13 ile 30 Hz arasında bir salınım gösterir. Aktif düşünme ve konsantrasyon anlarında aktivitesi yüksektir. Gama bandı ise 30 Hz ve üzeri salınımları kapsar. İstemli hareketler ve bilgi işleme anlarında aktivitesi yüksektir [39]. Bu alt bantlara ayırma işleminde dalgacık dönüşümü kullanılmıştır. Dalgacık dönüşümünde 'db8' filtresi kullanılmış ve sinyaller 5 seviyeli bir dönüşüme tâbi tutulmuştur. Burada kullanılmayan alt bant delta bandıdır. Bu bant en düşük frekans değerinde salınım yapan banttır (0.5-4 Hz). Baş, omuz, göz, dil ve çene hareketlerinden kaynaklı sinyaller bu bandın salınımına yakın salınımlar oluşturan hareketlerdir ve bu sinyaller istenmeyen sinyaller olarak adlandırılan

artefaktları olarak adlandırılırlar ve EEG sinyallerine dahil olurlar. Bu artefaktların EEG sinyalleri içerisinde tamamen elimine edilmesi oldukça zordur. Bu sebeple bu bandın değerlendirilmesinden feragat edilmiştir. Bu durum birçok çalışmada benzer şekilde gerçekleştirilmektedir.

Ritimlere ayırma işleminden sonra bu alt bantlara ait iki tür özellik matrisi oluşturulur. Bunlar DE ve FKD özellikleridir. Daha sonra bu özellik matrisleri tasarlanan 1B-ESA'na girdi olarak aktarılır ve duygunun sınıfı tahmin edilir. Bu işlemlerin detaylı açıklamaları ilgili alt başlıklarda yapılmıştır.

2.1. Diferansiyel entropi

DE kavramı Shannon'nın [40] nolu kaynaktaki çalışmasında sürekli dağılımlar için oluşturmuş olduğu entropi hesaplama yönteminin eşdeğeridir [41]. Bu yöntem ile sürekli ve rastgele bir değişkenin düzensizliği veya bu belirsizlikteki değişiklik ölçülebilir. Bu özellik EEG sinyalleri gibi oldukça karmaşık ve rastgele oluşan sinyaller için oldukça kullanışlıdır.

X sürekli zamanlı ve rastgele bir değişken ve X 'in olasılık yoğunluk fonksiyonu $p_X(x)$ olmak üzere X 'in DE'si Denklem 1'de ki gibi hesaplanır.

$$h_X = - \int_S p_X(x) \log(p_X(x)) dx \quad (1)$$

Burada $S = \{x | p_X(x) > 0\}$ X 'in destek kümesi olarak adlandırılır. Rastgele değişkenin Gauss dağılımı $N(\mu, \sigma^2)$ 'ye uyduğu için olasılık fonksiyonu formülasyonu Denklem 2'de ki forma dönüşür.

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{x^2 + \mu^2}{2\sigma^2}} \cosh\left(\frac{\mu x}{\sigma^2}\right) \quad (2)$$

Bu ifade Denklem 1'de ki eşitlikte yerine konulursa Denklem 3'te ki DE eşitliği elde edilir.

$$h_X = \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \ln(p(x)) dx = \frac{1}{2} \log_2(2\pi e \sigma^2) + L\left(\frac{\mu}{\sigma}\right) \quad (3)$$

Bu eşitlikte $L(\cdot)$ 0'dan 1'e ($\ln 2$ 'ye) giden μ/σ fonksiyonudur. e Euler sabiti ve σ 'da x 'in standart sapmasıdır. Bu eşitlikten yola çıkarak her bir EEG sinyalinin DE'si hesaplanarak özellik matrislerine kaydedilmiştir ve deneysel adımlar bu matrislerle gerçekleştirilmiştir.

2.2. Faz kitleme değeri

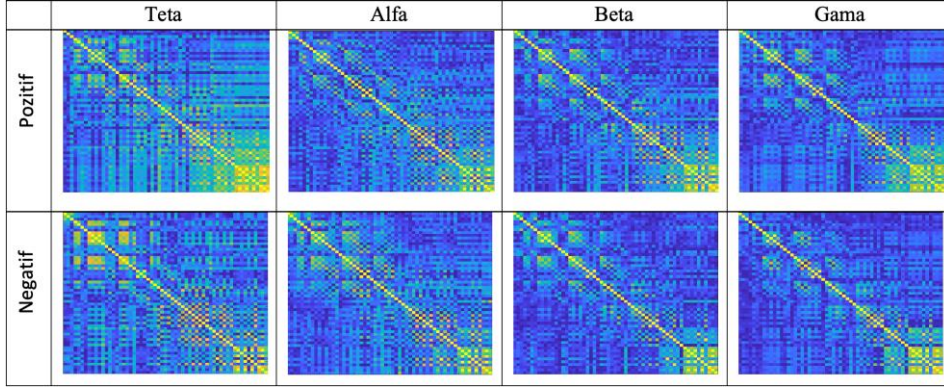
EEG gibi sinyaller için en çok kullanılan bağlantı hipotezlerinden biri faz senkronizasyonudur. Faz senkronizasyonuna göre, beynin iki farklı bölgesi farklı salınım aktivitesi gösterir ve farklı bölgeler arasında bir bağlantı varsa, salınım özellikleri arasında bir ilişki oluşur. Bu ilişki matematiksel olarak değerlendirilebilirse, faz eşleşmesinin bir tahminçisi elde edilir. Literatürde bulunan faz senkronizasyon ölçümlerinde en sık kullanılan temel ölçümlerden biri FKD'dir [42]. Bu ölçüm yönteminde, sinyaller arasında bağlı alanların anlık fazlarının birlikte gelişen sinyaller ürettiği hipotezi ile sinyallerin anlık faz farkı değerlendirilir. Bağlı sinyallerin fazlarının kilitli olduğu kabul edilir ve bu sinyaller arasındaki faz farkları sabit kabul edilir.

FKD'ni hesaplamak için kullanılan en yaygın yöntem, Hilbert veya Wavelet dönüşümleri kullanılarak elde edilen sinyallerin anlık fazının hesaplanmasıdır. Bu işlem için kullanılan FKD formülasyonu Denklem 4'te ki gibidir [43].

$$FKD_{i,j}(t) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N e^{-i(Q_i(t,n) - Q_j(t,n))} \right| \quad (4)$$

burada N , deneme sayısıdır ve $Q_i(t, n)$ ise t zamanındaki n denemesinde bulunan i sinyalinin anlık fazıdır.

EEG sinyallerine ait FKD kanallar arasındaki faz bağılıklarını gösterir ve bu çalışmada kullanılan EEG sinyal veri setindeki sinyallerde 59 kanallı olduğu için her bir sinyal parçasına ait 59×59 boyutunda özellik matrisleri elde edilecektir. Bu sinyaller arasında iki farklı duygu durumunda oluşan FKD matrisleri için dört alt bantta oluşan FKD matrislerine ait örnek bir gösterim Şekil 2'de ki gibidir.



Şekil 2. Veri setinden rastgele seçilen iki farklı duygu durumuna ait EEG sinyallerinin dört alt bantı için oluşan FKD görselleri

2.3. 1B-ESA

Geleneksel ESA çoğunlukla 2 boyutlu görüntü sınıflandırma uygulamaları için geliştirilmiştir [44]. 1B-ESA, bazı uygulamalarda daha avantajlı olan tek boyutlu özelliklere veya sinyal vektörlerine uygulanmasının daha etkili olmasıyla bilinen bir ESA uygulamasıdır. 1B-ESA ve 2B-ESA arasında bazı yapısal farklılıklar olsa da bunlar aynı çalışma prensiplerine dayanmaktadır [45].

Evrişim katmanı, giriş verileri ile skaler çarpım işlemi gerçekleştiren K adet filtreden oluşur. Her filtre, K 'nın özellik haritalarını tahmin eder ve bu filtreler belirli bir adım boyutuyla girişin uzunluğu boyunca kayarak hareket eder. 1B-ESA'da, evrişim katmanı, N boyutundaki giriş sinyali X vektörünün L boyutundaki bir filtre vektörü ω ile evrişimi ile gerçekleştirilir. Bu işlem Denklem 5 ile formüle edilebilir. Bu işlem herhangi bir sıfır dolgu olmadan $N-L+1$ uzunluğunda bir bir-boyutlu çıkış katmanı c ile sonuçlanır.

$$c(j) = f\left(\sum_{i=0}^{L-1} \omega(i) \cdot x(j-i) + b\right), j = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

Bu denklemde, b ön gerilim vektörüdür ve $f(\cdot)$ doğrusal olmayan bir fonksiyondur. Her evrişim katmanını, bir çekirdek penceresi fonksiyonu u 'da ki maksimum değerin, boyutu $m \times 1$ ve adımları s olan bir c giriş vektörü üzerinden alınan ve d olarak tanımlanan bir çıkış vektörü ile sonuçlanan bir maksimum havuzlama katmanı izler;

$$d = \max(u(m \times 1, s)c) \quad (6)$$

Tam bağlantılı katman (TBK), önceki katmandan gelen özellik haritası çıktısını giriş olarak alır ve tüm nöron düğümlerini birbirine bağlar. Bir aktivasyon fonksiyonu (örneğin Softmax, Sigmoid, vb.), ağ eğitimi sırasında çapraz entropi kaybı l 'yi hesaplamak için kullanılan tahmini çıktıyı Denklem 7'de ki gibi belirler:

$$l = \sum_{k=1}^c t(k) \log(p(k)) \quad (7)$$

Burada C , sınıfların sayısıdır. $t(k)$ ise tahmin edilen etiket ile doğru etiket arasındaki karşılaştırmanın sonucudur.

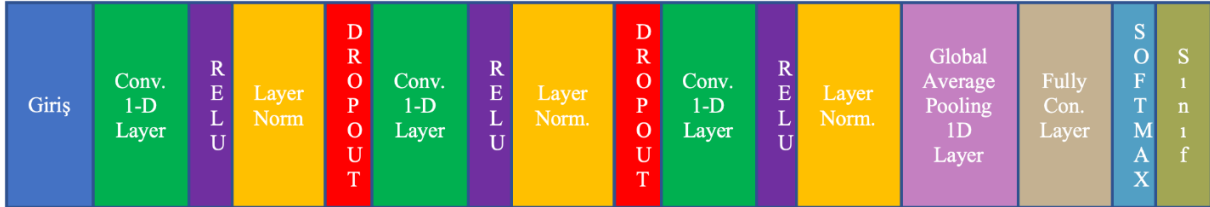
2.4. Veri seti

Çalışmada kullanılan veri seti [36] daha önce belirtildiği gibi üç boyutlu uyarılar yardımıyla oluşturulmuştur. Bunun için Shangay Film Akademisi tarafından üç boyutlu olarak hazırlanmış her biri 4 saniye uzunluğundaki üç farklı sınıftan 60 adet farklı video bir sanal gerçeklik gözlüğü yardımıyla deneklere izletilmiştir.

Bu esnada deneklerden 64 kanallı uluslararası 10-20 sistemine göre yerleştirilmiş bir EEG kayıt cihazı ile 100Hz örnekleme hızında EEG sinyalleri toplanmıştır. Veri setinde toplam 13 erkek ve 6 kadın denek ile 19 kişi yer almıştır. Veri seti oluşturulurken kullanılan 60 video ilk aşamada iki guruba ayrılmıştır. Bu gurupların birinde 20 adet pozitif ve 10 adet nötr etiketli video yer alırken diğer gurupta ise 20 adet negatif ve 10 adet nötr etiketli video yer almaktadır. Deneklere bu video gurupları rastgele şekilde iki defa izletilerek sinyaller kaydedilmiştir. Böylece her bir denek için toplamda 120 adet EEG kaydı oluşmuştur. Tüm kayıt işlemleri bittikten sonra toplanan EEG sinyallerinden bozuk olan parçalar silinmiş ve veri seti son halini almıştır. Bu işlemlerden sonra tüm veri setinde toplamda 2043 adet EEG sinyali yer almıştır. Bu sinyallere ait filtreleme, bağımsız bileşen analizi (BBA) ve taban çizgisi etiketleme işlemleri yapıldıktan sonra bir MATLAB altprogramı olan EEGLAB ile kullanıma uygun dosya formatlarında (.set, .bdf) kaydedilmiştir.

3. Deneysel Çalışmalar ve Sonuçlar

Çalışmada yapılan tüm deneyler MATLAB programında gerçekleştirilmiştir. MATLAB içerisinde EEGLAB araç kutusu yardımıyla önerilen yöntem uygun şekilde EEG sinyalleri okunmuş, gerekli etiketleme işlemleri yapılmış ve taban çizgisinden itibaren tüm sinyaller yeniden kaydedilmiştir. Daha sonra Şekil 1’de önerilen yöntem uygun şekilde işlemler gerçekleştirilmiştir. Veri setindeki tüm EEG sinyallerine ait dört alt bantın DE ve FKD verileri hesaplanarak özellik matrisleri oluşturulmuştur. Bu dört banttan elde edilen özellik matrisleri yan yana konularak (kombine) beşinci özellik matrisi oluşturulmuştur. Daha sonra bu özellik matrisleri 1B-ESA için %70 eğitim ve %30 test verisi olacak şekilde rastgele bir şekilde ayrılmıştır. Bu işlem tüm özellik matrisleri için 10 defa tekrarlanarak tüm deneyler gerçekleştirilmiştir. Böylece veri seti içerisinde oluşabilecek kümelenmiş veriler nedeniyle elde edilecek anormal sonuçların önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan 1B-ESA mimarisi Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Tasarlanan 1B-ESA'na ait katmanlar

EEG sinyalleri bir boyutlu, çok kanallı ve oldukça kompleks yapıya sahiptir. Bu sinyallerin görüntüye dönüştürülmesi çok kanallı yapısından dolayı oldukça zordur ve çoğu zaman anlamlı ve başarılı sonuçlar elde edilememektedir. Bu sebeple bu sinyallerin geleneksel 2 ve 3 boyutlu evrişimsel sinir ağlarıyla incelenmesi çok tercih edilmez. Ayrıca, geleneksel 2 ve 3 boyutlu evrişimsel sinir ağları sahip oldukları yüksek parametre sayıları sebebiyle hesapsal karmaşıklıkları, eğitim ve uygulama işlemleri açısından bu yöntemlere göre çok daha kompakt yapıdaki bir boyutlu evrişimsel sinir ağlarından çok daha fazladır. Şekilden görüleceği üzere tasarlanan model 3 adet konvolüsyon katmanı ve bunları takip eden 3 adet 'ReLU' tipi aktivasyon fonksiyonu katmanlarından oluşmaktadır. Böylece olası bir ezberleme durumunun önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Modelin sınıflandırma katmanından önce maksimum havuzlama, TBK (tam bağlantılı katman) ve 'softmax' tipi bir aktivasyon katmanı yer almaktadır. İlk konvolüsyon katmanı 26 adet 1×6 boyutunda bir boyutlu konvolüsyon filtreleri içermektedir. İkinci ve üçüncü konvolüsyon katmanlarında filtre boyutları aynı büyüklükte fakat sayıca iki katı büyüklüktedir. İki adet 'dropout' katmanı aşırı öğrenme durumunun azaltılması için 0.005 katsayı değeri ile ilk iki normalizasyon katmanlarından sonra kullanılmıştır. Eğitim aşamasında 'Adam' optimizasyon modeli ağa uygulanarak eğitimlerin optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. 'minibatch' parametresi 32 olarak ayarlanmıştır. Başlangıç öğrenme katsayısı 0.001 olarak ayarlanmış ve herhangi bir adaptasyon bu katsayıya uygulanmamıştır.

Tasarlanan bu model üzerinde gerçekleştirilecek değişiklikler ile daha kompleks bir ağ modeline dönüştürülebilir. Örneğin model çok girişli tasarlanarak aynı anda birden fazla aynı etikete sahip özellik vektörü

ağa girdi olarak aktararak eğitim işlemleri gerçekleştirilebilir. Tasarlanan ESA modelinde giriş katmanı bir boyutlu olduğu için elde edilen özellik matrislerinin bu mimarinin girişine uygun olması gerekmektedir. Toplamda 19 kişiden toplanan 2043 adet EEG sinyallerine ait DE özellik matrisleri 4 alt bant ve temel sinyaller için yukarıda da belirtildiği üzere 2043×60 boyutunda oluşmaktadır. Bu matriste satırlar deneylere karşılık gelirken sütunlardan ilk 59'u sinyale ait kanallara karşılık gelmekte ve son sütun ise sınıf etiketine karşılık gelmektedir. Bu matris evrimsel sinir ağına giriş olarak verilirken bu hususlar göz önünde bulundurulmuştur ve satır satır bu işlemler tüm verilerin rastgele karıştırılarak 10 defa aynı deneysel adımların izlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. FKD özellik matrisleri ise 59×59 boyutlarında oluşmaktaydı ve bu matris sinyale ait kanalların birbirleriyle olan faz ilişkilerini göstermekteydi. Bu özellik matrisleri de DE özellik matrislerine benzer olarak 4 alt bant ve temel sinyal için 19 kişiden elde edilen 2043 adet EEG sinyallerinden elde edilmiştir. Bu matrisler tasarlanan sinir ağına her görüntü için aynı olacak şekilde satır vektörü haline getirilerek girdi yapılmıştır. Dolayısıyla her bir deneye ait giriş vektör uzunluğu 3481 (59×59) olmuştur.

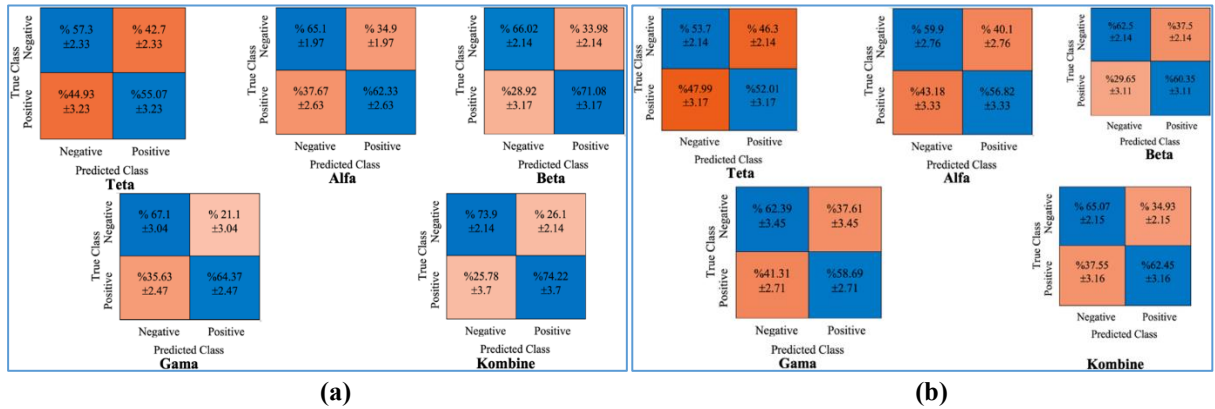
Şekil 4, Tablo 1 ve Tablo 2'de DE ve FKD özellikleri ile 1B-ESA sınıflandırıcı kullanılarak elde edilen ortalama doğruluk puanları ile sınıflandırma işlemlerine ait performans metrikleri ve bu puanlara ait standart sapma değerleri gösterilmiştir. İlk etapta Tablo 1 yakından incelendiğinde DE özellikleri ile gerçekleştirilen sınıflandırma işlemlerinin ortalama doğruluk puanlarının tüm durumlarda FKD özellikleri ile gerçekleştirilen sınıflandırma işlemlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Tablo 2'de beta bantı sınıflandırma performans ölçütlerinde tüm durumlar arasında en yüksek değerleri oluşturmuştur. Ayrıca Tablo 1'de her iki özellik için tüm bantların bir arada değerlendirildiği kombine özellik matrislerinde elde edilen sonuçlar tüm alt bantlardan daha iyi sonuçlar vermiştir. Şekil 4'te ki veriler bu sonuçları destekler niteliktedir.

Tablo 1. Özellik matrislerine ait ortalama sınıflandırma sonuçları ve standart sapmaları

Özellik	Teta	Alfa	Beta	Gama	Kombine
DE	56.5±1.5842	63.3710±1.8644	68.55±1.7823	65.736 ±2.3494	74.0610 ±1.4065
FKD	52.854±1.1189	58.36±1.7787	61.4250±1.9536	60.5290 ±1.4261	63.7590 ±1.7429

Tablo 2. Özellik matrislerine ait ortalama sınıflandırma performans sonuçları

DE	Teta	Alfa	Beta	Gama	Kombine
Kesinlik (%)	56.21±1.8224	63.73±1.7654	68.60±2.7902	70.31±1.2232	74.06 ±1.5778
Hassasiyet (%)	56.32±2.6478	63.69±1.7096	68.55±1.5726	70.22±2.6897	74.16 ±1.4548
F1 Skor (%)	56.19±1.5732	63.72±1.8641	68.57±1.6732	70.27±1.3451	74.12 ±1.4689
FKD	Teta	Alfa	Beta	Gama	Kombine
Kesinlik (%)	52.86±1.4890	58.27±1.4641	64.75±1.9053	60.58±1.3987	63.77 ±1.4421
Hassasiyet (%)	52.77±1.5752	58.32±2.1689	64.78±1.8841	60.54±2.4220	63.76 ±2.3588
F1 Skor (%)	52.81±2.4742	58.31±1.4438	64.76±1.7832	60.49±1.5055	63.76 ±1.4365



Şekil 4. (a) DE ve (b) FKD özelliği ile gerçekleştirilen sınıflandırma işlemleri sonucu elde edilen ortalama karışıklık matrisleri

Elde edilen sonuçlardan görüleceği üzere görece yüksek frekans bandındaki beta ve gama bantlarında elde edilen sonuçlar daha düşük frekans bantlarındaki teta ve alfa bantlarına göre daha yüksek sonuçlar üretmiştir. Özellikle beta bandı her iki özellik testleri için tekil değerlendirmelerde en yüksek sonucu vermiştir.

4. Tartışma

Bu çalışmada EEG sinyalleri ile duygu tanıma için yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde giriş EEG sinyalleri ilk etapta birtakım ön işlemlerden geçerek dalgacık dönüşümü yardımıyla alt ritim bantlarına ayrılmaktadır. Daha sonra bu alt bantlara ait DE ve FGD özellikleri hesaplanarak tasarlanan 1B-ESA için girdi olarak kullanılıp iki duygu durumunun (pozitif-negatif) tespiti yapılmıştır. Çalışmada kullanılan veri seti diğer EEG veri setlerinden farklı olarak üç boyutlu uyarınlar yardımıyla oluşturulmuş bir veri setidir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde dört adet alt bant ve bu bantların kombine edilmesiyle oluşturulan toplam özellik matrisleri yardımıyla on farklı test işleminin sonucu kaydedilmiş ve bu sonuçlara ait ortalama doğruluk puanları ve bu değerlere ait standart sapma değerleri elde edilmiştir.

Tablo 3. Önerilen yönteme ait sonuçların aynı veri seti ile gerçekleştirilen çalışmalarla kıyaslanması

Çalışma	Yıl	Veri Seti	Kullanılan Özellik	Sınıflandırıcı	Doğrulama Metodu	Doğruluk Puanı (%)
Yu ve ark. [36]	2022	VREED	GG (Göreceli Güç)	DVM	Çapraz doğrulama (70%-30%) 10 test ortalaması	73,77
Yu ve ark. [36]	2022	VREED	OFKD (Ortalama Faz Kilitleme Değeri)	DVM	Çapraz doğrulama (70%-30%) 10 test ortalaması	67,91
Uyanık ve ark. [11]	2022	VREED	DE	DVM	Çapraz doğrulama (70%-30%) 10 test ortalaması	76,22
Önerilen	2022	VREED	DE	1B-CNN	Çapraz doğrulama (70%-30%) 10 test ortalaması	74,06
Önerilen	2022	VREED	FGD	1B-CNN	Çapraz doğrulama (70%-30%) 10 test ortalaması	63,75

Tablo 3'te önerilen yöntemin başarısı veri seti ile gerçekleştirilen ilk çalışma olan [36] ve sonrasında 2022 yılında yaptığımız, bu veri seti ile yapılmış ikinci çalışma olan [11] ile karşılaştırılmıştır. [11] nolu çalışmamızda destek vektör makinesi tipi sınıflandırıcı ile elde edilen sonucun daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu çalışmada önerilen yöntem Yu ve ark.'nın önerdiği göreceli güç (GG) özellikleri ile elde edilen sonuçlardan daha yüksek elde edilmiştir. [36] yeni veri kümesinde olumsuz ve olumlu duyguların sınıflandırılmasının etkinliği için bir temel sağlamıştır. Yazarlar elde edilen özelliklerin sınıflandırılmasında özellik çıkarımı için göreceli güç ve ortalama PLV yaklaşımlarını kullanmış ve DVM sınıflandırıcısı ile deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, teta, alfa, beta ve gama bantlarının göreceli güç özelliklerinin birleştirilmesiyle %73,77'lik en iyi ortalama doğruluğu ürettiklerini bildirmişlerdir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada sanal gerçeklik tabanlı hazırlanmış bir EEG sinyali veri seti üzerinden farklı iki duygu tipinin tanınması için yeni bir yöntem önerilmiştir. Elde edilen sonuçlardan görüleceği üzere DE özelliklerinin EEG duygu tanıma için kullanılan veri setinde FGD özelliklerine göre çok daha yüksek oranda başarı elde ettiği görülecektir. Ayrıca, EEG sinyallerine ait alt bantlardan yüksek frekans değerlerinde salınım yapan beta ve gama bantlarının daha düşük salınım yapan teta ve alfa alt bantlarına göre daha yüksek başarı değerleri oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu durum bu alanda yapılan birçok çalışmaya paralellik göstermiştir [46-50]. Tüm bantlara ait özelliklerin birleştirilmesi senaryosunun ise en iyi başarı oranlarını elde ettiği ayrıca gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada elde ettiğimiz sonuçların bir önceki çalışmada elde ettiğimiz sonuçların geride kalması, önceki çalışmamızın tartışma kısmında belirtmiş olduğumuz DE özelliklerinin ESA türü sınıflandırıcılar ile kullanılmasının iyi sonuçlar vermeyeceği durumunu ispatlar nitelikte olmuştur. Çalışmada elde edilen DE ile 1B-ESA sınıflandırıcıya ait sonucun, kullanılan veri seti ile gerçekleştirilen ilk çalışma olan [36] nolu çalışmadaki göreceli güç (GG) özelliğinin DVM ile sınıflandırılması yönteminden, aynı metodoloji adımları takip edilerek gerçekleştirilerek daha yüksek başarı puanı oluşturduğu görülmektedir. Bu durum DE özelliklerinin EEG sinyalleri

ile kullanımı için oldukça uygun bir yöntem olduğunu bir kez daha göstermiştir. Yukarıda da belirtildiği üzere DE özellikleri sinyaller içerisindeki düzensizlik özelliklerini net bir şekilde açığa çıkaran bir yöntemdir. Sinyaller içerisindeki doğrusal olmayan özellikleri çıkarmak için oldukça kullanışlıdır ve bu durum EEG sinyalleri için oldukça net sonuçlar verir.

Çalışmada elde edilen özellik verileri yardımıyla oluşturulacak 3 boyutlu bir özellik tensörünün 3 boyutlu bir ESA ile test edilmesi ve sonuçların burada elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması ileriye dönük bir çalışmamızdır.

Kaynaklar

- [1] Chalmers D. The hard problem of consciousness. *The Blackwell companion to consciousness*, 2007, pp. 225–235.
- [2] Klinger E. Thought flow: Properties and mechanisms underlying shifts in content. *Singer*, 1999, pp. 29–50.
- [3] Robinson MD, Watkins E, Harmon-Jones E (Eds.). *Handbook of cognition and emotion*. The Guilford Press, pp. 3-16. (2013).
- [4] Adolphs R, Anderson DJ. *The Neuroscience of Emotion: A New Synthesis*. Princeton University Press, 2018.
- [5] Davidson RJ, Fox AS, Lapate RC, Shackman AJ. *Nature of Emotion: Fundamental Questions*. Oxford University Press, 2018.
- [6] Adolphs R, Mlodinow L, Barrett LF. What is an emotion?. *Current biology*, 2019, CB, 29(20), R1060–R1064.
- [7] Yadav SP, Zaidi S, Mishra A, Yadav V. Survey on machine learning in speech emotion recognition and vision systems using a recurrent neural network (RNN). *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022, 29(3), 1753-1770.
- [8] Aggarwal A, Srivastava A, Agarwal A, Chahal N, Singh D, Alnuaim A, Lee HN. Two-way feature extraction for speech emotion recognition using deep learning. *Sensors*, 2022, 22(6), 2378.
- [9] Hansen L, Zhang YP, Wolf D, Sechidis K, Ladegaard N, Fusaroli R. A generalizable speech emotion recognition model reveals depression and remission. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, 2022, 145(2), 186-199.
- [10] Wu J, Zhang Y, Sun S, Li Q, Zhao X. Generalized zero-shot emotion recognition from body gestures. *Applied Intelligence*, 2022, 52(8), 8616-8634.
- [11] Uyanik H., Ozcelik STA, Duranay ZB, Sengur A, Acharya UR. Use of Differential Entropy for Automated Emotion Recognition in a Virtual Reality Environment with EEG Signals. *Diagnostics*, 2022, 12(10), 2508.
- [12] Chowdary MK, Anitha J, Hemanth DJ. Emotion Recognition from EEG Signals Using Recurrent Neural Networks. *Electronics*, 2022, 11(15), 2387.
- [13] Zuo X, Zhang C, Hämäläinen T, Gao H, Fu Y, Cong F. Cross-Subject Emotion Recognition Using Fused Entropy Features of EEG. *Entropy*, 2022, 24(9), 1281.
- [14] Şengür D, Siuly S. Efficient approach for EEG-based emotion recognition. *Electronics Letters*, 2020 December, vol. 56, no. 25, pp. 1361-1364.
- [15] Kyranides MN, Petridou M, Gokani HA, Hill S, Fanti KA. Reading and reacting to faces, the effect of facial mimicry in improving facial emotion recognition in individuals with antisocial behavior and psychopathic traits. *Current Psychology*, 1-14, 2022.
- [16] Massaccesi C, Korb S, Willeit M, Quednow BB, Silani G. Effects of the mu-opioid receptor agonist morphine on facial mimicry and emotion recognition. *Psychoneuroendocrinology*, 2022, 105801.
- [17] Khattak A, Asghar MZ, Ali M, Batool U. An efficient deep learning technique for facial emotion recognition. *Multimedia Tools and Applications*, 2022, 81(2), 1649-1683.
- [18] Xiao H, Li W, Zeng G, Wu Y, Xue J, Zhang J, Guo, G. On-Road Driver Emotion Recognition Using Facial Expression. *Applied Sciences*, 2022, 12(2), 807.
- [19] Menting-Henry S, Hidalgo-Lopez E, Aichhorn M, Kronbichler M, Kerschbaum H, Pletzer B. Oral contraceptives modulate the relationship between resting brain activity, amygdala connectivity and emotion recognition—a resting state fMRI study. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 2022, 16.
- [20] Fauvé P, Tyvaert L, Husson C, Hologne E, Gao X, Maillard L, Hingray C. Functional MRI-based study of emotional experience in patients with psychogenic non-epileptic seizures: Protocol for an observational case-control study—EMOCRISES study. *Plos one*, 2022, 17(1), e0262216.
- [21] Gao L, Cai Y, Wang H, Wang G, Zhang Q, Yan X. Probing prefrontal cortex hemodynamic alterations during facial emotion recognition for major depression disorder through functional near-infrared spectroscopy. *Journal of Neural Engineering*, 2019, 16(2), 026026.
- [22] Nishi R, Fukumoto T, Asakawa A. Possible effect of natural light on emotion recognition and the prefrontal cortex: A scoping review of near-infrared (NIR) spectroscopy. *Advances in Clinical and Experimental Medicine: Official Organ Wroclaw Medical University*. 2023 April, PMID: 37093092.
- [23] Koelstra S ve diğerleri. DEAP: A Database for Emotion Analysis using Physiological Signals, *IEEE Transactions on Affective Computing*. 2012, vol. 3, no. 1, pp. 18-31.
- [24] Zheng WL, Lu BL. Investigating Critical Frequency Bands and Channels for EEG-based Emotion Recognition with Deep Neural Networks, *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development (IEEE TAMD)*. 2015, 7(3): 162-175.
- [25] Ismael AM, Alçin ÖF, Abdalla KH, Şengür A. Two-stepped majority voting for efficient EEG-based emotion classification. *Brain Informatics*, 2020, 7(1), 1-12.

- [26] Ari B, Siddique K, Alçin ÖF, Aslan M, Şengür A, Mehmood RM. Wavelet ELM-AE Based Data Augmentation and Deep Learning for Efficient Emotion Recognition Using EEG Recordings. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 72171-72181.
- [27] Alakus TB, Gonen M, Turkoglu I. Database for an emotion recognition system based on EEG signals and various computer games–GAMEEMO. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2020, 60, 101951.
- [28] Joshi VM, Ghongade RB. EEG based emotion detection using fourth order spectral moment and deep learning. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2021, 68, 102755.
- [29] Marín-Morales J, Higuera-Trujillo JL, Greco A. ve diğerleri. Affective computing in virtual reality: emotion recognition from brain and heartbeat dynamics using wearable sensors. *Scientific Reports*, 8(1), 2018,13657.
- [30] Suhaimi NS, Mountstephens J, Teo J. A Dataset for Emotion Recognition Using Virtual Reality and EEG (DER-VREEG): Emotional State Classification Using Low-Cost Wearable VR-EEG Headsets. *Big Data and Cognitive Computing*, 2022; 6(1):16.
- [31] Chen DW, Miao R, Yang WQ, Liang Y, Chen H, Huang L, Han N. A feature extraction method based on differential entropy and linear discriminant analysis for emotion recognition. *Sensors*, 2019, 19(7), 1631.
- [32] Li D, Xie L, Chai B, Wang Z. A feature-based on potential and differential entropy information for electroencephalogram emotion recognition. *Electronics Letters*, 2022, 58(4), 174-177.
- [33] Joshi VM, Ghongade RB. Optimal number of electrode selection for EEG based emotion recognition using linear formulation of differential entropy. *Biomedical and Pharmacology Journal*, 2020, 13(2), 645-653.
- [34] Li Y, Wong CM, Zheng Y, Wan F, Mak PU, Pun SH, Vai MI. EEG-based emotion recognition under convolutional neural network with differential entropy feature maps. In *2019 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications*, 2019 June (CIVEMSA), pp. 1-5.
- [35] Zheng WL, Zhu JY, Lu BL. Identifying Stable Patterns over Time for Emotion Recognition from EEG. *IEEE Transactions on Affective Computing*. 2017, 1–1.
- [36] Yu M. ve diğerleri. EEG-based emotion recognition in an immersive virtual reality environment: From local activity to brain network features. *Biomedical Signal Processing and Control*, 72 (2022): 103349.
- [37] Delorme A, Makeig S. EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 2004, 134(1):9–21.
- [38] İnternet kaynağı, By Hugo Gambo - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=473246>. Erişim Tarihi: 02.01.2023.
- [39] Sorkhabi MM. "Emotion Detection from EEG signals with Continuous Wavelet Analyzing." *American Journal of Computing Research Repository* 2.4 (2014): 66-70.
- [40] Shannon CE. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27:379–423, 623–656, 1948.
- [41] Michalowicz JV, Nichols JM, Bucholtz F. *Handbook of Differential Entropy* (1st ed.). Chapman and Hall/CRC, 2013.
- [42] Lachaux JP ve diğerleri. Measuring phase synchrony in brain signals. *Human brain mapping*, 1999, pp.194–208.
- [43] Bruña R, Maestú F, Pereda E. Phase locking value revisited: teaching new tricks to an old dog. *Journal of neural engineering*, 2018, 15(5), 056011.
- [44] O'Shea K, Ryan N. An introduction to convolutional neural networks. *arXiv preprint*, 2015, arXiv:1511.08458.
- [45] Kiranyaz S, Avci O, Abdeljaber O, Ince T, Gabbouj M, Inman DJ. 1D convolutional neural networks and applications: A survey. *Mechanical systems and signal processing*, 151, 2021, p. 107398.
- [46] Yang K, Tong L, Shu J, Zhuang N, Yan B, Zeng Y. High gamma band EEG closely related to emotion: evidence from functional network. *Frontiers in human neuroscience*, 2020, 14, 89.
- [47] Yang Y, Gao Q, Song Y, Song X, Mao Z, Liu J. Investigating of Deaf Emotion Cognition Pattern By EEG and Facial Expression Combination. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, Feb. 2022, vol. 26, no. 2, pp. 589-599.
- [48] Wang XW, Nie D, Lu BL. Emotional state classification from EEG data using machine learning approach, *Neurocomputing*, Volume 129, 2014, Pages 94-106.
- [49] Zheng WL, Zhu JY, Peng Y, Lu BL. EEG-based emotion classification using deep belief networks. *2014 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, 2014, pp. 1-6.
- [50] Zhang J, Chen M, Hu S, Cao Y, Kozma R. PNN for EEG-based Emotion Recognition. *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2016, pp. 2319-2323.

Tekrarlayıcı Sinir Ağları ile Mikropların Sınıflandırılması

Talha Burak ALAKUŞ^{1*}

¹ Yazılım Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, Türkiye
*¹ talhaburakalakis@klu.edu.tr

(Geliş/Received: 26/05/2023;

Kabul/Accepted: 07/08/2023)

Öz: Mikroplar insan vücudunun hem içinde hem de dışında yaşayan ve hemen hemen her yerde bulunan tek hücreli küçük canlılardır. Zararlı olabileceği gibi yararlı olan mikroplarda bulunmaktadır. Bu yüzden mikroplar ekolojik dengeyi sağlanmasında büyük bir rol üstlenmektedir. Ancak, bu mikropları birbirinden ayırt edebilmek çoğu zaman meşakkatli bir iş olmaktadır. Mikropların çeşitli özelliklerini anlayan ve taksonomi nüanslarını yorumlayabilen bir uzman bilgisinin gerekmesi ve laboratuvar ihtiyacının olması bu süreci hem maliyetli hem de zaman alıcı yapmaktadır. Bundan dolayı, bilgisayar destekli sistemlerin bu alanda önemi artmış ve günümüzde yapay zeka teknolojileri mikropların sınıflandırılmasında kullanılmaya başlanmıştır. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme teknolojilerinin bu alana uygulanmasıyla yüksek seviyede doğruluk skorları elde edilmekte ve biyoçeşitlilikle ilgili değerlendirmeler otomatik bir şekilde yapılabilmektedir. Bu çalışmada da derin öğrenme modellerinden biri olan tekrarlayıcı sinir ağları kullanılarak, mikropların sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Çalışma dört aşamadan meydana gelmiştir. Birinci aşamada, veriler elde edilmiştir. İkinci aşamada bu veriler normalleştirme işlemine tabi tutulmuş ve ön işlemden geçirilmiştir. Üçüncü aşamada UKSB ve TSA modelleri tasarlanmış ve sınıflandırılmıştır. Son aşamada ise sınıflandırıcıların performansları doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F1-skor ve EAA skoru ile belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda TSA sınıflandırıcısı ile %92,53, UKSB sınıflandırıcısı ile %99,85 doğruluk skoru elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Mikrop tahmini, derin öğrenme, tekrarlayıcı sinir ağları.

Classification of Microbes with Recurrent Neural Networks

Abstract: Microbes are tiny single-celled creatures that live both inside and outside the human body and are found almost everywhere. There are microbes that can be harmful as well as harmless. Therefore, microbes play a major role in maintaining the ecological balance. However, distinguishing these microbes from each other is often a difficult task. The need for a specialist who understands the various characteristics of microbes and can interpret taxonomy nuances and the need for a laboratory makes this process both costly and time consuming. Therefore, the importance of computer aided systems in this field has increased and artificial intelligence technologies have begun to be used in the classification of microbes today. With the application of artificial intelligence technologies to this field, high level accuracy scores are obtained, and biodiversity assessments can be made automatically. In this study, microbes were classified by using deep learning models, which is one of the artificial intelligence methods. The study consisted of four stages. In the first stage, the data were obtained. In the second stage, these data were preprocessed and normalized. In the third stage, LSTM and RNN models are designed, and data were classified. In the last stage, the performances of the classifiers were determined by accuracy, precision, recall, F1-score, and AUC score. At the end of the study, an accuracy score of 92,53% was obtained with the RNN classifier and 99,85% with the LSTM classifier.

Key words: Microbe prediction, deep learning, recurrent neural networks.

1. Giriş

Tek hücreli bir canlı olan mikroplar hayatımızın hemen hemen her yerinde bulunmaktadır. Mikroplar zararlı olabileceği gibi yararlı da olmaktadır. Bazıları sağlıklı sindirime yardımcı olmak için insanların bağırsaklarında yaşarken [1], bazıları ciltlerde bulunmaktadır [2]. Bu yararlı mikroplar vücudun dengede kalmasına ve bağışıklık sisteminin güçlendirilmesinde yardımcı olmaktadır [3]. Bunun yanı sıra, zararlı mikroplar ise yüzeylere yapışıp bulaşıcı hastalık yayarak vücutta hastalık ve enfeksiyonlara yol açan rahatsızlıklara neden olabilmektedirler [4]. Yararlı ve zararlı olmak üzere dört farklı türde mikrop bulunmaktadır. Bunlar; bakteriler, virüsler, mantarlar ve tek hücrelilerdir.

Mikroplar havada, suda, bitkilerde, yiyeceklerde, hayvanlarda, toprakta ve suda yoğun olarak bulunabilmektedirler. Bunlara ek olarak, doğrudan ya da dolaylı temas yolu olmak üzere genellikle iki farklı yol ile yayılmaktadırlar [5]. Mikroplardan korunabilmek için yapılması gereken en temel işlem kişisel hijyene

* Sorumlu yazar: talhaburakalakis@klu.edu.tr. Yazarın ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-3136-3341

dayanmaktadır. Kişisel hijyene önem verilmesi, kullanılmış ürünlerin tekrar kullanılmaması, eşyaların ortak kullanılmaması, vb. işlemler, mikropların bulaşmasını engelleyebilmektedir.

Zararlı mikroplar kişilerde enfeksiyona neden olduğu için, izlenecek tedavi yolları da farklılık göstermektedir. Bundan dolayı çeşitli ilaç tedavileri uygulanabilmektedir. Ancak, mikropların yararlı ya da zararlı olup olmadığına karar vermek uzun süren ve sıkıcı bir işlemdir [6]. Bunun yanı sıra, mikropların sınıflandırılabilmesi ve özelliklerine göre ayırt edilebilmesi için bir uzman yorumuna ihtiyaç duyulmaktadır [7]. Bu da sürecin yavaş olmasına ve laboratuvar ihtiyacı gerektirdiği için maliyetli olmasına neden olmaktadır [8]. Bu dezavantajların önüne geçebilmek için, araştırmacılar yapay zeka destekli çalışmalara yönelmişler ve hem derin öğrenme hem de makine öğrenmesi algoritmalarını kullanarak etkili sonuçlar elde etmişlerdir. [9] numaralı çalışmada araştırmacılar LR (Lojistik Regresyon – Logistic Regression), DVM (Destek Vektör Makinesi – Support Vector Machine) ve KNN (K En Yakın Komşu – K Nearest Neighbor) algoritmalarını kullanarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Çalışma üç aşamadan meydana gelmiştir. Birinci aşamada veriler elde edilmiştir. İkinci aşamada ön işleme yapılmış ve PBA (Parçacık Bileşen Analizi – Principal Component Analysis) ile öznitelik seçimi gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise sınıflandırma işlemi yapılmış ve modellerin başarımları doğruluk, kesinlik, hassasiyet ve F1-skorları ile belirlenmiştir. En yüksek başarımlar DVM ile elde edilmiş ve %98,2 oranında doğruluk gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada ise araştırmacılar mikro alglerin görüntülerini kullanarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirmiştir [10]. Çalışmada görüntü verileri değerlendirilmiş ve çeşitli görüntü işleme yöntemleri kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır. Sınıflandırma işlemi için ÇKA (Çok Katmanlı Algılayıcı – Multi-Layer Perceptron), SMO (Sıralı Minimum Optimizasyon – Sequential Minimal Optimization), Bagging ve J48 algoritmaları kullanılmıştır. Sınıflandırıcıların performansı sadece doğruluk skoru ile belirlenmiş ve en yüksek skor %97,22 ile SMO sınıflandırıcısıyla elde edilmiştir. [11] numaralı çalışmada da benzer bir yaklaşım uygulanmış ve alg görüntüleri kullanılarak sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sınıflandırıcı olarak SMO kullanılmış ve doğruluk skoru ile sınıflandırıcının performansı belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda %98,6 oranında doğruluk elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, elde edilen sonuçların yüksek ve etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Bahsedilen çalışmalardan edilen başarımlar doğrultusunda, bu çalışmada da yapay zeka destekli bir sistem geliştirilmiş ve derin öğrenme algoritmaları kullanılarak mikropların sınıflandırılması yapılmıştır. Çalışma dört aşamadan meydana gelmiştir. Birinci aşamada, veriler elde edilmiştir. İkinci aşamada bu veriler normalleştirme işlemine tabi tutulmuş ve ön işlemden geçirilmiştir. Üçüncü aşamada UKSB (Uzun/Kısa Süreli Bellek – Long/Short Term Memory) ve TSA (Tekrarlayıcı Sinir Ağı – Recurrent Neural Network) modelleri tasarlanmış ve sınıflandırılmıştır. Son aşamada ise sınıflandırıcıların performansları doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F1-skor ve EAA (Eğri Altındaki Alan – Area Under Curve) skoru ile belirlenmiştir. Çalışmanın öne çıkan noktaları şu şekilde belirlenmiştir:

- Alanyazın incelendiğinde bu alanda yapılan çalışmaların azlığı göze çarpmış ve bu alana katkının sağlanması hedeflenmiştir.
- Çalışmalar incelendiğinde derin öğrenme algoritmalarıyla bu alanda gerçekleştirilen çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma ile bu algoritmaların başarımlarının gösterilmesi ve araştırılması hedeflenmiştir.
- Alanyazında az sayıda gerçekleştirilen çalışmalarda genellikle görüntü sınıflandırılması yapılmıştır. Bu çalışmada ise görüntülerden ziyade, mikropların çeşitli öznitelikleri (sayısal veriler) kullanılmış ve sınıflandırma gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın organizasyonu şu şekilde tasarlanmıştır: İkinci kısımda veri seti ve kullanılan yöntemler hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü kısımda uygulama sonuçları sergilenmiş ve her bir sınıflandırıcının sonuçları verilmiştir. Dördüncü kısımda bulgular irdelenmiş ve tartışma yapılarak çalışmanın hem avantajlarından hem de dezavantajlarından bahsedilmiştir. Son kısımda ise çalışmanın alanyazına katkılarından bahsedilmiş ve elde edilen bulguların etkileri incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntemler

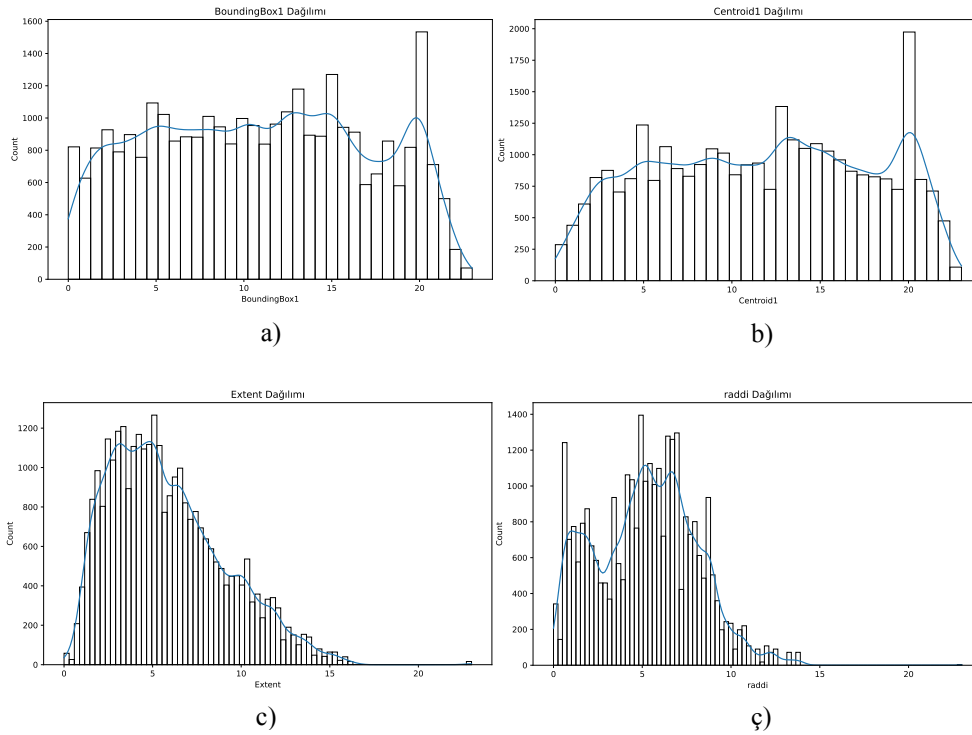
2.1. Veri seti

Çalışmada kullanılan veriler [12] numaralı çalışmadan elde edilmiştir. Çalışmada on farklı mikroorganizmaya ait veriler kullanılmıştır. Bu veriler mikroskopik görüntülerden elde edilmiş ve paylaşılmıştır. Veri setine ait çeşitli bilgiler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan veri seti hakkında genel bilgiler.

Mikroorganizma İsmi	Mikroorganizma Türü	Veri Sayısı
Aspergillus sp	Fungi	3,888
Diatom	Alg	1,818
Penicillium	Mantar	1,080
Pithophora	Alg	1,350
Protozoa	Ökaryot	3,888
Raizopus	Fungi	2,552
Spirogyra	Alg	612
Ulothrix	Alg	7,420
Volvox	Alg	4,320
Yeast	Fungi	3,600

Veri setinde toplamda 30,528 adet veri bulunmaktadır. Bu çalışmada da bu veriler kullanılmış ve çoklu sınıflandırma yapılmıştır. Sınıflandırma işlemi hem TSA hem de UKSB algoritmalarıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de mikroplara ait birkaç özelliğin dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 1. Verilerin çeşitli özniteliklere ve etiketlere göre dağılımı: (a) boundingbox1, (b) centroid1, (c) extend, (ç) raddi.

Şekil 1'de on adet mikroorganizmaya ait yirmi dört öznelikten sadece dört tanesi verilmiş ve bu özneliklerin dağılımı gösterilmiştir.

2.2. Sınıflandırma yöntemleri

Bu çalışmada sınıflandırma işlemi için TSA ve UKSB derin öğrenme algoritmaları kullanılmıştır. TSA algoritması sıralı verileri işlemek için kullanılan ve dahili bir hafızaya sahip olan güçlü bir derin sinir ağı modelidir [13]. TSA sisteminde hafıza hücreleri bulunmakta ve bir zincir oluşturmaktadır. Bu zincirli yapı sayesinde giriş verisindeki her bir eleman için aynı görev yürütülmektedir. Ancak, TSA yönteminde çeşitli problemler gözlemlenmektedir. Bu problemlerden en önemlileri kaybolan gradyan ve uçan gradyan problemleridir [14, 15]. Bu problemlerin önüne geçmek için ise başka bir tekrarlayıcı sinir ağı modeli olan UKSB önerilmiştir. UKSB

modelinde, standart bir TSA’da olduğu gibi tek bir sinir ağı bulunmamaktadır. Bu modelde dört etkileşimli bir katman yer almaktadır. Genel olarak bir UKSB ağında, bellek blokları yer almaktadır. Buradaki durumlar bir sonraki bloğa aktarılmaktadır. Bu sayede veriler temelde değişiklik göstermemekte ve ileriye yönelik hareket edebilmektedir. UKSB modeli daha önceden de açıklandığı üzere kaybolan gradyan problemini çözmek için geliştirilmiş bir yöntemdir. Kaybolan gradyan problemi, büyük farklılıklar bulunan girdilerin aktivasyon sonrasında ufak değer aralıklarına indirgenmesiyle, bunların gittikçe sıfıra yaklaşması ve model tarafından algılanamaması olarak ifade edilmektedir. Bundan dolayı da öğrenme işlemi yeteri kadar iyi olamamaktadır. UKSB ise bu problemin üstesinden yapısında bulunan hücre blokları, unutmama, girdi ve çıktı kapıları aracılığıyla gelmektedir [16]. Bu nedenle çoğu durumda UKSB mimarisi daha etkili bir performans sergilemektedir.

2.3. Değerlendirme ölçütleri

Bu çalışmada derin öğrenme modellerinin başarımları doğruluk, kesinlik, hassasiyet, F1-skor, EAA ve karmaşıklık matrisi değerlendirme ölçütleriyle belirlenmiştir. Karmaşıklık matrisi bir sınıflandırma algoritmasının performansını göstermek için kullanılan bir çeşit tablodur. Performans, eğitim verisinin test edilerek belirlenmesine dayanmaktadır. Karmaşıklık matrisinde GP (Gerçek Pozitif – True Positive), GN (Gerçek Negatif – True Negative), YP (Yanlış Pozitif – False Positive) ve YN (Yanlış Negatif – False Negative) olmak üzere dört farklı parametre bulunmaktadır. GP ifadesi tahmin edilen değer pozitif ve doğru olduğunu ifade etmektedir. Bunun yanı sıra ise GN ifadesi tahmin edilen değer negatif ve doğru olduğunu göstermektedir. Bunlara ek olarak, YP ifadesi değer pozitif ancak yanlış olduğunu belirtirken, YN ifadesi değer negatif ve yanlış olduğunu ifade etmektedir. Doğruluk, F1-skor, kesinlik ve hassasiyet değerleri ise bu verilen ifadelerin çeşitli denklemlerle hesaplanmasına dayanmaktadır. Denklem 1 ve Denklem 4 arasında bu işlemlerin hesaplanması gösterilmiştir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{GP + YN}{GP + GN + YP + YN} \quad (1)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{GP}{GP + YP} \quad (2)$$

$$\text{Hassasiyet} = \frac{GP}{GP + YN} \quad (3)$$

$$F1 - \text{Skor} = 2 * \left(\frac{\text{Kesinlik} * \text{Hassasiyet}}{\text{Kesinlik} + \text{Hassasiyet}} \right) \quad (4)$$

Bunun yanı sıra EAA skoru da önemli bir değerlendirme kriteridir. EAA skoru, AİK (Alıcı İşletim Karakteristiği – Receiver Operating Characteristic) eğrisinin altındaki alanı vermektedir. EAA skoru genellikle; modelin sınıfları ayırma konusunda ne kadar iyi olup olmadığını göstermektedir. Ayrıca, en iyi eşliğin belirlenmesinde de kullanılmaktadır [17]. EAA skoru yorumlanması Tablo 2’de verilen aralıklar göz önünde bulundurulmaktadır.

Tablo 2. EAA skorlarının yorumlanması [18].

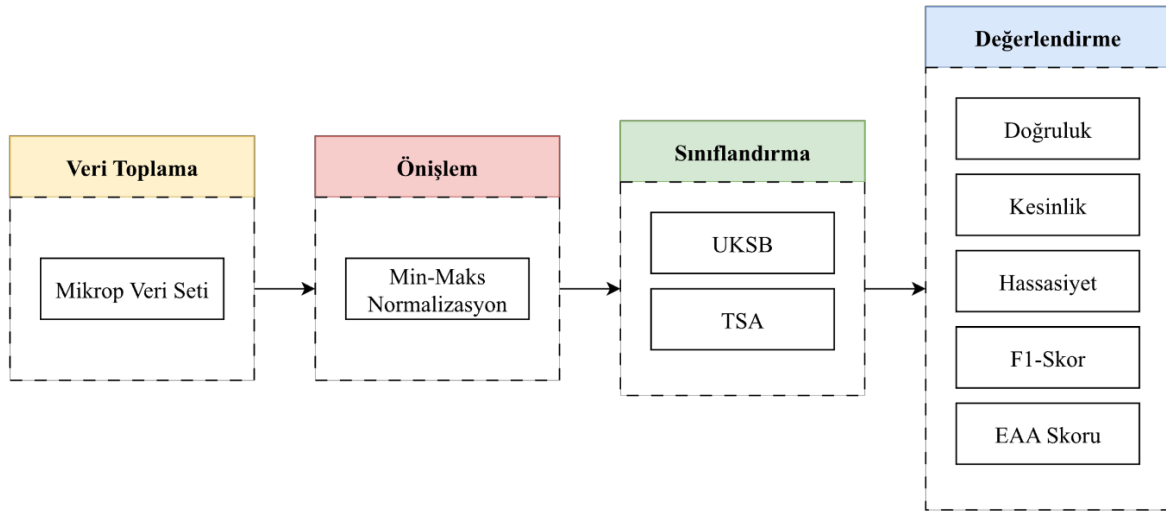
EAA Skoru	Açıklama
0,00 – 0,49	Ayırım yapılamaz
0,50 – 0,69	Zayıf sınıflandırma
0,70 – 0,79	Kabul edilebilir sınıflandırma
0,80 – 0,89	Harika sınıflandırma
0,90 – 1,00	Olağanüstü sınıflandırma

EAA skorunun 0,49 ve altında olması sınıflandırma işleminin yapılmadığını ifade etmektedir. Bunun yanı sıra ise eğer EAA skoru 0,50 ve 0,69 arasındaysa bu zayıf bir sınıflandırma olarak kabul edilmektedir. EAA skorunun 0,70 ve 0,79 arasında olması kabul edilebilir sınıflandırıcıyı ifade ederken, bu değer 0,80 ve 0,89 arasında olması harika sınıflandırma işlemi yapıldığını göstermektedir.

2.4. Uygulama geliştirme ortamı

Çalışmada macOS işletim sistemine sahip bir bilgisayar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar üzerinde M1 çip bulunmakta ve 8 GB RAM yer almaktadır. Apple Neural Engine’in M1 çipine dahil edilmesi, Mac cihazlarda

makine öğrenimi ve derin öğrenme görevlerinin hızını ve performansını önemli ölçüde arttırmaktadır. Son teknoloji 16 çekirdekli mimarisiyle, Apple'ın M1 çipine gömülü Neural Engine, Mac cihazlarının saniyede 11 trilyon gibi etkileyici bir işlem gerçekleştirmesini sağlamaktadır. M1 çipi, makine öğrenimi ve derin öğrenme görevlerinde olağanüstü performans sağlamak için özel olarak tasarlanmıştır. Çalışmada sınıflandırma işlemi Python programlama dili kullanılarak Anaconda, Spyder ortamında gerçekleştirilmiştir. Spyder'ın çalışmadaki versiyonu 5.4.2'dir. Anaconda, Python programlama dilinin popüler bir dağıtımıdır. Python programlama dilinin yanı sıra çeşitli veri bilimi, makine öğrenimi ve derin öğrenme araçlarını içeren zengin bir ekosisteme sahip bir platformdur. Pandas, NumPy ve SciPy gibi kütüphaneler veri işleme, matematiksel hesaplamalar ve istatistiksel analiz için kullanılmaktadır. Matplotlib ve Seaborn gibi görselleştirme kütüphaneleri ise verilerin görselleştirilmesine izin vermektedir. Scikit-learn, TensorFlow ve PyTorch gibi derin öğrenme ve makine öğrenimi kütüphaneleri, çeşitli modelleme ve tahmin görevleri için sıklıkla kullanılmaktadır. Sınıflandırma işlemi için Tensorflow kütüphanesi kullanılmış ve bu kütüphanenin çeşitli komutlarından yararlanılmıştır. Ayrıca Keras kütüphanesi kullanılarak optimizasyon algoritması, kayıp fonksiyonu ve değerlendirme metrikleri hesaplanmış ve tanımlanmıştır. Çalışmanın bulguları bahsedilen değerlendirme kriterleri ile belirlenmiş ve Şekil 2'de verilen akış şemasına göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Çalışmanın akış şeması.

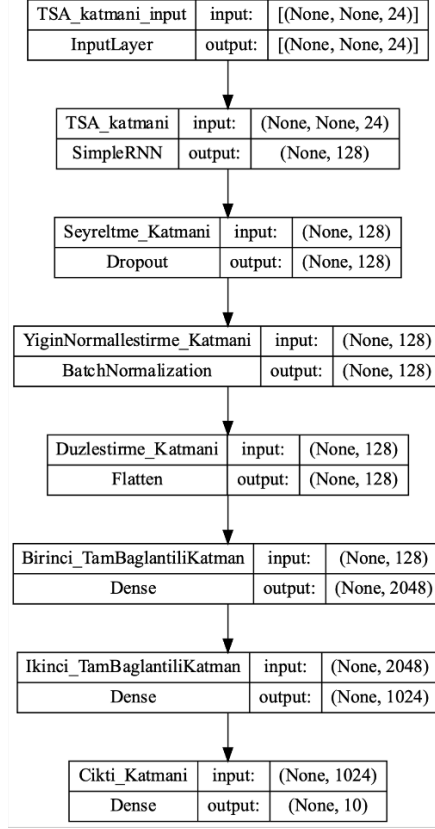
Şekil 2'de verilen akış şemasından da anlaşıldığı üzere çalışma dört aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşama (Verilerin Toplanması) içerisinde, kullanılan veri seti elde edilmiş ve 10 farklı mikroba ait çeşitli öznelikler kullanılmıştır. İkinci aşamada (Önilem) ise verilerin aynı değer aralığında olmasını sağlamak için normalleştirme işlemi yapılmış ve bunun için minimum-maksimum normalleştirmeye başvurulmuştur. Üçüncü aşamada (Sınıflandırma), iki farklı derin öğrenme modeli tasarlanmıştır. Bu modeller UKSB ve TSA modelleridir. Önilem aşaması sonunda elde edilen veriler, tasarlanan bu derin öğrenme modelleriyle sınıflandırılmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise (Değerlendirme) derin öğrenme modellerinin başarımları değerlendirilmiş ve bunun için doğruluk, kesinlik, hassasiyet, F1-skor ve EAA skoru değerlendirme ölçütlerine başvurulmuştur.

3. Uygulama Sonuçları

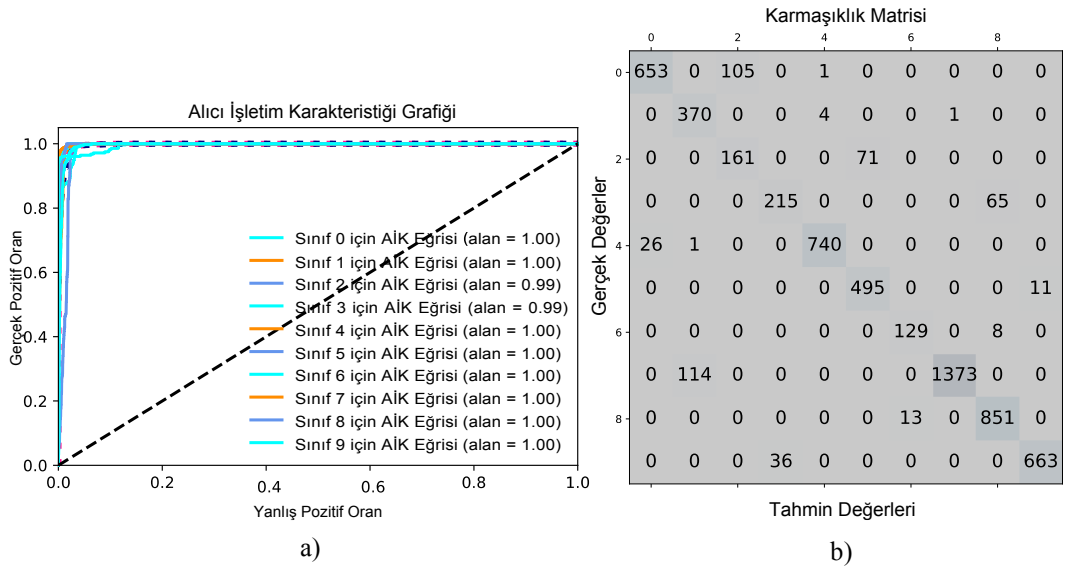
3.1. TSA modelinin uygulama sonuçları

Çalışma kapsamında geliştirilen TSA modelinin parametreleri deneme-yanılma yaklaşımı ile belirlenmiş ve en iyi sonuçlara göre değerlendirilmiştir. Modelin doğrulanması ise eğitim-test verisinin ayrıştırılmasına göre yapılmış ve verilerin %80'i eğitim, geri kalan %20'si test amacıyla kullanılmıştır. Eğitim işlemi 250 iterasyon ile gerçekleştirilmiştir. Modelin kaybı için kategorisel çapraz entropi kullanılmış ve en iyileme işlemi için ise Adam yöntemine başvurulmuştur. Şekil 3'te geliştirilen modelin parametreleri grafik üzerinde gösterilmiştir. Tablo 3'te TSA sınıflandırıcısının uygulama sonuçları verilmiştir. Tablo 3'te verilen bulgular doğrultusunda, TSA modeli ile %92,53 oranında bir doğruluk değeri elde edilmiştir. Bu model ile %88,66 oranında kesinlik değeri hesaplanırken,

bu modelin hassasiyet değeri ise %90,50 olmuştur. Bunlara ek olarak, F1-skor değeri %89,57 olarak hesaplanmıştır. Modelin EAA skoru ise 0,99 olmuş ve olağanüstü bir sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te bu modelin AİK grafiği ve karmaşıklık matrisi verilmiştir.



Şekil 3. Geliştirilen TSA sınıflandırıcısının parametreleri.



Şekil 4. TSA modelinin değerlendirme grafikleri: (a) alıcı işletim karakteristiği, (b) karmaşıklık matrisi (Sınıf 0 *Aspergillus sp.*, Sınıf 1, *Diatom*, Sınıf 2 *Penicillium*, Sınıf 3 *Pithophora*, Sınıf 4 *Protozoa*, Sınıf 5 *Raizopus*, Sınıf 6 *Spirogyra*, Sınıf 7 *Ulohris*, Sınıf 8 *Volvox* ve Sınıf 9 *Yeast* etiketlerini ifade etmektedir.)

Tablo 3. TSA modelinin sınıflandırma sonuçları.

Doğruluk	Kesinlik	Hassasiyet	F1-Skor	EAA Skoru
%92,53	%88,66	%90,50	%89,57	0,99

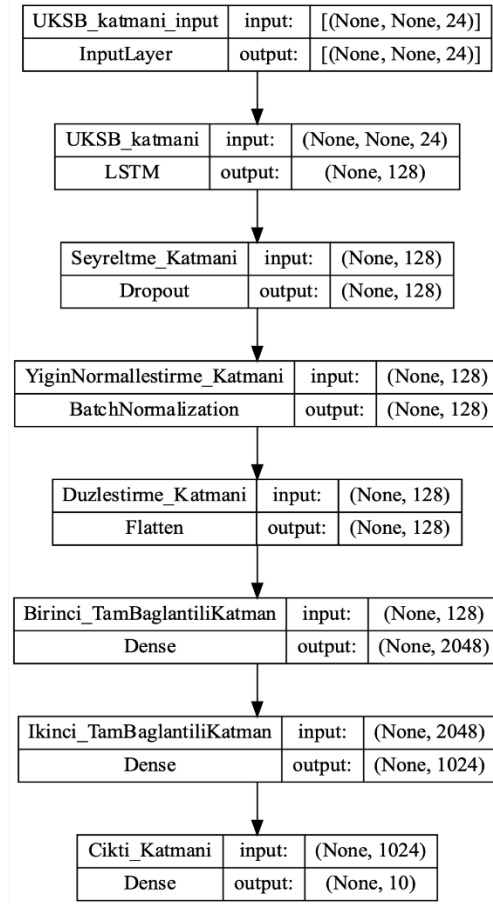
3.2. UKSB modelinin uygulama sonuçları

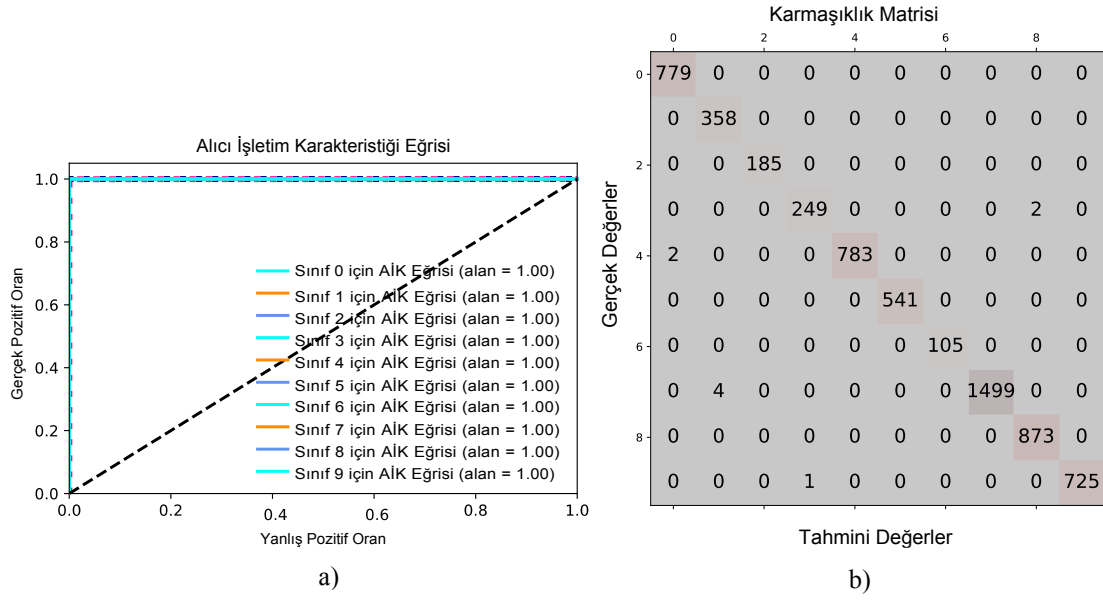
Çalışma kapsamında geliştirilen UKSB modelinin parametreleri deneme-yanılma yaklaşımı ile belirlenmiş ve en iyi sonuçlara göre değerlendirilmiştir. Modelin doğrulanması ise eğitim-test verisinin ayrıştırılmasına göre yapılmış ve verilerin %80'i eğitim, geri kalan %20'si test amacıyla kullanılmıştır. Eğitim işlemi 250 iterasyon ile gerçekleştirilmiştir. Modelin kaybı için kategorisel çapraz entropi kullanılmış ve en iyileme işlemi için ise RMSProp yöntemine başvurulmuştur. Şekil 5'te geliştirilen modelin parametreleri grafik üzerinde gösterilmiştir. Tablo 4'te UKSB sınıflandırıcısının uygulama sonuçları verilmiştir.

Tablo 4. UKSB modelinin sınıflandırma sonuçları.

Doğruluk	Kesinlik	Hassasiyet	F1-Skor	EAA Skoru
%99,85	%99,80	%99,85	%99,82	1,00

Tablo 4'te verilen bulgular doğrultusunda, UKSB modeli ile %99,85 oranında doğruluk değeri elde edilmiştir. Bu model ile %99,80 oranında kesinlik değeri elde edilirken, bu modelin hassasiyet değeri ise %99,85 olmuştur. Bunlara ek olarak, F1-skor değeri %99,82 olarak hesaplanmıştır. Modelin EAA skoru ise 1,00 olmuş ve olağanüstü bir sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da bu modelin AİK grafiği ve karmaşıklık matrisi verilmiştir.

**Şekil 5.** Geliştirilen UKSB sınıflandırıcısının parametreleri.



- Farklı derin öğrenme yöntemlerinin kullanılması ve irdelenmesi gerekmektedir. Bu sayede bu çalışmada elde edilen bulgular daha sağlıklı bir şekilde yorumlanabilir.

5. Sonuç

Bu çalışmada çeşitli mikropların özellikleri kullanılarak sınıflandırılması yapılmıştır. Çalışma kapsamında mikroskopik görüntülerden elde edilen verilere ait veri seti kullanılmış ve sınıflandırma işlemi dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada veri setinden veriler elde edilmiştir. İkinci aşamada veriler ön işleme tabi tutulmuş ve minimum-maksimum normalleştirme işlemiyle verilerin değeri [0-1] aralığına indirgenmiştir. Üçüncü aşamada derin öğrenme modelleri tanımlanmış ve hem TSA hem de UKSB sınıflandırıcıları kullanılmıştır. Son aşamada ise bu sınıflandırıcıların performansları doğruluk, kesinlik, hassasiyet, F1-skor ve EAA skorları ile ölçülmüştür. TSA sınıflandırıcısıyla %92,53 oranında doğruluk, 0,99 oranında EAA skoru elde edilmiştir. UKSB ile yapılan sınıflandırma işleminde ise %99,85 oranında doğruluk elde edilirken, EAA skoru ise 1,00 olarak ölçülmüştür. EAA skorlarına göre değerlendirme yapıldığında iki sınıflandırıcının da olağanüstü bir sınıflandırma yaptığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile derin öğrenme modellerinin mikropları sınıflandırmadaki başarımı gösterilmiş ve alanyazına katkı sağlanmıştır. Bunlara ek olarak, herhangi bir öznelik çıkarımı yapılmamış ve öznelik seçimine başvurulmamıştır. Bu dezavantajlara rağmen başarılı bir sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonraki çalışmalarda, mikropların türleri sınıflandırılacak ve türler ile mikroplar arasındaki biyoçeşitlilik araştırılacaktır.

Kaynaklar

- [1] Oka A, Sartor RB. Microbial-based and microbial-targeted therapies for inflammatory bowel diseases. *Dig Dis Sci* 2020; 65: 757-788.
- [2] Boxberger M, Cenizo V, Cassir N, Scola BL. Challenges in exploring and manipulating the human skin microbiome. *Microbiome* 2021; 9.
- [3] Yu K, Pieterse CMJ, Bakker PAHM, Berendsen RL. Beneficial microbes going underground of root immunity. *Plant Cell Environ* 2019; 42: 2860-2870.
- [4] Schirmer M, Garner A, Vlamakis H, Xavier RJ. Microbial genes and pathways in inflammatory bowel diseases. *Nat Rev Microbiol* 2019; 17: 497-511.
- [5] Björk JR, Diez-Vives C, Astudillo-Garcia C, Arcihe EA, Montaya JM. Vertical transmission of sponge microbiota is inconsistent and unfaithful. *Nat Ecol Evol* 2019; 3: 1172-1183.
- [6] Buszewski B, Rogowska A, Pomastowski P, Zloch M, Railean-Plugaru V. Identification of microorganisms by modern analytical techniques. *J AOAC Int* 2017; 100(6): 1607-1623.
- [7] Ganegoda S, Chinthaka SDM, Manage PM. Geosmin contamination status of raw and treated waters in Sri Lanka. *J Natl Sci Found Sri Lanka* 2019; 47(2): 245-259.
- [8] Ferone M, Gowen A, Fanning S, Scannell AGM. Microbial detection and identification methods: Bench top assays to omics approaches. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 2020; 19(6): 3106-3129.
- [9] Dhindsa A, Bhatia S, Agrawal S, Sohi BS. An improvised machine learning model based on mutual information feature selection approach for microbes classification. *Entropy* 2021; 23(2).
- [10] Promdaen S, Wattuya P, Sanevas N. Automated microalgae image classification. *Procedia Comput Sci* 2014; 29: 1981-1992.
- [11] Coltelli P, Barsanti L, Evangelista V, Frassanito AM, Gualtieri P. Water monitoring: automated and real time identification and classification of algae using digital microscopy. *Environ Sci Process Impacts* 2014; 16(11): 2656 – 2665.
- [12] Dhindsa A, Bhatia S, Agrawal S, Sohi BS. Dataset for efficient microbes classification system. *Mendeley Data* 2021; 4.
- [13] Cui Z, Ke R, Pu Z, Wang Y. Deep bidirectional and unidirectional LSTM recurrent neural network for network-wide traffic speed prediction. *arXiv* 2019; 1-11.
- [14] Ribeiro AH, Tiels K, Aguirre LA, Schön TB. Beyond exploding and vanishing gradients: analysing RNN training using attractors and smoothness. In: 23rd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics; 26-28 August 2020; Online: pp. 2370-2380.
- [15] Takeuchi D, Yatabe K, Koizumi Y, Oikawa Y, Harada N. Real-time speech enhancement using equilibrated RNN. In: International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing; 04-08 May 2020; Barcelona, Spain.
- [16] Yu Y, Si X, Hu C, Zhang J. A review of recurrent neural networks: LSTM cells and network architectures. *Neural Comput* 2019; 31(7): 1235-1270.
- [17] Rosset S. Model selection via the AUC. In: 21st International Conference on Machine Learning; 04-08 July 2004; New York.
- [18] Hosmer DW, Lemeshow S, Sturdivant RX. Applied Logistic Regression. 3rd ed. John Wiley and Sons, Inc.
- [19] Mahmud M, Kaiser MS, McGinnity TM, Hussain A. Deep learning in mining biological data. *Cognit Comput* 2021; 13: 1-33.

Özel Blok Yapıları Kullanarak Tasarlanan Derin Öğrenme Mimarileri ile Alzheimer Hastalık Tespiti

Eyup HANBAY^{1*}, Ali ARI²

^{1,2} Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye
^{*1} eyup44@gmail.com, ² ali.ari@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 12/06/2023;

Kabul/Accepted: 09/08/2023)

Öz: Bir demans türü olan Alzheimer hastalığı dünyada oldukça yaygın bir şekilde görülmektedir. Hastalığın farklı evreleri olup halen geçerli bir tedavisi yoktur. Güncel makine öğrenmesi yöntemleri ile hastalığın farklı evreleri tespit edilebilmektedir. Özellikle derin öğrenme tabanlı yöntemler ile hassas şekilde hastalık tespiti yapılabilmektedir. Bu çalışmada ResNet ve Inception mimarilerinin özel blok yapıları kullanılarak iki farklı derin öğrenme mimarisi geliştirilmiştir. Bu mimariler Alzheimer tespitinde etkin sonuçlar üretmiştir. Özel blok yapılarının tasarımı ile farklı mimarilerin birlikte çalışma yetenekleri ortaya çıkarılmıştır. Yapılan deneysel sonuçlarda önerilen mimarilerin etkin sonuçlar ürettiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Alzheimer hastalığı tespiti, Derin öğrenme, Inception, ResNet.

Alzheimer's Disease Detection with Deep Learning Architectures Designed Using Special Block Structures

Abstract: Alzheimer's disease, a type of dementia, is quite common in the world. The disease has different stages and there is still no cure. With current machine learning methods, different stages of the disease can be detected. Especially with deep learning-based methods, disease detection can be made sensitively. In this study, two different deep learning architectures have developed by using special block structures of ResNet and Inception architectures. These architectures have produced effective results in the detection of Alzheimer's. With the design of special block structures, the ability of different architectures to work together has been revealed. In the experimental results, it is seen that the proposed architectures produce effective results.

Key words: Alzheimers's disease detection, Deep learning, Inception, ResNet

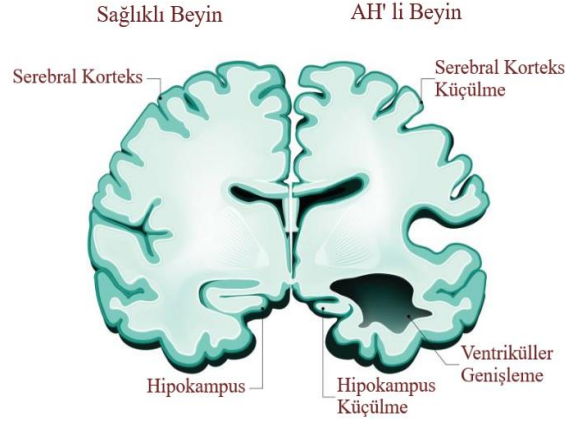
1. Giriş

İnsan hayatında yaş ilerledikçe buna bağlı olarak bilişsel gerileme önemli bir sağlık problemidir. Bunların başında gelen Demans (Bunama) bilişsel yetilerin günlük ve temel yaşam aktivitelerini bile yerine getirilemeyecek seviyede kaybedilmesidir. 65 yaş ve üstü insanlarda tespit edilen Demans vakalarının en az üçte ikisi Alzheimer Hastalığı (AH) türüdür. AH daha çok yaşlı insanları etkiler. Beyinde meydana getirdiği tahribatın tedavi edilmesi mümkün değildir [1]. Nörodejeneratif bir hastalık olan AH konuşma, hatırlamada güçlük, anlamada zorluk ve dikkat toplayamamak gibi bilişsel ve davranışsal yakınmalar ile başlar. İleriki aşamalarda AH etkileri kişinin başkalarının güç ve yardımı olmaksızın hayatlarını idame ettiremeyecek seviyeye ulaşır. AH'de Çok Hafif Demans, Hafif Demans, Orta dereceli Demans ve Demans olmak üzere dört evre bulunmaktadır. AH'nin belirtileri hastalık seviyesine göre değişkenlik gösterir.

AH'yi klinik olarak teşhis etmek için alanında uzman kişiler ve yüksek maliyetli bir dizi test gerekmektedir. Beyindeki yapısal ve kimyasal değişimler gözlemlenerek sağlıklı beyin ve AH'li beyin ayırt edilmektedir. Şekil 1'de sağlıklı ve AH'li beyin kesitleri verilmiştir. Beyin omurilik sıvısı tahlil yöntemi, PET (Pozitron Emisyon Tomografisi) yöntemi, plazma taramaları sayesinde ölçülebilen β -Amiloid molekülleri yöntemi, MRG (Manyetik Rezonans Görüntüleme) yöntemi gibi yöntemler AH teşhisi için başvurulan klinik yöntemlerdendir. Ancak uygulanabilirlik ve ulaşılabilirlik bu yöntemlerin bazı dezavantajları olarak öne çıkmaktadır [2]. AH'nin tespiti ve sınıflandırması için uzmanlar tarafından yapılan değerlendirmelere alternatif olarak tıbbi görüntüleme verileri üzerine makine öğrenmesinin alt algoritması olan derin öğrenme yöntemleri de kullanılmaktadır. BDTS (Bilgisayar destekli tespit sistemleri) olarak ön plana çıkan teknikler, alan uzmanlarına kitle tespiti için yardımcı olmaktadır [3]. Böylece matematiksel ve insan müdahalesine büyük ölçüde kapalı hastalık tespit yöntemleri

* Sorumlu yazar: eyup44@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0009-0004-2168-6221, ² 0000-0002-5071-6790

geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemler ile medikal uzmanlara karar vermede katkı sunan akıllı sistemler sunulmuştur.



Şekil 1. Sağlıklı beyin ve AH'li beyin kesiti

Liu ve diğ. yapmış oldukları çalışmada yapısal MRG görüntüleri kullanarak hafif bilişsel bozukluk evresini sağlıklı bireylerden ayırt etmek için üç boyutlu derin Evrişimli Sinir Ağlarına (ESA) dayalı yeni bir model [4] önermişlerdir. Çalışmalarında % 85 doğruluk değerine ulaşmışlardır. Modellerini daha zorlu bir görev olan 12 normal bilişsel denek eklediklerinde doğruluk değerini % 62,45 olarak bulmuşlardır. Cheung ve diğ. [2] 3240 sağlıklı insan ile 648 Alzheimer hastası kişilerden aldıkları toplam 12949 retina görüntüsünü kullanarak yeni bir model geliştirmişlerdir. Önerdikleri yöntem ile Alzheimer hastalığı-demans tespitinde % 93,2 doğruluk başarı elde edilmiştir. Sathish Kumar ve diğ. [5] transfer öğrenme yöntemi uyguladıkları bir AlexNet ağı ile Açık Erişim Görüntüleme Çalışmaları Serisi (OASIS) elde ettikleri 5000 den fazla MRG verisi ile Alzheimer hastalığını hafif bilişsel bozukluk seviyesinde tespit etmeye çalışmışlardır. Önerdikleri model % 98,35 doğruluk değeri ile benzer çalışmalara göre üstün doğruluk değerine ulaşmıştır. Tian Bai ve diğ. [6] önermiş oldukları BSGAN-ADD isimli Üretken Çekişmeli Ağ (GAN) tabanlı yöntem ile ESA tabanlı mimarinin üstün yönleri kullanılarak Alzheimer hastalığını tespit etmeye çalışmışlardır. Alzheimer hastalık sınıflandırmada yeni üç bileşenli çekişmeli ağ tabanlı yöntemi önermişlerdir. Sunmuş oldukları yöntem beyin dilimi görüntü geliştirme ile ESA tabanlı Alzheimer tespit etme yöntemlerini birleştirir. BSGAN-ADD yönteminde öğrenme algoritması sınıflandırıcıdan elde ettikleri hastalık sınıfı geri bildirimlerini kullanarak, eğitim safhasında görüntüde iyileştirme yapmaktadır. Bu sayede 2 boyutlu beyin dilimi görüntüsü yeniden yapılandırma aşamasına dahil edilmiştir. Literatürde yapılmış olan diğer bir çalışma ise hiper parametre optimizasyon yöntemidir. Denetimli karşıt öğrenme ve denetimsiz karşıt öğrenme yöntemleri [7] ile Alzheimer tespitinde ortalama % 92 başarı elde edilmiştir. Çalışmalarında popüler olan derin öğrenme yöntemlerinden ResNet100 ve EfficientNetB2 mimarilerini de önermiş oldukları model ile kıyaslamada kullanmışlardır. Kong ve diğ. [8] PET ve MRG görüntülerine bir füzyon birleşme yöntemi uyguladıkları Alzheimer tespiti için yeni bir model önermişlerdir. Uyguladıkları füzyon tekniği beyinin anatomik ve metabolik verileri üzerine yoğunlaşarak verideki bozulmaları temizlemişlerdir. Tek boyutlu görüntü kullanarak sınıflandırma yapan diğer yöntemlere kıyasla önerdikleri görüntü birleştirme yöntemi ve üç boyutlu ESA ile daha başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Alzheimer tespiti için diğer bir yaklaşımda ise beyinin sağ ve sol hipokampus bölgelerine yoğunlaşmıştır. Bu yöntemde ön işleme adımlarından sonra 3 görüntü yaması verilen ESA mimarisi tasarlanmıştır [9]. Modelde özellik haritalarını çıkarmada ESA mimarisi tercih edilirken; sınıfların tespitinde Softmax sınıflandırıcı kullanılmıştır. Modelin eğitiminde kullanılan veri seti GARD veri tabanından alınmıştır. Yapılan çalışmanın zayıf yönü ise beyin sağ ve sol hipokampus bölgelerinin manuel bir şekilde işaretlenmesi işleminin zor ve maliyetli oluşudur. Bu eksikliğe rağmen sınıflandırmada % 90,05 doğruluk değerine ulaşılmıştır.

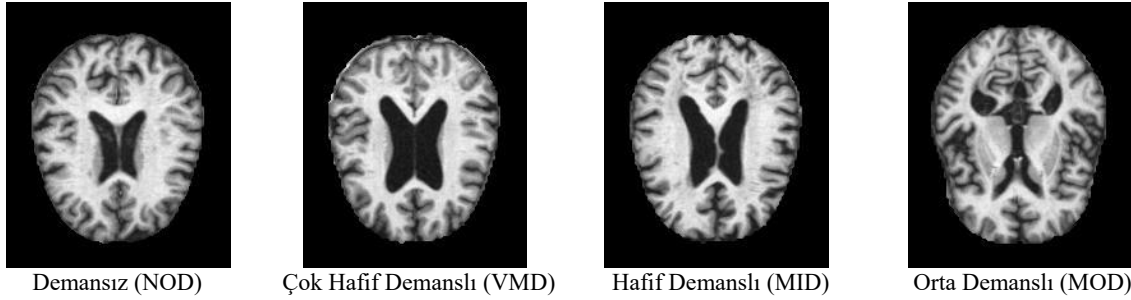
Bu çalışmada iki derin öğrenme mimarisi geliştirilerek ResNet ve Inception derin öğrenme model yapılarının özel blokları oluşturulmuştur. ResNet ve Inception modellerinin sadece özel blok yapılarının kullanıldığı çalışmada Alzheimer hastalığını tespit etmek için yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir.

2. Materyal ve Metodoloji

Bu bölümde önerilen yöntemde kullanılan veri seti ve özel blok yapısına sahip ResNet ve Inception derin ağ mimarileri hakkında bilgiler verilmiştir. Bu mimarilerin temel özellikleri, katman yapıları ve üstün yönleri kısaca irdelenmiştir.

2.1. Önerilen modeller için kullanılan alzheimer veri seti

Bu çalışmada araştırmacı Sarvesh Dubey tarafından oluşturulan veri seti kullanılmıştır [9]. Veri setindeki 208×176 boyutundaki 6400 adet farklı çözünürlükte jpeg MRG verisi Kaggle veri tabanında paylaşılmıştır. Veri setine ait örnek görseller Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Alzheimer veri seti örnek görselleri

Veri seti Alzheimer hastalığının 3 evresi olan Çok Hafif Demanslı (VMD), Hafif Demanslı (MID) ve Orta Demanslı (MOD) ile hastalık olmayan Demansız (NOD) olmak üzere 4 sınıf içermektedir. Veri tabanındaki Alzheimer hastalık sınıfları ile ilgili bilgiler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Veri setindeki sınıflar ve sınıflarda bulunan örnek sayıları

Sınıf	Veri sayısı	Yüzdellik oran
Demansız (NOD)	3200	50%
Çok Hafif Demanslı (VMD)	2240	35%
Hafif Demanslı (MID)	896	14%
Orta Demanslı (MOD)	64	1%
Veri Seti Toplam	6400	100%

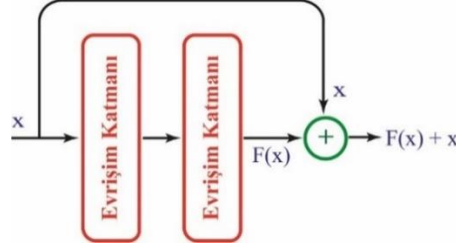
Tablo 1’de sınıflarına ait bilgileri verilen veri seti birçok çalışmada kullanılmıştır. Bu literatür çalışmalarında derin öğrenme yöntemleri ve geleneksel yöntemler uygulanarak AH evreleri sınıflandırılmak istenmiştir. Alzheimer veri seti kullanılarak AH sınıflandırması yapılan bazı güncel çalışmalar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Alzheimer veri seti kullanılarak yapılmış çalışmalar

Referanslar	Yöntemler
Sharma ve diğ. [10]	Transfer öğrenme, DVM ve permütasyon tabanlı makine öğrenimi
Sharma ve diğ. [11]	Transfer öğrenme temelli Inception modeli
Zena ve diğ. [12]	Modifiye edilmiş VGG16 Modeli
Singh ve diğ. [13]	Önerilen CNN+Softmax Modeli
Toğaçar ve diğ. [14]	Geliştirilmiş VGG16 Modeli
Shu ve diğ. [7]	Denetimli ve denetimsiz karşıt (contrastive) öğrenme
liu ve diğ. [15]	ResNet+Dikkat mekanizmaları

2.2. ResNet mimarisi

Derin öğrenme modellerinde derinliğin artması daha fazla katmanın arka arkaya eklenmesi ile ağların daha iyi öğrenmesi hedeflenir. Ağ derinliği arttıkça doğruluk değeri doyuma ulaşarak hızla düşmeye başlar. Yakınsamayı engelleyen bu problem kaybolan/patlayan gradyan sorunudur. Bu problemin çözüm yöntemlerinden birisi de ResNet mimarisi (Artık Bağlantı) modelidir. Artık bağlantı modeli ile bir veya daha fazla katmanı atlayarak giriş verisinin, katmanlardan elde edilen çıkışla toplanması ile sonuç elde edilir. Bu sayede ileri ve geri yayılım sırasında hesaplamalarda özellik haritalarındaki bozulmaların önüne geçilmiş olur. Örnek artık bağlantı modeli deseni aşağıda Şekil 3'te verilmiştir.

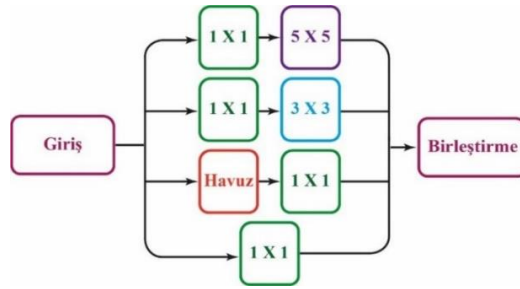


Şekil 3. Artık bağlantı modeli

ResNet mimarileri katman sayısı esasına göre değişik türlere sahiptir. Örneğin ResNet50 modeli 50 katmandan oluşur. Aynı şekilde ResNet101 modeli 101 katmandan oluşmaktadır. Katmanlarda belli bir desen tekrar etmektedir [16]. ImageNet veri tabanı ile eğitilmiş olan ResNet50 mimarisi 2 tane evrişim katmanı kullanmak yerine 1×1 , 3×3 ve 1×1 şeklinde ardışık evrişim katman bulunmaktadır.

2.3. Inception mimarisi

Google mühendisleri tarafından geliştirilmiş olan Inception (Başlangıç) mimarileri derin öğrenme modellerindeki hesaplama karmaşıklığına ve işlem yükünün fazlalığına bir çözüm olarak geliştirilmiştir [17]. InceptionV3 mimarisi, ardışık olarak arka arkaya gelen evrişim katman yapısı kullanmak yerine Inception bloklarından oluşmaktadır [18]. Tasarlanmış olan Inception modelinde ağ yapısı modüler bir yapıdır. Farklı boyutlarda evrişim ve Max-Pooling işlemleri her modülde görülmektedir. Inception'da hesaplama maliyetini azaltılmak için her evrişim katmanından önce 1×1 boyutunda evrişim katmanı kullanılmıştır. Temel Inception modülüne ait örnek yapı Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Inception mimarisinin modül yapısı

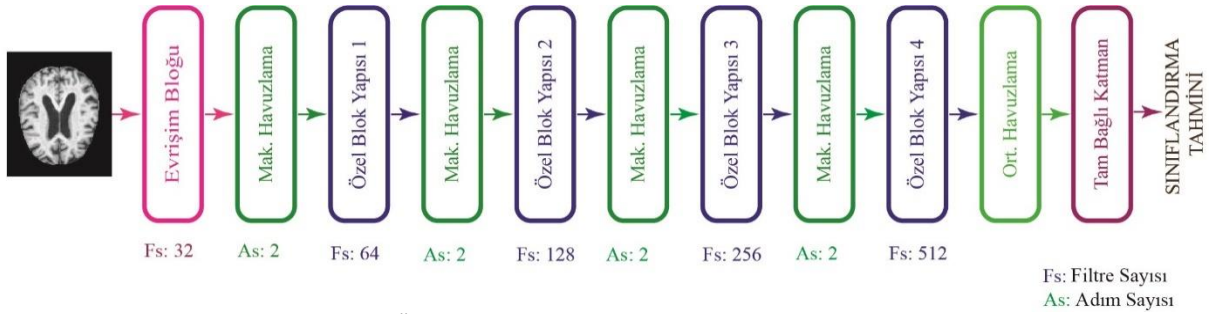
3. Önerilen Yöntem

Alzheimer hastalığı teşhis ve hastalık evreleri tespitinde yapılmış olan derin öğrenme tabanlı çalışmalarda; önerilen ESA mimarileri ya tamamen yeni bir mimari tasarımı yaparak ortaya çıkar, ya da mimarilerinin iyileştirilip, geliştirilmesine dayalı olarak kullanılmaktadır. Literatürde yapılmış olan çalışmalarda daha çok izlenen yol seçilmiş olan modeldeki evrişim katman yapısı, katmanların diziliş sırası ve bağlantı şekli üzerinde durulan en önemli konular arasındadır. Bunların yanında model eğitiminde kullanılmakta olan veri üzerinde verinin temsil gücü kaybı olmaksızın boyut indirgeme yöntemi de kullanılmaktadır. Ayrıca modellerin hesap

maliyetini azaltan bir mimari yapıda uygun katman yapısı kullanılarak ve bir diğer mimariyle birleştirilerek ortaya çıkan yeni mimarinin sınıflandırma doğruluk başarısını arttırması hedeflenmektedir.

Bu çalışmada önerilen model önceki bölümlerde kuramsal temelleri verilen ResNET50 mimarisindeki bağlantı deseni ve Inception V3 özel blok yapısını kullanmaktadır. Böylece farklı iki derin öğrenme modelinin özel blok yapılarının üstün yönlerinin birlikte kullanılması sağlanmıştır. Ayrıca bu mimarilerin birlikte çalışabilme yetenekleri irdelenmiştir. Mimarilerin sahip oldukları özel blok yapıları kendi içlerinde farklı evrişim, havuzlama ve bağlantı modelleri içermektedir. En az iki uygun mimarinin birlikte tasarımı ile yeni derin öğrenme mimarilerinin geliştirilmesi sağlanmıştır. Geliştirilen modelde Şekil 3'te verilen ResNET blok yapısı ve Şekil 4'te verilen Inception blok bağlantı modeli kullanılmıştır. Şekil 5'te gösterildiği gibi model klasik evrişim ve maksimum havuzlama katmanı ile başlamaktadır. Özel blok yapısı barındıran katmanlardan hemen sonra maksimum havuzlama katmanı gelmektedir. Havuzlama katmanlarında adım sayısı 2 olarak alınmıştır. Son olarak ortalama havuzlama ve tam bağlı katmandan sonra softmax sınıflandırıcı kullanılmıştır.

Önerilen yeni modelin AH tespitindeki etkinliği belirli bir veri tabanı üzerinde test edilmiştir. Geliştirilen bu farklı mimariye ait blok diyagram Şekil 5'te görülmektedir. Geliştirilen mimaride Şekil 5'teki sadece özel blok yapısı olarak adlandırılan dört kısımda ResNET ve inception V3 mimarilerin özel blok yapıları kullanılmıştır.



Şekil 5. Önerilen özel blok yapıları derin öğrenme modeli

3.1. Önerilen model 1: Inception-ResNet mimarisi

Önerilen modelde giriş görüntüsü klasik evrişim katmanından geçirildikten sonra Şekil 5'te verilen mimaride Özel Blok Yapısı-1 ve Özel Blok Yapısı-2 için Inception bağlantı modeli kullanılmıştır. Alzheimer verisi bu iki katmandan geçtikten sonra maksimum havuzlama işlemine tabi tutulmuştur. Özel Blok Yapısı-3 ve Özel Blok Yapısı-4'te ise ResNet50 bağlantı modeli tercih edilmiştir. Özel Blok Yapısı-4'ten sonra önceki katmanlardan farklı olarak ortalama havuzlama işlemi uygulanmıştır. Modelin sınıflandırma başarısını arttırmak için softmax sınıflandırıcı ile veriler sınıflandırılmıştır.

Önerilen bu model ile Inception mimarisindeki farklı boyutlardaki evrişim filtrelerinin olduğu özel blok yapısının ağırlık katmanlarında kullanılması ve veriyi soyutlaştırırken sınıflandırma performansına olan etkileri incelenmiştir. Şekil 4'te görüleceği üzere, ilk evrişim bloğu geleneksel evrişim yaptıktan sonra hemen devamında Özel Blok Yapısı-1 ve Özel Blok Yapısı-2 içerisindeki Inception bloklarına veriyi iletmektedir. Inception bağlantı modeli ile verinin aşırı soyutlaştırılması önlenmeye çalışılmıştır. Böylece MRG verisindeki hastalığa ait ayırt edici bilgilerin kaybolması engellenmiştir. Daha sonraki ResNet bloklarına yüksek özellik düzeyli MRG verisi iletilmiştir. ResNet ise artık bağlantılar evrişim işleminin aşırı soyutlama yapmasını kısıtlamıştır. Geliştirilen bu model ile her iki özel blok yapısının birlikte çalışma parametreleri ve davranışları somut şekilde irdelenebilmiştir.

3.2. Önerilen model 2: ResNet- Inception mimarisi

Önerilen ikinci modelde ResNet50 ve InceptionV3 bağlantı bloklarının Alzheimer sınıflandırma başarısı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Bunun için model 1'de önerilen özel blok yapılarının sıralamasının tersine; Özel Blok Yapısı-1 ve Özel Blok Yapısı-2 için ResNet50 bağlantı modeli, Özel Blok Yapısı-3 ve Özel Blok Yapısı-4'te ise Inception bağlantı modeli kullanılarak blok yapılarının yerleri değiştirilmiştir. Burada amaç ağırlık katmanlarında ResNet mimarisinin aşırı soyutlama ve gradyan kaybına sebep olup olmadığını gözlemlenmesidir. ResNet mimarisi artık bağlantı modeli ile verideki bilgi kaybını minimuma indirmiştir. Böylece gerçek giriş verisindeki ayırt edici bilgiler korunmuştur. Özel Blok 3 ve Özel Blok 4 ise Inception modeli ile ResNet özellikleri farklı sayı ve boyutta evrişim işlemlerinden geçirilerek yüksek seviyeli özellik

vektörleri hesaplanmıştır. Bu modelde kabul edilebilir sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla derin öğrenme modellerinin blok yapısı bağlamında birlikte kullanımlarının optimal maliyetler ile iyi sonuçlar üretecekleri anlaşılmıştır.

4. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Önerilen model Python programlama dilinde geliştirilen tensorflow kütüphanesi kullanılarak test edilmiştir. Tüm çalışmalar intel i7 işlemci, 32 GB Ram RTX 3080 ekran kartına sahip bir bilgisayarda yürütülmüştür. Geliştirilen iki model hem kendi aralarında hem de literatürdeki ResNet50 [16], ResNet101 [20], InceptionV3 [17], VGG16 [21], VGG19 [21] ve MobileNet [22] derin öğrenme mimarileri ile karşılaştırılmıştır. Böylece hem modellerin birbirlerine olan üstünlükleri hem de mevcut diğer yöntemlere olan güçlü/zayıf yönleri irdelenebilmiştir. Karşılaştırma metrikleri olarak F1-skor, sınıflandırma doğruluğu, duyarlılık ve hassasiyet kullanılmıştır.

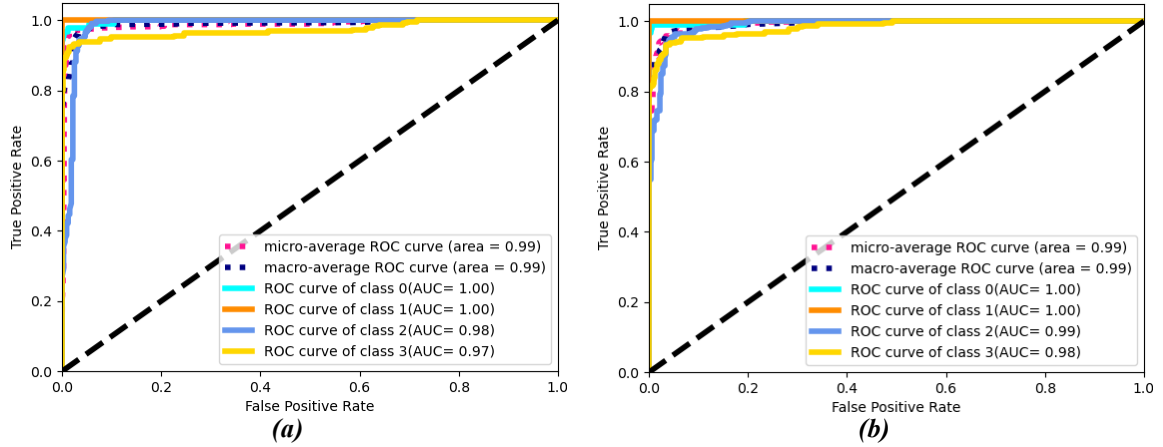
Geliştirilen modeller hem güncel akademik çalışmalar ile hem de bilinen derin öğrenme kütüphanelerinin orijinal mimarileri ile karşılaştırılmıştır. Tablo 3'te bu çalışmada kullanılan Alzheimer veri seti kullanılarak geliştirilen güncel 7 çalışma ile önerilen iki model karşılaştırılmıştır. Bazı çalışmalar önerilen iki modele göre daha iyi sonuçlar elde ederken bazıları ise daha kötü sonuçlar üretmişlerdir. [13] [14] ve [15] referans numaralı çalışmalar mevcut derin öğrenme mimarilerine oldukça güçlü katman güncellemesi yaptıkları için çok yüksek sonuçlara ulaşmışlardır. VGG16 modelinin evrişim ve diğer katman bileşenleri modifiye edilip güçlendirilerek çok başarılı sonuçlara ulaşılmıştır. Önerilen iki model ise bu modellere göre daha az derinlikte ve daha sade bir mimaridedir. Bu durum ağın öğrenme kabiliyetini etkilemiştir. Ancak farklı mimarilerin birlikte çalışma performanslarının gözlemlenmesine katkı sunulmuştur. Ayrıca sadece bir mimarinin özel blok yapısı alınarak farklı bir derin öğrenme metodolojisi sunulmuştur. Sınıflandırma sonuçları incelendiğinde önerilen iki modelin hibrit öğrenme mimarisi tasarımlarının umut verici olduklarını ortaya koymuştur.

Tablo 3. Önerilen modellerin ve diğer çalışmaların sınıflandırma sonuçlarının karşılaştırılması

Referanslar	Yöntemler	F1-skoru (%)	Doğruluk (%)
Sharma ve diğ. [10]	Transfer öğrenme, DVM ve permütasyon tabanlı makine öğrenimi	90,25	91,75
Sharma ve diğ. [11]	Transfer öğrenme temelli Inception modeli	94,75	94,92
Zena ve diğ. [12]	Modifiye edilmiş VGG16 Modeli	98	97,625
Singh ve diğ. [13]	Önerilen CNN+Softmax Modeli	97	98,59
Toğaçar ve diğ. [14]	Geliştirilmiş VGG16 Modeli	–	99,94
Shu ve diğ. [7]	Denetimli ve denetimsiz karşıt (contrastive) öğrenme	73	92
liu ve diğ. [15]	ResNet+Dikkat mekanizmaları	95	96,25
Önerilen Model 1	Inception-ResNet Mimarisi	95,76	95,78
Önerilen Model 2	ResNet- Inception Mimarisi	93,8	93,75

Önerilen Model 1, Model 2'ye göre daha iyi sınıflandırma sonuçları elde etmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3'te görülmektedir. Geliştirilen mimaride ağın ilk katmanlarında Inception blok yapılarının kullanılması daha yüksek sonuçlar üretmiştir. Inception blok yapısındaki dahili evrişim ve havuzlama katmanları Alzheimer verisi ile uyumlu çalışmıştır. Verinin ayırt edici özelliklerini çıkartabilmiştir. Bu özellikleri alan Özel Blok 3 ve Özel Blok 4'teki ResNet blokları ise aşırı soyutlama yapmadan özellikleri koruyabilmiş ve sınıflandırıcı katmanına iletmıştır.

Model 1 ile Inception-ResNet mimari tasarımı yapılarak ağa giren görüntü verisinin Inception bloklarında aşırı soyutlamaya uğraması ve veride bilgi kaybı oluşması engellenmiştir. Böylece ağın daha kararlı şekilde hata değerini azaltması ve öğrenme ağırlıklarını elde etmesi sağlanmıştır. Evrişim ve havuzlama işlemlerinin boyutları ve sayısının ayarlanması ile Alzheimer verilerindeki hastalık tespitini sağlayan piksel bölgelerinin özellikleri çıkartılabilmektedir. Bu nedenle model 2 ye göre daha iyi bir sınıflandırma elde edilebilmiştir. Önerilen iki model ile Alzheimer hastalık tespitinde geniş bir şekilde kullanılan mevcut veri tabanında etkin sonuçlar üretilmiştir. Bu iki modele ait ROC eğrileri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. (a) Önerilen Model 1'e ait ROC eğrisi grafiği ve (b) Önerilen Model 2'ye ait ROC eğrisi grafiği

Önerilen Model 1 en iyi sonuçlara sahipken, önerilen Model 2 ise en iyi dördüncü sonuçlara sahiptir. Diğer altı literatür yönteminin aksine, önerilen her iki model sadece belirli özel blok yapıları içermektedir. Önerilen iki modeldeki ağların boyutları ve karmaşıklıkları diğer altı modele göre çok daha kabul edilebilir boyutlardadır. Tablo 4'ten de görüleceği üzere, güçlü modeller olan ResNet101, VGG16, VGG19 ve MobileNet modelleri her iki modele göre daha düşük sonuçlara sahiptirler. Önerilen modeller belirli blok yapıları ile özellikle aşırı soyutlama ve kaybolan gradyan problemlerine neden olmayacak şekilde tasarlanmışlardır. Böylece hem ağırlık boyutu sınırlı tutulmuş hem de güçlü modellerin birlikte çalışma yetenekleri ortaya çıkartılmıştır. Tablo 4'te ise geliştirilen iki modelin literatürdeki altı farklı derin öğrenme modeli ile karşılaştırmaları verilmiştir.

Tablo 4. Önerilen modeller ile güncel modellerinin sınıflandırma sonuçları

Model	Doğruluk (accuracy)	Hassasiyet (precision)	Duyarlılık (recall)	F1-Skoru
Önerilen Model 1	95,78	95,93	95,78	95,76
ResNet50	94,69	94,93	94,69	94,61
InceptionV3	94,06	94,13	94,06	94,08
Önerilen Model 2	93,75	94,03	93,75	93,8
ResNet101	93,12	93,26	93,12	93,09
VGG16	89,84	89,88	89,84	89,86
MobileNet	77,5	78,38	77,5	76,87
VGG19	50	25	50	33,33

5. Sonuç

Bu çalışmada Alzheimer hastalığını tespit etmek için ResNet ve Inception derin öğrenme modellerinin sahip oldukları özel blok yapılarını birlikte kullanan iki derin öğrenme mimarisi geliştirilmiştir. Her iki mimaride dört farklı özel blok yapısı tasarlanarak bu bloklarda ResNet ve Inception modellerinin sadece özel blok yapıları kullanılmıştır. Böylece farklı mimarilerin birlikte çalışma yetenekleri gözlemlenmiştir. Mimarilerin üstün yönlerinin birlikte kullanılması ile yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar farklı değerlendirme metrikleri ile karşılaştırılmıştır. Literatürdeki güncel derin öğrenme mimarileri ile yapılan karşılaştırmalarda önerilen modellerin Alzheimer hastalık tespitinde kullanılabileceğini göstermiştir.

Gelecekte yapılacak çalışmalar ile farklı özel blok yapılarını içeren daha az parametrelili ve daha hızlı çalışabilen esnek mimariler geliştirilmesi planlanmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Kumar A, Sidhu J, Goyal A, Tsao JW. Alzheimer Disease, StatPearls Publ, 2018; 1–27.
- [2] Cheung, CY, Ran, AR, Wang S, Chan, VTT, Sham K, Hilal S, Venketasubramanian N, Cheng CY, ve diğerleri. A deep learning model for detection of Alzheimer's disease based on retinal photographs: a retrospective, multicentre case-control study. *The Lancet Digital Health* 2022; 4(11): 806–815.
- [3] Ari A, Alpaslan N, Hanbay D. Beyin MR görüntülerinden bilgisayar destekli tümör teşhisi sistemi. *Med Technol Natl Conf*; 15-18 Ekim 2015; Muğla, Türkiye. 1-4.
- [4] Liu S, Masurkar AV, Rusinek H, Chen J, Zhang B, Zhu W, Fernandez-Granda C, Razavian N. Generalizable deep learning model for early Alzheimer's disease detection from structural MRIs. *Sci Rep* 2022; 12(1): 1–12.
- [5] Sathish K. L, Hariharasitaraman S, Narayanasamy K, Thinakaran K, Mahalakshmi J, Pandimurugan V. AlexNet approach for early stage Alzheimer's disease detection from MRI brain images. *Mater Today Proc* 2021; 51: 58–65.
- [6] Bai T, Du M, Zhang L, Ren L, Ruan L, Yang Y, Qian G, Meng Z, ve diğerleri. A novel Alzheimer's disease detection approach using GAN-based brain slice image enhancement. *Neural Comput.* 2022; 492: 353–369.
- [7] Shu F, Tian L. Deep Learning Methods for Alzheimer's Disease Prediction. In *CS230: Deep Learn*, 2018, Stanford University. 1-10.
- [8] Kong Z, Zhang M, Zhu W, Yi Y, Wang T, Zhang B. Multi-modal data Alzheimer's disease detection based on 3D convolution. *Biomed. Signal Process Control* 2022; 75: 1-8.
- [9] Ahmed S, Choi KY, Lee JJ, Kim BC, Kwon GR, Lee KH, Jung HY. Ensembles of Patch-Based Classifiers for Diagnosis of Alzheimer Diseases. *IEEE Access* 2019; 7: 73373–73383.
- [10] Dubey S. "Alzheimer's Dataset four class of Images" <https://www.kaggle.com/datasets/tourist55/alzheimers-dataset-4-class-of-images>, 2020.
- [11] Sharma S, Gupta S, Gupta D, Altameem A, Saudagar AKJ, Poonia RC, Nayak SR. HTLML: Hybrid AI Based Model for Detection of Alzheimer's Disease. *Diagn* 2022; 12(8): 1-16.
- [12] Sharma S, Gupta S, Gupta D, Juneja S, Mahmoud A, El-Sappagh S, Kwak KS. Transfer learning-based modified inception model for the diagnosis of Alzheimer's disease. *Front. Comput. Neurosci.* 2022; 16: 1-13.
- [13] Zena JI, Lucky E, Ellaine CG, Edbert IS, Suhartono D. Deep Learning Approach based Classification of Alzheimer's Disease Using Brain MRI. 5th Int. Semin. Res of Inf Technol Intell Syst (ISRITI); 08-09 December 2022; Yogyakarta, Indonesia. 397–402.
- [14] Singh P, Mishra SK. (2022). Alzheimer's detection and categorization using a deep-learning approach. 3rd Int Conf on Intell Comput, Instrum Control Technol: Comput Intell for Smart Syst. ICICICT; 11-12 August 2022; Kerala India. 727–734.
- [15] Toğaçar M, Cömert Z, Ergen B. Enhancing of dataset using DeepDream, fuzzy color image enhancement and hypercolumn techniques to detection of the Alzheimer's disease stages by deep learning model. *Neural Comput Appl* 2021; 33(16): 9877–9889.
- [16] Liu Y, Tang K, Cai W, Chen A, Zhou G, Li L, Liu R. MPC-STANet: alzheimer's disease recognition method based on multiple phantom convolution and spatial transformation attention mechanism. *Front Aging Neurosci* 2022; 14: 1-15.
- [17] He K, Zhang X, Ren, S, Sun, J. Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE Comput Soc Conf Comput Vision Pattern Recognit*; 2016; Las Vegas, NV, USA. 770–778.
- [18] Szegedy C, Vanhoucke V, Ioffe S, Shlens J, Wojna Z. Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision. *Proceedings of the IEEE Comput Soc Conf Comput Vision and Pattern Recognit*; 2016; Las Vegas, NV, USA. 2818–2826.
- [19] Üzen H, Türkoğlu M, Arı A, Hanbay D. Piksel seviyesinde yüzey hata tespiti için InceptionV3 tabanlı zenginleştirilmiş öznetelik entegrasyon ağ mimarisi. *J Faculty Eng Architect Gazi Univ* 2022; 38(2): 721–732.
- [20] Rao Y, He L, Zhu J. A residual convolutional neural network for pan-sharpening. *Int. Workshop on Remote Sens Intell Process*; 18-21 May 2017; Shanghai, China. 1-4.
- [21] Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. 3rd Int Conf Learn Representations; 2015; 1-14.
- [22] Howard AG, Zhu M, Chen B, Kalenichenko D, Wang W, Weyand T, Andreetto M, Adam H. MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications. *Proceedings of the IEEE Comput Soc Conf Comput Vision and Pattern Recognit*; 2017; Honolulu, Hawaii: 1-9.

Genetik Algoritma Temelli Yeni Bir Sentetik Veri Üretme Yaklaşımının Geliştirilmesi

Fatma AKALIN^{1*}

¹ Bilişim Sistemleri Mühendisliği, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye
^{*1} fatmaakalin@sakarya.edu.tr

(Geliş/Received: 26/07/2023;

Kabul/Accepted: 11/08/2023)

Öz: Yapay zeka tabanlı çalışmalar, iş sektörlerinde karar destek sistemi oluşturmak, etkili çıktılar üretmek, sistem verimliliğini arttırmak ve maliyet etkin çözümler sunmak için büyük bir ilgi odağına sahiptir. Özellikle inovasyon sürecinin gelişmesinde, hızlanmasında ve hedef alana evrilmesinde yapay zeka tabanlı çalışmalar ile yenilikler sağlanmaktadır. Bu yeniliklerin gerçekleşmesinde veri, kritik bir anlama sahiptir. Algoritmalar vasıtasıyla eğitilen modellerin bilgisayarlar ya da özel makineler tarafından işlevselleştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte yetersiz veri erişimi, yasal düzenlemeler, etik kurallar, gizlilik prosedürleri, mahremiyet, veri paylaşım kısıtı ve maliyet; verilerin sahip olduğu potansiyelin açığa çıkarılmasının önündeki engellerdir. Bu engelleri aşmak için sentetik veri üretme yaklaşımı tercih edilmektedir. Fakat sentetik veri üretme yaklaşımına ilişkin standart bir çerçeve olmadığı için yeni ve güncel yaklaşımların geliştirilmesine yönelik araştırmalar devam etmektedir. Bu çalışmada genetik algoritma temelli yeni bir sentetik veri üretme yaklaşımı önerilmiştir. Bu doğrultuda orijinal veri kümesinin dinamiğinde yapay veriler üretmek için hedef veri kümesine uyarlanan çaprazlama ve mutasyon genetik operatörleri kullanılarak veri çeşitliliği artırılmıştır ve yeni bir nesil elde edilmiştir. Ardından üretilen bu nesildeki yapay örneklerin kategori tanımlaması, genetik algoritmanın maliyet fonksiyon bileşeni kullanılarak belirlenmiştir. Son aşamada üretilen yapay verilerin orijinal verilere benzerliğinin başarısını ölçmek için 6 farklı makine öğrenmesi sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Zenginleştirilen veri kümesi üzerinde Destek Vektör Makinesi sınıflandırıcısı ile maksimum duyarlılık ölçütü, %100 olarak elde edilmiştir. Bu durum artan veri sayısı ile orantılı olarak eğitim başarısının pozitif yönde eğilim gösterdiğini ifade etmektedir.

Anahtar kelimeler: Sentetik veri üretimi, genetik algoritma, makine öğrenmesi sınıflandırıcıları

Development of a New Synthetic Data Generation Approach Based on Genetic Algorithm

Abstract: Artificial intelligence-based studies have a great interest in creating decision support systems in business sectors, producing effective outputs, increasing system efficiency and providing cost-effective solutions. Especially in the development of the innovation process, the acceleration of the innovation process and its evolution into the target area, innovations are provided with artificial intelligence-based studies. In the realization of these innovations, data has a critical meaning for artificial intelligence-based studies. It plays an important role in the functionalization of models trained through algorithms by computers or special machines. However, insufficient data access, legal regulations, ethical rules, confidentiality procedures, privacy, data sharing limitations and cost; are major obstacles to revealing the potential of data. To overcome these obstacles, the synthetic data generation approach is preferred. But, since there is no standard framework for the synthetic data generation approach, research on the development of new and current approaches continues. In this study, a new synthetic data generation approach based on a genetic algorithm is proposed. In this direction, data diversity has been increased and a new generation has been obtained by using the crossover and mutation genetic operators adapted to the target dataset to produce artificial data in the dynamics of the original dataset. Then, the category definition of the artificial samples in this generation was done using the cost function component of the genetic algorithm. In the last stage, 6 different machine learning classifiers were used to measure the success of the similarity of the artificial data produced to the original data. The maximum sensitivity criterion was obtained as 100% with the Support Vector Machine classifier on the enriched dataset. This indicates that educational success tends to be in the positive direction in proportion to the increasing number of data.

Key words: Synthetic data generation, genetic algorithm, machine learning classifiers

1. Giriş

Yapay zeka, insanın sahip olduğu bilişsel yeteneklerin özel makineler ya da bilgisayarlar aracılığı ile taklit edilmesini sağlayan geniş bir çerçevedir [1]. Makine öğrenmesi, sinir ağları ve derin öğrenme alt alanlarını içeren yapay zeka çerçevesi ile matematik, istatistik, psikoloji ve nörobiyoloji gibi birçok alanda aktif çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Yapay zeka çerçevesindeki tüm alt alanlar birbiri ile ilişkilidir. Bu nedenle göreve bağlı olarak her bir alt alanda yer alan tekniklerin diğer alt alanlarda yer alan teknikler ile kullanımı mümkündür [2].

* Sorumlu yazar: fatmaakalin@sakarya.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-6670-915X

Makine öğrenmesi, günümüzde ciddi etki oluşturan popüler bir yapay zeka kategorisidir [3]. Algoritmalar vasıtasıyla eğitilen modellerin bilgisayarlar ya da özel makineler vasıtasıyla işlevselleştirilmesini sağlar. Makine öğrenmesi yaklaşımları ile başarılı bir eğitimin gerçekleştirilmesinde ve makinelere güçlü bir fonksiyonellik kazandırılmasında veri kritik bir öneme sahiptir [4]. Çünkü yetersiz veri sayısı ile başarılı bir eğitim mümkün değildir. Bununla birlikte verilerin kalitesiz olması, yasal düzenlemeler, etik kurallar ve gizlilik prosedürleri; makine öğrenmesi yaklaşımları ile veriler arasındaki ilişkilerin, desenlerin, benzerliklerin ve farklılıkların makineler tarafından öğrenilmesinde ve sonuçların değerlendirilmesinde bir engel teşkil etmektedir. Bunun sonucunda makine öğrenmesi modellerinde yetersiz öğrenme oluşmaktadır. Yetersiz öğrenme durumuna bir çözüm üretmek için kaliteli veri toplama ve etiketleme yapılabilir. Ancak bu süreçler maliyetli bir çıktı sunduğu için [4] sentetik veri üretme yaklaşımı vasıtasıyla orijinal verilerin dinamiğinde zenginleştirilmiş veri kümesi oluşturmak tercih edilen diğer bir seçenektir.

Sentetik veriler, tanımlanabilir bilgiler içermediği için kişi mahremiyetini koruyan yapay bilgi topluluğudur. Araştırmaların hızlı yürütülmesini ve araştırma süreçlerinde pozitif bir etki oluşturulmasını sağlar. Sonuçları maksimum verim ve düşük bir maliyet ile iyileştirir. İstatistiksel simülasyon ya da hesaplamalı üretme ile üretilen yapay veriler vasıtasıyla artan veri çeşitliliği ile geniş tanımlayıcı analizler yapılır. Gerçek verilere kıyasla veri paylaşımı kolay ve hızlı bir şekilde gerçekleşir. Artan veri ile birlikte geleceğe yönelik kritik problemlere ilişkin bir öngörücü rolü üstlenir. Özellikle tıp alanında tıbbi inovasyonun hızlandırılmasını sağlayabilen bir potansiyel içerir. Ek olarak sentetik veri yaklaşımı kapsamında hedef amaç doğrultusunda kullanılan yapay verilere ait tüm ayrıntıların bilimsel yayında ve üretilen tüm içerikler içinde ifade edilmesi gerekli bir konudur [1].

Sentetik veri üretimine ilişkin [5] çalışmada orta ölçekli Şili madencilikindeki atık barajların kapatılmasında fiziksel stabilitenin farklı potansiyel yenileme mekanizmalarına (PFM) ilişkin tahmini için atık barajların kritik değişkenlerin analizi sağlanmıştır ve beş olası PFM'nin tahmininde makine öğrenme algoritmaları kullanılmıştır. Burada veri azlığı nedeni ile üretken çekişmeli ağlar (GAN) yöntemi kullanılarak veri sayısı artırılmıştır. Zenginleştirilmiş veri kümeleri üzerinde makine öğrenmesi modelleri vasıtasıyla elde edilen F1 skor metriğinde %30 artış görülmüştür. [6] çalışmada ilişkisiz arka plan görüntüleri vasıtasıyla etki alanını rastgeleleştirerek nesne algılama görevine sahip sinir ağının nesne özelliklerini öğrenmesi ve arka plandan bağımsız olması için ardışık bir düzen önerilmiştir. Sentetik veri üretme amacına sahip bu düzen vasıtasıyla koni nesne algılama uygulaması kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmanın başarılı bir çıktı ürettiği ifade edilmiştir. Sürücü davranışını modellemek için gerekli veriye ulaşmanın zorluğundan esinlenerek [7] çalışmada orijinal verinin istatistiksel ve dağılım özelliğini kullanan synthpop kütüphanesi ile sentetik veri üretimi yapılmıştır. Ulaşılan sonuçların umut vaat edici çıktılar sunduğu ifade edilmiştir. Sentetik radyasyon verilerinin oluşturulmasının amaçlandığı [8] çalışmada birden fazla şehir bloğunu kapsayan modüler 3-D Monte Carlo modelleri ile veri kümeleri oluşturmak için Monte Carlo simülasyonlarının kullanımı açıklanmıştır. En tehlikeli afetlerden biri olan orman yangınlarının analizi ve yönetimi, önemlidir. Fakat büyük orman yangınlarının sayısı orman yangınlarının sayısına göre oldukça az olması durumlarında makine öğrenmesi modelini eğitmek için kullanılması planlanan veri kümesi dengesizdir [9]. Bu nedenle [9] çalışmada beş farklı sentetik veri oluşturma yöntemi değerlendirilmiştir ve sentetik verilere ilişkin kullanımın tahmin gücünde iyileştirme sağlandığı ifade edilmiştir. Su altı dünyasında istakoz türlerinin bolluğu ve biyoçeşitliliğini izlemek için su altı görüntülenmektedir. Fakat görüntülerin manuel değerlendirilmesi zaman alıcı bir süreç sunduğu için [10] çalışmada istakoz algılama işleminin otomatikleştirilmesi hedeflenmiştir. Açıklamalı eğitim veri kümesi eksikliğinden dolayı nesne algılama modellerinde kullanmak üzere sentetik veriler üretilmiştir. Sentetik veri üretimine ilişkin SPD isimli bu yaklaşımın nihai çıktı üzerinde performans artışı sağladığı belirtilmiştir. İnsan merkezli veri toplama sürecinin maliyetli olduğunu ifade eden [11] çalışmada GAN yaklaşımı ile parmak izi tabanlı yerelleştirmede üretilen sentetik veriler vasıtasıyla eğitim verisi toplanmıştır. Kabul edilebilir bir doğruluk elde edildiği ifade edilmiştir. [12] çalışmada manyetik rezonans görüntülemeye dayalı incelemenin zahmetli, hataya açık ve zaman alıcı olması problemi nedeniyle MRI veri analizinde beyin tümörlerini sınıflandırmak için derin öğrenme yaklaşımı kullanılmıştır. Sınıflandırma doğruluğunu iyileştirme hedefi kapsamında sunulan veri artırma konsepti ile önerilen stratejinin etkinliği değerlendirilmiştir. Son teknoloji tekniklere kıyasla daha iyi performans elde edildiği ifade edilmiştir. Devasa verinin mevcut olduğu günümüz çağında halen küçük veri kümelerinin kullanımına ilişkin sınırlamaların aşılması ve denetimli öğrenme algoritmalarının kullanılması için [13] çalışmada Geometrik Küçük Veri Aşırı Örnekleme Tekniği önerilmiştir. Veri oluşturma mekanizması Geometrik SMOTE yaklaşımına dayanan bu teknik ile mevcut örneklerin etrafındaki geometrik bölgelerden faydalanarak yüksek kaliteli örnekler oluşturulmuştur. Doğruluk değerinde önemli bir başarı sağlandığı ifade edilmiştir. Belgelerden finansal ve idari alanlar için kimlik doğrulaması yapmak gerekli bir konu iken imza doğrulama sistemlerinin performansını etkileyen gerçek imza sayısının yetersiz olmasından dolayı [14] çalışmada özellik üretici önerilmiştir. Yapay bağımsızlık sistemlerinin mutasyon, klonlama ve kaynak rekabeti mekanizmaları üzerinde temellenen bu yaklaşımın

doğrulama adımında SVM sınıflandırıcısı kullanılarak iki tanımlayıcı vasıtasıyla değerlendirme sağlanmıştır. Sentetik özelliklerin etkinliğini vurgulayan bu çalışmanın geliştirilen doğrulama sistemi üzerinde bir iyileştirme sağladığı ifade edilmiştir. Ticari tarım faaliyetlerinde sürdürülebilirliğin sağlanması ve kalite standartlarının oluşturulması için [15] çalışmada, tüketimde kullanılacak asma yapraklarının türünün tanınması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda ESRGAN modeli vasıtasıyla yaprağa ilişkin doku özelliklerinin korunduğu bir veri kümesi elde edilmiştir. Ardından VGG19 modeli ile verilerden çıkarılan öznelikler arasından en iyi öznelik alt kümesinin seçimi PCA algoritması ile yapılmıştır. Son aşamada Destek Vektör Makineleri yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma işlemi sonucunda %96,14 doğruluk oranı elde edilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar sentetik veri üretme yaklaşımı ile oluşturulan zenginleştirilmiş veri kümelerinde eğitim performansının orantılı olarak arttığına işaret etmektedir. Bu doğrultuda sunulan çalışmada 54 farklı özelliğin yer aldığı boşanmayı tahmin etme ölçeği kullanılarak verilen cevaplar, makine öğrenmesi sınıflandırıcıları ile sınıflandırılmıştır. Ardından genetik algoritma temelli yeni bir sentetik veri üretme yaklaşımı kullanılarak üretilen yapay veriler, orijinal veri kümesine eklenmiştir ve zenginleştirilmiş veri kümesinde yeniden bir sınıflandırma işlemi sağlanmıştır. Değerlendirme sonucunda verilerden sağlanan çıkarım performansının iyileştirildiği ve artan performans eğrisine sahip bir başarının elde edildiği görülmüştür. Böylece önerilen sentetik veri üretme yaklaşımı ile yapay zeka temelli çalışmalarda kritik bir öneme sahip olan veri sayısının bir doyum noktasına ulaşmasının sonucunda amaca uygun çıktıların üretilmesi, modelin başarılı bir şekilde eğitilmesi, yapay zeka çözümlerinin hayatın içerisine dahil edilmesi ve düşük maliyet sunan bir karar destek sisteminin inşa edilmesi için çözüm potansiyeli oluşturulmuştur.

2. Metodoloji

Sentetik veri üretimi, gerçek veri kümesindeki orijinal verilerin dinamiğinde yapay verilerin üretilmesini ifade eden bir yaklaşımdır. Gerçek dünya problemlerine ilişkin hedef veriler üzerinde başarılı analizler yapmak, kararlı çıkarımlar üretmek ve inovasyonu desteklemek amacıyla tercih edilmektedir.

Bu çalışmada genetik algoritma temelli yeni bir sentetik veri üretme yaklaşımı önerilmiştir ve önerilen yaklaşımın performansı belirli bir boyuta sahip örneklem büyüklüğü ile analiz edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan veri kümesi, genetik algoritma ve genetik algoritma temelli sentetik veri üretme yaklaşımı aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2.1. Boşanma öngörü veri kümesi

Hayat alanı kapsamında kişisel bilgi formu ve boşanmayı yordama ölçeği kullanılarak elde edilen Boşanma Öngörü Veri Kümesi (Divorce predictors dataset), UCI (the University of California Irvine Machine Learning Repository) halka açık gen bankasından [16] tedarik edilmiştir. Toplam 54 farklı öznelikten oluşan veri kümesinde kişilerin boşanma tercihleri 2 ayrı kategoride (0 ve 1) sunulmuştur ve veri kümesinde toplam 170 farklı örnek mevcuttur.

Bu çalışmada Boşanma Öngörü Veri Kümesi kullanılarak genetik algoritma temelli sentetik veri üretme yaklaşımı vasıtasıyla orijinal veri kümesinin dinamiğinde üretilen sentetik veriler ile zenginleştirilmiş veri kümesi elde edilmiştir. Ardından sınıflandırma aşamasında orijinal ve zenginleştirilen güncel veri kümesinin %65'i eğitim ve %35'i test kümesi olarak ayrılmıştır. Son aşamada orijinal ve zenginleştirilen veri kümesi üzerinde önerilen sentetik veri üretme yaklaşımının performansı makine öğrenmesi sınıflandırıcıları ile değerlendirilmiştir.

2.2. Genetik algoritma

Genetik algoritma, 1975 yılında Holland tarafından geliştirilmiştir. Evrimsel fikirler üzerinde temellenen bu algoritma; seçim, mutasyon ve çaprazlama teknikleri vasıtasıyla çözümler üretmektedir [17]. Matematiksel işlemlerin aksine ayrık ve doğrusal olmayan işlemlerden oluşur. Temel amaç, nesilden nesile evrilme sürecinde optimum duruma yaklaşmak ya da optimum durumu elde etmektir. Aynı zamanda karmaşık problemlerin çözümü için tercih edilen bir yaklaşım sunmaktadır. Bu nedenle bilgisayar ağları, yazılım mühendisliği, görüntü işleme, konuşma tanıma, sağlık hizmetleri ve makine öğrenmesi gibi farklı birçok alanda kullanımı mevcuttur [18].

Genetik algoritmanın ilk adımında başlangıç çözümleri rastgele oluşturulur. İkinci adımda hedef problem doğrultusunda değerlendirme fonksiyonu belirlenir. Probleme özgü performansın başarısını değerlendirmek için gerçekleştirilen bu aşamadan sonra uygunluk değerlerine göre iki çözüm seçilir. Ardından bu çözümlerin genetik algoritma parametreleri vasıtasıyla çoğaltılması sağlanır ve her tur sonucunda yeni nesil elde edilir. Bu adım,

optimum çözümü bulma, optimuma yakın çözüm elde etme ya da sonlandırma kriterine ulaşma durumuna kadar devam eder [18]. Genetik algoritmanın genel hiyerarşisi Kaba Kod 1 kısmında sunulmuştur [18].

Kaba Kod 1. Genetik algoritmanın genel hiyerarşisi

1	Başlangıç popülasyonunu oluştur
2	Her bir bireyin uygunluk değerini değerlendir
3	Seleksiyon işlemini gerçekleştir
4	Çaprazlama yap
5	Mutasyon uygula
6	Belirlenen iterasyon sayısına ulaşıldı mı?
7	Belirlenen iterasyon sayısına ulaşıldı ise sonlandır / Belirlenen iterasyon sayısına ulaşılmadı ise ikinci maddeye geri dön
8	Bitir

Kaba kod 1'de özetlendiği gibi bireyler topluluğu kullanılarak inşa edilen genetik algoritma yaklaşımında bireyler birleşir ve çocuklar oluşur. Çocuklara seleksiyon, çaprazlama ve mutasyon işlemlerinin uygulanması ve bu işlemlerin iterasyon boyunca tekrar edilmesi ile evrim gerçekleşir. Güçlü olan çocuğun hayatta kalması genetik algoritmanın temel mantığıdır [19]. Aslında kromozomların evrimini yansıtan bu süreç vasıtasıyla en çok uyum gösteren kromozomlar, organizmaları güçlü olan canlılar olarak nitelendirilir [20]. Doğal seçimden ilham alan genetik algoritma ile en uygun çözüme ulaşılması temel hedeflerdendir [20].

2.3. Genetik algoritma yaklaşımı kullanılarak sentetik veri üretimi

Genetik algoritma, evrimden ilham alınarak yazılmıştır. Temel mantığı nesilden nesile aktarılan toplulukta kötü çözümlerin yok olması ve iyi çözümlerin varlığını devam ettirmesidir. Topluluk, kromozomlardan meydana gelen bir kümedir ve kromozomlar problem için olası çözümleri temsil eder. Kromozomların yer aldığı çözümlerde, uygunluk fonksiyonu vasıtasıyla çözümün kalitesi belirlenir. Bununla birlikte kaliteyi ve uygunluğu iyileştirmek amacıyla mutasyon ve çaprazlama uygulanan diğer işlemlerdir. Genetik işlemlerin uygulandığı bu süreç sonunda seçilen bireyler içerisinde en kaliteli çözümlerin elde edilmesi sağlanır.

Genetik algoritma her bir problem çeşidi için ortak bileşenlere sahiptir. Bu bileşenler, kodlama ve maliyet fonksiyonudur. Bu bileşenler problemin doğasına yönelik bir temsil sağlamalıdır. Problemlerin temsilinde kodlama yaklaşımı kapsamında ikili kodlama, permütasyon kodlaması, değer kodlaması ve ağaç kodlaması literatürde kullanılan yaklaşımlardır [18].

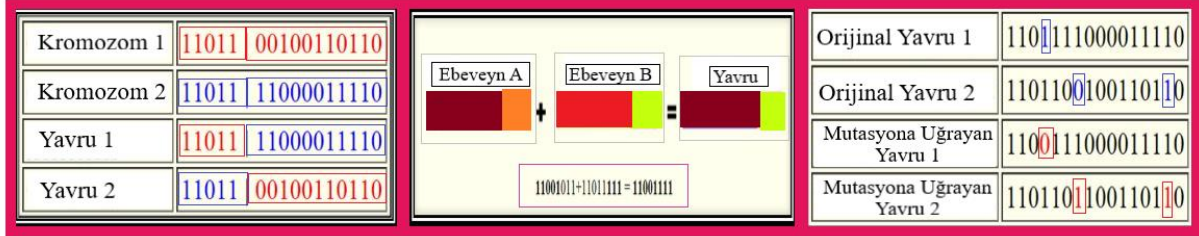
Bu çalışmada toplam 54 farklı öznelikten oluşan boşanma öngörü veri kümesinde katılımcılar tarafından 0 ile 4 ölçeği arasında değişen bir değerlendirme yapısı kullanılarak katılımcıların değerlendirmeye katılımları sağlanmıştır ve bir öngörü oluşturulması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda mevcut problem uzayının doğasına yönelik bir temsil sağlanması için 0 ile 4 arasında kodlama yapılmıştır ve matris oluşturulmuştur. Başlangıç popülasyonunda 0 ile 4 arasında değişen rastlantısal değerlerin üretilmesinden sonra popülasyondaki tüm kromozomların uygunluk değeri vasıtasıyla maliyet değeri hesaplanmıştır. Ardından yeni bir popülasyonu oluşturmak için seleksiyon, çaprazlama ve mutasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Seleksiyon işlemi, çiftleşme ve üreme için kromozomların seçilmesi işlemidir. Yeni yavruların üretilmesinde çaprazlamada kullanılacak ebeveynlerin belirlenmesi sağlanır [18]. Bu çalışmada seleksiyon işlemi için rastgele bir seçim yapılmıştır ve kromozom çifti seçilmiştir. Ardından yavruların oluşturulması için parça değişimi yapılmıştır. Çaprazlama ismindeki bu işlevsellik kapsamında tek noktalı çaprazlama türü seçilmiştir. Böylece ebeveynlerin belirli bir bölgesinin seçilmesi ve karşılıklı değiştirilmesi işlemi ile çeşitlilik sağlanmıştır [18].

Ek olarak, yerel optimumlardan kaçınmak ve uyarlanabilir yeni çözümler oluşturmak önemlidir. Bunun için çaprazlama işleminden sonra mutasyon gerçekleştirilmiştir. Mutasyon genetik operatörü ile kromozomdaki bir ya da daha fazla gene mutasyon işlemi uygulanmakta ve genin değiştirilmesi sağlanmaktadır [18]. Önerilen çalışmada veri kümesi uzayına uyarlanan mutasyon işlemi için aşağıda sunulan 5 madde ile çeşitlilik sağlanmıştır.

- 1- Mutasyon için seçilen gen değeri 4 ise 3 ile değişir.
- 2- Mutasyon için seçilen gen değeri 3 ise 2 ile değişir.
- 3- Mutasyon için seçilen gen değeri 2 ise 1 ile değişir.
- 4- Mutasyon için seçilen gen değeri 1 ise 0 ile değişir.
- 5- Mutasyon için seçilen gen değeri 0 ise 1 ile değişir.

Genetik algoritma yapısının daha net anlaşılabilmesi için Binary (İkili) kodlama yapılan bir çözüm uzayında çaprazlama, çaprazlama yönteminin özel bir türü olan tek nokta çaprazlama ve mutasyon işlemlerinin görsel tasviri Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Genetik algoritmada kullanılan çaprazlama, tek nokta çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin tasviri [18]

Şekil 1’de sunulan görüntünün üç kutucuğu sırasıyla çaprazlama, tek nokta çaprazlama ve mutasyon genetik operatörlerini göstermektedir. Tüm bu işlemler çeşitliliğin sağlanması için önemli adımlardır.

Genetik algoritma temelli sentetik veri üretmek amacıyla inşa edilen bu çalışmada mevcut probleme yönelik bir temsil sağlanması için 0 ile 4 arasında yapılan kodlama ile oluşturulan çözüm uzayında iterasyon sayısı 100 olarak belirlenen sonlandırma kriteri sonucunda yeni bir nesil elde edilmiştir. Fakat yeni bir nesil oluşturma eyleminin yanı sıra elde edilen güncel neslin sahip olduğu kategorinin belirlenmesi de sentetik veri üretme aşamasının temel bir adımıdır. Bunun için maliyet fonksiyonu kullanılmıştır.

Maliyet fonksiyonu vasıtasıyla elde edilen maliyet değeri kullanılarak gerçekleştirilen değerlendirme işlevi, orijinal veri kümesinin analiz edilmesinin sonucunda performansın derecelendirilmesidir. Bu çalışmada maliyet değeri, boşanma tahminine ilişkin iki ayrı kategori için sınır değeri üreten bir parametredir. Bu doğrultuda yapılan analizler sonucunda 54 farklı özellik içeren ve 0 ile 4 arasında kodlanan ölçek için verilen puanların toplam değeri, maliyet fonksiyonu olarak nitelendirilmiştir. Aynı zamanda maliyet fonksiyonu kullanılarak orijinal veri kümesinde yapılan analizler sonucunda eşik değeri tanımlaması yapılmıştır ve eşik değeri 50 olarak belirlenmiştir. Böylece 50 eşik değerinin altında kalan maliyet fonksiyonu için kategori değeri 0 ile eşleştirilirken 50 ve üstü eşik değerine sahip maliyet fonksiyonu için kategori değeri 1 ile eşleştirilmiştir. Tüm bu işlemler sonucunda artan veri çeşitliliği ile sentetik veriler üretilmiştir.

3. Araştırma Bulguları ve Tartışma

Veri, endüstriyel inovasyonu geliştirmek için algoritmalar vasıtasıyla eğitilen modellerin bilgisayarlar ya da özel makineler tarafından işlevselleştirilmesinde önemli rol oynayan bilgi kümesidir. Fakat yetersiz veri erişimi, yasal düzenlemeler, etik kurallar, gizlilik prosedürleri, mahremiyet, veri paylaşım kısıtı ve maliyet; başarılı bir eğitimin ve güçlü bir çıkarımın gerçekleştirilmesinin önündeki engellerdir. Bu engelleri aşmak, araştırmaların hızlı yürütülmesini sağlamak ve araştırma süreçlerine pozitif etki sunmak için sentetik veri üretimi tercih edilen bir yaklaşımdır. Bununla birlikte sentetik veri üretme yaklaşımına ilişkin standart bir çerçeve yoktur [4]. Fakat yeni ve güncel yaklaşımların geliştirilmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Bu çalışmada genetik algoritma temelli yeni bir sentetik veri üretme yaklaşımı önerilmiştir. Böylece Boşanma Öngörü Veri Kümesi kapsamında 54 farklı özelliğin 0 ile 4 arasındaki bir ölçekte nitelendirildiği örneklerle seleksiyon, çaprazlama ve mutasyon genetik faktörleri uygulanarak veri çeşitliliği artırılmıştır. Ardından üretilen sentetik verilerin kategori bilgisi maliyet fonksiyonu ile tanımlanan bir eşik değeri kullanılarak belirlenmiştir ve orijinal veri kümesine sentetik veriler eklenerek zenginleştirilmiş yeni bir veri kümesi oluşturulmuştur. Son aşamada orijinal veri kümesi ve zenginleştirilmiş veri kümesi üzerinde makine öğrenmesi sınıflandırıcıları kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır. Makine öğrenmesi sınıflandırıcıları kapsamında 170 veri içeren orijinal veri kümesinde ve 300 veri içeren zenginleştirilmiş veri kümesinde Eğitim (Eğitim K.) ve Test (Test K.) verileri için elde edilen sınıflandırma sonuçları Tablo 1-6’da verilmiştir.

Tablo 1. Orijinal ve zenginleştirilmiş veri kümeleri üzerinde Naive Bayes sınıflandırıcısı kullanılarak elde edilen performans ölçütleri

Naive Bayes Sınıflandırıcısı		Doğruluk Oranı	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F Ölçütü
Orijinal Veri Kümesi	Eğitim K.	0.9909	1	1	1	1
	Test K.	0.95	0.9666	0.9655	0.9666	0.9666
Zenginleştirilmiş Veri Kümesi	Eğitim K.	0.9897	0.9793	1	1	0.9895
	Test K.	0.9904	0.9807	1	1	0.9902

Tablo 2. Orijinal ve zenginleştirilmiş veri kümeleri üzerinde Karar Ağacı sınıflandırıcısı kullanılarak elde edilen performans ölçütleri

Karar Ağacı Sınıflandırıcısı		Doğruluk Oranı	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F Ölçütü
Orijinal Veri Kümesi	Eğitim K.	1	1	1	1	1
	Test K.	0.95	0.9354	0.9655	0.9666	0.9507
Zenginleştirilmiş Veri Kümesi	Eğitim K.	1	1	1	1	1
	Test K.	0.9904	0.9807	0.9811	0.9807	0.9807

Tablo 3. Orijinal ve zenginleştirilmiş veri kümeleri üzerinde Rastgele Orman sınıflandırıcısı kullanılarak elde edilen performans ölçütleri

Rastgele Orman Sınıflandırıcısı		Doğruluk Oranı	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F Ölçütü
Orijinal Veri Kümesi	Eğitim K.	1	1	1	1	1
	Test K.	0.9666	0.9354	0.9807	1	0.9666
Zenginleştirilmiş Veri Kümesi	Eğitim K.	1	1	1	1	1
	Test K.	0.9904	0.9807	1	1	0.9902

Tablo 4. Orijinal ve zenginleştirilmiş veri kümeleri üzerinde KNN sınıflandırıcısı kullanılarak elde edilen performans ölçütleri

KNN Sınıflandırıcısı		Doğruluk Oranı	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F Ölçütü
Orijinal Veri Kümesi	Eğitim K.	0.9818	0.9622	0.9793	1	0.9807
	Test K.	0.9666	0.9354	0.9807	1	0.9666
Zenginleştirilmiş Veri Kümesi	Eğitim K.	0.9897	0.9793	1	1	0.9895
	Test K.	0.9904	0.9807	1	1	0.9902

Tablo 5. Orijinal ve zenginleştirilmiş veri kümeleri üzerinde Lojistik Regresyon sınıflandırıcısı kullanılarak elde edilen performans ölçütleri

Lojistik Regresyon Sınıflandırıcısı		Doğruluk Oranı	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F Ölçütü
Orijinal Veri Kümesi	Eğitim K.	1	1	1	1	1
	Test K.	0.9666	0.9354	0.9807	1	0.9666
Zenginleştirilmiş Veri Kümesi	Eğitim K.	1	0	1	1	1
	Test K.	0.9904	0.9807	1	1	0.9902

Tablo 6. Orijinal ve zenginleştirilmiş veri kümeleri üzerinde DVM sınıflandırıcısı kullanılarak elde edilen performans ölçütleri

DVM Sınıflandırıcısı		Doğruluk Oranı	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F Ölçütü
Orijinal Veri Kümesi	Eğitim K.	1	1	1	1	1
	Test K.	0.9666	0.9354	0.9807	1	0.9666
Zenginleştirilmiş Veri Kümesi	Eğitim K.	1	1	1	1	1
	Test K.	0.9904	0.9807	1	1	0.9902

Tablo 1-6'da verilen eğitim sonuçları kapsamında Boşanma Öngörü Veri Kümesi dinamiğinde zenginleştirilen veri kümesi üzerinde makine öğrenmesi sınıflandırıcıları kullanılarak ulaşılan performans kriterleri değerlendirilmiştir. Bu kriterler doğrultusunda doğruluk oranı, iki ayrı boşanma tercihi için yapılan doğru tahminlerin tüm tahminlere oranını ifade etmektedir. Duyarlılık, boşanma durumuna ilişkin olumlu tercihler için gerçek çıktı değerleri ile bilgisayar destekli sistemler tarafından yapılan ortak tahminlerin tüm tahminlere oranını ifade etmektedir. Özgüllük, boşanma durumuna ilişkin olumsuz tercihler için gerçek çıktı değerleri ile bilgisayar

destekli sistemler tarafından yapılan ortak tahminlerin tüm tahminlere oranını ifade etmektedir. Kesinlik, iki ayrı boşanma tercihi için gerçekleştirilen tahminlerin ayırt etme gücünü ifade etmektedir. F Ölçütü, kesinlik ve duyarlılık değerlerinin harmonik ortalamasıdır. Uç değerlerin dikkate alınmasını sağlar. Bu performans ölçütlerine ilişkin matematiksel ifadeler, denklem 1-5'te verilmiştir [21].

$$\text{Doğruluk Oranı} = (\text{DP} + \text{DN}) / (\text{DP} + \text{YP} + \text{DN} + \text{YN}) \quad (1)$$

$$\text{Duyarlılık} = (\text{DP}) / (\text{DP} + \text{YN}) \quad (2)$$

$$\text{Özgüllük} = (\text{DN}) / (\text{DN} + \text{YP}) \quad (3)$$

$$\text{Kesinlik} = (\text{DP}) / (\text{DP} + \text{YP}) \quad (4)$$

$$\text{F Ölçütü} = (2 * \text{kesinlik} * \text{duyarlılık}) / (\text{kesinlik} + \text{duyarlılık}) \quad (5)$$

Doğru Pozitif (DP), Doğru Negatif (DN), Yanlış Pozitif (YP) ve Yanlış Negatif (YN) ölçütleri kullanılarak değerlendirilen Doğruluk Oranı, Duyarlılık, Özgüllük, Kesinlik ve F Ölçütü kriterlerinin %100 ya da %100'e yakın bir sonuç üretmesi önerilen yaklaşımın başarısını gösterir. Bu doğrultuda Tablo 1-6 incelendiğinde genetik algoritma temelli sentetik veri üretme yaklaşımı ile oluşturulan zenginleştirilmiş veri kümesinin sırasıyla Naive Bayes, Karar Ağacı, Rastgele Orman, K-Nearest Neighbors (KNN), Lojistik Regresyon ve Destek Vektör Makinesi (DVM) sınıflandırıcıları vasıtasıyla ulaşılan sonuçları üzerinde bir iyileştirme sağladığı görülmektedir. Zenginleştirilen veri kümesi üzerinde maksimum duyarlılık ölçütü, Destek Vektör Makinesi sınıflandırıcısı ile %100 olarak elde edilmiştir. Aslında sınıflandırma performansı veri kümesinin veri sayısı ile ilişkilidir. Çünkü orijinal veri kümesinin dinamiğinde artan veri sayısı ile orantılı olarak benzer ilişkiler, benzer desenler ve benzer çıkarımlar daha güçlü bir şekilde öğrenilmiştir. Bunun sonucunda da eğitim başarısı iyileştirilmiştir ve daha kararlı ve istikrarlı çıkarımlar yapılmıştır. Aksı durumun gerçekleşme ihtimali performans başarısında bir azalma eğilimi göstereceği için önerilen sentetik veri üretme yaklaşımının literatüre katkı sağlaması hedeflenmektedir.

4. Sonuç

Veri, yapay zeka temelli çalışmalarda kritik bir öneme sahiptir. Amaca uygun çıktıların üretilmesinde, modelin başarılı bir şekilde eğitilmesinde, yapay zeka çözümlerinin hayatın içerisine dahil edilmesinde, sorunlara verimli çözüm noktaları oluşturulmasında ve düşük maliyet sunan bir karar destek sisteminin inşa edilmesinde büyük bir potansiyel barındırmaktadır. Fakat yetersiz veri erişimi, yasal düzenlemeler, etik kurallar, gizlilik prosedürleri, mahremiyet, veri paylaşım kısıtı ve maliyet; veriye ulaşmanın önündeki engellerdir. Bununla birlikte sentetik veri üretme yaklaşımına ilişkin standart bir çerçeve de yoktur. Fakat yeni ve güncel yaklaşımların geliştirilmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Bu çalışmada genetik algoritma temelli yeni bir sentetik veri üretme yaklaşımı geliştirilmiştir. Önerilen sentetik veri üretme yaklaşımı kullanılarak orijinal veri kümesinin dinamiğinde zenginleştirilen veri kümesi üzerinde 6 farklı makine öğrenme sınıflandırıcısı vasıtasıyla önerilen yaklaşımın başarısı değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda zenginleştirilen veri kümesi üzerinde maksimum duyarlılık ölçütü, Destek Vektör Makinesi sınıflandırıcısı ile %100 olarak elde edilmiştir. Bu durum veri sayısının artarak bir doyum noktasına ulaşması sonucunda veriler arasındaki ilişki ve çıkarımın artmasına ve gerçekleştirilen sınıflandırma işlemi sonucunda performansın iyileştirilmesine işaret etmektedir. Çünkü yeterli veri sayısı, yapay zeka tabanlı yöntemlerin potansiyelini ortaya çıkarır ve endüstriyel inovasyonun sınırlarını zorlar.

Gelecekte, çok yönlü genetik operasyona sahip olan genetik algoritmanın sahip olduğu çeşitlilikten ilham alarak sürekli verilerden oluşan veri kümesi örnekleri için de çalışmanın genişletilmesi planlanmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Mavrogenis AF, Scarlat MM. Artificial intelligence publications: synthetic data, patients, and papers, *Int Orthop* 2023; 47:1395–1396.
- [2] Hashimoto DA, Ward TM, Meireles OR. The Role of Artificial Intelligence in Surgery. *Adv. Surg* 2020; 54:89–101.
- [3] Shah S, Gandhi D, Kothari J. Machine learning based Synthetic Data Generation using Iterative Regression Analysis. *Proc. 4th Int. Conf. Electron. Commun. Aerosp. Technol ICECA 2020*; pp. 1093–1100.
- [4] Lu Y, Shen M, Wang H, Wei W. Machine Learning for Synthetic Data Generation : A Review. *arXiv* 2021; 14(8): 1–18.
- [5] Pacheco F. et al. Generation of Synthetic Data for the Analysis of the Physical Stability of Tailing Dams through Artificial Intelligence. *Mathematics* 2022; 10(23):1–15.
- [6] Belke M, Blanke P, Storms S, Herfs W. Object pose estimation in industrial environments using a synthetic data generation pipeline, *Proc. - 2022 6th IEEE Int Conf Robot Comput IRC 2022*; pp. 435–438.
- [7] Ucuozova E, Kurtulmaz E, Gokalp Yavuz F, Karacan H, Sahin NE. Synthetic CANBUS data generation for driver behavior modeling. *29th IEEE Conf. Signal Process. Commun Appl Proc SIU 2021*; pp. 28–31.
- [8] Nicholson AD, Peplow DE, Ghawaly JM, Willis MJ, Archer DE. Generation of Synthetic Data for a Radiation Detection Algorithm Competition. *IEEE Trans. Nucl. Sci* 2020; 67(8): 1968–1975.
- [9] Pérez-Porras FJ, Triviño-Tarradas P, Cima-Rodríguez C, Meroño-De-Iarriva JE, García-Ferrer A, Mesas-Carrascosa FJ. Machine learning methods and synthetic data generation to predict large wildfires. *Sensors* 2021; 21:1–19.
- [10] Mahmood A, Bennamoun M, An S, Sohel F, Boussaid F, Hovey R, Kendrick G. Automatic detection of western rock lobster using synthetic data. *ICES Journal of Marine Science* 2020; 77(4): 1308–1317.
- [11] Nabati N, Navidan H, Shahbazian R, Ghorashi SA, Windridge D. Using Synthetic Data to Enhance the Accuracy of Fingerprint-Based Localization: A Deep Learning Approach. *IEEE Sensors Lett* 2020; 4(4):1–4.
- [12] Khan AR, Khan S, Harouni M, Abbasi R, Iqbal S, Mehmood Z. Brain tumor segmentation using K-means clustering and deep learning with synthetic data augmentation for classification. *Microsc. Res. Tech.* 2021; 84(7): 1389–1399.
- [13] Douzas G, Lechleitner M, Bacao F. Improving the quality of predictive models in small data GSDOT: A new algorithm for generating synthetic data. *PLoS One* 2022; 17(4):1–15.
- [14] Arab N, Nemmour H, Chibani Y. A new synthetic feature generation scheme based on artificial immune systems for robust offline signature verification. *Expert Syst Appl* 2023; 213.
- [15] İmak A, Doğan G, Şengür A, and Ergen B. Asma Yaprağı Türünün Sınıflandırılması için Doğal ve Sentetik Verilerden Derin Öznitelikler Çıkarma, Birleştirme ve Seçmeye Dayalı Yeni Bir Yöntem. *Int J Pure Appl Sci* 2022; 9(1): 46–55.
- [16] UCI (the University of California Irvine Machine Learning Repository), <https://archive.ics.uci.edu/>.
- [17] Turgun FS, Zorlu H. Parçacık Filtresinin Optimizasyonu için Genetik Algoritma Tabanlı Yeni Bir Yaklaşım/A New Approach Based on Genetic Algorithm for Optimization of Particle Filter. *Bozok J Eng Archit* 2023; 2(1):24–33.
- [18] Hassanat A, Almohammadi K, Alkafaween E, Abunawas E, Hammouri A, Prasath VBS. Choosing mutation and crossover ratios for genetic algorithms-a review with a new dynamic approach. *Information* 2019; 10:1–36.
- [19] Altay A. Genetik Algoritma ve Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2007.
- [20] Zhou J, Huang S, Zhou T, Armaghani DJ, Qiu Y, Employing a genetic algorithm and grey wolf optimizer for optimizing RF models to evaluate soil liquefaction potential. *Artificial Intelligence Review* 2022; 55: 5673-5705.
- [21] Akalın F, Sayısal Haritalama Teknikleri Kullanılarak DNA Dizilimleri Üzerinden Lösemi Hastalığının Temel Türlerinin Yapay Zeka Tabanlı Algoritmalar ile Sınıflandırılması, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2023.

Akıllı Şehirler ve Trafik Güvenliği için Sürüş Kontrolü Uygulaması

Yıldırım YİĞİT^{1*}, Murat KARABATAK²

¹ Ahlat Meslek Yüksekokulu, Bitlis Eren Üniversitesi, BİTLİS, Türkiye

² Yazılım Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ yildirayyigit@gmail.com, ² mkarabatak@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 21/02/2023;

Kabul/Accepted: 11/08/2023)

Öz: Dünya nüfusu her geçen gün daha hızlı bir şekilde artmakta ve kırsal kesimdeki insanların kentlere olan göçleri de buna paralel devam etmektedir. Kentlerdeki bu hızlı nüfus artışı beraberinde çözülmesi gereken ulaşım, barınma, eğitim gibi birçok problemi de beraberinde getirmektedir. Kentlerdeki trafik ve ulaşım problemi bu problemlerin en başında gelmektedir. Trafikte yaşanan problemler eğitim, ekonomi, sağlık, çevre kirliliği gibi birçok yaşam alanını da doğrudan ya da dolaylı olarak etkilemektedir. Her geçen gün artan trafikten dolayı insanların trafikte geçirdiği süre artmakta, trafik yoğunluğuna bağlı olarak sürücülerin hızlanma ve yavaşlamalarında çok büyük bir değişkenlikler olabilmektedir. Ayrıca, yapılan araştırmalarda trafik yoğunluğunun az olduğu saatlerde aşırı hızlanma ve yavaşlamaya bağlı kazaların daha fazla olduğu görülmektedir. Araç sürücülerinin trafikte konforlu ve güvenli sürüş yapabilmeleri, beraberinde birçok avantaj getirebilmektedir. Sürüş güvenliğinden yakıt tüketimine, çevre kirliliğinden konfora kadar birçok parametre sürüş kontrolü ile sağlanabilmektedir. Literatürde yapılan çalışmaların büyük bir kısmının simülasyon ortamında yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmada, trafik ışıklarına bağlı olarak sürüş kontrolünün sağlayacağı avantajlara yönelik deneysel çalışmalar yapılmış ve sonuçları tartışılmıştır. Aynı zamanda, bu sürüş kontrolünü sağlayacak bir sistem de çalışmada önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: Trafik Güvenliği, Yakıt Tüketimi, Sürücü Davranışı, Emisyon Salınımı.

Driving Control Application for Smart Cities and Traffic Safety

Abstract: With the rapid increase in the world population daily, the migration of people from rural areas to cities is also increasing rapidly. This rapid population growth in cities brings many problems such as transportation, accommodation and education that need to be solved. Traffic and transportation problems in cities are at the forefront of these problems. Due to the increasing traffic day by day, the time people spend in traffic is increasing, and depending on the traffic density, there can be great variability in the acceleration and deceleration of the drivers. In addition, studies have shown that accidents due to excessive acceleration and deceleration are more common at times when traffic density is low. The fact that vehicle drivers can drive comfortably and safely in traffic can bring many advantages. Many parameters, from driving safety to fuel consumption, from environmental pollution to comfort, can be provided by driving control. It is seen that most of the studies in the literature are done in the simulation environment. In this study, experimental studies were carried out on the advantages of driving control depending on traffic lights and the results were discussed. At the same time, a system that will provide this driving control is also suggested in the study.

Key words: Traffic Safety, Fuel Consumption, Driver Behavior, Emission release.

1. Giriş

Büyük şehirlerde hızlı nüfus artışı her geçen gün daha da karmaşık hale gelen trafik sorununu da beraberinde getirmektedir. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) Mayıs 2022 yılı motorlu kara taşıtları bültenine göre Türkiye’de toplam 25 milyon 704 bin 749 adet motorlu taşıt bulunmaktadır [1]. Artan araç sayısı hem trafik yoğunluğunu hem de emisyon gazı salınımını arttırmaktadır. Artan trafik problemini çözmek için her geçen gün yeni yöntemler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Buna rağmen insanların trafikte geçirdiği süre her geçen gün artmaktadır. Ayrıca trafiği düzenlemek için yapılan çalışmalara rağmen her gün yaşanan trafik kazalarında can ve mal kaybı meydana gelmektedir. Türkiye karayolu ağında 2021 yılında toplam 1 milyon 186 bin 353 adet trafik kazası meydana geldi. Bu kazaların 998 bin 390 adedi maddi hasarlı, 187 bin 963 adedi ise ölümlü yaralanmalı trafik kazasıdır. Yıl içerisinde meydana gelen ölümlü yaralanmalı trafik kazalarının %78,6’sı yerleşim yeri içinde %21,4’ü ise yerleşim yeri dışında meydana gelmiştir [2]. Türkiye’de 2021 yılında ölümlü yaralanmalı trafik kazasına neden olan toplam 224 bin 418 kusura bakıldığında kusurların %87,1’inin sürücü, %8,2’sinin yaya, %2,6’sının taşıt, %1,8’inin yolcu ve %0,4’ünün yol kaynaklı olduğu görülmektedir. Şehir içi ulaşımında trafik yoğunluğu eğer çok ise hızlanma ve yavaşlamada çok büyük bir değişiklik olmamaktadır. Yapılan araştırmalarda trafik yoğunluğunun az olduğu

* Sorumlu yazar: yildirayyigit@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-8953-9405, ² 0000-0002-6719-7421

saatlerde aşırı hızlanma ve yavaşlamaya bağlı kazaların daha fazla olduğu görülmektedir. Aynı zamanda araçların trafikte bekleme süresinin artmasından dolayı araçların yakıt tüketimi de artış göstermektedir. Yakıt tüketimine etki eden bir diğer etken ise sürücünün araç kullanma alışkanlıklarıdır. Büyük şehirlerdeki trafik problemini çözmeye yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar aynı zamanda yakıt tüketimini de azaltmayı hedeflemektedir.

R. D. Pace, C. Fiori, L. Pariota ve F. Storani 2020 yılında yaptıkları çalışmalarında bağlantılı ve otonom araçların (CAV'ler) mevcudiyetinde kentsel ağ trafik kontrolü için iki alt bölümden oluşan entegre bir modelleme geliştirmeyi amaçladıklarını ifade etmişlerdir [3]. Modellemenin birinci bölümünü otonom olmayan ve donanım desteği olmayan araçlar için GLOSA sistemini modellerken ikinci bölümünü otonom araçlar için hız kontrolünü amaçlamaktadır. Yapılan modelleme Napoli şehrinde test edilmiştir. Yaptıkları çalışmanın sonucu olarak üç ana husus ortaya çıkmıştır: ilki TC(traffic control) stratejisiyle ilgilidir ve özellikle çok kriterli optimizasyonun tek kriterli yaklaşımdan daha iyi performans gösterdiği test edilmiştir; ikincisi, TCMULTI(the multi-criteria traffic control) ve S-GLOSA(speed guidance optimisation) arasındaki karşılaştırmaya atıfta bulunur, bu nedenle S-GLOSA'nın TCMULTI yönteminden daha kötü performanslar sağladığı; son olarak, TCMULTI ve S-GLOSA arasındaki kombinasyon, beklendiği gibi en iyi sonuçları sağladığını belirtmişlerdir.

C. Guardiola, B. Pla, V. Pandey ve R. Burke 2019 yılında yaptıkları çalışmalarında dizel hafif hizmet aracı sürücüsünün iki trafik ışığı arasındaki 1 km'lik belirli bir rotayı kat etmeye çalışırken karşılaşabileceği üç farklı senaryoyu karşılaştırarak, trafik ışığı bilgilerinin kullanılabilirliğinin yakıt tüketimi ve emisyonlar açısından etkisini ele almışlardır [4]. İlk senaryoda sürücü trafik ışığının durumu hakkında bilgi sahibi değildir. İkinci senaryoda sürücü trafik ışığının durumu hakkında bilgi sahibidir fakat hesaplama ve modelleme yapamaz. Üçüncü senaryoda ise sürücü trafik ışığının durumu hakkında bilgiye sahiptir, hesaplama ve modelleme yapabilmektedir. Bu üç senaryoya göre yaptıkları çalışmayı Euro 5 Dizel araca takip deney yapmışlardır. Yaptıkları deney sonucunda yakıt tüketimi ve NOx emisyonları için %7,5 – 12 ve %13 – 32 azalma olduğunu ifade etmişlerdir.

N. Mellegård ve F. Reichenberg 2020 yılında Connecting Europe Facility (CEF) tarafından ortak finanse edilen Nordic Way 2 projesi kapsamında yaptıkları çalışmalarında 2006 – 2019 yılları arasında trafik kontrolü hakkında yapılan çalışmaların tematik analizlerini kullanarak oluşturulan bir şemaya göre sınıflandırmışlardır [5]. Yapılan çalışmada incelenen yayınların genelde etkin trafik ışıklarıyla tek bir kavşak için optimum hız hesaplamak için yerleşik bir algoritma önerdiklerini ve etkilerini simülasyonda değerlendirdiklerini ifade etmişlerdir. Ayrıca incelenen çalışmalarda özellikle yakıt tüketimi ve seyahat süreleri için olumlu sonuçların bildirilmesine rağmen etki büyüklüğü anlamında çeşitli farklılıklar olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmada donanımlı araçlara odaklanıldığı ve diğer trafik kullanıcılarının nasıl etkilendiğinin dikkate alınmadığını öne sürmüşlerdir.

T. Cabannes, J. Li, F. Wu, H. Dong ve A. M. Bayen 2020 yılında yaptıkları çalışmalarında mevcut Markovian trafik atama çerçevesini yeni trafik kontrol stratejilerine uyguladıklarını ifade etmişlerdir [6]. İlk önce klasik Markovian statik atamasını yapmışlar daha sonra da SUMO simülasyon programını kullanarak dinamik trafik atamasına geçiş yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalarında kavşaklarda yönlendirme davranışını öğretmeye ve buna göre trafik akışını düzenlemeye çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmanın Markovian zincir teorisinin daha büyük ağlara ölçeklenme yeteneğini desteklediğinden umut verici olduğunu belirtmişlerdir.

C. Boz ve F. Gülgen 2018 yılında yaptıkları çalışmalarında Yıldız Teknik Üniversitesi Davut paşa Kampüsü'nün ana giriş ve bağlantılarında yapılan kavşak düzenlemesinin sonuçları irdelemişlerdir [7]. Çalışmaya konu olan bölgenin düzenlemeden sonraki etkililiği incelenmiştir. Çalışmada SUMO simülasyon programı kullanılmıştır. Çalışma alanında yetkili kurumlar tarafından yapılan çalışmanın yoğun olmayan saatlerde bir farklılık yaratmadığı yoğun olan saatlerde ise %71,8 oranında azaltma yaptığının gözlemlendiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca yaptıkları bu çalışmada alanın devamında bulunan kavşaklara oluşturulan trafik yoğunluğunun geri trafik oluşturma etkisini ele almadıklarını belirtmişlerdir.

H. Anany 2019 yılında yaptığı tez çalışmasında akıllı bir şehirde konvansiyonel ve otomatik araçlar için hız tavsiyeli trafik sinyal sisteminin etkinliğini incelemiştir [8]. Yapılan tez çalışmasında GLOSA algoritmasının etkinliği ölçülmeye çalışılmıştır. Ölçme yapılırken GLOSA algoritması temel düzeyde tüm araçların uyduğu varsayıldığını ifade etmiştir. Ayrıca otonom araç parametrelerinin geliştirilmesinin GLOSA algoritmasının da küçük iyileştirilmeler ile daha etkin bir şekilde çalışabileceğini ifade etmiştir. Araçların GLOSA sistemine uyumlu hale getirildiğinde bekleme sürelerinde %35 ile %70 arasında bir azalma olabileceği ifade edilmiştir.

C. Colombaroni, G. Fusco ve N. Isaenko yaptıkları çalışmalarında gerçek zamanlı olarak trafikte yol öncelik kurallarını çevrim içi olarak aktifleştirebilen aynı zamanda diğer araçlar için yeşil ışık durumuna göre hız önerisinde bulunabilen model tabanlı bir optimizasyon prosedürü sunduklarını ifade etmişlerdir [9]. Bu çalışmada trafik ışıklarında geçiş önceliklerinin trafik akışını nasıl etkilediğini problem olarak ele almışlardır. Işıklara geçiş önceliği kuralları ekleyerek sistemi test etmişlerdir. Bu yöntemi İtalya'nın Roma şehrinde tramvay yolunun da

bulduğu bir bölgede test etmişlerdir. Test aşamasında simülasyon programı kullanmışlardır. Kullandıkları modelde trafik akışındaki kuyruk uzunluğu trafik ışıklarının faz sürelerini de dikkate alarak varış sürelerini hesaplamışlardır. Kuyruğun tamamı temizleninceye kadar geçen süreyi de ortalama bekleme sürelerine eklemişlerdir. Yaptıkları çalışmalarında elde ettikleri sonuçlar ışığında ışık önceliğini trafik kontrolünde kullanmanın bir dezavantaj oluşturmadığını, aksine avantaj olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Yine çalışmalarında araç sürücülerine yeşil ışıkta geçmeleri için bilgilendirmenin yapılmasının da bekleme sürelerinde iyileştirmeye neden olduğunu belirtmişlerdir.

K. Thorin 2017 yılında yaptığı tez çalışmasında ağır yük araçlarının yakıt tüketimini ve yolculuk süresini azaltmak için bir yaklaşım önermiştir [10]. Tez çalışmasında iki durum ele alınmıştır. Birinci durum trafik ışığı bilgisinin araç tarafından bilinip ona göre hız önerisinin yapıldığı durum, ikinci durum ise trafik ışığı bilgisinin sürücünün gözüyle görebildiği mesafeyle sınırlı olan durumdur. Tez çalışmasında deneysel olarak normal bir araçla tasarlanan modelin uygulandığı bir araç test edilmektedir. Yapılan deneysel çalışmanın sonucunda modeli kullanan aracın %50 oranında enerji tasarrufu yaptığı öne sürülmüştür.

Biao Xu, Xiaolong Chen, Keqiang Li, Manjiang Hu, Yougang Bian, Qianwen Yu ve Jianqiang Wang 2019 yılında yaptıkları çalışmalarında trafiği düzenlemek için GLOSA algoritmasını çoklu katmanlar şeklinde uygulayarak yeni bir yöntem önermişlerdir [11]. Önerdikleri yöntemde trafik ışıklarına verici eklemişlerdir. Araca eklenen alıcı sistem sayesinde trafik ışıklarının durumunu elde etmekte ve buna göre hız optimizasyonu yapmaktadırlar. GLOSA algoritmasından farklı olarak sadece bir sonraki ışığı değil birden fazla trafik ışığı elde ettiklerini ve buna göre hesaplama yaptıklarını ileri sürmektedirler. Yaptıkları çalışmalarında %26 yakıt tasarrufu yaptıklarını ve yolculukta %10,8 verimlilik elde ettiklerini ifade etmişlerdir.

2. Çalışmanın Amacı

Yapılan çalışmanın birden fazla amacı bulunmaktadır. Bunlardan ilki sürüş güvenliğini sağlamaktır. Yapılan araştırmalara göre trafik kazalarının trafik yoğunluğunun az olduğu saatlerde aşırı hızlanma ve yavaşlamaya bağlı kazaların daha fazla olduğu ifade edilmektedir. Yapılan çalışmayla bu tür kazaların önlenebileceği düşünülmektedir. Çalışmanın amaçlarından ikincisi sürüş konforunu artırmaktır. Yapılan çalışmada sürüş konforunun nasıl etkilendiği de detaylı olarak incelenmektedir. Amaçlardan üçüncüsü temiz şehirlerdir. Yapılan çalışmada trafikte salınan emisyon gazlarının azaltılması ve böylece daha temiz bir şehir hedeflenmektedir. Yapılan çalışmanın son hedefi ise yakıt tüketimini azaltarak hem bireysel hem de ulusal ekonomik katkı sağlamaktır.

3. Deneysel Çalışma

Her gün artan trafik problemleri, şehir yöneticilerinin çözmesi gereken en önemli temel problemlerden bir tanesidir. Ulaşımında yaşanan aksaklıkların üretimden eğitime, ekonomiden sosyal hayata kadar birçok alanda etkisi açıkça hissedilmektedir. Yaşanan trafik kazaları maddi ve manevi olarak insanlara birçok yük getirmektedir. Bu çalışmayla trafik problemlerine etki edebilecek bir yöntem önerilmektedir.

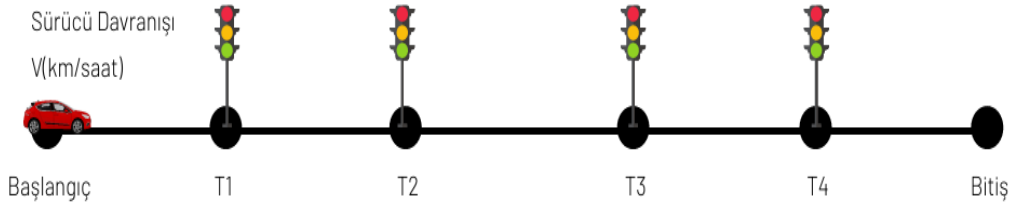
3.1 Deney ortamı

Deneysel çalışmalar Elazığ ile Malatya arasındaki 6 km'lik bir rota üzerinde yapılmıştır. Yapılan çalışmada kullanılan rotaya ait harita Şekil 1'de gösterilmektedir. Şekil 1'de gösterilen harita üzerinde işaretlenmiş kullanılacak olan rota üzerinde trafik yoğunluğu gündüz saatlerinde çok fazla olmakla birlikte akşam saatlerinde bu yoğunluk azalmaktadır. Bu nedenden dolayı belirtilen rota, çalışma güzergâhı olarak seçilmiştir. Çalışma için seçilen rota üzerinde 4 adet trafik ışığı bulunmaktadır. Bu trafik ışıklarına ait süreler ve kullanılan diğer parametreler Şekil 2' de gösterilmektedir.

Şekil 2'de "V" ile ifade edilen parametre deney yapılırken kullanılan araçların ortalama hızlarını ifade etmektedir. Sürücü davranışı olarak ifade edilen parametre ise sürücünün araç kullanırken göstermiş olduğu davranışlardır. Bu davranışlar, "agresif" ve "standart" olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. "Agresif" olarak sınıflandırılan davranış türü, ani hızlanma ve ani yavaşlamayı ifade etmektedir. "Standart" olarak sınıflandırılan davranış türü ise yavaş yavaş hızlanmayı ve yavaş yavaş fren yapmayı ifade etmektedir. T1, T2, T3 ve T4 ile belirtilen parametreler ise trafik ışıklarını ifade etmektedir. Deney ortamına ait parametreler ve değerleri Tablo 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Deneysel çalışmanın yapıldığı ortam.



Şekil 2. Deneysel çalışmada kullanılan parametreler.

Tablo 1. Deney ortamına ait parametreler.

Deney No	Ortalama Hız (Km/S)	1. Işık	Bekleme Süresi	2. Işık	Bekleme Süresi	3. Işık	Bekleme Süresi	4. Işık	Bekleme Süresi	Sürüş Tarzı
1	60	Yeşil	0 sn	Yeşil	0 sn	Yeşil	0 sn	Yeşil	0 sn	Standart
2	90	Yeşil	0 sn	Yeşil	0 sn	Yeşil	0 sn	Yeşil	0 sn	Standart
3	100	Kırmızı	60 sn	Kırmızı	60 sn	Kırmızı	60 sn	Kırmızı	60 sn	Agresif
4	90	Kırmızı	60 sn	Yeşil	0 sn	Kırmızı	60 sn	Yeşil	0 sn	Standart
5	90	Yeşil	0 sn	Kırmızı	60 sn	Yeşil	0 sn	Kırmızı	60 sn	Agresif
6	90	Kırmızı	45 sn	Kırmızı	30 sn	Kırmızı	30 sn	Kırmızı	15 sn	Standart

Tablo 1’de deneyde kullanılan araçların her bir trafik ışığındaki bekleme süreleri ve trafik ışıklarının renk durumları verilmektedir. Tablo 1’de belirtilen parametreler kullanılarak yapılacak deney çalışmalarında kullanılmak üzere 5 adet farklı özelliklere sahip araç kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan araçlar ve özellikleri Tablo 2’de gösterilmektedir. Çalışmada kullanılan araçların hepsini tek kişi kullanmıştır. Böylelikle sürücünden kaynaklı farklılıkların önüne geçilmeye çalışılmaktadır.

Tablo 2. Deney çalışmasında kullanılan araçlar.

Araç No	Yakıt Türü	Vites Türü	Motor Hacmi	Model Yılı
1	Benzin	Otomatik	1,2	2015
2	Benzin	Otomatik	1,4	2014
3	Benzin	Otomatik	1,4	2012
4	Benzin	Manuel	1,6	2012
5	Benzin	Manuel	1,0	2013

Çalışma boyunca araçlarda bulunan start / stop özelliği de devre dışı bırakılmıştır. Bu nedenden dolayı kullanılan araçlar ışıklarda bekledikleri süre boyunca da çalışmaya devam ettikleri için start / stop özelliği bulunmayan araçları da temsil etmektedir.

3.2 Elde edilen sonuçlar

Çalışmada kullanılan araçlar için CO₂ salınımı değerleri ve ortalama yakıt tüketimi değerleri Tablo 3'te gösterilmektedir. Tablo 3'te belirtilen değerler üretici firmaların araç kullanım kitapçıklarından elde edilmektedir [12-14].

Tablo 3. Araçların yakıt tüketimi ve emisyon değerleri ile ilgili kullanım kitapçıklarından elde edilen veriler [12 - 14].

Araç No	Şehir İçi Ortalama Yakıt Tüketimi L/100km	Şehir Dışı Ortalama Yakıt Tüketimi L/100km	CO ₂ Gazı Salınımı g/km
1	7,3	4,9	134
2	7,7	5,0	138
3	8,9	5,2	154
4	8,2	6,0	
5	5,9	3,7	105

Yapılan deneysel çalışmada elde edilen ortalama yakıt tüketimi verisi araçların yol bilgisayarlarından elde edilmiştir. Araçların harcamış olduğu yakıt miktarı denklem 1'de verilen formül kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Yakıt Miktarı = (Ortalama Yakıt Tüketimi/100) * Alınan Toplam Yol \quad (1)$$

Yapılan çalışma esnasında araçların kullandığı yakıtın litre fiyatı 1.589 USD olarak tespit edilmiştir. Çalışma boyunca araçların harcamış olduğu yakıtların toplam maliyeti denklem 2'de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Toplam Tutar = Tüketilen Yakıt * Litre Fiyatı \quad (2)$$

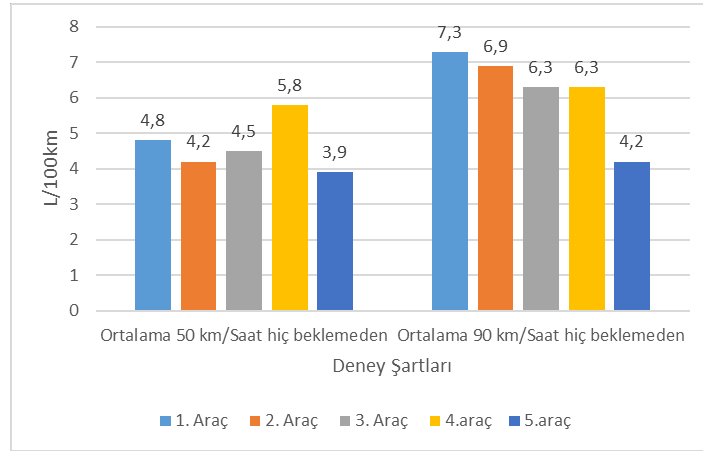
Bir litre benzin 750 gramdır ve %87 oranında karbon içerdiğinden dolayı 652 gr karbon içermektedir. Bir litre benzinde bulunan karbon miktarını yakmak için 1740 gr oksijen gereklidir. Sonuç olarak 1 litre benzin yakma işlemine tabi tutulduğunda 652+1740=2392 gr karbondioksit salınımı gerçekleştiği elde edilmektedir. Tablo 4'te ifade edilen CO₂ gazı salınımı denklem 3'te ifade edilen formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$CO_2 \text{ salınımı } g/km = (Ortalama yakıt Tüketimi * Araç CO_2 \text{ Salınımı}(g/l)/100) * Alınan Yol \quad (3)$$

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen değerler Tablo 4'te gösterilmektedir. Tablo 4'te verilen değerler incelendiğinde, üreticilerden temin edilen araç kitapçıklarından elde edilen Tablo 3'teki değerlerden farklı sonuçların çıktığı açıkça görülmektedir. Bu farklılıkların oluşmasındaki temel etkenler sürücü davranışları, trafik yoğunluğu, mevsimsel şartlar ve araç hızı olarak belirlenmektedir. Tablo 4'ten elde edilen veriler kullanılarak Şekil 3'te verilen grafik elde edilmiştir.

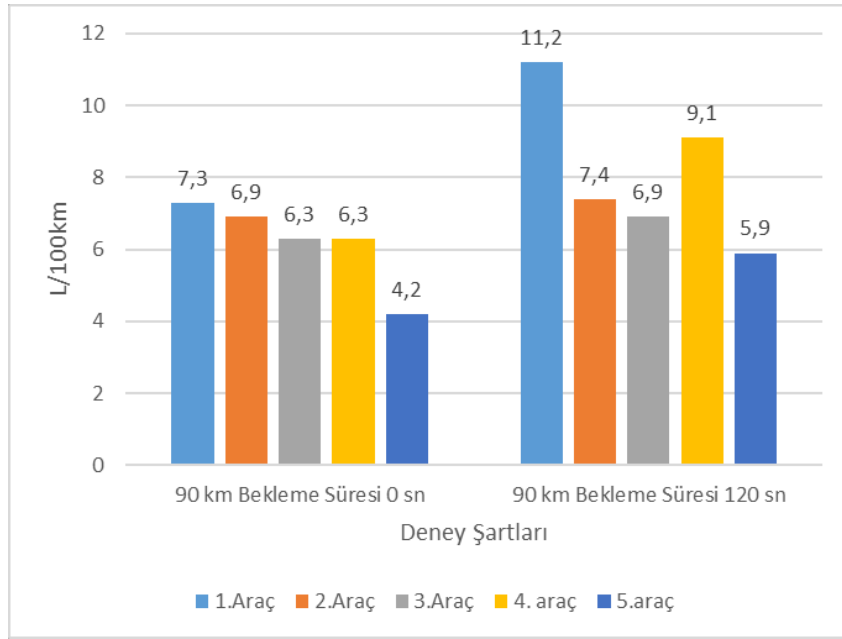
Tablo 4. Deney çalışmada elde edilen değerler.

Araç No	Deney No	Yakıt Tüketimi (litre/100km)	Tüketilen Yakıt (Litre)	Tutar (USD)	Toplam CO ₂ Gazı Salınımı(gr)
1	1	4,8	0,29	0,45	683
	2	7,3	0,44	0,69	1042
	3	14,0	0,84	1,33	2009
	4	10,0	0,60	0,95	1430
	5	11,9	0,72	1,14	1714
	6	11,2	0,67	1,07	1608
2	1	4,2	0,25	0,40	608
	2	6,9	0,41	0,65	984
	3	14,3	0,86	1,37	2058
	4	8,9	0,53	0,85	1279
	5	12,8	0,77	1,22	1835
	6	7,4	0,45	0,71	1065
3	1	4,5	0,27	0,43	652
	2	6,3	0,38	0,60	900
	3	11,0	0,66	1,05	1577
	4	8,4	0,50	0,80	1200
	5	8,8	0,53	0,84	1264
	6	6,9	0,41	0,66	987
4	1	5,8	0,35	0,55	832
	2	6,3	0,38	0,60	904
	3	12,5	0,75	1,19	1794
	4	8,3	0,50	0,79	1191
	5	9,5	0,57	0,91	1363
	6	9,1	0,55	0,87	1306
5	1	3,9	0,23	0,37	560
	2	4,2	0,25	0,40	603
	3	8,9	0,53	0,85	1277
	4	5,1	0,31	0,49	732
	5	6,9	0,41	0,66	990
	6	5,9	0,35	0,56	847

**Şekil 3.** Sürüş tarzı standart olarak yapılan deney şartlarına göre yakıt tüketimi.

Şekil 3'teki grafik incelendiğinde araçların yakıt tüketimine ortalama hızın etkisi görülmektedir. Ortalama hızın ne kadar etkili olduğunu belirleyebilmek için ortalama hız dışındaki diğer parametreler değiştirilmemektedir. Grafik analiz edildiğinde ortalama hız ne kadar artarsa aracın yakıt tüketiminin de o oranda arttığı açıkça görülmektedir.

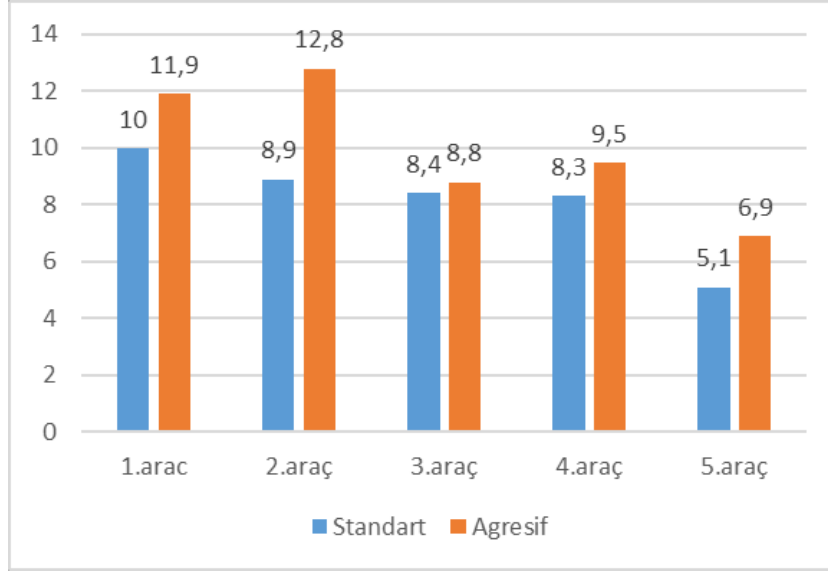
Şekil 4'te verilen grafikte sürücü davranışlarından standart olarak belirlenmiş sürüş tarzıyla yapılan araç kullanımlarında trafik ışıklarındaki bekleme sürelerinin yakıt tüketimine olan etkisi incelenmektedir. Trafik ışıklarındaki bekleme sürelerinin yakıt tüketimine olan etkisini karşılaştırabilmek için diğer deney parametreleri değiştirilmemektedir. Şekil 4'te verilen grafikteki veriler analiz edildiğinde, araçların trafik ışıklarındaki bekleme sürelerinin yakıt tüketimindeki etki oranı %50'lere kadar çıkmaktadır. Aleksandar Stevanovic, Jelka Stevanovic ve Cameron Kergaye yaptıkları çalışmalarında simülasyon ortamında yakıt tüketimine etkisini %0,5 olarak bulduklarını ifade etmektedirler [12]. Yapılan çalışma göstermiştir ki bu oran çok daha yüksek olmaktadır.



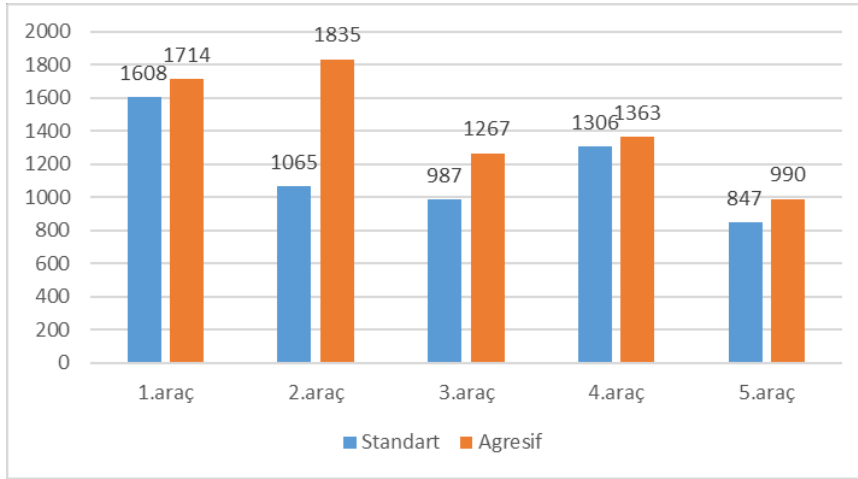
Şekil 4. Bekleme sürelerine göre yakıt tüketimi.

Şekil 5'te verilen grafik, sürücü davranışının ortalama yakıt tüketimine olan etkisini göstermektedir. Çalışmaya ait diğer deney parametreleri ise ortalama hızın 90 km/saat ve bekleme süresinin 120 sn olarak belirlenmiştir. Şekil 5'te verilen grafik incelendiğinde, trafikteki sürücü davranışının aracın ortalama yakıt tüketimine olan etkisinin azımsanmayacak kadar önemli olduğu görülmektedir. Sürücü davranışı ile birlikte trafik ışıklarındaki bekleme süresi ve ortalama hız faktörü de ele alındığında yakıt tüketimindeki tasarruf yüksek oranda artmaktadır. Şekil 6'da verilen grafikte trafikte sürücü davranışlarının çevre kirliliğine olan etkisi gösterilmektedir.

Şekil 6'da verilen grafik incelendiğinde 6 km'lik bir rotada trafikteki sürücü davranışlarının çevre kirliliğini etkilediği açıkça görülmektedir. Trafikte geçirilen sürenin artması ve rotanın daha uzun olması, çevre kirliliğine olan bu etkiyi daha da artıracak kaçınılmazdır. Günümüzde küresel problemlerin başında iklim krizinin ilk sıralarda olduğu göz önünde bulundurulduğunda trafikteki bu problemi çözmek çevre kirliliğinin azalmasında önemli bir paya sahip olacaktır.



Şekil 5. Sürücü davranışının yakıt tüketimine etkisi.



Şekil 6. Sürücü davranışlarının çevre kirliliğine etkisi.

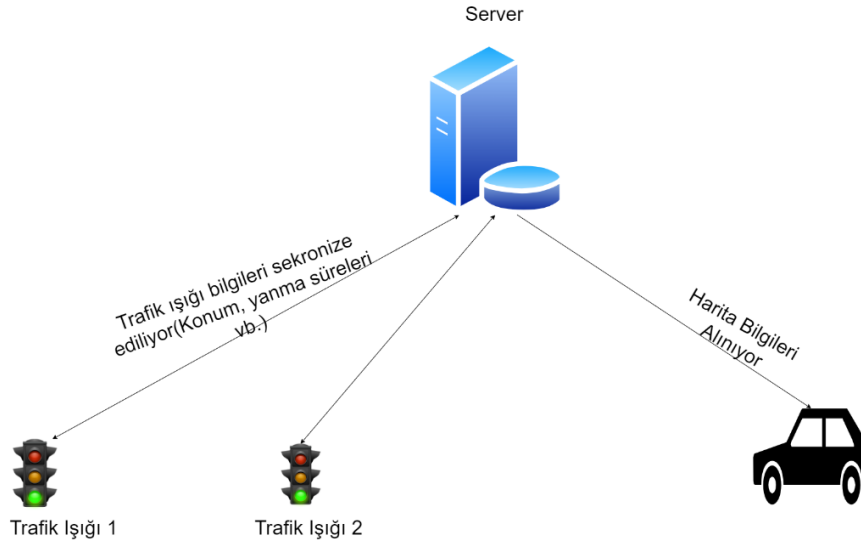
3.3. Sonuçların değerlendirilmesi

Yapılan deneysel çalışmada elde edilen veriler incelendiğinde trafikteki bekleme süreleri, araçların ortalama hızları ve sürücülerin araç kullanırken gösterdikleri davranışlar önemli etkenlerdir. Bu etkenler öncelikle ekonomi alanında büyük bir etkiye sahip olmaktadır. Hem bireysel olarak hem de ulusal ekonomiye ciddi etkileri bulunmaktadır. İkinci olarak etkilediği alan ise çevre kirliliği olarak karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde, küresel iklim krizinde emisyon gazı salınımlarının daha da önemli olduğu bilinmektedir. Her gün trafikte salınan emisyon gazlarını azaltmak için taşıt üreticileri, daha çevreci motorlar üretmeye çalışmaktadır. Fakat var olan araçlar bu teknolojilerle üretilmediğinden dolayı var olan araçlar için yapılan bu tür çalışmalar önem arz etmektedir. Bu çalışma ile sadece sürücü davranışlarının değiştirilebildiğinde nasıl etki oluşacağı açıkça görülmektedir. Yapılan çalışmalarda sürücü davranışlarının sürüş güvenliğini ve seyahat konforunu nasıl etkilediği de açıkça belirlenmektedir. Daha güvenli ve konforlu bir sürüş için sürücü davranışlarının mutlaka kontrol edilebilmesi gerekmektedir. Sürücü davranışlarını kontrol edebilmenin ilk şartı da sürücüyü bilgilendirmektir. Türkiye’de bu amaçla trafik ışıklarında bir sonraki ışığa kalan süre saniye olarak gösterme uygulamasına geçilmiştir. Daha sonra

sürücülerin trafik ışığının yeşilden kırmızıya geçmek için az bir sürenin kaldığını gördükleri zaman daha çok hızlanmaya çalıştıkları, bu sebepten dolayı daha çok kazalara sebep olduğu gözlenmiştir. Bu durum göz önünde bulundurularak birçok bölgede bu uygulamadan vazgeçilmiştir. Bu nedenle 4. Bölümde yeni bir model önerilmektedir.

4. Öneriler

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen veriler göstermiştir ki sürücülerin trafikteki davranışları düzenlendiğinde sürüş güvenliği ve seyahat konforu artmaktadır. Aynı zamanda sürücülerin davranışlarının düzenlenmesi yakıt tüketimini ve emisyon gazı salınımını da önemli bir oranda azalmaktadır. Sürücülerin trafikteki davranışlarını düzenlemek için önerilen model Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Önerilen model.

Şekil 7'de önerilen modelde, sürücünün rotasında bulunan trafik ışığına ait konum bilgisi ve bir sonraki duruma geçiş süreleri gibi bilgileri şehir trafik yönetiminden elde edilerek bulut depolama ortamında depolanmaktadır. Şehirlerde bulunan trafik ışıkları sistem üzerinden belirli parametrelerle güncellendiğinden bu bilgiler bulut ortamına kaydedildikten sonra ışık bilgileri harita üzerinde düğüm olarak belirlenmiş olan trafik ışıklarında belirli aralıklarla değerleri güncellenecektir. Araç belirli aralıklarla güzergâhında bulunan ışıklara ait bilgileri oluşturulan haritalar aracılığıyla ve kendi konum bilgisini GPS yardımıyla almaktadır. Daha sonra araç bilgisayarından hız bilgileri alınmaktadır. Araç bilgisayarından aldığı bilgileri ve harita ortamından aldığı bilgileri birleştirerek bir hesaplama yapmaktadır. Yapılan hesaplama sonucunda, hız limitleri de göz önünde bulundurularak sürücüye hız önerisinde bulunmaktadır. Böylece sürücünün ani hızlanmasına veya ani fren yapmasına gerek kalmayacaktır. Önerilen yöntemde trafik ışığı ve harita bilgisi online olarak depolanmakta ve aracın güzergahına göre senkron bir şekilde çalışması gerekmektedir. Günümüzde kullanılan sistemde trafik ışığı bilgileri sistem üzerinden düzenlense de bunun herhangi bir sistemle entegrasyonu bulunmamaktadır. Bu etkileşim için gerekli alt yapı sağlandığında daha etkili sistemlerin tasarlanmasının da önü açılacaktır. Bu gelişmeler sayesinde daha konforlu ve daha güvenli bir trafik sağlanabilecektir. Önerilen yöntemde yakın ülkemizde kullanılan yeşil dalga sistemi ve trafik ışığı süre bilgilendirme bulunmaktadır. Yeşil dalga sisteminin tasarlanma amacı araçların trafik bekleme sürelerini azaltmak ve trafik güvenliğini sağlamak olsa da trafiğin aşırı yoğun olduğu veya aşırı yoğun olmayan saatlerde efektif çalışmadığı saptanmıştır. Önerilen sistemde aşırı yoğun trafikte hız önerisi mümkün olmazken yoğun olmayan trafik için trafik bilgisine sahip olmak trafik güvenliği ve verimliliği açısından birçok kazanım sağladığı deneysel çalışmalarda açıkça görülmektedir.

5. Tartışma ve Sonuç

Yapılan bu deneysel çalışma kapsamında deneysel şartlar gerçek dünyadaki şartlar kullanılarak yapılmıştır. Deneysel ortamındaki imkânlar tam bir test yapmaya elverişli olmamakla birlikte elde edilen değerler fikir verebilecek niteliktedir. Bu sebepten dolayı deneyin tekrarlanması halinde değerlerde farklılık olması muhtemeldir. Yapılan çalışmada elde edilen değerler ile simülasyon ortamında elde edilen değerler birebir aynı olmamakla birlikte aynı doğrultudadır. Yapılan çalışma göstermiştir ki trafikteki bekleme süreleri ne kadar artarsa yakıt tüketimi de o oranda artmaktadır. Büyük şehirlerdeki trafik yoğunluğunu azaltmaya yönelik her çalışma sonucunda yakıt tüketimi de azalacaktır. Yakıt tüketiminin azalması hem bireysel hem de milli ekonomiye büyük katkılar sağlayacaktır. Ayrıca trafikte bekleme sürelerinin yanı sıra sürüş davranışlarının da yakıt tüketimine olan etkisi azımsanmayacak oranlarda tespit edilmiştir. Ulaşım problemine çözüm aramakla birlikte sürücü davranışlarını düzenleyen uygulamalar da geliştirildiğinde yakıt tüketiminde ciddi oranlarda tasarruf yapılabileceği gözlemlenmiştir. Gelecek çalışmalarda yapay zeka algoritmaları ve optimizasyon algoritmaları birleştirilerek hibrit bir sistem tasarlanarak var olan araçlar için uygulanabilirliği test edilebilir.

Kaynaklar

- [1] Türkiye İstatistik Kurumu. Motorlu Kara Taşıtları. Türkiye İstatistik Kurumu, Mayıs 2022.
- [2] Türkiye İstatistik Kurumu. Karayolu Trafik Kaza İstatistikleri. Türkiye İstatistik Kurumu, 2021.
- [3] Pace RD, Fiori C, Pariota L, Storani F. Centralised Traffic Control and Green Light Optimal Speed Advisory Procedure in Mixed Traffic Flow: An Integrated Modelling Framework Transportation Systems for Smart, Sustainable, Inclusive and Secure Cities. Intechopen. 2020. pp. 145 – 160.
- [4] Guardiola C, Pla B, Pandey V, Burke R. On the potential of traffic light information availability for reducing fuel consumption and NOx emissions of a diesel light-duty vehicle. Proc Inst Mech Eng, Part D: J. Automob Eng. 2019. pp. 981-991.
- [5] Mellegård N, Reichenberg F. The Day 1 C-ITS Application Green Light Optimal Speed Advisory—A Mapping Study. Transp Res Procedia. 2020, pp. 170 – 182.
- [6] Cabannes T, Li J, Wu F, Dong H, Bayen M. A Learning Optimal Traffic Routing Behaviors Using Markovian Framework in Microscopic Simulation. 99th annual meeting of the Transportation Research Board. Washington D.C. 2020.
- [7] Boz C, Gülgen F. Sumo Trafik Simülasyonu Kullanılarak Trafik Düzenlemelerinin Etkilerinin Gözlenmesi. VII. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu (UZAL-CBS 2018). Eskişehir, 2018.
- [8] Anany H. Effectiveness of a Speed Advisory Traffic Signal System for Conventional and Automated Vehicles in a Smart City. Norrköping: master thesis. Linköping Üniversitesi, 2019.
- [9] Colombaroni C, Fusco G, Isaenko N. A Simulation-Optimization Method for Signal Synchronization with Bus Priority and Driver Speed Advisory to Connected Vehicles. Transp Res Procedia. 2019, pp. 890 – 897.
- [10] Thorin K. Optimal Speed Controller in the Presence of Traffic Lights. Tez. Uppsala Universit, 2017.
- [11] Xu B, Chen X, Li K, Hu M, Bian Y, Yu Q, Wang J. Double-layer speed optimization for reducing fuel consumption with vehicle-to-infrastructure communication. Int J Intell Transp Syst Res , 2019. pp. 513 – 524.
- [12] Stevanovic A, Stevanovic J, Kergaye C, Green Light Optimized Speed Advisory Systems Impact of Signal Phasing Information Accuracy, Proc Inst Mech Eng, Part D: J Automob Eng, 2013. pp. 53 – 59.
- [13] Ford Otosan. Ford Fiesta Owner's Manual. Ford Motor Company, 2012.
- [14] Ford Otosan. Ford Fiesta Owner's Manual. Ford Motor Company, 2013.
- [15] Volkswagen. Golf Kullanım Klavuzu. Volkswagen, 2012.

Histopatolojik Görüntülerden Kolon Kanseri Tespiti için EfficientNetB0 ve DVM Tabanlı Yaklaşım

Gaffari ÇELİK^{1*}

¹ Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Meslek Yüksekokulu, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Ağrı, Türkiye
^{*1} gcelik@agri.edu.tr

(Geliş/Received: 06/07/2023;

Kabul/Accepted: 12/08/2023)

Öz: Kolon kanseri, gelişmiş ülkelerde ciddi bir sağlık sorunu olmakta ve en sık görülen kanser türleri arasında gelmektedir. Bu hastalığın erken teşhisi hastaların hayatta kalma şansını artırmaktadır. Geciken teşhisler ise ölümlerle sonuçlanabilmektedir. Bu çalışmada kolon kanseri tespiti için EfficientNetB0 ve destek vektör makineleri (DVM) tabanlı bir model önerilmiştir. EfficientNetB0 mimarisi ile histopatolojik görüntülerden öznelik haritalarının çıkarılması sağlanırken, DVM algoritması ile elde edilen öznelik haritalarının sınıflandırılması gerçekleştirilmektedir. Ayrıca önerilen modelin başarısını analiz etmek üzere EfficientNetB0, Xception, VGG19, InceptionV3, DenseNet121 ve ResNet101 gibi evrişimli sinir ağları (ESA) mimarileri ile performans kıyaslaması yapılmıştır. Veri kümesi olarak sekiz sınıflı Kather-5k ve iki sınıflı LC25000 veri kümeleri kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, önerilen modelin Kather-5k veri kümesi kullanıldığında %99.70 doğruluk, %100 kesinlik, %100 duyarlılık, %100 F1-Score, %99.71 G-ortalama, %100 özgüllük ve %99.83 AUC ile mevcut ESA mimarilerine kıyasla daha yüksek başarı sağladığını göstermiştir. LC25000 veri kümesi kullanıldığında ise önerilen model tüm metriklerde %100 başarı elde etmiştir. Benzer şekilde Kather-5k ve LC25000 veri kümeleri birleşiminden oluşan veri kümesi kullanıldığında önerilen model, %99.96 doğruluk, %100 kesinlik, %100 duyarlılık, %100 F1-Score, %99.92 G-ortalama, %100 özgüllük ve %99.96 AUC oranı ile diğer modellere kıyasla daha yüksek performans göstermiştir. Ayrıca önerilen model ile EfficientNetB0 mimarisinin başarısında önemli oranda bir başarı artışı sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Kolon kanseri, evrişimli sinir ağları, EfficientNetB0, destek vektör makineleri

EfficientNetB0 and SVM Based Approach for Colon Cancer Recognition from Histopathological Images

Abstract: Colon cancer is a significant health issue in developed countries and ranks among the most common types of cancer. Early diagnosis of this disease increases the chances of survival for patients, while delayed diagnosis can lead to fatal outcomes. In this study, an EfficientNetB0 and Support Vector Machines (SVM) based model has been proposed for colon cancer detection. The EfficientNetB0 architecture is utilized to extract feature maps from histopathological images, and the SVM algorithm is employed to classify the obtained feature maps. Furthermore, to analyze the performance of the proposed model, a comparison is made with convolutional neural network (CNN) architectures such as EfficientNetB0, Xception, VGG19, InceptionV3, DenseNet121, and ResNet101. The datasets used for the study are the eight-class Kather-5k and the two-class LC25000 datasets. The findings indicate that the proposed model achieves higher success rates compared to existing CNN architectures on the Kather-5k dataset, with an accuracy of 99.70%, precision of 100%, recall of 100%, F1-Score of 100%, G-mean of 99.71%, specificity of 100%, and an AUC of 99.83%. Similarly, on the LC25000 dataset, the proposed model achieves 100% success rates in all metrics. When the combined dataset of Kather-5k and LC25000 is used, the proposed model demonstrates better performance compared to other models with an accuracy of 99.96%, precision of 100%, recall of 100%, F1-Score of 100%, G-mean of 99.92%, specificity of 100%, and an AUC of 99.96%. In addition, with the proposed model, a significant increase in success has been achieved in the success of the EfficientNetB0 architecture.

Key words: Colon cancer, convolutional neural networks, EfficientNetB0, support vector machines

1. Giriş

Kolorektal kanseri (CRC) olarak da bilinen kolon kanseri kalın bağırsağın parçaları olan kolon veya rektumda ortaya çıkar. Bu kanser türü gelişmiş ülkelerde sıklıkla görülmekte ve Amerikan Birleşik Devletleri'nde kadınlar ve erkekler arasında görülen kanser türleri arasında üçüncü sırada gelmektedir. Sadece 2020 yılında, dünya çapında yaklaşık 1.93 milyon yeni kolorektal kanser vakasının görüldüğü ve bu hastalığın 0.94 milyon insanın ise ölümüne neden olduğu tahmin edilmektedir. Bu durumun, her on kanser vakasının hastalıkla ya da ölümlerle sonuçlandığı anlamına geldiğini göstermektedir [1, 2]. Ayrıca, 2040 yılına kadar küresel yeni vakaların 3.2 milyona ulaşacağı öngörülmektedir. CRC' nin artış eğiliminde olması ve artan küresel yükü, dünya sağlık sistemlerine büyük

* Sorumlu yazar: gcelik@agri.edu.tr. Yazarın ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-5658-9529

sıkıntılar yaratmaktadır. Erken ve doğru teşhis, tedavinin etkinliğini artırmakla beraber bu rakamları önemli ölçüde azaltabilir ve hastaların sağkalım oranının artmasında da önemli rol oynar [3, 4].

Histopatolojik inceleme tıpta kolorektal kanseri teşhisinde en çok kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde, kanserli dokular patolojik mikroskop altında incelenir. Doku değişikliklerini ve hücreleri gözlemleyerek buna göre teşhis konur [5, 6]. Ancak, bu süreç profesyonel uzmanlık gerektiren, zaman alıcı, sıkıntılı ve zorlu bir süreçtir. Bu süreçte, hekimlerin verileri yanlış yorumlamasıyla sonuçlanabilir. Bu da doğruluk oranını azaltarak erken teşhise engel olabilir [2, 7].

Kolon kanseri dört evreden oluşur. Belirli evrelerde, kolon kanseri hastalarının hayatta kalma şansı önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. 18 ile 65 yaş arasındaki kişilerde kolon kanseri birinci evrede teşhis edilirse, etkili tedavi ile %94 hayatta kalma şansına sahiptir. Ancak ileri evrelerde hayatta kalma oranları sırasıyla ikinci evrede %87, üçüncü evrede %74 ve dördüncü evrede %19'a kadar düşmektedir [8, 9]. Kolon kanseri hastalarının hayatta kalma olasılığı tüm yaş gruplarında ele alındığında birinci evrede %70 iken dördüncü evrede %13 gibi çok düşük bir orana düşmektedir. Kesin bir kanser tedavisi olmadığından, erken teşhis edilen hastalar, doktorların tedavi planı oluşturmak için daha fazla zamanı olur ve bu da hastanın hayatta kalma şansını artırır. Erken teşhis ve tedavi, kansere bağlı ölümleri önlemenin tek yoludur. Ancak, birçok insan, bu ölümcül hastalığa karşı mücadelede yetkin teşhis merkezlerine erişimden yoksundur, bu da mücadeleyi daha da zorlaştırmasına neden olmaktadır [8, 10].

Kolon kanseri, patolojik görüntüler kullanılarak Yapay Zeka (AI) teknikleri ile teşhis edilme potansiyeline sahiptir [5]. AI teknikleri ile elde edilen bulgular sayesinde geleneksel yöntemlere alternatif olarak görülmektedir. Bir hastalığın teşhisi hastadan alınan bilgiye bağlı olarak bir uzman tarafından yapılmaktadır. Dijital ortamlarda tutulan hasta numuneleri AI teknikleri aracılığı ile başarılı bir şekilde işlenerek hastalık tespiti yapılması mümkündür. Son dönemlerde geliştirilen Derin öğrenme (DL) algoritmaları kullanılarak çok boyutlu görüntülerden hastalık teşhisi yapılmakta ve video analizi gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca DL teknikleri, uzmanların iş yükünü büyük ölçüde azaltmakla beraber hastalık teşhisi daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir [5, 8].

Histopatolojik görüntülerden kolon kanseri tespiti için yapılan bu çalışmada temel katkılarımızın bir özeti aşağıda verilmiştir:

- Kolon kanseri teşhisi için EfficientNetB0, Xception, VGG19, InceptionV3, DenseNet121 ve ResNet101 gibi ESA mimarilerinin performansları incelenmiştir
- EfficientNetB0 ve DVM temelli yeni bir model önerilmiştir.
- EfficientNetB0 mimarisini ile histopatolojik görüntülerden öznelik haritalarının çıkarılması sağlanmış ve çıkarılan öznelik haritaları DVM algoritması ile sınıflandırılmıştır.
- Önerilen EfficientNetB0 ve DVM temelli model ile EfficientNetB0 mimarisinin performansında önemli oranda bir iyileştirme sağlanmıştır.

2. İlgili Çalışmalar

Kolon kanseri tespiti için son dönemlerde yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Rathore vd. [11] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, kolon dokularının öznelikleri matematiksel olarak modelleyen yeni bir teknik önerdiler. Makale, normal ve habis kolon örneklerini ayırt etmek için Hibrit Özellik Alanı Tabanlı Kolon Sınıflandırma (HFS-CC) yöntemini sundular. 174 kolon biyopsi görüntüsü üzerinde yapılan çalışmada HFS-CC tekniği ile %98.07 test doğruluğuna ulaştılar. Toraman vd. [12] kolon kanseri tespiti için Fourier Dönüşümü Kızılötesi (FTIR) spektroskopisi yöntemi kullanarak sinyallerden çeşitli istatistiksel özellikler topladılar. Çalışma kapsamında 30 kolon kanseri hastası ve 40 sağlıklı kişiden kan örnekleri (plazma) toplanarak FTIR sinyal ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her bir FTIR sinyalinden altı istatistiksel özellik, beş alan oranı ve beş yükseklik oranı olmak üzere toplam 16 öznelik elde ettiler. El edilen bu 16 öznelik, YSA ve DVM ile sınıflandırdılar YSA ile %95.71 doğruluk elde ettiler. Toğaçar [13], DL tabanlı DarkNet19 modeli kullanarak yeni bir model önerdi. DarkNet19 modeli ile elde edilen öznelikler Equilibrium ve Manta Ray Foraging optimization algoritmaları kullanarak önemli öznelikleri optimize etti. DVM algoritması ile optimize edilen öznelikler sınıflandırarak %99.69 doğruluk elde etti. Garg vd. [14] ise LC25000 veri setini kullanarak histopatolojik görüntülerden akciğer ve kolon kanseri tespiti için önceden eğitilmiş sekiz ESA (ResNet50, Xception, MobileNet, VGG16, InceptionResNetV2, DenseNet169, NASNetMobile ve InceptionV3) mimarisini kullandılar. Sekiz model ile %96 ve %100 arasında değişen doğruluk elde ettiler. Urban vd. [15] 2000 kişiden aldıkları 4.088 benzersiz polip içeren 8641 kolonoskopi görüntüsünü ve ESA tekniğini kullandılar. Önerdikleri modeli toplam süresi beş saat olan 20 kolonoskopi videosu üzerinde test ederek %96 oranında doğruluğa ulaştılar.

Babu vd. [16], kolon kanserinin varlığını tahmin etmek için kolon biyopsi görselleri kullandılar. İlk olarak, görüntüleri HSV (Hue-Saturation-Value) düzlemine aktardılar. Daha sonra Dual-tree ve double-densite 2-D dalgacık dönüşümü tekniklerini kullanarak öznelik çıkardılar. Sonra olarak RF (Random Forest) tabanlı sınıflandırma algoritması kullanarak çıkarılan öznelikleri sınıflandırdılar ve %85.4 doğruluk elde ettiler. Masud vd. [17] iyi huylu ve kötü huylu kolon dokularını içeren bir veri kümesi kullandılar. Kanser tespiti için DIP (Dijital Görüntü İşleme) ve ESA yöntemlerini kullanarak bir sınıflandırma çerçevesi oluşturdu. Önerdikleri çerçeve yöntemi ile %96.33 doğrulukla kanser dokularını tespit ettiler. Jiao vd. [18] tarafından yapılan diğer bir çalışmada, görüntülerden öznelik çıkarımı için Gri Düzey Eşzamanlı Oluşum Matrisi (Gray-Level Co-occurrence Matrix, GLCM), gri tonlama varyansı ve gri tonlama ortalaması tekniklerini kullandılar. GLCM yöntemi ile 16 öznelik, gri tonlama varyansı ve gri tonlama ortalaması tekniklerinden birer öznelik olmak üzere toplam 18 öznelik çıkardılar. Çıkarılan öznelikler DVM yöntemi ile sınıflandırdılar ve %96,67 kesinlik (precision), %83,33 hatırlama (recall) ve %89.51 F-measure elde ettiler.

Kolon kanseri tespiti için Tasnim vd. [19] tarafından yapılan diğer bir çalışmada, ortalama havuzlama katmanları ve maksimum havuzlama katmanlarına sahip ESA tabanlı yöntem ile mevcut MobileNetV2 yöntemi kullanılmıştır. ESA modeli ile %97.49 doğruluk elde ederken MobileNetV2 mimarisi ile %99,67 doğruluk elde ettiler. Qasim vd. [20] tarafından yapılan diğer bir çalışmada ESA tabanlı bir model önerdi. Aynı zamanda önerilen modelin performansını değerlendirmek için VGG16 mimarisini aynı veri kümesi üzerinde eğittiler. 5000 kolon adenokarsinomu ve 5000 de iyi huylu kolon olmak üzere toplamda 10000 histopatolojik görüntü içeren veri kümesi kullandılar. VGG16 mimarisi ile %96.2 doğruluk elde ederken önerdikleri model ile %99.6 doğruluk elde ettiler.

“Deneysel Çalışmalar ve Sonuçları” bölümünde önerilen model ile elde edilen bulgular verilmiştir. Elde edilen bulgular incelendiğinde önerilen model Kather-5k veri kümesi ile %99.70 doğruluk, LC25000 veri kümesi ile %100 doğruluk ve bu iki veri kümesinin birleşiminden ise %99.96 oranında yüksek bir doğruluk elde edilmiştir. Yukarıda verilen benzer çalışmalar ile önerilen modelin performansı değerlendirildiğinde önerilen modelin son derece yüksek bir başarı gösterdiği görülmektedir. Önerilen modelin yüksek bir performans sergilemesi ise temel yapısını oluşturan EfficientNetB0 mimarisi ile elde edilen önemli öznelik haritalarından kaynaklandığını söyleyebiliriz. Ayrıca literatürde öznelik haritalarının çıkarılmasının önemi çalışma [21] ve [22]’de açıkça verilmiştir.

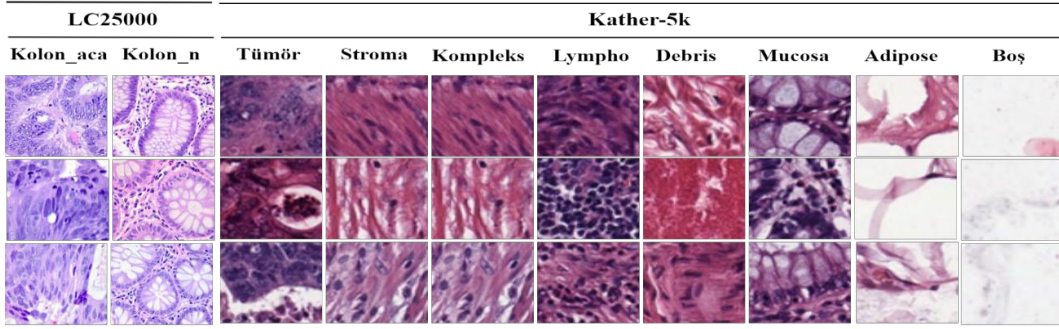
3. Materyal

Bu çalışmada kolon kanseri tespiti için Kather-5k [23, 24] ve LC25000 [25] olmak üzere iki farklı veri kümesi kullanıldı. Kather-5k veri kümesi, Tümör (tümör epiteli), Stroma (tümör stroması), Kompleks (tek bağışıklık hücreleri ve/veya tek tümör hücreleri içeren kompleks stroma), Lympho (bağışıklık hücresi konglomeraları), Debris (nekrozu, kanamayı ve mukusu kucaklayan enkaz), Mucosa (mukozal bezler), Adipose (yağ dokusu) ve Boş (arka plan) olmak üzere sekiz sınıfa ait histopatolojik görüntüleri içermektedir. Her bir sınıfta 625 olmak üzere toplamda 5000 görüntü bulunmakta ve görüntüler 150×150 çözünürlüktedir.

LC25000 veri kümesinde kolon görüntüsü olarak 5000 görüntü kolon iyi huylu doku (Colon Benign Tissue) ve 5000 kolon adenokarsinomu (Colon Adenocarcinoma) görüntüsü bulunmaktadır. Herkesin erişimine açık olan Kather-5k veri kümesine “<https://zenodo.org/record/53169>” bağlantısından ve LC25000 veri kümesine ise “<https://124.im/6t2a>” bağlantısı kullanılarak erişim sağlanabilir. Veri kümeleri ile ilgili detaylı bilgi ayrıca Tablo 1’de sunulmuş olup örnek görüntüler Şekil 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kather-5k ve LC25000 veri kümeleri özellikleri

Veri kümesi	Kanser Türü	Tanım	Görüntü sayısı	Görüntü Boyutu
Kather-5k	Tümör	Tümör epiteli	625	150x150
	Stroma	Tümör stroması	625	150x150
	Kompleks	Tek bağışıklık hücreleri ve/veya tek tümör hücreleri içeren kompleks stroma	625	150x150
	Lympho	Bağışıklık hücresi konglomeraları	625	150x150
	Debris	Nekrozu, kanamayı ve mukusu kucaklayan enkaz	625	150x150
	Mucosa	Mukozal bezler	625	150x150
	Adipose	Yağ dokusu	625	150x150
	Boş	Arka plan	625	150x150
	LC25000	Kolon_aca	Kolon adenokarsinomu	5000
Kolon_n		Kolon iyi huylu doku	5000	768x768

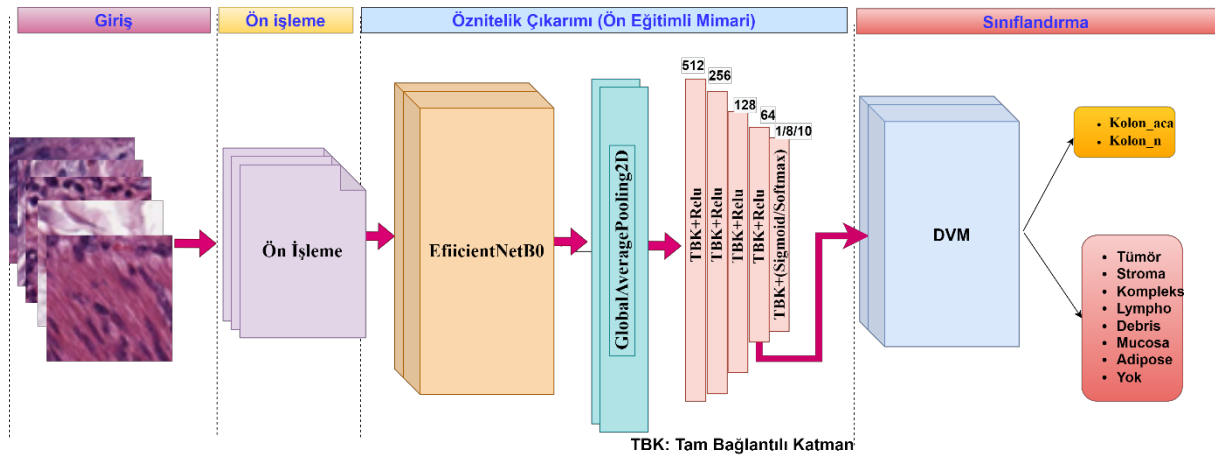


Şekil 1. Kather-5k ve LC25000 veri kümelerinde bulunan sınıflara göre örnek görüntüler

4. Metot

Bu çalışmada kolon kanseri tespiti için DL' nin alt dalı olan ESA ve DVM tabanlı bir yöntem önerilmiştir. DL mimarileri, ham girdi verilerinden istenilen bilgiyi elde etmek amacıyla derin bir ağ yapısına sahip temsili öğrenme algoritmalarıdır. DL, bir biri ile bağlantılı katmanlardan oluşur ve veriler katmanlar aracılığıyla işlenir. Katmanlardan elde edilen öznitelikler bir sonraki katmana aktararak daha detaylı incelenmesi sağlanır [26, 27].

ESA, çok katmanlı derin ağ mimarisine sahip ve doğal görsel algılama mekanizmasından ilham alan DL yöntemlerinin bir alt dalıdır. ESA mimarileri, görüntü işleme, DNA işleme ve örüntü tanıma gibi birçok alanda uygulanan en etkili DL mimarilerinden biri olarak görülmektedir [28, 29]. ESA mimarileri, evrişim katmanı, havuzlama katmanı ve birbiri ile bağlantılı katmanlar olmak üzere genellikle üç temel kategoriye sahiptirler. Evrişim katmanları, evrişim işlemi ile giriş verisinden anlamlı öznitelik haritaları çıkarmak için kullanılır. Havuzlama katmanı, veri boyutunu düşürerek işlenmesini hızlandırmak ve gereksiz bilgileri elemek amacıyla kullanılır. Birbiri ile bağlantılı katmanlar aracılığı ile öznitelikler vektörel hale getirilerek aktivasyon fonksiyonları (sigmoid, softmax ve tanh) yardımı ile tahmin işlemi gerçekleştirilir [30, 31]. Literatürde ESA mimarileri kullanılarak, asfalt çatlaklarının tespiti [32], fiziksel hareketlerden aktivite belirleme [33], yazılım güvenlik açıklarının sınıflandırılması [34]; ses, nefes ve öksürükten Covid-19 tespiti [35], alzheimer hastalığının sınıflandırılması [36], beyin tümörü tespiti [37], insan aktivite türlerinin tespiti [38], timpanik membran görüntülerinin sınıflandırılması [39] ve beyin kanaması tespiti [40] gibi birçok alanda başarılı bir şekilde uygulanmıştır.



Şekil 2. Önerilen modelin metodolojisi.

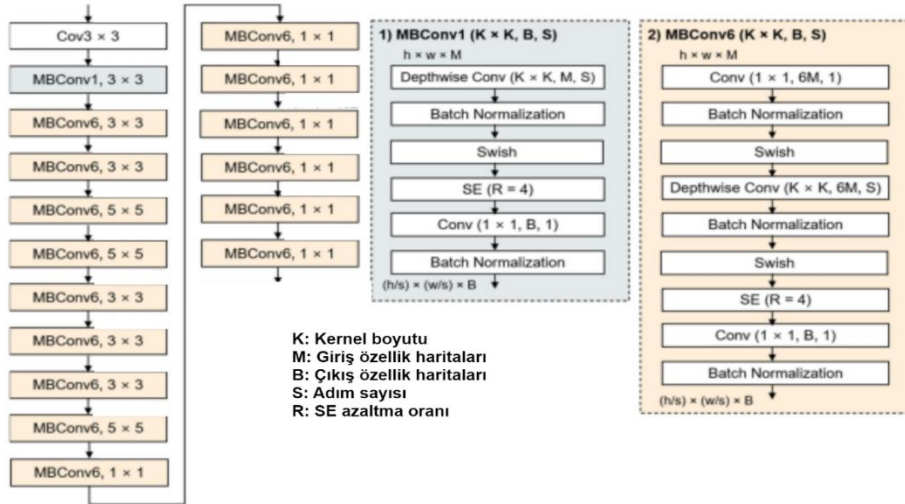
4.1. Önerilen metot

Kolon kanseri tespiti için yapılan bu çalışmada EfficientNetB0 mimarisini ve DVM algoritmasını temel alan bir model önerilmiştir. Önerilen modelin metodolojisi Şekil 2'de sunulmuştur. Önerilen model giriş, ön işleme, öznitelik çıkarımı ve sınıflandırma olmak üzere dört aşamadan oluşmaktadır. Giriş aşamasında Kather-5k ve LC25000 veri kümelerindeki histopatolojik görüntüler kullanılmaktadır. Ön işleme aşamasında görüntüler

128×128 boyutuna indirgenerek EfficientNetB0 mimarisine girdi olarak verilmektedir. Öznitelik çıkarımı aşamasında girdi görüntüleri sırasıyla EfficientNetB0, GlobalAveragePooling2D ve art arda beş tam bağlantılı katmanı ile eğitilerek özniteliklerin çıkarımı sağlanmıştır. Daha sonra dördüncü tam bağlantılı katmandan (64) elde edilen öznitelikler DVM algoritması kullanılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Öznitelikler dördüncü tam bağlantılı katmandan (64) özetlendiği için bu katman seçilmiştir. İlk dört tam bağlantılı katmandan sonra Relu aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Son tam bağlantılı katmandan sonra iki sınıflı veri kümesinin (LC25000) eğitimi için aktivasyon fonksiyonu olarak Sigmoid, çok sınıflı veri kümesinin (Kather-5k) eğitimi için Softmax aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. İlk dört tam bağlantılı katmanlarda nöron sayısı 512, 256, 128 ve 64 olarak belirlenmiştir. Son tam bağlantılı katmanda nöron sayısı veri kümesindeki sınıf sayısına bağlı olarak 1, 8 ya da 10 olarak ayarlanmıştır.

4.1.1. EfficientNetB0 mimarisi

EfficientNet mimarisi Tan ve Le [41] tarafından 2019 yılında önerilmiştir. EfficientNet ailesi, ESA modellerini geliştirmek için basit ve oldukça etkili bir ölçeklendirme katsayısı temel alır. Ölçeklendirme katsayısı genişlik, derinlik ve çözünürlük gibi ağ boyutlarını dengeleyerek ağın verimli bir şekilde çalışmasını sağlar. Uygulamada, tek tek boyutları ölçeklendirmek model performansını artırırken, ağı tüm boyutlarını mevcut kaynaklara göre dengelemek, genel performansı etkili bir şekilde artırır. EfficientNetB0 mimarisi MBConv bloklarını kullanır. Bu mimaride giriş verisine ilk olarak bir evrişim işlemi uygulanır. Daha sonra bir MBConv1 bloğu ve 15 MBConv6 bloğa tabi tutulmaktadır. Bloklarda Swish aktivasyon fonksiyonu kullanılmaktadır. Ayrıca mimarinin performansının iyileştirilmesine katkı sağlamak amacıyla MBConv bloklarına küçültme ve genişletme (Squeeze-and-Excitation, SE) dikkat modülü dahil edilmiştir [42]. Şekil 3’ te EfficientNetB0 mimarisinin temel yapısı verilmiştir.



Şekil 3. EfficientNetB0 mimarisi: 1) MBConv1 ve 2) MBConv6 bloklarının temel yapısını göstermektedir [43].

4.1.2. DVM

DVM, sınıflandırma ve regresyon problemlerinde kullanılan denetimli öğrenme modelidir. DVM, temel olarak doğrusal veriler için kullanılır. Ancak DVM doğrusal olmayan verileri, çekirdek işlevi aracılığı ile doğrusal özellik uzayına taşıyarak doğrusal olmayan problemlerde kullanılabilme yeteneğine sahiptir. Çekirdek fonksiyonu aracılığı ile n-boyutlu doğrusal olmayan veriler, m-boyutlu yeni bir uzayda ($m > n$) doğrusal olarak ayarlanır. Daha sonra veriler iki sınıfa ayırmak için hiper düzlemler kullanılır. Sınıflandırma işlemi için en yüksek sınıra sahip lineer fonksiyonu bulunması amaçlanır. N lineer olarak ayrılabilen veri kümesini $\{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$ göz önünde bulundurduğumuzda en yüksek sınır sınıflandırıcı $f(x) = \text{sgn}(w \cdot x + b)$ fonksiyonu ile bulunur. Burada w ve b iki sınıfa göre sınırı maksimum eden parametreler göstermektedir. DVM, lineer olan veri kümelerini Denklem 1’deki gibi bir sınıflandırıcı oluşturmayı amaçlar [44-47].

$$f(x) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_i y_i (x_i \cdot x) + b \right) \quad (1)$$

Burada α maksimum s sınıflandırıcısını bulmak için kullanılan parametredir. Matematiksel bir işlev olan sgn fonksiyonu, sonuç değerinin pozitif, negatif veya sıfır olduğunu bulmak için kullanılmaktadır. α değeri genel olarak sıfırdır. Sıfır olmayan α değerleri güçlü destek vektörleri olarak tanımlanır ve sınıflandırmada karar fonksiyonuna önemli oranda katkı sağlar.

Doğrusal olmayan veri kümelerinde kullanılan karar fonksiyonu ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$f(x) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_i y_i K(x_i \cdot x) + b \right) \quad (2)$$

Burada K , doğrusal olmayan verileri doğrusal bir uzayda tanımlamak için kullanılan çekirdek fonksiyondur. Çekirdek fonksiyonları olarak, doğrusal, polinom, radyal temel fonksiyon ve hiperbolik tanjant fonksiyonları kullanılır.

5. Performans Değerlendirme Metrikleri

Mimarilerin performansını değerlendirmek üzere doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), duyarlılık (recall), f1-Score, G-ortalama, özgüllük (specificity), AUC metrikleri ve karmaşıklık matrisi kullanılmıştır. Bu metrikler matematiksel olarak aşağıda verilmiştir:

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} * 100 \quad (3)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP+YP} * 100 \quad (4)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP}{DP+YN} * 100 \quad (5)$$

$$\text{F1 - Score} = \frac{2 * \text{Kesinlik} * \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} * 100 \quad (6)$$

$$\text{Özgüllük} = \frac{DN}{DN+YP} * 100 \quad (7)$$

$$\text{G - Ortalama} = \sqrt{\text{Duyarlılık} \times \text{Özgüllük}} \times 100 * 100 \quad (8)$$

Burada, DP doğru pozitifleri, DN doğru negatifleri, YP yanlış pozitifleri, YN yanlış negatifleri ifade etmektedir. AUC ise bir olasılık eğrisi olan ROC' un altında kalan alandır. ROC eğrisinde Y ekseninde TPR (Gerçek Pozitif Oranı) ve X ekseninde FPR (Yanlış Pozitif Oran) bulunur. Eğrinin altındaki alan (AUC) artıkça (1'e yaklaştıkça) modelin performansının arttığını gösterir [3, 48-51].

$$\text{TPR} = \frac{DP}{DP+DN} \quad (9)$$

$$\text{FPR} = \frac{YP}{YP+YN} \quad (10)$$

Karmaşıklık matrisi, bir sınıflandırıcıda gerçek ve tahmin edilen sınıflar hakkında bilgi verir [52].

6. Deneysel Çalışmalar ve Sonuçları

Kolon kanseri tespiti için yapılan bu çalışmada EfficientNetB0 ve DVM tabanlı bir yöntem önerilmiştir. EfficientNetB0 mimarisi ile önemli öznelik haritaları çıkarıldıktan sonra elde edilen öznelikler DVM algoritması sınıflandırılması sağlanmıştır. Ayrıca önerilen modelin performansını değerlendirmek amacıyla EfficientNetB0, Xception, VGG19, InceptionV3, DenseNet121 ve ResNet101 gibi ESA mimarileri ile kıyaslanmıştır. Deneysel uygulamalarda veri kümesi olarak Kather-5k ve LC25000 veri kümeleri kullanılmıştır. Kolon kanseri tespiti için üç uygulama gerçekleştirilmiştir. İlk uygulamada Kather-5k, ikinci uygulamada LC25000 ve üçüncü uygulamada her iki veri kümesi birleştirilerek deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Uygulamalar için veri kümelerin %80'i eğitim ve %20'si ise test için ayrılmıştır. Eğitim ve test veri kümelerinin sınıflara göre verilerin dağılımı detaylı olarak Tablo 2'de sunulmuştur. Tüm mimarilere aynı hiperparametreler verilerek eğitilmiştir. Eğitim için parça boyutu (batch size) 128 ve epok (epoch) değeri 50 olarak ayarlanmıştır. Optimizasyon algoritması için Adam ($lr = 0.001$) optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Maliyet fonksiyonu olarak ikinci uygulama için Binary Crossentropy; birinci ve üçüncü uygulamalar için ise Categorical Crossentropy kullanılarak modellerin eğitimi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Deneysel çalışmalarda kullanılan veri kümelerinin eğitim ve test için görüntü sayılarının sınıflara göre dağılımı.

Uygulama	Veri Kümesi	Kanser Türü	Eğitim	Test	Toplam
1	Kather-5k	Tümör	511	114	625
		Stroma	525	100	625
		Kompleks	498	127	625
		Lympho	488	137	625
		Debris	500	125	625
		Mucosa	495	130	625
		Adipose	495	130	625
		Boş	491	134	625
2	LC25000	Kolon_aca	3990	1010	5000
		Kolon_n	4010	990	5000
3	Kather-5k+ LC25000	Tümör	501	124	625
		Stroma	511	114	625
		Kompleks	491	134	625
		Lympho	489	136	625
		Debris	502	123	625
		Mucosa	499	126	625
		Adipose	494	131	625
		Boş	497	128	625
		Kolon_aca	4013	987	5000
		Kolon_n	4014	986	5000

Kather-5k veri kümesi kullanılarak gerçekleştirilen ilk uygulamanın test sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur. Aynı zamanda bu uygulama için önerilen modelin sınıflandırma başarısı gösteren karmaşıklık matris sonuçları Şekil 4 (a)'da verilmiştir.

Tablo 3. Kather-5k veri kümesi kullanılarak modellerin test sonuçları

Metot	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1-Score	G-ortalama	Özgüllük	AUC
EfficientNetB0	95.90	96.00	96.00	96.00	95.69	96.25	97.64
Xception	94.00	94.00	93.00	93.00	92.75	82.81	96.21
VGG19	79.10	80.00	79.00	79.00	77.87	71.66	87.84
InceptionV3	91.20	91.00	91.00	91.00	90.37	85.62	94.77
DenseNet121	94.00	95.00	94.00	94.00	93.52	88.37	96.42
ResNet101	92.80	93.00	93.00	92.00	92.29	91.31	95.77
Önerilen Model	99.70	100.00	100.00	100.00	99.71	100.00	99.83

Tablo 3'teki sonuçlar incelendiğinde önerilen model %99.70 doğruluk, %100 kesinlik, %100 duyarlılık, %100 F1-Score, %99.71 G-ortalama, %100 özgüllük ve %99.83 AUC ile en yüksek performansı gösterdiği görülmektedir. Aynı zamanda önerilen modelin EfficientNetB0 mimarisinin başarısında farklı metriklerde %2.12 ile %4.02 arasında bir artış sağladığını söyleyebiliriz. Şekil 4(a)'da ilk uygulama için önerilen modelin

karmaşıklık matris sonuçları incelendiğinde sadece iki Adipose sınıfına ait görüntünün yanlış tahmin ettiği, ancak diğer tüm sınıfları doğru tahmin ettiği görülmektedir.

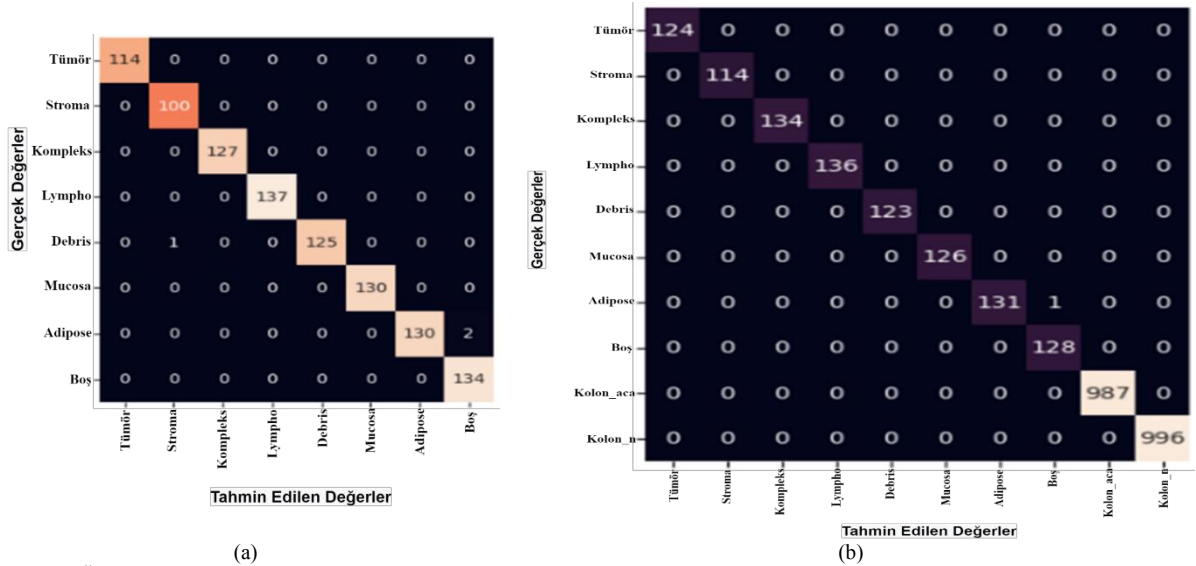
Tablo 4. LC25000 veri kümesindeki kolon görüntüleri kullanılarak modellerin test sonuçları

Metot	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1-Score	G-ortalama	Özgüllük	AUC
EfficientNetB0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Xception	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
VGG19	99.95	100.00	100.00	100.00	99.95	99.95	99.95
InceptionV3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
DenseNet121	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
ResNet101	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Önerilen Model	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

İkinci deneysel çalışmada LC25000 veri kümesindeki kolon kanseri görüntüleri kullanılarak kanser tespiti gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma için modellerin test veri kümesine göre başarıları Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'teki sonuçlar incelendiğinde VGG19 hariç diğer modellerin tüm metriklerde %100.00 başarı gösterdiği görülmektedir. Bütün modellerin yüksek performans göstermesi kullanılan veri kümesindeki görüntülerden kaynaklandığını söyleyebiliriz.

Tablo 5. Kather-5k ve LC25000 veri kümeleri kullanılarak modellerin test sonuçları

Metot	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1-Score	G-ortalama	Özgüllük	AUC
EfficientNetB0	97.87	95.00	95.00	95.00	94.87	94.48	97.40
Xception	97.70	95.00	95.00	95.00	94.69	91.37	97.28
VGG19	94.03	87.00	86.00	86.00	85.58	80.20	92.78
InceptionV3	96.30	92.00	91.00	91.00	90.67	81.59	95.40
DenseNet121	97.73	95.00	95.00	95.00	94.29	94.44	97.25
ResNet101	96.13	91.00	91.00	91.00	90.54	80.84	95.41
Önerilen Model	99.96	100.00	100.00	100.00	99.92	100.00	99.96



Şekil 4. Önerilen modelin test veri kümelerine göre karmaşıklık matris sonuçları: (a) Kather-5k veri kümesi için, (b) Kather-5k ve LC25000 veri kümeleri için.

Kolon kanseri tespiti için gerçekleştirilen üçüncü çalışmada Kather-5k ve LC25000 veri kümeleri birleştirilerek modellerin performansları değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular Tablo 5'te sunulmuştur. Bu uygulamada modellerin farklı görüntüler karşısındaki başarıları test edilmesi amaçlanmıştır. Tablo 5'teki sonuçlar incelendiğinde önerilen model doğruluk ve AUC metriklerine göre %99.96, kesinlik, duyarlılık, F1-Score ve

özgüllük metriklerine göre %100 ve G-ortalama metriğine göre %99.92 başarı ile en yüksek performansı sergilediği görülmektedir. Ayrıca önerilen modelin, EfficientNetB0 mimarisinin başarısında farklı metriklere göre %2.09 ile %5.52 arasında bir iyileştirme yaptığını söyleyebiliriz.

Üçüncü çalışmada önerilen modelin Kather-5k ve LC25000 veri kümelerindeki görüntülerine göre karmaşıklık matris sonuçları Şekil 4 (b)'de sunulmuştur. Elde edilen bulgular incelendiğinde önerilen modelin sadece Adipose sınıfındaki görüntülerden bir adet görüntüyü yanlış tahmin ettiği, diğer dokuz sınıftaki görüntülerin ise hepsinin doğru tahmin ettiğini söyleyebiliriz. Üçüncü çalışmada elde edilen bulgular incelendiğinde önerilen model, birinci uygulamadaki (Tablo 3) sonuçlardan daha yüksek bir başarıyı sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte artan veri sayısı ile önerilen modelin daha kararlı bir yapı gösterdiğini söyleyebiliriz.

Sonuçlar genel bir şekilde ele alındığında EfficientNetB0 mimarisinin diğer ESA mimarilerine göre daha yüksek bir performans sergilediği görülmektedir. EfficientNetB0 tabanlı önerilen modelin ise EfficientNetB0 mimarisinin başarısında %5.52'ye varan bir artış sağlayarak daha yüksek performans sergilemiştir. EfficientNetB0 ve DVM tabanlı önerilen modelin EfficientNetB0 modeline göre daha kompleks bir yapıya sahip olması hesaplama maliyetini artırmakta ve bu da önerilen model için bir dezavantaj olarak görülebilir. Ancak günümüz teknolojisi (GPU ekran kartları kullanılarak) ile böyle bir problemin üstesinden gelinebilmektedir.

7. Tartışma

Kolon kanseri, milyonlarca insanın ölümüne neden olduğu en ölümcül kanser türleri arasında görülmektedir. Bu hastalığın erken teşhisi hastaların hayatta kalma şansını artırmaktadır. Belirli yaş (18-65) gruplarında ilk evrede teşhis edildiğinde, hastanın hayatta kalma şansı %94'lerde iken son evrelerde bu oran %19'lara kadar düştüğü görülmüştür. Son dönemlerde DL alanında gelişen ilerlemeler sayesinde kanser teşhisinde hızlı ve doğru kararlar alınması mümkün hale gelmiştir.

Bu çalışmada kolon kanseri tespiti için farklı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yeni bir model önerilmiş ve mevcut ESA modelleri ile performans değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda önerilen modelin mevcut ESA modellerine kıyasla üstünlüğü açıkça görülmüştür. Ayrıca Literatürde bizimle aynı Kather-5k veri kümesini kullanan bazı çalışmaların sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Çalışma [53]'de toplu derin sinir ağları (DNN) mimarisi kullanılarak %92.83, [54]'de yapay sinir ağları kullanılarak %95.30; [4, 55] ve [56]'de farklı ESA teknikleri kullanılarak sırasıyla %98.83, %94.86 ve %94.16 elde edilmiştir. Ancak önerilen model ile %99.70 doğruluk ile en yüksek başarıyı sağlandığı görülmektedir.

Tablo 6. Literatürde Kather-5k veri kümesini kullanan bazı çalışmaların sonuçları

Çalışma	Yıl	Yöntem	Doğruluk (%)
Ghosh vd. [53]	2021	DNN	92.83
Trivizakis vd. [54]	2021	YSA	95.30
Tsai vd. [55]	2021	ESA	94.86
Paladini vd. [56]	2021	Toplu ESA	94.16
Dabass vd. [4]	2022	ESA ve Dikkat modülü	98.83
Önerilen Model	2023	EfficientNetB0 ve DVM	99.70

8. Sonuç

Kolon kanseri tespiti için yapılan bu çalışmada EfficientNetB0 ve DVM tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Önerilen modelin performansı, farklı ESA mimarileriyle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. İki farklı veri kümesi (Kather-5k ve LC25000) kullanılarak yapılan deneylerde, önerilen modelin diğer mimarilere kıyasla daha yüksek doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F1-Score, G-ortalama, özgüllük ve AUC değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Önerilen model Kather-5 veri kümesinde doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F1-Score, G-ortalama, özgüllük ve AUC metriklerine göre sırasıyla %99.70, %100, %100, %100, %99.71, %100 ve %99.83 başarı elde etmiştir. LC25000 veri kümesiyle yapılan çalışmada ise önerilen model tüm metriklerde %100 başarı sağlamıştır. Her iki veri kümesini de içeren uygulamada, önerilen model %99.96 doğruluk, %100 kesinlik, %100 duyarlılık, %100 F1-Score, %99.92 G-ortalama, %100 özgüllük ve %99.96 AUC oranı ile diğer mimarilere kıyasla daha yüksek performans sergilemiştir. Aynı zamanda önerilen model EfficientNetB0 mimarisinin başarısında %5.52'ye varan performans artışı sağlamıştır.

Gelecek çalışmalarda kolon kanserinin erken teşhisi için evrelere göre sınıflandırılmış veri kümeleri ile çalışılması amaçlanmaktadır. Ayrıca yüksek performans sergileyen, güvenilir ve uygulanabilir yeni ESA tabanlı modellerin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Kaynaklar

- [1] Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Laversanne M, Soerjomataram I, Jemal A, Bray F. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA. Cancer J. Clin* 2021; 71(3): 209–249.
- [2] Pacal I, Karaboga D, Basturk A, Akay B, Nalbantoglu U. A comprehensive review of deep learning in colon cancer. *Comput. Biol. Med.* 2020; 126(April): 104003.
- [3] Xi Y, Xu P. Global colorectal cancer burden in 2020 and projections to 2040. *Transl. Oncol.* 2021; 14(10): 101174.
- [4] Dabass M, Vashisth S, Vig R. A convolution neural network with multi-level convolutional and attention learning for classification of cancer grades and tissue structures in colon histopathological images. *Comput. Biol. Med.* 2002; 147: 105680.
- [5] Liang M, Ren Z, Yang J, Feng W, Li B. Identification of Colon Cancer Using Multi-Scale Feature Fusion Convolutional Neural Network Based on Shearlet Transform. *IEEE Access.* 2020; 8: 08969–208977.
- [6] Sarwinda D, Paradisa RH, Bustamam A, Anggia P. Deep Learning in Image Classification using Residual Network (ResNet) Variants for Detection of Colorectal Cancer. *Procedia Comput. Sci.* 2021; 179: 423–431.
- [7] Catal H, Veysel R. Transfer Learning Approach and Nucleus Segmentation with MedCLNet Colon Cancer Database. *J. Digit. Imaging.* 2023; 36 (1): 306–325.
- [8] Mehedi FMJ, Newaz A, Alam H, Binte S. Deep Learning Predictive Model for Colon Cancer Patient using CNN-based Classification. 2021.
- [9] Cancer Survival Rates. (Erişim Tarihi 18 Nisan 2023). <https://cancersurvivalrates.com/?type=colon&role=patient>.
- [10] Sánchez-peralta LF, Bote-curriel L, Picón A, Sánchez-margallo FM, Pagador JB. Deep learning to find colorectal polyps in colonoscopy : A systematic literature review. *Artif. Intell. Med.* 2020; 108(August): 101923.
- [11] Rathore S, Hussain M, Khan A. Automated colon cancer detection using hybrid of novel geometric features and some traditional features. *Comput. Biol. Med.* 2015; 65: 279–296.
- [12] Toraman S, Girgin M, Üstündağ B, Türkoğlu İ. Classification of the likelihood of colon cancer with machine learning techniques using FTIR signals obtained from plasma. *TURKISH J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 2019; 27(3): 1765–1779.
- [13] Toğaçar M. Disease type detection in lung and colon cancer images using the complement approach of inefficient sets. *Comput. Biol. Med.* 2021; 137: 104827.
- [14] Garg S, Garg S. Prediction of lung and colon cancer through analysis of histopathological images by utilizing Pre-trained CNN models with visualization of class activation and saliency maps. in 2020 3rd Artificial Intelligence and Cloud Computing Conference. Dec. 2020; 38–45.
- [15] Urban G, Tripathi P, Alkayali T, Mittal M, Jalali F, Karnes W, Baldi P. Deep Learning Localizes and Identifies Polyps in Real Time With 96% Accuracy in Screening Colonoscopy. *Gastroenterology.* 2018; 155(4): 1069-1078.
- [16] Babu T, Gupta D, Singh T, Hameed S. Colon Cancer Prediction On Different Magnified Colon Biopsy Images. in 2018 Tenth International Conference on Advanced Computing (ICoAC); 13-15 December 2018; Chennai, Indiap. 277–280.
- [17] Masud M, Sikder N, Nahid AA, Bairagi AK, AlZain MA. A Machine Learning Approach to Diagnosing Lung and Colon Cancer Using a Deep Learning-Based Classification Framework. *Sensors;* 21(3): 748.
- [18] Jiao L, Chen Q, Li S, Xu Y. Colon Cancer Detection Using Whole Slide Histopathological Images. 2013; 1283–1286.
- [19] Tasnim Z, Chakraborty S, Shamrat, Mehedi FMJ, Chowdhury AN, Nuha HA, Karim A, Zahir SB, Billah MdM. Deep Learning Predictive Model for Colon Cancer Patient using CNN-based Classification. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* 2021; 12(8).
- [20] Qasim Y, Al-Sameai H, Ali O, Hassan A. Convolutional Neural Networks for Automatic Detection of Colon Adenocarcinoma Based on Histopathological Images. 2021; 19–28.
- [21] Doğan G, Ergen B. A new approach based on convolutional neural network and feature selection for recognizing vehicle types. *Iran J. Comput. Sci.* 2023; 6(2): 95–105.
- [22] İmak A, Doğan G, Şengür A, Ergen B. Asma Yaprağı Türünün Sınıflandırılması için Doğal ve Sentetik Verilerden Derin Öznitelikler Çıkarma, Birleştirme ve Seçmeye Dayalı Yeni Bir Yöntem. *Int. J. Pure Appl. Sci.* 2023; 9(1): 46–55.
- [23] Kather JN, Weis C, Bianconi F, Melchers SM, Schad LR, Gaiser T, Marx A, Zöllner FG. Multi-class texture analysis in colorectal cancer histology. *Sci. Rep.* 2016; 6(1): 27988.
- [24] Kather JN, Zöllner FG, Bianconi F, Melchers SM, Schad LR, Gaiser T, Marx A, Weis CA. Collection of textures in colorectal cancer histology. *Zenodo.* 2016.
- [25] Borkowski AA, Bui MM, Thomas LB, Wilson CP, DeLand LA, Mastorides SM. Lung and Colon Cancer Histopathological Image Dataset (LC25000). *arXiv.* 2019.
- [26] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. *Nature.* 2015; 521(7553); 436–444.
- [27] Behrad F, Saniee Abadeh M. An overview of deep learning methods for multimodal medical data mining. *Expert Syst. Appl.* 2022; 200(Aug.):117006.
- [28] Sharma A, Lysenko A, Boroevich KA, Vans E, Tsunoda T. DeepFeature: feature selection in nonimage data using convolutional neural network. *Brief. Bioinform.* 2021; 22(6).
- [29] Li Z, Liu F, Yang W, Peng S, Zhou J. A Survey of Convolutional Neural Networks: Analysis, Applications, and Prospects. *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.* 2022; 33(12): 6999–7019.
- [30] Subramanian N, Elharrouss O, Al-Maadeed S, Chowdhury M. A review of deep learning-based detection methods for

- COVID-19. *Comput. Biol. Med.* 2022; 143: 105233.
- [31] Sarıgül M, Ozyildirim BM, Avcı M. Differential convolutional neural network. *Neural Networks.* 2019; 116: 279–287.
- [32] Doğan G, Ergen B. Karayollarındaki Asfalt Çatlaklarının Tespiti İçin Yeni Bir Konvolüsyonel Sinir Ağı Tabanlı Yöntem. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.* 2022; 34(2): 485–494.
- [33] Çalışan M, Talu MF. Comparison of Methods for Determining Activity from Physical Movements. *Politek. Derg.* 2021; 24(1): 17–23.
- [34] Özdemir E, Türkoğlu İ. Yazılım Güvenlik Açıklarının Evrimsel Sinir Ağları (CNN) ile Sınıflandırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.* 2022; 34(2): 517–529.
- [35] Celik G. CovidCoughNet: A new method based on convolutional neural networks and deep feature extraction using pitch-shifting data augmentation for covid-19 detection from cough, breath, and voice signals. *Comput. Biol. Med.* 2023; 163: 107153.
- [36] Toğaçar, M., Cömert, Z. & Ergen, B. Enhancing of dataset using DeepDream, fuzzy color image enhancement and hypercolumn techniques to detection of the Alzheimer's disease stages by deep learning model. *Neural Comput & Applic.* 2021; 33, 9877–9889.
- [37] Başaran E. A new brain tumor diagnostic model: Selection of textural feature extraction algorithms and convolution neural network features with optimization algorithms. *Comput. Biol. Med.* 2022; 148; 105857.
- [38] Çalışkan, A. Detecting human activity types from 3D posture data using deep learning models. *Biomed. Signal Process. Control.* 2023; 81:104479.
- [39] Çalışkan A. Classification of Tympanic Membrane Images based on VGG16 Model. *Kocaeli J. Sci. Eng.* 2022; 5(1): 105–111.
- [40] Toğaçar, Z. Cömert, B. Ergen and Ü. Budak, "Brain Hemorrhage Detection based on Heat Maps, Autoencoder and CNN Architecture," 2019 1st International Informatics and Software Engineering Conference (UBMYK), Ankara, Turkey. 2019; 1-5.
- [41] Tan M, Le QV. EfficientNet : Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks. in *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning, PMLR 97.* 9-15 June 2019; Long Beach, California: 6105–6114.
- [42] Alhichri H, Alswayed AS, Bazi Y, Ammour N, Alajlan NA. Classification of Remote Sensing Images Using EfficientNet-B3 CNN Model With Attention. *IEEE Access.* 2021; 9: 14078–14094.
- [43] Gang S, Fabrice N, Chung D, Lee J. Character Recognition of Components Mounted on Printed Circuit Board Using Deep Learning. *Sensors.* 2021; 21(9): 2921.
- [44] Shahbakhi M, Far DT, Tahami E. Speech Analysis for Diagnosis of Parkinson's Disease Using Genetic Algorithm and Support Vector Machine. *J. Biomed. Sci. Eng.* 2014; 07(04): 147–156.
- [45] Gunduz H. Deep Learning-Based Parkinson's Disease Classification Using Vocal Feature Sets. *IEEE Access.* 2019; 7: 115540–115551.
- [46] Thangavel KD, Seerengasamy U, Palaniappan S, Sekar R. Prediction of factors for Controlling of Green House Farming with Fuzzy based multiclass Support Vector Machine. *Alexandria Eng. J.* 2023; 62: 279–289.
- [47] Başaran E. Classification of white blood cells with SVM by selecting SqueezeNet and LIME properties by mRMR method. *Signal, Image Video Process.* 2022; 16(7): 1821–1829.
- [48] Kaya Y, Uyar M. A hybrid decision support system based on rough set and extreme learning machine for diagnosis of hepatitis disease *Appl. Soft Comput. J.* 2013; 13(8); 3429–3438.
- [49] Liu T, Fan W, Wu C. A hybrid machine learning approach to cerebral stroke prediction based on imbalanced medical dataset. *Artif. Intell. Med.* 2019; 101(September): 101723.
- [50] Caprolu M, Raponi S, Oligeri G, Di Pietro R. Cryptomining makes noise : Detecting cryptojacking via Machine Learning. *Comput. Commun.* 2020; 171(November): 126–139.
- [51] Subramanian N, Elharrouss O, Al-maadeed S, Chowdhury M. A review of deep learning-based detection methods for COVID-19. *Comput. Biol. Med.* 2022; 143: 105233.
- [52] Ibrahim AA, Ridwan RL, Muhammed MM, Abdulaziz RO, Saheed GA. Comparison of the CatBoost Classifier with other Machine Learning Methods. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* 2020; 11(11): 738–748.
- [53] Ghosh S, Bandyopadhyay A, Sahay S, Ghosh R, Kundu I, Santosh KC. Colorectal Histology Tumor Detection Using Ensemble Deep Neural Network. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 2021; 100: 104202.
- [54] Trivizakis E, Ioannidis GS, Souglakos I, Karantanas AH, Tzardi M, Marias K. A neural pathomics framework for classifying colorectal cancer histopathology images based on wavelet multi-scale texture analysis. *Sci. Rep.* 2021; 11(1): 15546.
- [55] Tsai MJ, Tao YH. Deep Learning Techniques for the Classification of Colorectal Cancer Tissue. *Electronics.* 2021; 10(14): 1662.
- [56] Paladini E, Vantaggiato E, Bougourzi F, Distante C, Hadid A, Taleb-Ahmed A. Two Ensemble-CNN Approaches for Colorectal Cancer Tissue Type Classification. *J. Imaging.* 2021; 7(3): 51.

Kırık Rotor Çubuğu Sayısının Ampirik Mod Ayrışımı ve Makine Öğrenmesi Yaklaşımları İle Belirlenmesi

Fırat DİŞLİ^{1*}, Mehmet GEDİKPINAR², Abdulkadir ŞENGÜR³

^{1,2,3} Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
^{*1} dislifirat@gmail.com, ² mgedikpinar@gmail.com, ³ ksengur@gmail.com

(Geliş/Received: 02/05/2023;

Kabul/Accepted:12/08/2023)

Öz: Endüstriyel sürücü sistemlerinde verimlilikleri, sağlamlıkları, güç ve boyut çeşitlilikleri nedeniyle asenkron motorlar sıklıkla kullanılmaktadır. Asenkron motorlarda meydana gelen kırık rotor çubuğu arızaları, sistemin verimliliğini doğrudan etkilediğinden arıza teşhisi gittikçe önem kazanmaktadır. Kırık rotor çubuğu arızalarının teşhisi için hem stator akım sinyali hem de motor titreşim sinyali kullanılmaktadır. Son zamanlarda bu konuda yapılan çalışmalarda bazı sinyal işleme teknikleri ile birlikte makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, ampirik mod ayrışımı (AMA) ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak kırık rotor çubuğu sayısının sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. İlk olarak arızalı motor veri setinden alınan bir faz akımı ve motor titreşim sinyali filtrelenip zarflanmıştır. İkinci adımda bu sinyaller AMA yöntemiyle 5 adet içsel mod fonksiyonuna (İMF) ayrıştırılıp spektral entropi ve anlık frekans öznitelikleri elde edilmiştir. Üçüncü adımda bu öznitelikler uç uca eklenip yeni öznitelik vektörü oluşturulmuştur. Dördüncü adımda, öznitelik vektörleri destek vektör makinesi (DVM), k en yakın komşu (KEK) ve karar ağacı (KA) makine öğrenmesi yöntemleriyle sınıflandırılmıştır. Başarı parametresi olarak sınıflandırma doğruluğu kullanılmış ve en yüksek başarı %93,9 ile DVM sınıflandırma yönteminden elde edilmiştir. Çalışmanın sonunda literatürde aynı veri seti için yapılan çalışmalar ile performans karşılaştırılması yapılmış ve bunların sonucunda kırık rotor çubuğu sayısının sınıflandırılmasının AMA ve DVM ile yapılabileceği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Ampirik mod ayrışımı, Asenkron motor, Kırık rotor çubuğu, Makine öğrenmesi.

Determination of The Number of Broken Rotor Bars by Empirical Mode Decomposition and Machine Learning Approaches

Abstract: Induction motors are frequently used in the industrial drive systems due to their efficiency, robustness, power and size diversity. Diagnosis is becoming increasingly important as broken rotor bar failures in induction motors directly affect the efficiency of the system. Both the stator current signal and the motor vibration signal are used to diagnose broken rotor bar faults. In recent studies on this subject, machine-learning methods are used together with some signal processing techniques. In this study, determination of the number of broken rotor bars was performed using empirical mode decomposition (EMD) and machine learning methods. Firstly, a phase current and vibration signal taken from the faulty motor data set are filtered and enveloped. In the second step, these signals were decomposed into five intrinsic mode functions (IMF) using by the EMD method, and their spectral entropy and instantaneous frequency features were obtained. In the third step, these features are added end-to-end and a new feature vector is created. In the last step, feature vectors are classified by support vector machine (SVM), k nearest neighbor (KNN) and decision tree (DT) machine learning methods. Classification accuracy was used as the success parameter and the highest success in classification was obtained with SVM, with a classification accuracy of 93.9%. Final of the study, performance comparisons were made with the studies conducted for the same data set in the literature. As a result, it has been seen that the classification of the number of broken rotor bars can be done successfully with EMD and SVM.

Key words: Broken rotor bar, Induction motor, Empirical mode decomposition, Instantaneous frequency, Machine learning.

1. Giriş

Asenkron motorlar endüstriyel sistemler, elektrikli araçlar ve ev aletleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Asenkron motorlarda dönme hareketinin oluşturulması ve tork üretilmesi için gerekli olan önemli bir bileşen rotor elemanıdır. Besleme kayağındaki dengesizlikler, yükteki dengesizlikler gibi çalışma koşulları motorlarda bazı problemleri meydana getirmektedir. Bu problemler rotor elemanlarında genellikle rotor çubuğu kırılması arızasına neden olmaktadır. Bu arıza ile torkta dalgalanma, motorda aşırı ısınma, akımda dalgalanmalar ve ortalama torkta azalma oluşarak motor verimini düşürmektedir. Endüstriyel uygulamalardaki bu tür kayıpların azaltılması ve arızanın teşhisi için bilgi teknolojilerinin gelişmesiyle sinyal işleme temelli yöntemler yaygınlaşmıştır. Arıza teşhis

* Sorumlu yazar: dislifirat@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-0016-3558, ² 0000-0002-1045-7384, ³ 0000-0003-1614-2639

yöntemleri genellikle vibrasyon sinyali ve motor akım sinyali üzerine temellenir. Bu veriler gürültülü olsa da, sinyal işleme teknikleri arıza özelliklerini doğru biçimde çıkarabilir. Sinyal işleme teknikleri ile birlikte yapay sinir ağı modellerinin kullanılmasıyla birlikte arıza teşhisinin hesaplama hızı ve genelleme performansı artabilmektedir [1,2].

İletim yolu ve ortam gürültüsünden dolayı vibrasyon sinyalinin arıza teşhisine yönelik karakteristik bilgisi zayıflarken kırık rotor çubuğu arızasının stator akımına özellikli etki yapması, stator akımı ile arıza teşhisini kolaylaştırmaktadır. Bu nedenlerle arıza teşhisi için vibrasyon ve akım sinyalinin birlikte kullanılması teşhis başarısını arttırmaktadır [3,4].

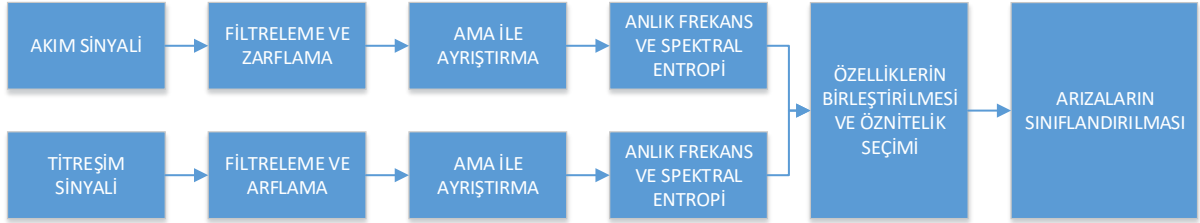
Asenkron motorlarda kırık rotor çubuğu arızası için, genellikle frekans analizine dayalı sinyal işleme teknikleri kullanılmaktadır. Motor akımı kullanılarak yapılan bu yöntemler motor akım imza analizi olarak adlandırılmaktadır. Motorun arıza özelliklerini elde etmek için akım sinyali bazı sinyal işleme teknikleri ile bileşenlerine ayrılır veya bazı istatistiksel değerler elde edilir. Elde edilen bu değerler ve bileşenler analiz edilerek arıza teşhisi yapılabilmektedir. Sinyal işleme uygulamalarında sıklıkla kullanılan hızlı Fourier dönüşümü (HFD) tekniği, durağan olmayan sinyallerde ve düşük hızlarda arıza teşhisi konusunda zayıf kalmaktadır. Bu dezavantajından dolayı son zamanlarda AMA sürekli dalgacık dönüşümü (SDD), kısa zamanlı Fourier dönüşümü (KZFD) gibi gelişmiş teknikler kullanılmaya başlamıştır. Bu teknikler hem akım sinyali hem de vibrasyon sinyalinden arıza özellikleri çıkarılması konusunda başarılı sonuçlar vermektedirler [5-7].

Sinyal işleme teknikleri ile çıkarılan arıza özellikleri, hem istatistiksel analizler hem de yapay sinir ağı (YSA) modelleri ile sınıflandırılmaktadır. Problemin çözümde DVM, KA, KEK gibi makine öğrenmesi metodlarının yanında evrişimli sinir ağları (ESA), uzun kısa süreli bellek (UKSB) gibi derin öğrenme metodları da kullanılmaktadır. Makine öğrenmesi metodlarında arıza özelliklerinin çıkarılması ve seçilmesi araştırmacı tarafından yapılırken, derin öğrenme modellerinde özellik çıkarılması adımı modelin kendisi tarafından yapılmaktadır. Makine öğrenmesi yöntemleri sınırlı veri kümelerinde başarılı sonuçlar üretirken, derin öğrenme modelleri daha büyük veri kümelerinde başarılı sonuçlar üretmektedir. Ayrıca önceden başka problemlerde eğitilmiş ağların transfer öğrenme yöntemiyle yeni problemler için kullanılabilmesinden dolayı son zamanlarda derin öğrenme yaklaşımları arıza teşhisi konusunda ön plana çıkmaktadır [8-15].

Literatürde kırık rotor çubuğu arızası teşhisi için yapılan çalışmalar incelendiğinde genelde çözüm için dört temel adım uygulandığı görülmektedir. Birinci adım, deney setinin oluşturulması ve verilerin toplanması, ikinci adım sinyal ve veri ön işleme işleme, üçüncü adım özellik çıkarma ve özellik seçme, dördüncü adım ise arıza sınıflandırma ve ya özellik analizi yapılması şeklinde ilerlemektedir. Reddy ve arkadaşları, 4 farklı seviyede rulman arızası deney seti oluşturup, motordan alınan vibrasyon sinyallerini AMA ile bileşenlerine ayırarak arıza özellikleri çıkarmışlardır. Entropi temelli özellik seçme yöntemini kullanıp farklı makine öğrenmesi teknikleri ile sınıflandırma yapmışlardır [8]. Benzer bir çalışmada Sbaa ve arkadaşları, sağlıklı ve 1 kırık rotor çubuklu motor seti oluşturup, yüksüz ve %75 yükte testler yapmışlardır. Elde ettikleri stator akımlarından HFD, ayırık dalgacık dönüşümü (ADD) ve AMA yöntemleri kullanarak özellikler çıkarmışlardır. Bu özellikleri istatistiksel yöntemlerle analiz edip, ADD ve AMA yöntemleri ile daha başarılı teşhis yapılacağı sonucuna varmışlardır [5]. Bir başka çalışmada Shao ve arkadaşları, stator sargılarında kısa devre arızası, rulman arızası, eksenel kaçıklık arızası, rotor bent arızası ve kırık rotor çubuk arızası teşhisleri için çoklu sinyal kullanan çok kanallı CNN modeli önermişlerdir. Yaptıkları çalışmada stator akımı ve vibrasyon sinyalini SDD ile zaman-frekans özellikleri çıkarılmış. Bu özellikler çok kanallı bir ESA ile sınıflandırılmış ve çoklu sinyal kullanılarak oluşturulan yöntemin daha başarılı sınıflandırma yaptığı sonucuna varmışlardır [4]. Faiz ve arkadaşları ise, farklı sayıda ve farklı rotor lokasyonlarında kırık çubuğa sahip inverter beslemeli asenkron motor arızası teşhisi için AMA temelli analiz yapmışlardır. Elektrik motorları genellikle inverter ile sürüldüğünden deneylerini inverter kullanarak yapmışlardır. İnverter besleme ile arızanın hız üzerindeki etkisi kompozite edilip farklı hızlarda yaptıkları testlerde kırık rotor çubuklarının bitişik konumda olması arızanın daha belirgin olduğu sonucuna varmışlardır [9]. Motor arıza teşhisi konusunda yapılan bir başka çalışmada Valles-Novo ve arkadaşları, farklı sayıda kırık rotor çubuğu arızasını hem farklı yüklerde hem de motorun geçici ve kalıcı durumda test etmişlerdir. AMA kullanarak stator akımını bileşenlerine ayırıp standart sapma değeri üzerinden alanda programlanabilir kapı dizisi (APKD) kullanarak sınıflandırma yapmışlardır. Yaptıkları çalışma ile hem motorun geçici durumunda hem de kalıcı durumunda arıza teşhisini yapmışlardır [10].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, motor akım sinyali ve vibrasyon sinyalinin birlikte kullanılıp, AMA ile özelliklerine ayrıştırıldıktan sonra birçok alanda kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri ile asenkron motor arıza teşhisinin sınıflandırılması başarılı sonuç vereceği öngörülmektedir. Bu bağlamda, yapılan çalışmada ilk olarak 1'er saniyelik akım ve gerilim sinyalleri filtrelenmiş ve zarflanmıştır. İkinci adımda AMA yöntemi ile 5 adet içsel mod fonksiyonu (IMF) elde edilmiş ardından bu fonksiyonlardan anlık frekans ve spektral entropi özellikleri çıkarılmıştır. Çıkarılan özellikler bir sonraki adımda uç uca eklenerek birleştirilip ilk 10000 özellik

seçilmiştir. Seçilen özellikler için son adımda karar ağacı, k en yakın komşu ve destek vektör makinesi yöntemleri ile sınıflandırma yapılmıştır. Çalışmada kullanılan yöntemle ait akış şeması Şekil 1’de verilmiştir. Çalışmanın sonucunda elde edilen sonuçlar karışıklık matrisleriyle gösterilmiş ve bu sonuçlar aynı veri seti üzerinde yapılan diğer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde genellikle kullanılan motorun yüksüz ve tam yük olmak üzere iki yük koşulunda çalıştığı ve arıza çeşitliliğinin olmadığı görülmektedir. Bu çalışmada sekiz farklı yük koşulunda arıza teşhisinin yapılması ile asenkron motor arıza teşhisi literatürüne katkı sağlayacağı düşünülmektedir [15-18].



Şekil 1. Kırık rotor çubuğu arızası teşhisi için önerilen metod

2. Teorik Arkaplan

2.1. Ampirik mod ayrışımı

Ampirik mod ayrıştırma, Huang ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş olup bir sinyali bir dizi içsel mod işlevine ayıran sinyal işleme tekniğidir. Geliştirildiği günden bu yana sinyal işleme, medikal işaret işleme, yapay sinir ağları ve finans gibi bir çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. AMA yöntemi bir sinyali içsel mod fonksiyonundan (İMF) oluşan bir diziye dönüştürür. Sinyaldeki tüm yerel maksimum ve yerel minimum değerleri tanımlanarak ve kübik çizgiler kullanılarak aralarında interpolasyon yapıp İMF’ler çıkarılır. İnterplasyonlu uç değerler, İMF’nin üst ve alt zarflarını oluşturur ve bunlar daha sonra ilk İMF’yi elde etmek için sinyalden çıkarılır. İşlem daha sonra bir durdurma kriteri karşılanana kadar artık sinyal üzerinde tekrarlanır [11]. Zamana bağlı bir $x(t)$ sinyalini ele alalım, AMA algoritması şu şekilde çalışır:

- Sinyaldeki $x(t)$ tüm yerel maksimumları ve minimumları tanımlanır. Bunlar sırasıyla $min = \{n_1, n_2, \dots, n_N\}$ ve $max = \{m_1, m_2, \dots, m_N\}$ olarak gösterilsin. Burada n yerel minimum noktalarını, m yerel maksimum noktalarını temsil etmektedir.
- Sırasıyla üst ve alt zarfları elde etmek için kübik çizgileri kullanarak maksimum ve minimum arasında interpolasyon yapılır. Burada $u(t)$ üst zarfı, $l(t)$ alt zarfı temsil etmektedir.
 - $u(t) = interpolasyon(max)$
 - $l(t) = interpolasyon(min)$
- Zarfların ortalaması olan $m(t)$ fonksiyonu hesaplanır.
 - $m(t) = (u(t) + l(t)) / 2$
- İlk İMF’nin elde edilmesi için ortalama zarf orijinal sinyalden çıkarılır.

$$IMF1(t) = x(t) - m(t) \quad (1)$$

- Durdurma kriteri karşılanana kadar (örneğin, önceden belirlenmiş sayıda İMF çıkarılmaya veya kalıntı monoton bir fonksiyon haline gelene kadar) kalıntı sinyali ($IMF1(t)$) üzerinde i-iv adımları tekrarlanır.
- İMF’lerine ayrıştırılmış sinyalin son hali $x(t)$ şu şekilde verilebilir.

$$x(t) = IMF1(t) + IMF2(t) + \dots + IMFk(t) + R(t) \quad (2)$$

Burada k , çıkarılan toplam İMF sayısını ve $R(t)$ kalıntı sinyalini temsil etmektedir. AMA algoritması, her bir İMF için iki kriteri karşılar:

- İMF, iyi tanımlanmış bir anlık frekansa sahip tek bileşenli bir sinyaldir.
- Ekstremim sayısı ile sıfır geçiş sayısı arasındaki fark en fazla birdir.

AMA algoritması yinelemelidir ve sinyalin karmaşıklığı arttıkça çıkarılan İMF’lerin sayısı artabilmektedir. Çıkarılan İMF’ler, trend analizi veya gürültü azaltma gibi daha ileri analizler için kullanılabilir. Bununla birlikte, AMA algoritmasının mod karıştırma olasılığı ve gürültüye duyarlılık gibi bazı sınırlamaları olabilmektedir [11].

2.2. Anlık frekans ve spektral entropi

Anlık frekans (AF), belirli bir zaman noktasındaki bir sinyalin frekansının bir ölçüsüdür. Sinyalin zamanla değişen fazından aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

- $x(t)$ reel bileşen, j sanal bileşen olduğunda, sinyalin karmaşık analitik temsili $z(t) = x(t) + j * y(t)$ şeklinde olur.
- Bu sinyal $z(t) = A(t) * e^{(j\varphi(t))}$ şeklinde kutupsal olarak yazılabilir, burada $A(t)$ anlık genlik ve $\varphi(t)$ sinyalin anlık fazıdır.
- Sinyalin anlık frekansı, fazın zaman türevi ile verilir: $AF(t) = \frac{\partial \varphi(t)}{\partial t}$

Spektral entropi (SE), bir sinyalin frekans spektrumunun karmaşıklığının bir ölçüsüdür. Spektral entropi, frekans alanındaki güç dağılımının bir ölçüsüdür ve sinyalin zamansal dinamikleri hakkında herhangi bir bilgi sağlamaz. Zamansal dinamikleri yakalamak için, kayan pencere yaklaşımı kullanılarak kısa zaman aralıklarında spektral entropi hesaplanabilir. Bu durumda, spektral entropi her pencere için hesaplanarak frekans spektrumunun karmaşıklığının zamanla değişen bir ölçüsü elde edilir [8]. Sinyalin güç spektral yoğunluğunun (GSY) entropisiyle ilişkilidir ve şu şekilde verilir:

- Fourier dönüşümü $X(f)$ olan bir $x(t)$ sinyalinin GSY'si $P(f) = |X(f)|^2$ şeklinde verilebilir.
- Spektral entropi $H(f)$ ise şu şekilde tanımlanır: $H(f) = -1 \int P(f) * \log_2(P(f)) df$

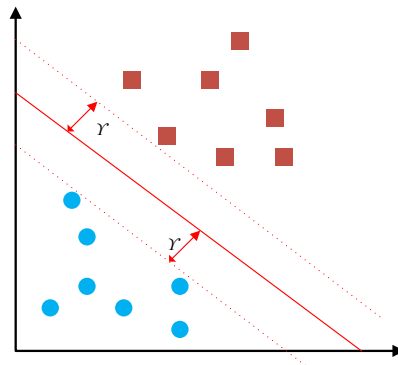
burada integral ilgili frekans aralığı üzerinden alınır. SE, 0 ile $\log_2(N)$ arasında değişir, burada N , GSY'deki frekans bölmesi sayısıdır. 0 değeri tamamen düz bir spektrumu gösterirken, $\log_2(N)$ değeri, tüm frekans bölmelerine eşit enerji dağıtılmış maksimum derecede karmaşık bir spektrumu gösterir [12].

2.3. Destek vektör makinesi

Destek Vektör Makinesi (DVM) sınıflandırıcısı, istatistiksel yöntemleri kullanan güçlü bir lineer olmayan sınıflandırıcıdır. Hem özellik çıkarma hem de sınıflandırma uygulamalarında kullanımının kolay olması nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadır. DVM'nin temel işlevi, iki boyutlu uzayda doğrusal olarak sınıflandırılabilen iki örnek grubunu, düz bir çizgi ile ayırmaktır. Çok boyutlu uzaydaki örnekler, bir düz çizgi tarafından ayrılabilir. Yine de örneklerin bir düz çizgi tarafından ayrılmadığı problemlerde düşük boyutlu uzaydaki verileri yüksek boyutlu uzaya eşleme yöntemiyle DVM'ler örnek kümeyi doğrusal olarak ayrılabilir hale getirebilir ve bu işlemi gerçekleştirmek için bir çekirdek fonksiyonu kullanılır. Ek olarak, DVM'nin yumuşak marjlı olması genelleme performansını güçlendirir. DVM'ler, regresyonların yanı sıra çeşitli türdeki sorunları sınıflandırmak için kullanılabilen farklı hibritlere sahiptir. x_i bir giriş vektörü, y_i karşılık gelen çıkışlar olsun. Böylece eğitim seti $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ olur, burada n eğitim setindeki toplam örnek sayısıdır. DVM'nin amacı, eğitim setini iki farklı kümeye ayıran Υ ($\Upsilon = 1, \Upsilon = -1$) değerlerine sahip düz çizgi bulmaktır. Bura Υ hiper-düzlem ile kümeler arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. Hiper-düzlem eşitliği denklem 3'de verildiği gibi doğrusal düzlem olarak kabul edilebilir [16,17].

$$f(x) = w * x + b \quad (3)$$

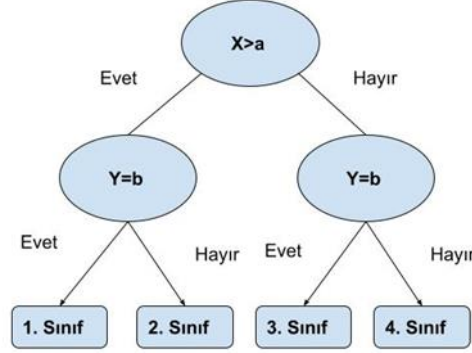
Burada w , x ile aynı boyuta sahip bir giriş vektörü ve b ise bias değeridir. Optimum sınıflandırma için, optimum bir hiper-düzlem bulunmalıdır. Optimum hiper-düzlem, Şekil 2'de gösterildiği gibi iki farklı küme arasındaki en büyük geometri mesafesini Υ almasıyla meydana gelmektedir.



Şekil 2. Eğitim setinde geometrik uzaklık

2.4. Karar ağacı

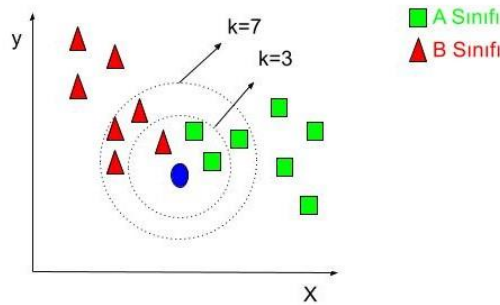
Karar ağaçları, hızları ve verimlilikleri nedeniyle sınıflandırmada ve regresyon problemlerinde sıklıkla kullanılan denetimli makine öğrenmesi yöntemlerinden biridir. Karar ağaçları, ağaç mimarisinin oluşturulması ve bu ağaçtan kuralların elde edilmesi olarak iki aşamada oluşturulurlar. Kök düğüm, dal ve yaprak düğümler karar ağaçlarının temel bileşenleri olup, karar verme süreci kök düğümlerden yaprak düğümlere doğru ilerler. Kök düğümler özellik kümelerini temsil ederken dallar kuralları temsil etmektedir. Dallardaki kurallar takip edilerek ulaşılan yaprak düğümler ise ağacın çıkışı olan bir kararı ifade etmektedir. Temel bir karar ağacı yapısı Şekil 3'de verilmiştir [18].



Şekil 3. Temel bir karar ağacı

2.5. K en yakın komşu

KEK, sınıflandırma ve kümeleme problemlerinde sıklıkla kullanılan denetimli makine öğrenmesi yöntemidir. Bu algoritmada, sınıflandırılmış mevcut veriler saklanır, önceki veriler ile yeni gelen veriler arasında hesaplanan uzaklıklara göre sınıflandırma yapılır. Bu yöntemde “k” tane komşu için yeni gelen verinin mevcut verilere uzaklığı hesaplanır. Her bir yinelemede yeni gelen verinin mevcut verilere uzaklıkları hesaplanıp “k” yakın komşuluğu kontrol edilir. Veriler, k tane komşu için yakın hesaplanan komşusunun sınıfına dâhil edilir. Yeni gelen verinin komşularına olan mesafesi hesaplanırken Öklid, Manhattan ve Minkowski fonksiyonları kullanılır. Şekil 4’de örnek bir KNN çizimi verilmiştir. Buna göre üçgen ve karelerden oluşan kümeler ek bir elips ile ifade edilen veri geldiğinde bu verinin komşularına olan uzaklığı ölçülür. K değeri 3 olduğunda yeni gelen elips kare sınıfına dâhil edilirken, k=7 olduğunda üçgen sınıfına dâhil edilir. KNN algoritması güçlü bir sınıflandırıcı olmasına rağmen, her yeni veri geldiğinde tüm işlemleri tekrar yaptığından, büyük veri kümelerinde hesaplama zamanı artmaktadır. Bu nedenle küçük veri kümelerinde daha etkili kullanılabilir [19,20].

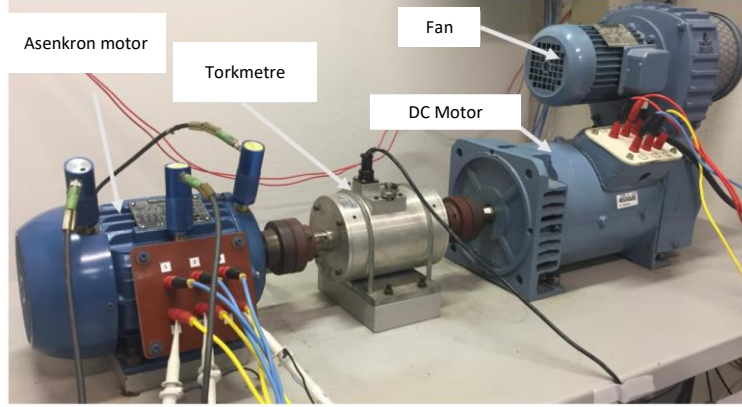


Şekil 4. K en yakın komşu algoritması grafiği

3. Veriseti

Çalışmamızda açık erişim olan kırık rotor çubuğu arızalarına sahip asenkron motorun veri seti kullanılmıştır. Üç fazlı asenkron motor üzerinde yapılan testlerden elde edilen elektriksel ve mekanik sinyaller veri setinde bulunmaktadır. Veri setinde kullanılan asenkron motor 3 faz, 1 hp güç, 220/380V besleme gerilimi, 4 kutup ve

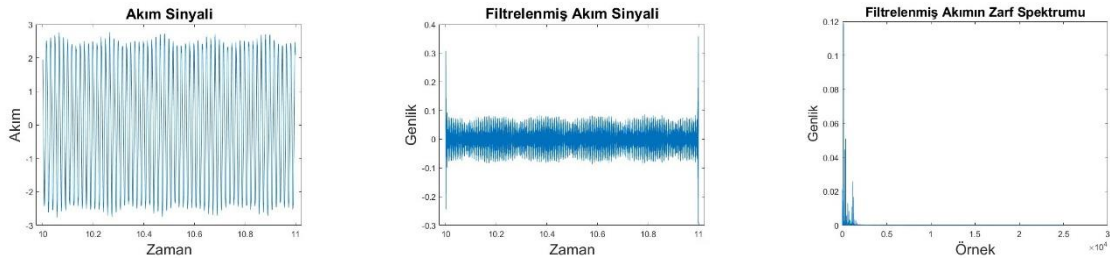
1785 rpm nominal hıza sahiptir. Veri setinde 1, 2, 3 ve 4 kırık çubuğa sahip dört hata sınıfı ve de bir sağlıklı sınıf bulunmaktadır. Tüm sınıflar için veri seti, yük koşulu olarak 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 ve 4.0 Nm tork olarak 8 yük koşulundan oluşturulmuştur. Veri kümesi oluşturma için sağlıklı ve yükleme koşullarının her bir kombinasyonu için on deney yapılmıştır [21]. Bu çalışmada, sağlıklı ve yükleme koşullarının her bir kombinasyonu için sürülen taraftaki radyal mekanik titreşim sinyali ve bir faz akım sinyali kullanılmıştır. Radyal mekanik titreşim sinyali veri setinde Vib_acpi olarak, bir faz akım sinyali Ia olarak temsil edildiğinden, yapılan çalışmada bu temsilleri kullanılmıştır. Titreşim sinyallerinin örnekleme frekansı 7600 Hz ve elektriksel sinyallerinin örnekleme frekansı 50 kHz'dir. Çalışmada, 8 yük koşulu ve 5 arıza sınıfı için 1 sn lik sinyaller her bir deney için 40, toplamda 5 sn ve 10 deney göz önüne alındığında toplam sinyal sayısı 2000 adet oluşturulmuştur. Şekil 5'te arızalı asenkron motor veri seti elde etmek için kurulan deney seti görseli verilmiştir.



Şekil 5. Veri seti için kurulan deney seti

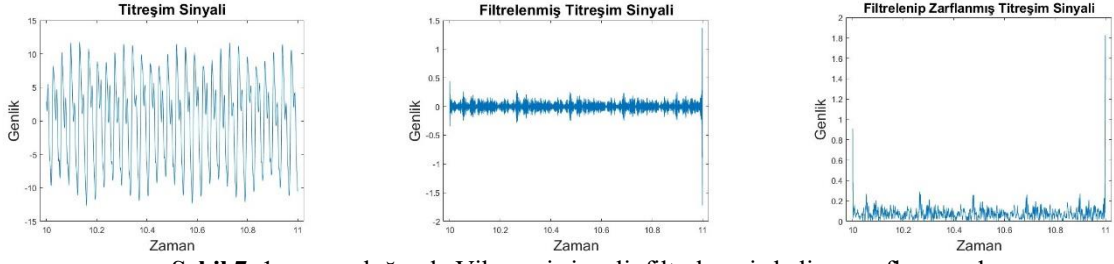
4. Deneysel Çalışmalar ve Bulgular

Deneysel çalışmalarda i7 İntel mikro işlemcisi 64 GB RAM'ı olan bir bilgisayar kullanılmıştır. Ayrıca makina öğrenme uygulamaları için de 8 GB RAM'a sahip Nvidia M4000 GPU kullanılmıştır. Tüm kodlamalar MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Titreşim sinyali Vib_acpi ve akım işareti Ia'nın güç spektrumlarında [900 1300] Hz bandında ilgilenilen frekans bileşenleri bulunmaktadır. Bu nedenle, Vib_acpi ve Ia sinyallerini bu bant aralığında filtrelemek için bir bant geçiren süzgeç kullanılmıştır. Bant geçiren filtrelemeden sonra sinyallerin zarfları hesaplanmış ve bu zarflar bir sonraki adımda kullanılmıştır. Veri setindeki sinyallerin uzunluğu 18 saniye olup, Vib_acpi ve Ia sinyallerinin zarflarının örneklenmesi için 11-15 saniye aralığında, 1 saniye uzunluğunda örtüşmeyen pencereler kullanılmıştır. Böylece her bir Vib_acpi ve Ia sinyali için toplam 2000 sinyal örneği oluşturulmuş ve deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. 1 saniye uzunluğundaki Ia sinyali, filtrelenmiş durumu ve filtrelenmiş durumunun zarf spektrumu Şekil 6'da verilmiştir.



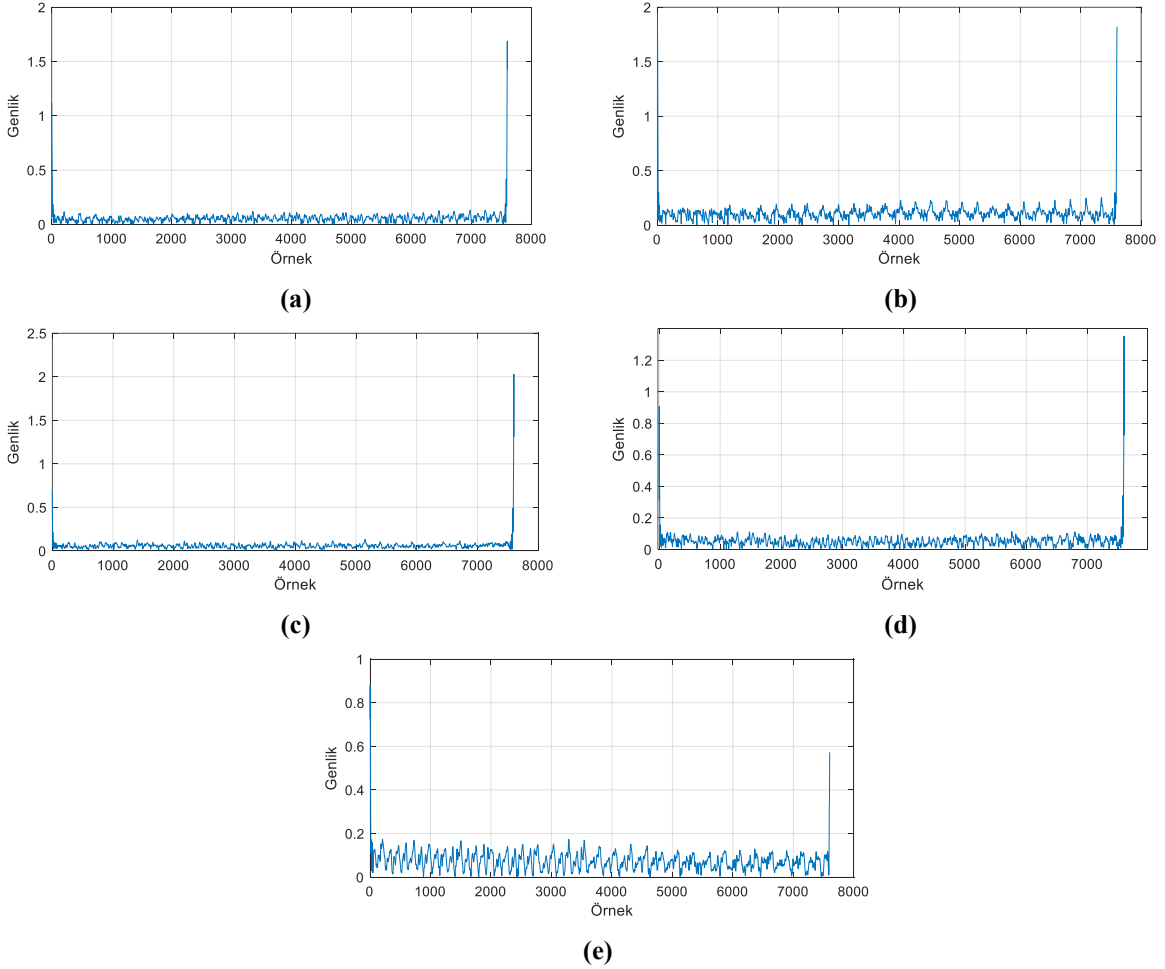
Şekil 6. 1 sn uzunluğunda Ia sinyali, filtrelenmiş hali ve zarf spektrumu

Zarf spektrumu analizi özellikle dönen makinelerin arıza teşhisinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Arızalı sinyal ile sağlıklı sinyal zarf spektrumu arasındaki farklılık, bazı istatistiksel yöntemler ve HFD gibi sinyal işleme teknikleri ile belirlenebilmektedir. Zarf spektrumu ile arıza analizi üç adıma ayrılabilir, İlk olarak sinyal filtrelenir, ikinci olarak üst zarfı ve bu zarfından Hilbert dönüşümü ile zarf spektrumları elde edilir. Son olarak AMA yöntemi gibi sinyal işleme teknikleri ile arıza özellikleri elde edilir [22].

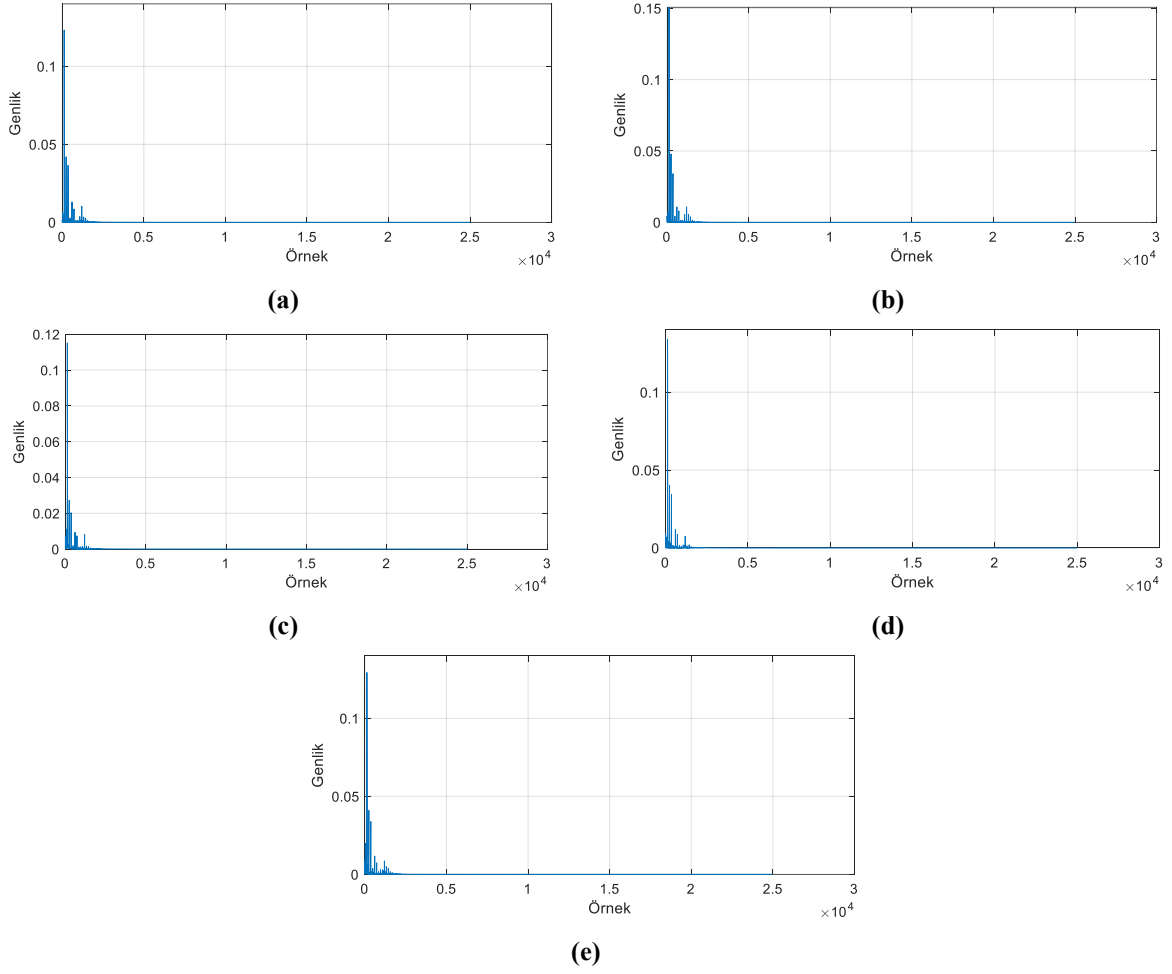


Şekil 7. 1 sn uzunluğunda Vib_acpi sinyali, filtrelenmiş hali ve zarflanmış durumu

Çalışmada kullanılan titreşim sinyali Vib_acpi sinyali, bu sinyalin filtrelenmiş durumu ile filtrelenip zarflanmış hali Şekil 7'de gösterilmiştir. Kırık rotor çubuğu olan arızalı bir asenkron motorun akım ve titreşim sinyallerindeki dalgalanmalar ve bu dalgalanmalara bağlı olarak zarfları ve zarf spektrumlarındaki farklılıkların iki temel değişkene bağlıdır. Bunlar motorun yük durumu ve kırık rotor çubuğu sayısıdır. Hem motorun yükündeki artış hem de kırık rotor çubuğu sayısındaki artış akım ve titreşim sinyallerinin spektrumlarındaki harmonik sayısında artışa ve bu harmoniklerin genliklerinin artmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada sekiz farklı yük koşulu kullanılmış ama sınıflandırma işlemi sadece kırık çubuk sayısı için yapılmıştır. Sekiz farklı yük koşulunda ait sinyallerin kullanılması sınıflandırma zorluğunu arttırabilmektedir. Şekil 8'de, tüm arıza sınıfları için Vib_acpi sinyallerinin zarfları göstermektedir. Ayrıca Şekil 9'da tüm arıza sınıfları için la akım sinyalinin zarf spektrumunu vermiştir.



Şekil 8. 0.5 Nm yük koşulu için Vib_acpi'nin zarf sinyali a) Sağlıklı, b) Bir kırık çubuk, c) İki kırık Çubuk, d) Üç kırık Çubuk, e) Dört kırık çubuk

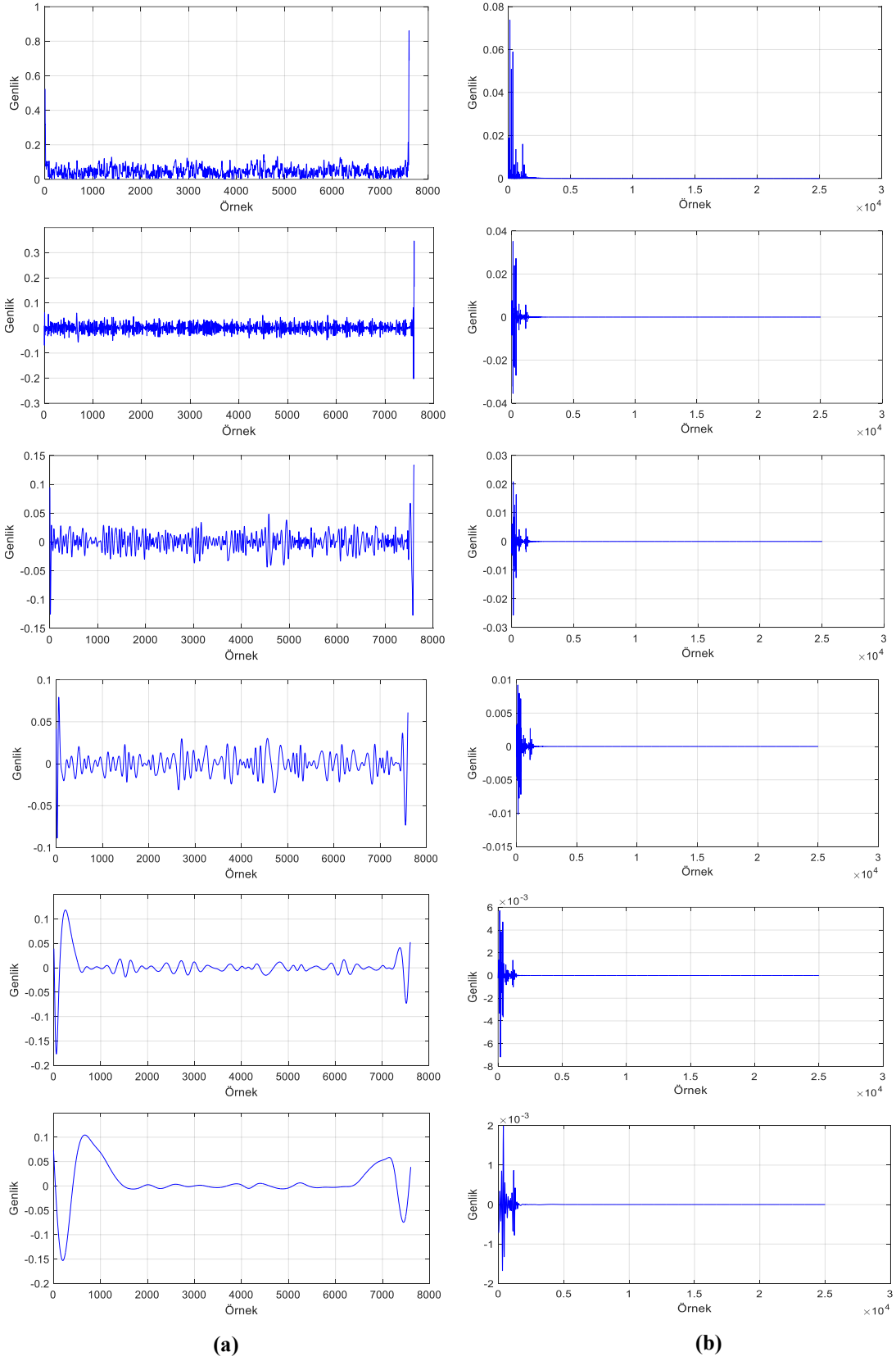


Şekil 9. 0.5 Nm yük koşulu için Ia'nın zarf spektrumu sinyali a) Sağlıklı, b) Bir kırık çubuk, c) İki kırık Çubuk, d) Üç kırık Çubuk, e) Dört kırık çubuk

Asenkron motorda kırık rotor çubuğu arızası teşhisi için, Ia ve Vib_acpi sinyalleri filtrelenip zarfları ve zarf spektrumları elde edildikten sonra AMA yöntemi ile 5 adet İMF'ye ayrıştırılmıştır. Şekil 10'da Vib_acpi ve Ia'nın İMF'leri verilmiştir. Bu şekillerden de anlaşılacağı gibi, İMF sayısı arttıkça ilgili İMF bileşenin genliğindeki değişim azalmaya başlamaktadır ve bu durumda ayrıştırma işlemi bitirilebilir. Son İMF bileşeni artık sinyal olarak adlandırılmaktadır. Artık sinyal üzerinde arıza bilgisi zayıf olmaktadır. Çalışma için kullanılan sinyallerin 5. İMF seviyesinde genlik değişimi azaldığında İMF sayısı bu çalışmada 5 olarak belirlenmiştir.

Arıza sınıflandırılması yapılmadan önce, İMF'lerine ayrıştırılmış sinyallerin anlık frekans ve spektral entropi öznitelikleri elde edilmiştir. Bu öznitelikler motorun arıza durumunda farklılık gösterdiğinden arıza sınıflandırması için kullanılabilirler. Elde edilen bu öznitelikler uç uca ekleme yöntemiyle birleştirilmiş ve yeni arıza öznitelik vektörü oluşturulmuştur. Ayrıca hem akım hem de titreşim sinyallerinden elde edilen bu özellik vektörleri de birleştirilmiştir. Doğal olarak arızanın hem akım sinyali üzerindeki etkisi hem de titreşim sinyali üzerindeki etkisi özellik vektöründe bulunmaktadır. Bu adımdan sonra, Relief öznitelik seçim algoritması ile en etkili 10000 öznitelik seçilmiş ve sınıflandırıcılara verilmiştir.

Bu çalışmada üç farklı makine öğrenmesi yöntemiyle sınıflandırma yapılmıştır. Bunlar karar ağacı (KA), destek vektör makinesi (DVM) ve k en yakın komşu (KEK) yöntemleridir. Sınıflandırmaların başarı parametresi olarak sınıflandırma doğruluğu seçilmiştir. KA kullanılarak yapılan sınıflandırmada Matlab yazılımında "fine tree" özelliği kullanılmış ve %67,6 sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. DVM yöntemi için "Quadratic SVM" kullanılmış ve %93,3 sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. Son olarak KEK yönteminde en yakın komşu sayısı 5 parametresi ile sınıflandırma yapılmış ve %88,1 doğruluk elde edilmiştir.

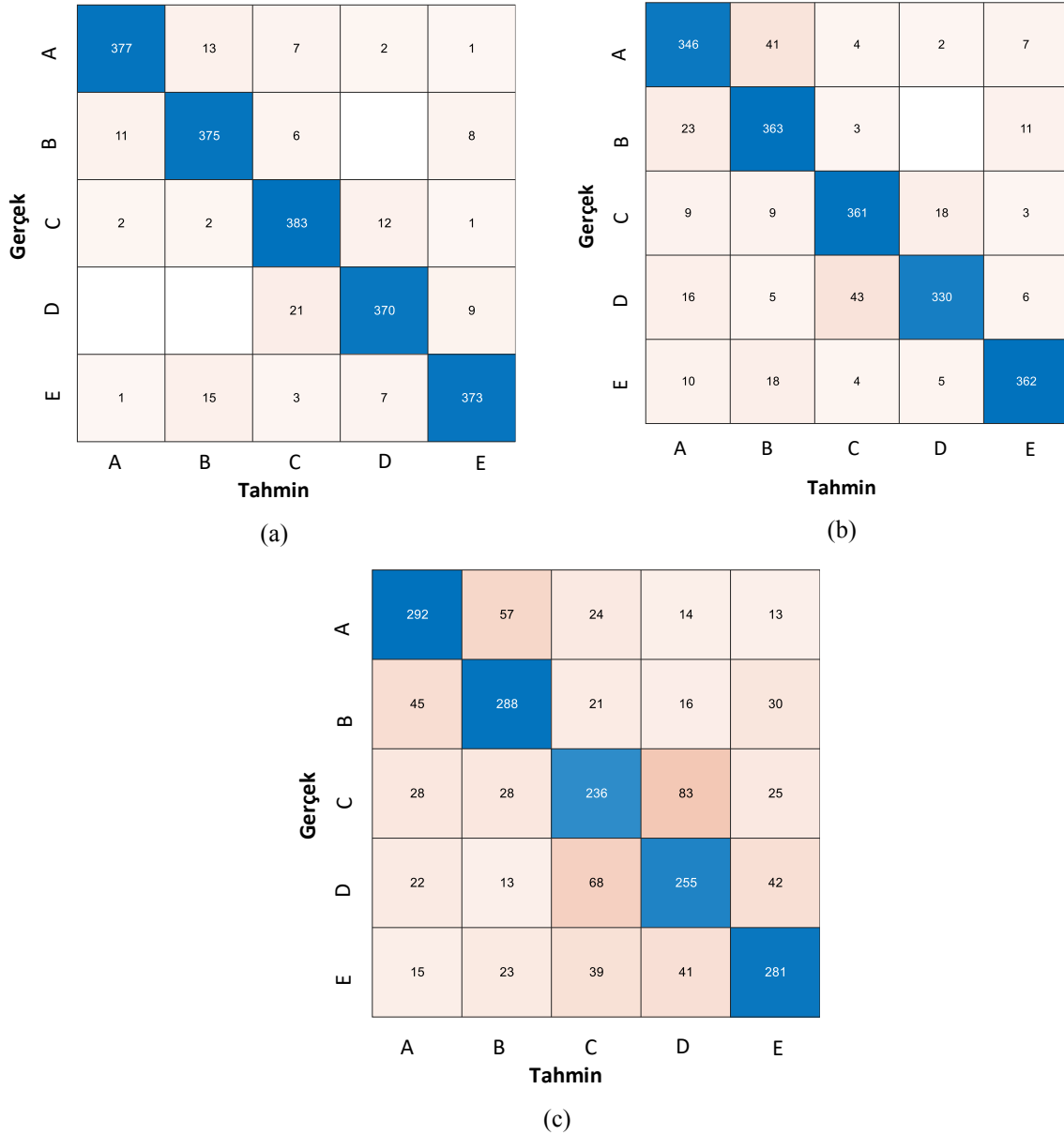


Şekil 10. 4Nm yük durumu ve sağlam motor için a) Vib_acpi ve 5 İMF seviyesi, b) Ia ve 5 İMF seviyesi

Tablo 1. Sınıflandırma Sonuçları

Sınıflandırıcı	Doğruluk
DVM	%93.9
KEK	%88.1
KA	%67.6

Yapılan sınıflandırmalara ait doğruluk değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Ayrıca, kullanılan sınıflandırıcıların başarımları karışıklık (karmaşıklık ve ya karışıklık) matrisleri ile de incelenmiştir. Şekil 11’de kullanılan sınıflandırıcılar için elde edilen karışıklık matrisleri gösterilmiştir. Karışıklık matrisinde her arıza sınıfı için 400 adet tahmin sonucu bulunmaktadır. Karışıklık matrislerinde bir kırık çubuk için A, iki kırık çubuk için B, üç kırık çubuk için C, dört kırık çubuk için D ve sağlıklı motor için E kullanılmıştır.

**Şekil 11.** Kümülatif karışıklık matrisleri a) DVM b)KEK c)KA

DVM sınıflandırıcısı için elde edilen karışıklık matrisi incelendiğinde, DVM'nin en iyi sınıflandırma başarımını, 383 adet doğru 17 yanlış tahminle 3 kırık çubuk arıza sınıfı için elde ettiği görülmüştür. Ayrıca, DVM ile en düşük sınıflandırma doğruluğu, 370 doğru ve 30 yanlış tahminle 4 kırık çubuk arıza sınıfı için elde edilmiştir. Ayrıca 1 kırık çubuk sınıfı için 377 doğru 23 yanlış tahmin, 2 kırık çubuk için 375 doğru 25 yanlış tahmin, sağlıklı sınıf için 373 doğru 27 yanlış tahmin elde edilmiştir. KEK ile yapılan sınıflandırma başarısı %88,3 olmuş ve en yüksek başarı 363 doğru 37 yanlış tahmin ile 2 kırık çubuk arızası sınıfında elde edilirken en düşük başarı 330 doğru 70 yanlış tahminle 4 kırık çubuk sınıfında elde edilmiştir. Ayrıca bu sınıflandırma algoritmasında sırasıyla, 1 kırık çubuk için 346 doğru 54 yanlış tahmin, 3 kırık çubuk için 361 doğru 39 yanlış tahmin, sağlıklı rotor sınıfı için 362 doğru 38 yanlış tahmin sonucu elde edilmiştir. Bu çalışmada yapılan son sınıflandırma yönteminde KA kullanılmış ve toplamda %67,6 sınıflandırma başarısı elde edilmiştir. Bu sınıflandırma yönteminde 292 doğru 108 yanlış tahminle 1 kırık çubuk arızası sınıfında en yüksek başarı elde edilirken, 236 doğru 164 yanlış tahminle 3 kırık çubuk arızası sınıfında en düşük başarı elde edilmiştir. Bu sınıflandırma yönteminde diğer sonuçlar sırasıyla, 288 doğru 112 yanlış tahmin ile 2 kırık çubuk, 255 doğru 145 yanlış tahminle 4 kırık çubuk ve 281 doğru 119 yanlış tahminle sağlıklı rotor sınıflarının sınıflandırması şeklinde olmuştur.

Genel olarak karışıklık matrisleri incelendiğinde, sınıflandırmada yanlış tahminlerin komşu sınıflar arasında yoğunlaştığı görülmektedir. Örneğin, DVM ile sınıflandırılmada en çok sayıda yanlış tahmin 4 kırık çubuk arızasının 3 kırık çubuk olarak tahmin edilmesi olmuştur. Benzer şekilde KEK ile sınıflandırılmada en kötü tahmin 43 adet ile 4 kırık çubuğun 3 kırık çubuk olarak, 41 adet ile 1 kırık çubuğun 2 kırık çubuk olarak tahmin edilmesi olmuştur. Aynı durum KA ile sınıflandırmada da görülmektedir. Bu sınıflandırmada 83 adet ile 3 kırık çubuğun 4 kırık çubuk olarak sınıflandırılması, yine 68 adet ile 4 kırık çubuğun 3 kırık çubuk olarak sınıflandırılması, ayrıca 57 adet ile 1 kırık çubuğun 2 kırık çubuk olarak sınıflandırılması yanlış tahminlerin komşu sınıflar arasında yoğunlaştığını pekiştirmektedir. Bu duruma, çalışma için 8 farklı yük ile çalıştırılmış motor sinyallerinin kullanılmasının neden olduğu düşünülmektedir.

Makine öğrenmesi modellerinin performanslarını değerlendirmede doğruluk değerinin yanında kesinlik (precision), duyarlılık (recall) ve bunların harmonik ortalaması olan f1 değerleri kullanılabilir. Öneri robotu gibi uygulamalarda sınıf bazlı f1 değeri kullanılabilir de bu parametreler özellikle dengesiz veri setlerinde ve ikili sınıflandırma problemlerinde performans değerlendirmesi olarak etkili olmaktadır. Tablo 2'de bu çalışmada uygulanan yöntemler için bu performans değerleri verilmiştir. Çalışma için kullanılan veri kümesi, dengeli yani içerisinde her sınıf için eşit sayıda örnek bulunduğu için, ortalama f1 değeri doğruluk değeri ile aynı olmaktadır. Yine de bu parametreler ile diğerlerinden olumsuz olarak ayrılan sınıf belirlenebilmektedir ve bu çalışmada tüm sınıfların f1 değeri doğruluk değerleri ile paralellik göstermektedir. Bu nedenle bu çalışma için yapılan değerlendirme karşılaştırmasında doğruluk değeri kullanılmıştır [23-25].

Tablo 2. Yapılan sınıflandırmaların performans değerleri

Sınıflandırıcı	Durum	Kesinlik	Duyarlılık	f1	Ortalama f1	Doğruluk
DVM	A	0.9641	0.9425	0.9532	0.939	0.939
	B	0.9259	0.9375	0.9316		
	C	0.9119	0.9575	0.9341		
	D	0.9462	0.9250	0.9355		
	E	0.9515	0.9348	0.9431		
KEK	A	0.8564	0.8650	0.8606	0.881	0.881
	B	0.8325	0.9075	0.8684		
	C	0.8698	0.9025	0.8858		
	D	0.9295	0.8250	0.8741		
	E	0.9305	0.9072	0.9187		
KA	A	0.7263	0.7300	0.7281	0.676	0.676
	B	0.7041	0.7200	0.7119		
	C	0.6082	0.5900	0.5989		
	D	0.6234	0.6375	0.6304		
	E	0.7186	0.7042	0.7113		

Tablo 3. Kullanılan veri seti için uygulanan yöntemlerin karşılaştırılması

Referans	Kullanılan Özellik	Sınıflandırıcı	Doğruluk (%)
[16]	Vib_acpi'in ResNet18 ile elde edilen özellikleri	KEK	99.5
[16]	Ia'nın ResNet18 ile elde edilen özellikleri	ESA	95.0
[16]	Derin transfer öğrenme ile Vib_acpi'den elde edilen özellikler	DVM	99.0
[16]	Derin transfer öğrenme ile Ia'dan elde edilen özellikler	DVM	94.5
[16]	Derin transfer öğrenme ile Ia ve Vib_acpi'nin birleştirilmiş özellikleri	DVM	100.0
[26]	Ia ve Vib_acpi'in frekans temelli ve istatistiksel özellikleri	KA	93.8
[26]	Ia ve Vib_acpi'in frekans temelli ve istatistiksel özellikleri	KEK	98.8
[27]	Vibrasyon sinyallerinin zaman bölgesi özellikleri	KEK	77.37
[27]	Vibrasyon sinyallerinin zaman bölgesi özellikleri	KA	83.80
Bu çalışma	Vib_acpi ve Ia dan AMA yöntemi ile çıkarılan spektral entropi ve anlık frekans özellikleri	KA	67.6
Bu çalışma	Vib_acpi ve Ia dan AMA yöntemi ile çıkarılan spektral entropi ve anlık frekans özellikleri	KEK	88.1
Bu çalışma	Vib_acpi ve Ia dan AMA yöntemi ile çıkarılan spektral entropi ve anlık frekans özellikleri	DVM	93.9

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile literatürde aynı veri seti üzerinde yapılan çalışmaların sonuçları Tablo 3'de verilmiştir. Literatürde kullanılan veri seti üzerinde yapılan çalışmalar sınırlı olduğundan sadece üç farklı çalışma için yapılan uygulamalar ile karşılaştırma yapılabilmektedir. Bu çalışmalara bakıldığında, sürekli dalgacık dönüşümü ile sinyallerin frekans temelli özellikleri iyi temsil edilebildiğinden ve evrişimli sinir ağları ile görüntüler yüksek başarı ile sınıflandırabildiğinden [16] nolu çalışmada daha yüksek başarı elde edilmiştir. Ayrıca AMA yöntemi durağan olmayan sinyallerde daha başarılı sonuç verebilirken, akım sinyali gibi durağan olan sinyallerde ise aynı başarıyı mümkün olmamıştır. Evrişimli sinir ağı ve sürekli dalgacık dönüşümü kullanılarak daha yüksek başarı elde edilebilirken, daha hızlı sınıflandırma söz konusu olduğunda bu çalışmada kullanılan DVM temelli yaklaşım tercih edilebilir.

5. Sonuç

Bu çalışmada, asenkron motorlarda meydana gelen kırık rotor çubuğu sayısının belirlenmesi için AMA yöntemi ve makine öğrenmesi yöntemlerinin bazılarını temel alan bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşımlarla kırık rotor çubuğu sayısı başarılı bir şekilde tespit edilmiştir. Literatürde bu konuda yapılan çalışmalarda genellikle sinyal işleme tabanlı istatistiksel yöntemler kullanılmış olup, çalışmaların büyük çoğunluğunda yük koşulu ve arıza çeşitliliğinin düşük olduğu görülmektedir. Yük koşulu ve arıza çeşitliliğinin artması arıza teşhisini zorlaştırmasına rağmen, bu çalışmada sekiz farklı yük koşulunda ve beş arıza sınıfında arıza teşhisinin başarılı bir şekilde yapılmasıyla yük ve arıza çeşitliliğinin oluşturduğu zorluğunun üstesinden gelinmiştir. Elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında yük çeşitliliğine rağmen, AF ve SE özelliklerinin AMA yöntemiyle çıkarılıp DVM ile sınıflandırılma yapılarak kırık rotor çubuğu sayısının başarılı bir şekilde yapılabileceği görülmektedir. Gelecekteki çalışmalarda asenkron motorlarda aynı anda meydana gelebilecek birden fazla arızanın teşhisi, önerilen yöntem ile yapılabileceği düşünülmektedir. Elektrik motorların hayatın her alanına girdiği günümüzde, farklı elektrik motorlarının arıza teşhisinde de çalışmada uygulanan yaklaşımın kullanılabileceği düşünülebilir.

Kaynaklar

- [1] Garcia M, Antonino-Daviu J. Efficiency assessment of induction motors operating under different fault conditions. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2018-Şubat, 1837-42.
- [2] Halder S, Bhat S, Zychma D, Sowa P. Broken Rotor Bar Fault Diagnosis Techniques Based on Motor Current Signature Analysis for Induction Motor—A Review. *Energies*, 2022, 15, 1-20.
- [3] Mohammed A, Melecio JI, Djurovic S. Stator winding fault thermal signature monitoring and analysis by in Situ FBG sensors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66, 8082-92.
- [4] Shao S, Yan R, Lu Y, Wang P, Gao RX. DCNN-Based multi-signal induction motor fault diagnosis. *IEEE Transactions*

- on *Instrumentation and Measurement*, IEEE. 2020, 69, 2658–69.
- [5] Sbaa S, Bessous N, Pusca R, Romary R. A comparative study dedicated to rotor failure detection in induction motors using MCSA, DWT, and EMD techniques. *2020 International Conference on Electrical Engineering, ICEE 2020*.
- [6] Ağoston K. Fault Detection of the Electrical Motors Based on Vibration Analysis. *Procedia Technology*, 2015, 19, 547–53.
- [7] Fourati A, Feki N, Bourdon A, Rémond D, Chaari F, Haddar M. Electrical modeling for faults detection based on motor current signal analysis and angular approach. *Applied Condition Monitoring*, 2016, p. 15–25.
- [8] Reddy MSP, Reddy DM, Devendiran S, Mathew AT. Bearing Fault Diagnosis Using Empirical Mode Decomposition, Entropy Based Features and Data Mining Techniques. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd. 2018, 5, 11460–75.
- [9] Faiz J, Ghorbanian V, Ebrahimi BM. EMD-Based analysis of industrial induction motors with broken rotor bars for identification of operating point at different supply modes. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE. 2014, 10, 957–66.
- [10] Valles-Novo R, De Jesus Rangel-Magdaleno J, Ramirez-Cortes JM, Peregrina-Barreto H, Morales-Caporal R. Empirical mode decomposition analysis for broken-bar detection on squirrel cage induction motors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE. 2015, 64, 1118–28.
- [11] Huang NE, Shen, Z, Long SR, Wu MC, Snin HH, Zheng Q. The empirical mode decomposition and the Hubert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454, 903–95.
- [12] Deniz E, Sobahi N, Omar N, Sengur A, Acharya UR. Automated robust human emotion classification system using hybrid EEG features with ICBBrainDB dataset. *Health Information Science and Systems*, 2022, 10.
- [13] Demir F, Sengur A, Ari A, Siddique K, Alswaitti M. Feature Mapping and Deep Long Short Term Memory Network-Based Efficient Approach for Parkinson’s Disease Diagnosis. *IEEE Access*, IEEE. 2021, 9, 149456–64.
- [14] Aslan M, Akbulut Y, Şengür A, İnce MC. Skeleton based efficient fall detection. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2017, 32, 1025–34.
- [15] Ucar, F., Alcin, O.F., Dandil, B. and Ata, F. Machine learning based power quality event classification using wavelet - Entropy and basic statistical features. *2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2016*, 414–9.
- [16] Dişli, F., Gedikpinar, M. ve Şengür, A. Deep Transfer Learning-Based Broken Rotor Fault Diagnosis For Induction Motors Asenkron Motor Kırık Rotor Çubuğu Arızasının Derin Transfer Öğrenme Tabanlı Teşhisi. *Turkish Journal of Science & Technology*, 2023, 18, 275–90.
- [17] Şengür, D. Investigation of the relationships of the students’ academic level and gender with Covid-19 based anxiety and protective behaviors : A data mining approach. *Turkish Journal of Science & Technology*, 2020, 15, 93–9.
- [18] Samantaray SR, Kamwa I, Joos G. Decision tree based fault detection and classification in distance relaying. *Engineering Intelligent Systems*, 2011, 19, 139–47.
- [19] Kilincer IF, Ertam F, Sengur A. Machine learning methods for cyber security intrusion detection: Datasets and comparative study. *Computer Networks*, Elsevier B.V. 2021, 188, 107840.
- [20] Şengür D, Turhan M. Prediction Of The Action Identification Levels Of Teachers Based On Organizational Commitment And Job Satisfaction By Using K-Nearest Neighbors Method. *Firat University Turkish Journal of Science and Technology*, 2018, 13, 61–8.
- [21] Aline ET, Rogério AF, Marcelo S, Narco ARM. Experimental database for detecting and diagnosing rotor broken bar in a three-phase induction motor, IEEE Dataport 2020. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.21227/fimnm-bn95>
- [22] Chauhan DS, Dubey J. Envelope Spectrum Analysis for Rolling Element Bearing Faults Diagnosis by Using Kurtogram and Spectral Kurtosis for Band Selection. *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*, 2021, 4, 794–801.
- [23] Amazon Machine Learning: Developer Guide. <https://docs.aws.amazon.com/machine-learning/latest/dg/multiclass-model-insights.html>
- [24] Powers, D.M.W. Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation, 2020.
- [25] Gonzalez-Ramirez A, Lopez J, ToreesRoman D, Yanez-Vargas I. Analysis Analysis of multi-class classification performance metrics for remote sensing imagery imbalanced datasets. *Journal of Quantitative and Statistical Analysis*, 2021, 8, 11–7.
- [26] Matworks. <https://www.mathworks.com/help/predmaint/ug/broken-rotor-fault-detection-in-ac-induction-motors-using-vibration-and-electrical-signals.html>.
- [27] Misra S, Kumar S, Sayyad S, Bongale A, Jadhav P, Kotecha K. Fault Detection in Induction Motor Using Time Domain and Spectral Imaging-Based Transfer Learning Approach on Vibration Data. *Sensors*, 2022, 22, 1–17.

Farklı Şiddetlerde Meydana Gelen Güneş Aktivitesinin GPS-PPP Doğruluğu Üzerindeki Etkisinin Bölgesel olarak Araştırılması

Aziz SARAÇOĞLU^{1*}

¹ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ asaracoglu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 02/05/2023;

Kabul/Accepted:12/08/2023)

Öz: Son yıllarda GNSS (Global Navigation Satellite System) topluluğu içerisinde, (Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning, PPP) yöntemi oldukça ilgi çekici bir konu haline gelmiştir. PPP tekniği ile, herhangi bir referans istasyonuna ihtiyaç duymadan yalnızca tek bir alıcı kullanarak yüksek konum doğruluğuna erişmek mümkündür. Ancak birçok hata kaynağı PPP hassasiyetini doğrudan ya da dolaylı olarak etkilemektedir. Bu çalışmada, Güneş'te meydana gelen farklı şiddetlerdeki aktivitelerin GPS-PPP doğruluğu üzerindeki etkisi bölgesel olarak araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda kutup, orta ve ekvatorial enlem bölgesinden olmak üzere Uluslararası GNSS Servisi (IGS) ağına ait üç istasyon seçilerek güneşte meydana gelen aktivite şiddetine göre GPS-PPP doğruluğundaki değişim izlenmiştir. Yaklaşık 11 yıllık güneş döngüsü dikkate alınarak 2000-2018 yılları arasındaki minimum, orta ve maksimum aktivite dönemlerine ait 60'ar günlük GPS verileri kullanılmıştır. GPS verileri, Güneşte meydana gelen aktivite değişimini tam olarak yansıtılması için gündüz vaktine denk gelen saat 10:00-18:00 aralığındaki 8 saatlik kısa veri oturumlarına bölünmüştür. Elde edilen tüm veri setleri NASA/JPL'nin GIPSY/OASIS II v6.4 yazılımının Hassas Nokta Konumlama (PPP) modülü kullanılarak analiz edilmiştir. Söz konusu üç farklı aktivite dönemi ve üç farklı bölgede gözlenen GPS-PPP doğruluğundaki değişimler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda, güneşte meydana gelen patlamalar arttıkça GPS-PPP doğruluğunun azaldığı ve bu durumdan en fazla ekvatorial enlem bölgesinin etkilendiği gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: GPS, PPP, Konum doğruluğu, Güneş aktivitesi, Güneş patlamaları.

A Regional Investigation of the Effect of Solar Activity of Different Intensities on GPS-PPP Accuracy

Abstract: In recent years, Precise Point Positioning (PPP) has become a very interesting topic within the GNSS (Global Navigation Satellite System) community. With the PPP technique, it is possible to achieve high position accuracy using only a single receiver without the need for any reference station. However, many sources of error directly or indirectly affect PPP accuracy. In this study, the impact of different intensities of solar activity on GPS-PPP accuracy was investigated regionally. For this purpose, three stations belonging to the International GNSS Service (IGS) network were selected from the polar, mid-latitude and equatorial latitudes and the change in GPS-PPP accuracy was monitored according to the intensity of solar activity. Considering the solar cycle period of approximately 11 years, 60 days of GPS data for the minimum, medium and maximum activity periods between 2000-2018 were used. The GPS data were divided into short 8-hour data sessions between 10:00-18:00, which coincides with the daytime, to fully reflect the changes in solar activity. All data sets were analyzed using the Precision Point Positioning (PPP) module of NASA/JPL's GIPSY/OASIS II v6.4 software. The changes in GPS-PPP accuracy observed during the three different periods of activity and in three regions were compared. As a result of the comparisons, it was observed that the GPS-PPP accuracy decreases as the intensity of solar activity increases, with the equatorial latitude region being most affected.

Key words: GPS, PPP, Positioning accuracy, Solar activity, Solar flares.

1. Giriş

Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning, PPP) tekniğinin, GNSS (Global Navigation Satellite System) konum belirleme teknikleri içerisindeki önemi ve kullanım oranı hızla artmaktadır. PPP tekniği, günümüzde yüksek yörünge hassasiyeti, gelişmiş saat ve atmosfer modelleri, veri işleme ve analizindeki gelişmeler sayesinde, tek bir alıcı kullanılarak referans istasyonuna ihtiyaç duymadan neredeyse rölatif konum belirleme tekniği hassasiyetine yakın bir doğrulukla koordinat bilgisi sağlayabilmektedir. Bu teknik, yayın efemerisi yerine hassas yörünge ve uydu saat değerleri kullanılmaktadır. Bu nedenle, kullanılan veriye ve ölçme süresine bağlı olarak elde edilebilecek doğruluk seviyesi de değişebilir. PPP tekniğinde, uydu yörünge ve saat

* Sorumlu yazar: asaracoglu@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-3781-3964

hataları, küresel bir ağdan (ör. International GNSS Service, IGS) alınan farklı düzeltme ürünlerinin (hassas uydu yörünge ve saat düzeltmelerinin) elde edilmesi ile giderilmektedir. PPP yöntemi, ilk olarak [1] tarafından ortaya atılmış ve ardından [2], [3] tarafından gerçekleştirilen çalışmalarıyla birlikte yaygın kullanıma başlanmıştır. PPP tekniği, referans istasyon ihtiyacını ortadan kaldırarak uygulamalarda birçok kolaylık sağlamaktadır. Bu nedenle, PPP tekniği günümüzde birçok GNSS uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. PPP, günümüzde tarım endüstrisi, hidrografi, deformasyon izleme ve insansız hava araçları ile havadan haritalama gibi birçok çalışmada kullanılan bir yöntemdir. PPP yöntemi kullanılarak hem statik hem de kinematik konum belirleme doğruluğu ve hassasiyeti hakkında çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir [4]–[13].

Günümüzde konum belirlemede en sık kullanılan uydu-tabanlı konum belirleme sistemlerinde elde edilecek konum doğruluğunu etkileyen uydu, alıcı veya çevresel faktörler gibi birçok hata kaynağı bulunmaktadır. Jeodezik, jeodinamik ve deformasyon analizi gibi çalışmalarda, bölgesel ve global düzeydeki PPP tekniği uygulamalarında birçok hata kaynağı dikkate alınmalı ve modellenmelidir. Bu sebeple, GPS ölçümlerine etki eden iyonosferik kırılma, yörünge doğruluğu, anten faz merkezi hatası, multipath etkisi ve troposferik gecikme gibi ana hata kaynaklarının etkileri tarihsel süreçte önemli ölçüde azaltılmıştır [14]–[16]. Birçok neden, uydu-tabanlı konum belirleme sistemlerindeki hata kaynaklarının oluşmasına sebep olur. Bunların en önemlileri, kuşkusuz mevsimsel değişimlerdir. Troposfer tabakasında, kuru gazlar ve su buharının neden olduğu sinyal gecikmeleri yaşanmakta ve sinyalin troposferdeki yayılma süresini artırmaktadır. Troposfer tabakasındaki bu etkiye, troposferik gecikme veya troposfer yolu gecikmesi denilmektedir. Bu gecikme değerleri yaz ve kış mevsimlerinde farklılık gösterir. Mevsimsel değişimlere bağlı olarak, yaz aylarındaki gecikme değerleri en yüksek seviyededir, kış aylarında ise en düşük seviyededir [17]–[19].

GPS sinyallerini etkileyen bir diğer faktör de güneşte meydana gelen aktiviteler sonucunda iyonosfer tabakasında meydana gelen değişimlerdir. İyonosfer tabakasında meydana gelen düzensiz değişimlerin birincil kaynağı güneş patlamalarıdır. Güneş patlaması, Güneş'in atmosferinde gözlenen ani parlaklık artışı olarak tanımlanabilir. Bu patlamalar, Güneş'in manyetik alanındaki ani değişikliklerden kaynaklanır ve Güneş'ten dış uzaya yüksek enerjili parçacıkların salınmasına neden olur. Bu parçacıklar, Dünya'ya ulaştığında manyetik fırtınalar ve radyasyon fırtınaları gibi etkiler yaratabilir. Güneş patlamaları, iletişim sistemleri, uydu sinyalleri ve hatta güç şebekeleri gibi teknolojik altyapıları olumsuz etkileyebilir. Güneş patlamalarının GPS doğruluğuna etkisi, yüksek enerjili parçacıkların Dünya'ya ulaşarak manyetik alanımızda dalgalanmalara ve manyetik fırtınalara neden olmasıdır. Manyetik fırtınalar GPS sinyallerini etkiler ve parlamaya neden olur. Bu nedenle iyonosferdeki iyonlaşmayı düzensiz olarak etkileyen manyetik fırtınaların konum belirleme üzerindeki etkilerinin araştırılması elzemdir. İyonosferden kaynaklanan etkilerin büyük derecede olanları Güneş'in en aktif (solar maksimum) olduğu zamanlarda meydana gelmektedir. İyonosferik aktivitenin en yüksek düzeyde olduğu bu dönem 11 yıllık bir periyotla süregelmektedir. Güneş aktivite etkilerinin araştırılması GPS'deki koordinat çözümlerinin doğruluğu bakımından oldukça önemlidir [20]–[28].

[20] çalışmasında solar maksimum döneminde, ekvatorial ve orta enlem bölgelerindeki iyonosferin GPS sinyalleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada, atmosferin iyonosfer tabakasının tropikal bölgelerde orta enlem bölgelerine nazaran daha fazla elektrona sahip olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, ekvatorial kuşak üzerindeki GPS ölçülerinde iyonosfere bağlı konum hatasının orta enlem bölgesine nazaran daha etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Toplam elektron yoğunluğu (TEC) değişiminin güneş aktivitesinden etkilendiği ve güneş aktivitesinin her iki bölgede de TEC değişiminin ana faktörü olduğu sonucuna varmışlardır. [21] çalışmasında, solar minimum döneminde ekvatorial bölgedeki yıllık TEC değişimini incelemiştir. Bu çalışmada, ekvator bölgesindeki iyonosferik anomalinin maksimum seviyesinin 20° kuzey coğrafi enleminde yerel saat ile 14:00'da meydana geldiğini açıklamışlardır. Bu sonuç, ekvatorial bölgelerde gerçekleştirilecek GPS ölçümlerinin yerel saat olarak 14:00'da en yüksek Güneş aktivitesi kaynaklı konum hatasına sahip olacağını ortaya koymuşlardır. [22] çalışmasında, solar maksimum döneminde yerel uydu ağı için GPS verilerini kullanarak iyonosferik kırılma hatalarını azaltmaya yönelik analizler sunmuşlardır. Sonuç olarak, yerel ağlarda özellikle yüksek hassasiyet gerektiren çalışmalarda, solar maksimum döneminde GPS verileri değerlendirilirken iyonosferik kırılma etkilerinin hesaba katılması gerektiğini vurgulamışlardır. [23] çalışmasında, solar maksimum ve minimum dönemlerinde Güneş aktivitesinin GPS doğruluğu üzerindeki etkisini incelemiştir. Ancak yetersiz veri ve istasyon kullanımı nedeniyle bu etkileri görmek için daha fazla veri kullanılması gerektiğini belirtmiştir. [24] çalışmasında, solar maksimum döneminde ekvatorial bölgede iyonosferik aktivitenin GNSS sinyal performansına etkisini araştırmak için yaptıkları çalışmada ekvatorial bölgelerde yüksek solar aktivite dönemlerinde GNSS sinyalleri için günümüzde sorun olmaya devam ettiğini belirtmişlerdir. [25] gerçekleştirdiği çalışmasında, düşük ve yüksek güneş aktivitesinde, sırasıyla 2009 ve 2013 yıllarına ait dönem boyunca her aydan 5 gün seçilerek, düşük enleme sahip bir ağda GPS verilerinin analizi incelenmiştir. İyonosfer tabakasındaki toplam elektron yoğunluğunun (TEC) yüksek güneş aktivitesi döneminde özellikle öğle saatlerinde pik seviyeye ulaştığı gözlenmiştir. Ayrıca bu pik

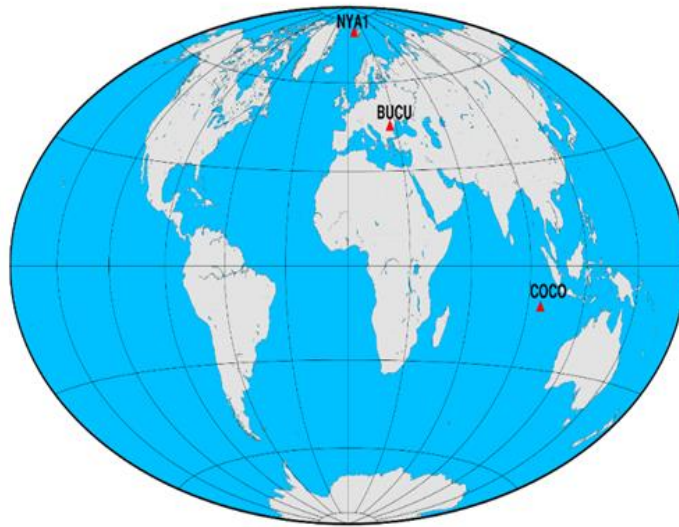
oluşumunun yaz ve kış mevsimlerinde ekinoks aylarına göre daha fazla olduğunu belirtilmiştir. [26] yaptıkları çalışmada, 2011 yılı şubat ayında gerçekleşen Güneş patlamasından sonra, Malezya üzerindeki ekvatorial ve alçak enlem bölgesinde iyonosferik sintilasyon oluşumunu araştırmışlardır. Çalışmada güneş patlamasının, Malezya bölgesi üzerinde GPS tabanlı hizmetlerin performansında makul seviyede bir bozulmaya sebep olduğu belirtilmiştir. [27] çalışmalarında, Hindistan Haydarabad'da bulunan bir referans istasyonunda 2013-2018 yılları arasında mevsimsel ve güneş aktivitesini dikkate alarak iyonosferik sintilasyonların kinematik hassas nokta konumlama üzerinde uzun vadeli etkilerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda, mevsimsel ve güneş aktivitesinin kinematik hassas nokta konumlama üzerinde olumsuz yönde bir etkiye sebep olduğu belirtilmiştir. [28] gerçekleştirdikleri çalışmada, GNSS alıcılarının verileri dikkate alınarak, güneş ve jeomanyetik aktivitelerin sebep olduğu global iyonosferik tepki incelenmiştir. Çalışmalarında iyonosfer tabakasının, güçlü jeomanyetik aktivite kaynaklı etkilere verdiği tepki analiz edilerek global ölçekte model sunmuşlardır. Elde edilen modelde, güneş aktivitesi faktörünün göz önünde bulundurulması gerektiğini vurgulanmıştır.

Bu çalışmada, atıf yapılan referanslarda yapılan çalışmalar genişletilerek daha kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Kutup, orta kuşak ve ekvator bölgelerinden olmak üzere, Uluslararası GNSS Servisi (IGS) ağına ait üç istasyon seçilerek, farklı şiddetlerde meydana gelen güneş aktivitesinin GPS-PPP doğruluğu üzerindeki bölgesel etkileri izlenmiştir. Bu amaçla, yaklaşık 11 yıllık güneş döngüsü dikkate alınarak, 2000-2018 yılları arasındaki minimum, orta ve maksimum aktivite dönemlerine ait 60 günlük GPS verileri kullanılmıştır. GPS verileri, güneş aktivitesinin etkilerini tam olarak yansıtılabilmesi amacıyla gündüz saatleri olan 10:00-18:00 arasındaki 8 saatlik kısa oturumlara bölünmüştür. Elde edilen veri setleri, NASA/JPL'nin GIPSY/OASIS II v6.4 yazılımının Hassas Nokta Konumlama (PPP) modülü kullanılarak analiz edilmiştir. Bu üç farklı aktivite dönemi ve üç farklı bölgede gözlenen GPS-PPP doğruluğu değişimleri karşılaştırılmıştır. Güneş'te farklı şiddetlerde meydana gelen aktivitelerin etkisi sonucunda oluşan güneş leke sayılarının GPS-PPP doğruluğu ile ilişkisi bölgesel olarak araştırılmış, elde edilen bulgular yorumlanmıştır.

2. Uygulama

2.1. Çalışma alanı

Güneş aktivitesinin farklı enlem bölgelerindeki etkisini incelemek amacıyla Uluslararası GNSS Servisi (IGS) ağına ait kutup, orta kuşak ve ekvator bölgelerinde yer alan üç istasyon seçilmiştir. Çalışmada kullanılan üç istasyonun belirlenmesindeki motivasyon, farklı şiddetlerde meydana gelen Güneş aktivitesinin sonuçlar üzerindeki enlemsel karakteristiklerinin incelenmesidir. Bunun için kutup bölgesi NYA1, orta kuşak bölgesi BUCU ve ekvatorial bölgesi ise COCO istasyonu ile temsil edilmektedir (Tablo 1). Çalışmada kullanılan IGS istasyonları Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan GPS istasyonları

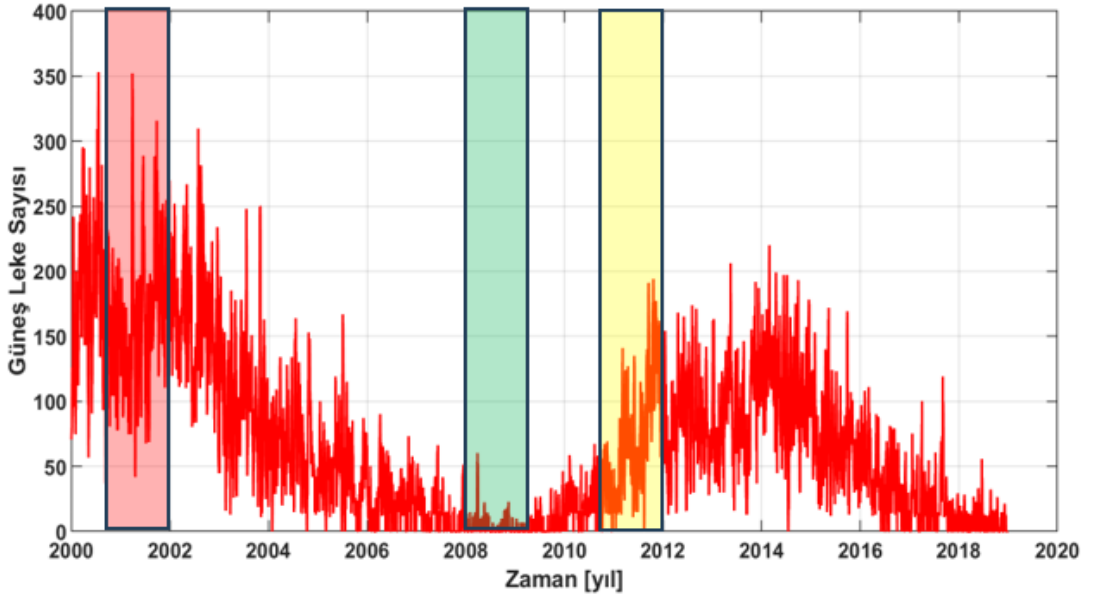
Tablo 1. Çalışmada kullanılan GPS istasyonlarına ait konum bilgileri

Nokta ID	Enlem (°)	Boylam (°)	Ülke
NYA1	78.930	11.865	Norveç
BUCU	44.464	26.126	Romanya
COCO	-12.188	96.834	Avustralya

2.2. Verilerin değerlendirilmesi

Bu çalışmada, güneşte meydana gelen aktivite şiddetinin GPS-PPP doğruluğu üzerindeki bölgesel değişimlerini izlemek amacıyla farklı enlem bölgelerinden IGS ağına bağlı GPS istasyonları seçilmiştir. Çalışmada, 11 yıllık güneş döngüsü göz önünde bulundurularak, 2000-2018 yılları arasındaki minimum, orta ve maksimum aktivite dönemlerine ait 60'ar günlük GPS verileri kullanılmıştır (Şekil 2). Buna göre, güneş leke sayısının minimum olduğu zaman için 2008 ve 2009 yıllarından 60 gün, güneş leke sayısının ortalama bir değerde olduğu zaman için 2011 ve 2012 yıllarından 60 gün ve güneş leke sayısının maksimum olduğu zaman için ise 2001, 2002 yıllarından 60 günlük veri seti seçilmiştir. Şekil 2'de, 2000-2018 yılları arasında, aktivitenin düşük olduğu zaman dilimi yeşil, ortalama aktivitenin olduğu zaman dilimi sarı ve aktivitenin yüksek olduğu zaman dilimi ise kırmızı renk dolgu ile vurgulanmaktadır. Çalışmada değerlendirme için esas alınan zaman dilimi, Şekil 2'de farklı renkler ile vurgulanan alanlardan seçilmiştir.

Dünya'nın eksenini $23^{\circ}27'$ eğik olması Güneş ışınlarının yıl içinde gelme açısının değişmesinden dolayı kutup bölgelerinde altı ay gece, altı ay gündüz yaşanmasına neden olmaktadır. Çalışma için değerlendirilen günleri belirleme aşamasında, kutup bölgesinde yer alan NYA1 istasyonu için altı ay gündüz vakti içerisine denk gelmesine dikkat edilmiştir. Üç farklı bölgeden seçilen istasyonlara ait 2000-2018 yılları arasındaki 60'ar günlük GPS verileri SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) web sitesinden RINEX formatında elde edilmiştir [29]. Güneş aktivitesi etkilerini daha iyi izleyebilmek için veriler, gündüz vaktine denk gelen 10:00-18:00 saatleri arasındaki 8 saatlik kısa veri oturumlarına ayrılmıştır. Elde edilen tüm veriler, NASA/JPL'nin GIPSY/OASIS II v6.4 yazılımının Hassas Nokta Konumlama (PPP) modülü kullanılarak analiz edilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada belirlenen günlere ait, 2000-2018 yılları arasında güneş leke sayılarının düşük, orta ve yüksek olduğu alanlar

PPP tekniğinde, hassas nokta konum bilgisine ulaşabilmek için GPS ölçülerine etki eden hata kaynaklarının giderilmesi ve modellenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, GPS verilerinin değerlendirilmesi ve analizi aşamasında, JPL tarafından sağlanan hassas uydu yörünge ve saat bilgileri kullanılmıştır. Alıcı saat hatası modellenmiş, alıcı ve uyduların anten faz merkezi kayıklıkları giderilmiştir [30]. Bu çalışmada analizler ITRF2008 datumunda gerçekleştirilmiştir [31]. Uydu yükseklik açısı 7° olarak belirlenmiştir. İyonosfer etkisi, L1 ve L2 GPS sinyalleri kullanarak oluşturulan L3 doğrusal modeli ile ortadan kaldırılmıştır. İkinci mertebeden iyonosferik etki göz önünde bulundurularak, "IONEX" dosyası kullanılarak giderilmiştir. Troposferik ıslak gecikme, doğu ve kuzey bileşenlerindeki gradyanlar kestirilmiştir. Karasal ve okyanus gelgit yüklemeleri göz önünde bulundurulmuştur. Değerlendirme stratejisi Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Değerlendirme stratejisi

Analiz parametreleri	PPP analiz stratejisi
GNSS sistemi	GPS
Referans sistemi	ITRF08 [31]
Uydu yörünge ve saat bilgileri	JPL nihai ürünleri
Epok aralığı	30 sn
Uydu yükseklik açısı	7°
Anten faz merkezi	Değerlendirme zamanındaki en güncel igs14_WWWW.xyz
İyonosferik etki	IGS IONEX dosyaları kullanılarak ikinci dereceden etki giderilmiştir.
Faz belirsizlikleri	Çözülmüştür [30]
Önsel troposfer modeli	VMF1 modeli [32]
Başucu ıslak gecikmesi kestirimi	Rastgele yürüyüş yöntemi ($5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$)
Yatay gecikme gradyanları kestirimi	Rastgele yürüyüş yöntemi ($5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$)
Gelgit etkisi	Katı gelgitler, okyanus yükü ve kutup gelgitleri [33]

2.3. Analiz ve bulgular

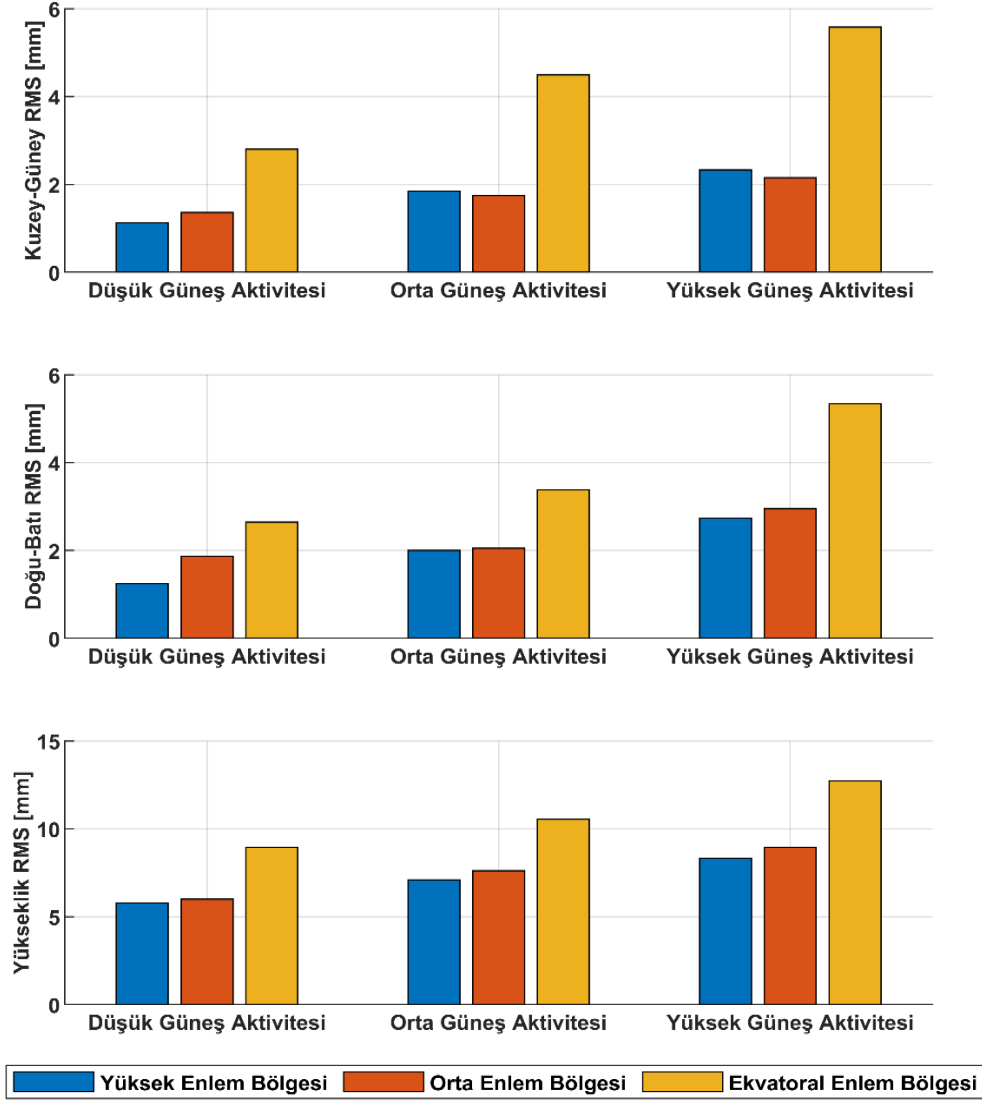
Öncelikle, ITRF14 referans sisteminde elde edilen üç boyutlu kartezyen koordinat değerleri, hareketin anlamlı bir şekilde yorumlanabilmesi için Kuzey, Doğu ve Yükseklik bileşenlerinden oluşan toposentrik koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Her bir IGS istasyonu için hesaplanan yer merkezli koordinat değerlerinin ilk günlerine göre ötelenmiş gözlemlerin toposentrik koordinat sistemine dönüşümü Denklem 1 kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \Delta k \\ \Delta d \\ \Delta y_{\text{yük}} \end{bmatrix}_m = \begin{bmatrix} -\sin \varphi \cdot \cos \lambda & -\sin \varphi \cdot \sin \lambda & \cos \varphi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ \cos \varphi \cdot \cos \lambda & \cos \varphi \cdot \sin \lambda & \sin \lambda \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_m \quad (1)$$

Denklem 1'deki, Δk , Δd ve $\Delta y_{\text{yük}}$ değerleri toposentrik koordinat sisteminde kuzey, doğu, yükseklik bileşenini, φ coğrafi enlemi, λ boylamı, ΔX , ΔY ve ΔZ değerleri ise ilk günlere göre ötelenmiş üç boyutlu

kartezyen koordinat değerlerini simgelemektedir. Daha sonra kuzey, doğu ve yükseklik bileşenleri için minimum, orta ve maksimum güneş aktivitesi dönemlerine ait RMS (Karesel Ortalama Hata) değerleri Denklem 2 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada x koordinat değerlerini n ise veri sayısını temsil etmektedir.

$$RMS = \sqrt{\frac{x^2}{n}} \quad (2)$$



Şekil 3. Güneş aktivitesi şiddetine göre tüm bileşenler için RMS değerleri değişimi

Yüksek, orta ve ekvatorial enlem bölgelerinde kuzey-güney, doğu-batı ve yükseklik bileşeni için hesaplanan RMS değerlerinin güneş aktivitesi şiddetine göre değişimi Şekil 3'te gösterilmektedir. Ayrıca RMS değerleri Tablo 3'te verilmektedir. Şekil 3 ve Tablo 3 incelendiğinde, Güneş aktivitesinin şiddeti arttıkça GPS-PPP konum doğruluğunda azalma gözlenmektedir. GPS-PPP doğruluğu bölgesel olarak incelendiğinde ise, güneş aktivitesinden en fazla ekvatorial enlem bölgesinin etkilendiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalar ile paralellik göstermektedir.

Tablo 3. Güneş aktivitesi şiddetine göre tüm bileşenler için RMS değerleri

Bölge	Bileşen	Minimum Aktivite RMS (mm)	Orta Aktivite RMS (mm)	Maksimum Aktivite RMS (mm)
Yüksek Enlem Bölgesi (NYA1)	Kuzey-Güney	1.1	1.8	2.3
	Doğu-Batı	1.3	2.0	2.7
	Yükseklik	5.8	7.1	8.3
Orta Enlem Bölgesi (BUCU)	Kuzey-Güney	1.4	1.7	2.2
	Doğu-Batı	1.9	2.1	2.9
	Yükseklik	6.0	7.6	8.9
Ekvatorial Enlem Bölgesi (COCO)	Kuzey-Güney	2.8	4.5	5.6
	Doğu-Batı	2.7	3.4	5.3
	Yükseklik	8.9	10.5	12.7

3. Sonuç ve Öneriler

Farklı şiddetlerde meydana gelen aktif Güneş olaylarının GPS-PPP konum doğruluğu üzerindeki bölgesel etkisini araştırmak amacıyla yaklaşık 11 yıllık güneş döngüsü dikkate alınarak 2000-2018 yılları arasındaki minimum, orta ve maksimum aktivite dönemlerine ait konum doğruluğu değişimi incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda üç farklı güneş aktivitesi dönemine ait 60'ar günlük GPS verileri analiz edilerek GPS ölçülerine etki eden hata kaynaklarının büyük bir kısmı giderilmiştir. Veri analizinden sonra kuzey, doğu ve yükseklik koordinat bileşenlerine etki eden yıllık ve yarıyıllık döngüsel hareketler ve doğrusal varyasyon kaldırılmıştır. Bu etkiler kaldırıldıktan sonra elde edilen düzeltme değerlerinden kuzey, doğu ve yükseklik bileşenlerine ait RMS değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan RMS değerleri analiz edilerek yüksek, orta ve ekvatorial enlem bölgelerindeki doğruluk değişimi incelenmiştir. Üç farklı aktivite dönemi ve üç farklı enlem bölgesinde hesaplanan RMS değerleri karşılaştırılmıştır.

Karşılaştırmalar sonucunda elde edilen bulgulara göre;

- Güneşte meydana gelen aktivitenin şiddeti arttıkça GPS-PPP konum doğruluğunda azalma gözlenmiştir. Elde edilen bu sonuç, güneş aktivitesine bağlı olarak iyonosfer tabakasında meydana gelen değişimler ile açıklanabilir. İyonosfer tabakasında iyonlaşma miktarı, güneş ışınımıyla ilişkilidir. Güneş ışınları, elektronları moleküllerinden ayırarak serbest hale getirir. Serbest elektron yoğunluğu, yerel saatle yaklaşık olarak 14:00 civarında en yüksek seviyeye ulaşır. Güneş lekelerinin sayısı ve güneş patlamaları, güneş ışınım seviyesini, buna bağlı olarak iyonlaşmayı ve iyonosferdeki serbest elektron miktarını önemli ölçüde etkilediği literatürde belirtilmiştir [34], [35]. Dolayısıyla, iyonosfer tabakasındaki iyonlaşma ve serbest elektronlar nedeniyle, uydular alıcı arasındaki olması gereken gerçek geometrik uzunluk ile ölçülen mesafe arasında bir fark meydana getirerek GPS doğruluğunu olumsuz yönde etkilemektedir.

- GPS-PPP konum doğruluğu bölgesel olarak incelendiğinde, güneş aktivitesinden en fazla ekvatorial enlem bölgesinin etkilendiği gözlenmiştir. Elde edilen bu sonuç, iyonosferin coğrafi özellikleri ile açıklanabilir. Güçlü güneş radyasyonu ve yoğun iyonlaşma nedeniyle elektron yoğunluğunun en yüksek olduğu bölge ekvatorial bölgedir [36]. Dolayısıyla ekvatorial enlem bölgesinde GPS-PPP doğruluğu, yüksek ve orta enlem bölgesine nazaran güneş aktivitesinden daha fazla etkilenmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, güneş aktivitesi GPS-PPP doğruluğu ve GPS veri analizi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Özellikle hassasiyet gerektiren çalışmalarda bu etki göz önünde bulundurulmalıdır. Güneş aktivitesinin GPS ölçüleri üzerindeki etkisini daha net görebilmek için veri aralığının ve istasyon ağının genişletilmesi önerilmektedir.

Teşekkür

Verilerin değerlendirilmesinde kullanılan GIPSY/OASIS II v6.4 yazılımı için NASA-JPL'ye, ayrıca veri ve ürün desteklerinden ötürü IGS'e teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1] Anderle, R J. Satellite Doppler Positioning: Proceedings, International Geodetic Symposium, October 12-14, 1976. The Symposium, 1976.
- [2] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, Watkins M M, Webb F H. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 102, no. B3, pp. 5005–5017, 1997, doi: 10.1029/96JB03860.
- [3] Héroux P, Kouba J. GPS precise point positioning using IGS orbit products. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, vol. 26, no. 6, pp. 573–578, Jan. 2001, doi: 10.1016/S1464-1895(01)00103-X.
- [4] Seepersad G, Bisnath S. Challenges in Assessing PPP Performance. *Journal of Applied Geodesy*, vol. 8, no. 3, pp. 205–222, Sep. 2014, doi: 10.1515/jag-2014-0008.
- [5] Shi j, Yuan X, Cai Y, Wang G. GPS real-time precise point positioning for aerial triangulation. *GPS Solut*, vol. 21, no. 2, pp. 405–414, Apr. 2017, doi: 10.1007/s10291-016-0532-2.
- [6] Yigit C O, Gurlek E. Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 8, no. 2, pp. 893–904, Dec. 2017, doi: 10.1080/19475705.2017.1284160.
- [7] Choy S, Bisnath S, Rizos C. Uncovering common misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and its future prospect. *GPS Solut*, vol. 21, no. 1, pp. 13–22, Jan. 2017, doi: 10.1007/s10291-016-0545-x.
- [8] Hernández H, Dollase D, Fernández M G, Perez R O, García A R. Precise ionospheric electron content monitoring from single-frequency GPS receivers. *GPS Solut*, vol. 22, no. 4, p. 102, Jul. 2018, doi: 10.1007/s10291-018-0767-1.
- [9] Krietemeyer A, Veldhuis M T, Marel H, Realini E, Giesen, N. Potential of Cost-Efficient Single Frequency GNSS Receivers for Water Vapor Monitoring. *Remote Sensing*, vol. 10, no. 9, Art. no. 9, Sep. 2018, doi: 10.3390/rs10091493.
- [10] Erol S, Alkan R M, Ozulu İ M, İlçi V. Impact of different sampling rates on precise point positioning performance using online processing service. *Geo-spatial Information Science*, vol. 24, no. 2, pp. 302–312, Apr. 2021, doi: 10.1080/10095020.2020.1842811.
- [11] Vadakke S V, Aquino M, Marques H A, Moraes A. Mitigation of ionospheric scintillation effects on GNSS precise point positioning (PPP) at low latitudes. *J Geod*, vol. 94, no. 2, p. 15, Jan. 2020, doi: 10.1007/s00190-020-01345-z.
- [12] Collins P, Bisnath S, Lahaye F, Héroux P. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing. *Navigation*, vol. 57, no. 2, pp. 123–135, 2010, doi: 10.1002/j.2161-4296.2010.tb01772.x.
- [13] Davis J L, Herring T A, Shapiro I, Rogers A E E, Elgered G. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*, vol. 20, no. 6, pp. 1593–1607, 1985, doi: 10.1029/RS020i006p01593.
- [14] Bock O, Doerflinger E. Atmospheric modeling in GPS data analysis for high accuracy positioning. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, vol. 26, no. 6, pp. 373–383, Jan. 2001, doi: 10.1016/S1464-1895(01)00069-2.
- [15] Olynik M C. Temporal Characteristics of GPS Error Sources and Their Impact on by Analysis. Msc, Calgary University, Calgary, 2002.
- [16] Hofmann B, Wellenhof H, Lichtenegger H, Collins J. *Global Positioning System: Theory and Practice*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [17] EUREF Permanent GNSS Network. URL adres: http://www.epncb.oma.be/_productsservices/troposphere/zpd_timeseries_station.php?station=ISTA00TUR. (Erişim Tarihi: 27.10.2022).
- [18] Saracoglu A, Sanli D U. Accuracy of GPS positioning concerning Köppen-Geiger climate classification. *Measurement*, vol. 181, p. 109629, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.109629.
- [19] Saracoglu A, Sanli D U. 'Effect of meteorological seasons on the accuracy of GPS positioning', *Measurement*, vol. 152, p. 107301, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2019.107301.
- [20] Sukcharoen T, Weng J, Charoenkalyunyata T, Wu F. Comparison of Ionosphere at Middle Latitude Zone during Solar Maximum and Solar Minimum. *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 9, pp. 262–268, Jan. 2017, doi: 10.7763/IJET.2017.V9.982.
- [21] Wu C C, Fry C D, Liu J Y, Liou K, Tseng C L. Annual TEC variation in the equatorial anomaly region during the solar minimum: September 1996–August 1997. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 66, no. 3, pp. 199–207, Feb. 2004, doi: 10.1016/j.jastp.2003.09.017.

- [22] Bosa J, Figurski M, Wielgosz P. A strategy for GPS data processing in a precise local network during high solar activity. *GPS Solutions*, vol. 7, no. 2, pp. 120–129, Aug. 2003, doi: 10.1007/s10291-003-0052-8.
- [23] Hansson A. Solar Cycles and the Accuracy and Precision of GNSS Measurements. MSc, Department of Urban Planning and Environment KTH, Division of Geodesy and Geoinformatics, Stockholm, 2013.
- [24] Fortes L P S, Lin T, Lachapelle G. Effects of the 2012–2013 solar maximum on GNSS signals in Brazil. *GPS Solut*, vol. 19, no. 2, pp. 309–319, Apr. 2015, doi: 10.1007/s10291-014-0389-1.
- [25] Kumar S. Ionospheric variability during quiet and disturb geomagnetic conditions for low and high solar activity year. *Indian J Phys*, vol. 96, no. 6, pp. 1635–1641, May 2022, doi: 10.1007/s12648-021-02124-y.
- [26] Seif A, Panda S K. Ionospheric scintillation characteristics from GPS observations over Malaysian region after the 2011 Valentine’s day solar flare. *Journal of Applied Geodesy*, vol. 17, no. 1, pp. 79–90, Jan. 2023, doi: 10.1515/jag-2022-0053.
- [27] Yousuf M, Dashora N, Sridhar M, Dutta G. Long-term impact of ionospheric scintillations on kinematic precise point positioning: seasonal and solar activity dependence over Indian low latitudes. *GPS Solut*, vol. 27, no. 1, p. 40, Dec. 2022, doi: 10.1007/s10291-022-01378-1.
- [28] Pulnits M S, Budnikov P A, Pulnits S A. Global Ionospheric Response to Intense Variations of Solar and Geomagnetic Activity According to the Data of the GNSS Global Networks of Navigation Receivers. *Geomagn. Aeron.*, vol. 63, no. 2, pp. 172–185, Apr. 2023, doi: 10.1134/S0016793222600898.
- [29] Scripps Orbit and Permanent Array Center. <http://sopac.ucsd.edu/dataBrowser.shtml> (Erişim Tarihi: 14.10.2022).
- [30] Bertiger W, Desai S D, Haines B, et al. Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data. *J Geod* 84, 327–337 (2010). <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0371-9>
- [31] Altamimi Z, Collilieux X, Métivier L. ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *J Geod*, vol. 85, no. 8, pp. 457–473, Aug. 2011, doi: 10.1007/s00190-011-0444-4.
- [32] Boehm J, Werl B, Schuh H. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 111, no. B2, 2006, doi: 10.1029/2005JB003629.
- [33] Lyard F, Lefevre F, Letellier T, Francis O. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004, *Ocean Dynamics*, vol. 56, no. 5, pp. 394–415, Dec. 2006, doi: 10.1007/s10236-006-0086-x.
- [34] Kahveci M, Alioğlu D, Çetin G. Tek Frekanslı Gnss Alıcılarda Kullanılan İyonosferik Etki Düzeltme Modellerinin Karşılaştırılması. *Konjes*. vol. 9, no. 2, Art. no. 2, Jun. 2021, doi: 10.36306/konjes.849391.
- [35] Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science*, vol. 36, no. 2, pp. 261–275, 2001, doi: 10.1029/2000RS002432.
- [36] Groves K M, Basu S, Quinn J M, Pedersen T R, Falinski K, Brown A, Ning P. A Comparison of GPS Performance in a Scintillation Environment at Ascension Island. p. 9, Sep. 2000.

Sille’de Bulunan Tarihi Camilerin Harim Planlarına Tipolojik Bir Yaklaşım

Fikret BADEMCI^{1*}

¹ Mimarlık Bölümü, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye

*¹ fikretbademci@gmail.com

(Geliş/Received: 16/07/2023;

Kabul/Accepted: 22/08/2023)

Öz: Sille, tarihsel süreç içerisinde birçok medeniyete ev sahipliği yapmıştır. Bu nedenle Sille camiden kiliseye birçok kültürel mirasa sahiptir. Özellikle, Müslüman toplumların uzun yıllar yaşadığı Sille’de birçok tarihi cami bulunmaktadır. Bu camiler yapıldıkları dönemin mimari anlayışlarını yansıtmaktadırlar. Böylece camiler gerek yapıım sistemleri gerek işçilikleri gerekse de süslemeleriyle İslam mimarisinin gelişimine katkı sağlamaktadır. Bu camiler üzerinde yapılacak olan tipoloji çalışmaları hem İslam mimarisine hem de Osmanlı dönemi cami mimarisine ışık tutması bakımından önemlidir. Çalışma, Sille’de bulunan tarihi camilerin harim planlarının incelenerek tipolojik benzerliklerin tespit edilmesini amaçlamaktadır. Çalışmanın kapsamını Konya’nın Selçuklu İlçesi’ne bağlı Sille Tarihi Kenti’ndeki günümüze ulaşmış tarihi camiler olan Ak Cami, Subaşı Cami, Çay Cami, Karataş Cami, Mormi Cami ve Mezaryaka Camileri oluşturmaktadır. Tipoloji çalışması için yapının künye bilgilerini, harim bilgilerini ve planını içeren bir katalog oluşturulmuştur. Bu kataloglar yapıya gidilerek yerinde doldurulmuştur. Çalışma sonucunda Sille’deki tarihi camilerin harim bölümlerinde birçok tipolojik özellik tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sille, cami, tipoloji.

A Typological Approach to the Harem Plans of the Historical Mosques in Sille

Abstract: Sille has been home to many civilisations in the historical process. For this reason, Sille has many cultural heritage from mosques to churches. Especially, there are many historical mosques in Sille, where Muslim communities lived for many years. These mosques reflect the architectural understanding of the period they were built. Thus, the mosques contribute to the development of Islamic architecture with their construction systems, workmanship and ornaments. Typological studies on these mosques are important in terms of shedding light on both Islamic architecture and Ottoman mosque architecture. The study aims to determine the typological similarities by examining the harem plans of the historical mosques in Sille. The scope of the study consists of Ak Mosque, Subaşı Mosque, Çay Mosque, Karataş Mosque, Mormi Mosque and Mezaryaka Mosque, which are the historical mosques that have survived to the present day in Sille Historical City of Selçuklu District of Konya. For the typology study, a catalogue containing the identification information, harem information, visuals and plan of a building was created. These catalogues were filled in on site by visiting the building. As a result of the study, many typological features were identified in the harem sections of the historical mosques in Sille.

Key words: Sille, cami, typology.

1. Giriş

Sille, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde, Konya şehir merkezine yaklaşık 8 km uzaklıkta yer alan tarihi bir alandır. Sille Tarihi Kenti, Takkeli ve Karabuğa Dağları arasında, kuzeyinden Sille Çayı'nın aktığı bir vadide bulunmaktadır. Bölge, sönmüş volkan kraterinin kuzeyinde bulunmaktadır [1]. Kutsal hac yolu olarak bilinen Roma-Bizans-Kudüs güzergâhında bulunan Sille hem doğal hem tarihi hem de kültürel açıdan önemli bir yere sahiptir [2-3].

Sille kiliseler, şapeller, evler, camiler, hamamlar, çeşmeler ve kamu binaları da dahil olmak üzere çeşitli mimari mirasıyla tanınmaktadır. Bölge, Roma döneminden Cumhuriyet dönemine kadar uzanan yapılara sahiptir. Sille'nin tarihi önemi, arkeolojik alanlar ve kültürel mirası koruma çabaları ile koruma altındaki bir kentsel alan olarak tanınmasına yol açmıştır [4-5].

Tarihsel süreçte Hristiyanlar ve Müslümanlar Sille’de bir arada yaşamıştır. 20. yüzyılda nüfusunun yaklaşık 18.000 olduğu bilinen Sille’de özellikle 19. yüzyılda Müslüman nüfusun artış gösterdiği ve bu artışla birlikte bölgede cami ihtiyacının doğduğu bilinmektedir [6-7]. Sille’de Osmanlı dönemi İslam mimarisi bakımından öneme sahip 7 adet tarihi cami yer almaktadır. Tarihsel süreç içerisinde çeşitli değişiklikler olmuş olsa da bu camiler yapıldıkları dönemin mimari anlayışlarını taşımaya ve yansıtmaya devam etmektedirler [8].

* Sorumlu yazar: fikretbademci@gmail.com. ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-4860-9416

Sille’deki camiler genellikle ahşap direkli olup üç sahadan oluşmaktadır. Yapıların ana beden duvarlarında moloz taş görülmektedir. Sille’deki tarihi camiler Selçuklu ve Beylikler dönemi cami ve mescitleriyle de benzerlik göstermektedir. Özellikle de ahşap işçiliğinin yoğun olması bu durumu desteklerken Selçuklu ve Beylikler dönemi camilerinde kullanılan çini işlemler, süslemeli taş işçiliği ve kesme taş sistemlerine Sille’deki camilerde rastlanılmaması bu durumu desteklemektedir [9].

Camiler buldukları bölgeye ve yapıldıkları döneme göre mimari bakımdan farklı özellikler göstermektedir [10]. Bu bağlamda Sille’deki tarihi camiler üzerinde yapılacak tipoloji çalışmaları Osmanlı dönemi cami mimarisine ışık tutması bakımından önem arz etmektedir. Bu bağlamda çalışmanın amacı Sille’de bulunan tarihi camilerin mimari özelliklerini anlamak ve koruma çalışmalarında rehberlik etmek için önemli bir kaynak oluşturmaktır. Çalışma aynı zamanda Sille’de bulunan tüm tarihi camilerde orijinal halinin günümüze ulaştığı görülen harimlerin planlarının inceleyerek camiler arasındaki tipolojik ortaklıkları belirlemeyi hedeflemektedir.

2. Materyal ve Metot

Çalışma Konya’nın Selçuklu ilçesi Sille mahallesinde yer alan tarihi camileri kapsamaktadır. Günümüzde Sille Tarihi Kenti’nde 7 adet cami bulunmaktadır. Bu camiler; Ak Cami, Çay Cami, Orta Cami, Subaşı Cami, Karataş Cami, Mezaryaka Cami ve Mormi Camileridir. Osmanlı dönemine ait olan bu camiler 19. yüzyıla tarihlenmektedir.

Sille tarihi kentindeki tarihi camilerin harimlerinin tipolojik özelliklerinin tespit edilmesini amaçlayan bu çalışmada nitel araştırma yöntemi tercih edilmiştir. Çalışma için gerekli literatür taraması yapılmış olup katalog hazırlanmıştır. Hazırlanan katalogda yapının künye bilgilerinin yanı sıra harim bilgileri ve rölöve planı yer almaktadır. Yapının künye bilgileri arasında yapının ismi, yapım yılı ve adresi yer almaktadır. Harim bilgileri arasında ise plan tipi, son cemaat mahali, üst kat, kadınlar mahfili, imam odası, giriş sayısı, giriş yönü, ahşap direk, pencere, minber ve minare bilgileri yer almaktadır.

Plan tipinde harim planının kenar sayısı ve kenar uzunluklarına göre kare yakın, yatay ya da dikey oluşları incelenmiştir. Yatay ya da dikey oluşlarında kible duvarının yönü göz önünde bulundurulmuştur. Son cemaat mahali incelenirken son cemaat mahalinin varlığı ve varsa harimin içinde ya da dışında oluşu değerlendirilmiştir. Üst kat incelenirken üst katın varlığı ve varsa kullanım amacına bakılmıştır. Kadınlar mahfili ve imam odası incelemesinde mahfil ya da odanın varlığı ve varsa harimin hangi bölgesinde olduğu değerlendirilmiştir. Bunlarla birlikte kapı sayısı ve kapının harimin hangi duvarında yer aldığı, harimde bulunan taşıyıcı ahşap direk varlığı ve sayısı, minberin harimdeki konumu ve minarenin konumu incelenmiştir. Aynı zamanda harim duvarlarındaki harime açılan pencere sayıları değerlendirilmiştir.

Hazırlanan kataloglar yapıya temas edilerek yerinde doldurulmuştur. Katalogların tamamlanmasının ardından katalog içindeki bölümler kendi aralarında değerlendirilmiş ve yapıların tamamına bütüncül bir bakış açısı sergilenmiştir.

3. Bulgular ve Değerlendirme

Sille Ak Cami, Konya’nın Selçuklu İlçesi Sille Mahallesi, Mali Sokakta bulunmaktadır. 1863 yılında yapılmış olan yapının mülkiyeti Selçuklu Belediyesi’ne ait olmakla birlikte yapı Gayrimenkul Eski Eserler ve Anıtlar Yüksek Kurulu’nun 10.10.1991-1148 sayılı kararıyla tescillenmiştir [11].

Yapının harim planı yedigen şeklindedir. Plana bakıldığında yapının kuzey-batı köşesinde pahlama; güney duvarında ise girinti yapılarak yapının yedigen halini aldığı görülmektedir. Bununla birlikte harimin kuzey-güney ve doğu-batı doğrultusunda kareye yakın bir forma sahip olduğu söylenebilir. Yapıda harimin dışında, doğu duvarına paralel uzanan son cemaat yeri bulunmaktadır. Harime giriş bir kapı aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu kapı harimin doğu duvarı üzerinde kuzeye yakın bölümde yer almaktadır. Harimin kuzey bölümünde ise kuzey duvarına paralel şekilde uzanan üst kat yer almaktadır. Üst katın altında, harimin kuzey-batı köşesinde imam odası vardır. Harimin güney duvarına bitişik minber bulunmaktadır. Bu minber harimin batı kenarına yakın bir konumdadır. Harimde kuzey-güney yönlü uzanan ve her birinde 4 tane toplamda 12 tane ahşap direk bulunmaktadır. Harim güneyde bulunan 10, doğuda bulunan 4 ve batıda bulunan 3 pencere ile aydınlatılmaktadır. Kuzey duvarda ise pencere bulunmamaktadır (Tablo 1.).

Tablo 1. Sille Ak Cami için hazırlanan katalog.

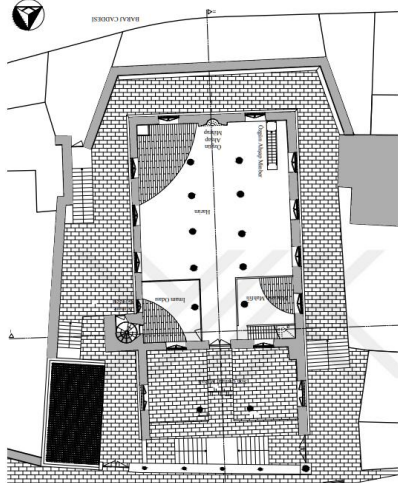
PLAN ÖZELLİKLERİ				YAPININ KÜNYESİ			
				İSİM		Ak Cami	
HARİM PLAN TIPI	YEDİGEN	KAREYE YAK	X	YAPIM YILI	1863 (Özyurt, 2019)		
		YATAY					
		DİKEY					
SON CEMAAT MAHALİ	VAR	DIŞ MEKAN	X	ADRES	Sille Mahallesi, Mali Sokak No: 1 Selçuklu/Konya		
		İÇ MEKAN					
ÜST KAT	YOK						
KADINLAR MAHFİLİ	VAR	KUZEY	X	MİNARE	VAR	KUZEY	X
		GÜNEY				GÜNEY	
		DOĞU				DOĞU	
		BATI				BATI	
		ÜST KAT	X			YOK	
İMAM ODASI	VAR	KUZEY	X	MİNBER	VAR	KUZEY	
		GÜNEY				GÜNEY	X
		DOĞU				DOĞU	
		BATI	X			BATI	
		YOK				YOK	
GİRİŞ SAYISI	BİR		X	YAPININ PLANI			
		İKİ					
		ÜÇ					
GİRİŞ KAPISININ YÖNÜ	KUZUY						
		GÜNEY					
		DOĞU	X				
		BATI					
TAŞIYICI AHŞAP DİREK	VAR/SAYISI		X/12				
		YOK					
PENCERE SAYISI	KUZUY		0				
		GÜNEY	10				
		DOĞU	4				
		BATI	3				

Sille Çay Cami Sille Mahallesi, Hükümet Caddesi üzerinde bulunmaktadır. Yapının mülkiyeti Vakıflar Genel Müdürlüğü'ne aittir. Yapı Gayrimenkul Eski Eserler ve Anıtlar Yüksek Kurulu'nun 10.10.1991-1148 sayılı kararıyla tescillenmiştir [11].

Sille Çay Cami'nin harim bölümü dörtgen planlı olup dikey olarak düzenlenmiştir. Yapının harim bölümüne kuzey duvarda yer alan tek kapıdan giriş sağlanmaktadır. Yapının taşıyıcı sisteminde kullanılan 10 adet ahşap direk harim bölümünde yer almaktadır. Harim bölümünün kuzey duvarına paralel olarak dış mekanda düzenlenmiş son cemaat yeri bulunmaktadır. Harimin kuzey duvarının iç mekanında ise üst kat, kadınlar mahfili ve imam odası bulunmaktadır. İmam odası kuzey-doğu köşesinde yer alırken kuzey-batı köşesi ve üst kat kadınlar yeri olarak kullanılmaktadır. Üst kattaki kapı aracılığıyla harimin kuzey-doğu köşesinde yer alan minareye ulaşılmaktadır. Caminin minberi ise güney duvara bitişik batı duvarına yakın şekilde konumlandırılmıştır. Bununla birlikte Sille

Çay Cami’nin harimi kuzey ve güney duvarlarında 5’er, doğu ve batı duvarlarında 8’er pencere olmak üzere toplam 26 pencere ile aydınlatılmaktadır (Tablo 2.).

Tablo 2. Sille Çay Cami için hazırlanan katalog

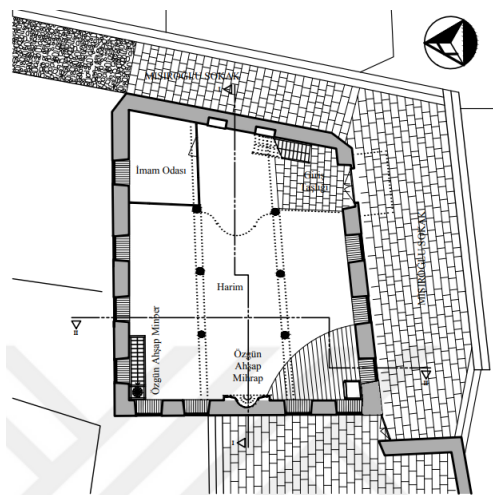
PLAN ÖZELLİKLERİ	HARİM PLAN TİPİ	DÖRT GEN	KAREYE YAK.	YAPININ KÜNYESİ	İSİM	Çay Cami			
			YATAY			YAPIM YILI	19. yy (Özyurt, 2019)		
			DİKEY		X	ADRES	Sille Mahallesi, Hükümet Caddesi, No: 17 Selçuklu/Konya		
	SON CEMAAT MAHALİ	VAR	DIŞ MEKAN	X					
		YOK	İÇ MEKAN						
	ÜST KAT	VAR	X						
		YOK							
	KADINLAR MAHFİLİ	VAR	KUZEY	X	MİNARE	VAR	KUZEY	X	
			GÜNEY				GÜNEY		
			DOĞU				DOĞU	X	
BATI			X	BATI					
ÜST KAT			X	YOK					
YOK									
İMAM ODASI	VAR	KUZEY	X	MİNBER	VAR	KUZEY			
		GÜNEY				GÜNEY	X		
		DOĞU	X			DOĞU			
		BATI				BATI			
YOK				YOK					
GİRİŞ SAYISI	BİR	X	YAPININ PLANI						
	İKİ								
	ÜÇ								
GİRİŞ KAPISININ YÖNÜ	KUZEY	X							
	GÜNEY								
	DOĞU								
	BATI								
TAŞIYL. AHŞAP DİREK	VAR/SAYISI	X/10							
	YOK								
PENCERE SAYISI	KUZEY	5							
	GÜNEY	5							
	DOĞU	8							
	BATI	8							

Orta Cami, Sille Mahallesi Mısıroğlu Sokak’ta bulunmaktadır. 1863 yılında inşa edildiği bilinen caminin mülkiyeti Vakıflar Genel Müdürlüğü’ne aittir. Gayrimenkul Eski Eserler ve Anıtlar Yüksek Kurulu’nun 10.10.1991-1148 sayılı kararıyla tescillenmiştir [11].

Dörtgen plan tipine sahip Orta Cami yapıya yakın olarak düzenlenmiştir. Camide son cemaat yeri bulunmamaktadır. Yapıya doğu duvarının kuzeye yakın bölümünde yer alan tek kapıdan girilmektedir. Harim bölümünde kuzey-güney doğrultusunda sıralanmış 6 adet ahşap direk bulunmaktadır. Harim bölümünün kuzeyinde duvar boyunca uzanan üst kat bulunmaktadır. Üst kat kadınlar yeri olarak kullanılmaktadır. Üst katın

altında, harimin kuzey-batı köşesinde imam odası yer almaktadır. Minberin, harimin güney-doğu köşesinde yer aldığı camide minare bulunmamaktadır. Caminin harim bölümünde 23 pencere bulunmaktadır. Bu pencerelerin 8 tanesi güney, 7 tanesi doğu, 8 tanesi ise batı duvarındadır. Kuzey duvarda pencere bulunmamaktadır (Tablo 3.).

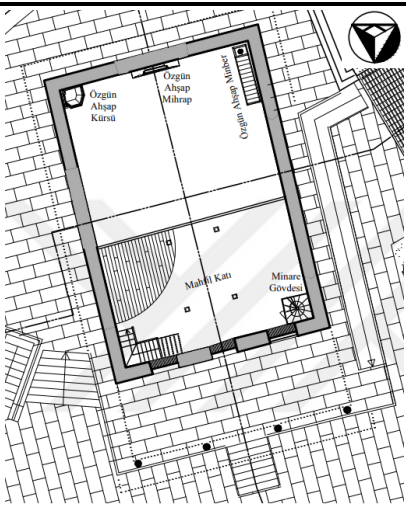
Tablo 3. Sille Orta Cami için hazırlanan katalog

PLAN ÖZELLİKLERİ	HARİM PLANI		YAPININ KÜNYESİ		YAPININ PLANI			
	HARİM PLANI TİPİ	DÖRTGEN	KAREYE YAK.	X	İSİM	Orta (Orta Mahalle) Cami		
			YATAY		YAPIM YILI	1862-1863 (Özyurt, 2019)		
			DİKEY		ADRES	Sille Mahallesi, Mısıroğlu Sokak, No: 8 Selçuklu/Konya		
	SON CEMAAT MAHALİ	VAR	DIŞ MEKAN					
			İÇ MEKAN					
	ÜST KAT	VAR	YOK	X				
			YOK					
	KADINLAR MAHFİLİ	VAR	KUZEY		MİNARE	VAR	KUZEY	
			GÜNEY				GÜNEY	
DOĞU				DOĞU				
BATI				BATI				
ÜST KAT			X	YOK			X	
İMAM ODASI	VAR	KUZEY	X	MİNBER	VAR	KUZEY		
		GÜNEY				GÜNEY	X	
		DOĞU				DOĞU		
		BATI	X			BATI	X	
		YOK				YOK		
GİRİŞ SAYISI	BİR		X					
		İKİ						
		ÜÇ						
GİRİŞ KAPISININ YÖNÜ	KUZUY							
		GÜNEY						
		DOĞU	X					
		BATI						
TAŞIYL. AHSAP DİREK	VAR/SAYISI		X/6					
		YOK						
PENCERE SAYISI	KUZUY		0					
		GÜNEY	8					
		DOĞU	7					
		BATI	8					

Subaşı Cami, Sille Mahallesi, Ömürlü Sokakta yer almaktadır. Caminin mülkiyeti Selçuklu Belediyesi'ne aittir. Yapı Gayrimenkul Eski Eserler ve Anıtlar Yüksek Kurulu'nun 10.10.1991-1148 sayılı kararıyla tescillenmiştir [11]. Yapının harimi bölümü dörtgen planlı olup dikey şekilde düzenlenmiştir. Yapının kuzey duvarı boyunca uzanan harimin dışında bir son cemaat yeri bulunmaktadır. Yapıya kuzey duvarda bulunan kapıdan girilmektedir. Harimin kuzeyinde, kuzey duvarına paralel şekilde uzanan bir üst kat vardır. Üst kat kadınlar bölümü olarak kullanılmaktadır. Üst katın altında, kapının batısında kalacak bölüme imam odası konumlandırılmıştır.

İmam odasının içinde bulunan merdivenler aracılığıyla harimin kuzey-batı köşesinde bulunan minareye ulaşılmaktadır. Harimin güney-batı köşesinde ise minber yer almaktadır. Harim bölümünde yapının taşıyıcı sistemi olarak adlandırılabilir ahşap direk bulunmamaktadır. Bununla birlikte üst katı taşıyan 8 adet ahşap direk görülmektedir. Caminin harim bölümünde 5 tanesi kuzey duvarında, 2 tanesi güney duvarında, 3 tanesi doğu duvarında ve 3 tanesi de batı duvarında olmak üzere toplam 13 tane pencere bulunmaktadır (Tablo 4.).


Tablo 4. Sille Subaşı Cami için hazırlanan katalog

PLAN ÖZELLİKLERİ	HARİM PLANI	DÖRT GEN	KAREYE YAK.		YAPININ KÜNYESİ	İSİM			
						YATAY		Subaşı (Karhane) Cami	YAPIM YILI
						1878 (Özyurt, 2019)			
	SON CEMAAT MAHALİ	VAR	DIŞ MEKAN	X	ADRES	Sille Mahallesi, Ömürlü Sokak No:29 Selçuklu/Konya			
			İÇ MEKAN						
		YOK							
	ÜST KAT	VAR		X					
		YOK							
KADINLAR MAHALİ	VAR		KUZEY	X	MİNARE	VAR	KUZEY	X	
			GÜNEY				GÜNEY		
			DOĞU	X			DOĞU		
			BATI				BATI	X	
			ÜST KAT	X			YOK		
	YOK								
	İMAM ODASI	VAR		KUZEY	X	MİNBER	VAR	KUZEY	
				GÜNEY				GÜNEY	X
				DOĞU				DOĞU	
				BATI	X			BATI	X
YOK				YOK					
					YAPININ PLANI				
GİRİŞ SAYISI	BİR		X						
	İKİ								
	ÜÇ								
GİRİŞ KAPISININ YÖNÜ	KUZEY		X						
	GÜNEY								
	DOĞU								
	BATI								
TAŞIYL. AHŞAP DİREK	VAR/SAYISI								
	YOK		X						
PENCERE SAYISI	KUZEY		5						
	GÜNEY		2						
	DOĞU		3						
	BATI		3						

Karataş Cami, Konya'nın Selçuklu İlçesi Sille Mahallesi, Baraj Caddesi'nde bulunmaktadır. 1872 yılında yapılmış olan yapının mülkiyeti Vakıflar Genel Müdürlüğü'ne ait olmakla birlikte yapı Gayrimenkul Eski Eserler ve Anıtlar Yüksek Kurulu'nun 10.10.1991-1148 sayılı kararıyla tescillenmiştir [11].

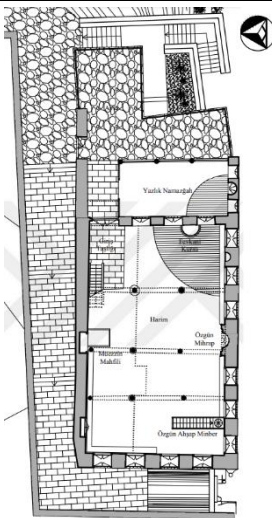
Yapının harim planı kareye yakın dörtgen şeklindedir. Yapıda harimin dışında, batı duvarına paralel uzanan son cemaat yeri bulunmaktadır. Harime giriş bir kapı aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu kapı harimin batı duvarı üzerinde kuzeye yakın bölümde yer almaktadır. Harimin kuzey bölümünde ise kuzey duvarına paralel şekilde uzanan üst kat yer almaktadır. Üst kat kadınlar yeri olarak kullanılmaktadır. Öte yandan yapıda imam odası bulunmamaktadır. Harimin güney duvarına bitişik minber bulunmaktadır. Bu minber harimin batı kenarına yakın bir konumdadır. Harimin dışında güney-batıda kalan bir alanda ise minare bulunmaktadır. Harimde taşıyıcı olarak kullanılan 5 tane ahşap direk bulunmaktadır. Harim güneyde bulunan 7, doğuda bulunan 2 ve batıda bulunan 2 pencere ile aydınlatılmaktadır. Kuzey duvarda ise pencere bulunmamaktadır (Tablo 5.).

Tablo 5. Sille Karataş Cami için hazırlanan katalog

PLAN ÖZELLİKLERİ	HARİM PLANI TİPİ	DÖRTGEN	KAREYE YAK.	X	YAPININ KÜNYESİ	İSİM	Karataş Cami			
			YATAY				YAPIM YILI	1872 (Özyurt, 2019)		
			DİKEY				ADRES	Sille Mahallesi, Baraj Caddesi, No: 11 Selçuklu/Konya		
	SON CEMAAT MAHALİ	VAR	DIŞ MEKAN	X						
			İÇ MEKAN							
	YOK			ÜST KAT	VAR	X				
	YOK				YOK					
	KADINLAR MAHİFİLİ	VAR	KUZEY							
			GÜNEY							
			DOĞU							
BATI										
ÜST KAT			X							
YOK			MİNARE	VAR	KUZEY					
GÜNEY	X									
DOĞU										
BATI	X									
YOK										
İMAM ODASI	VAR	KUZEY								
		GÜNEY								
		DOĞU								
		BATI								
		YOK	X							
GİRİŞ SAYISI	BİR	X								
	İKİ									
	ÜÇ									
	YOK									
GİRİŞ KAPISININ YÖNÜ	KUZEY									
	GÜNEY									
	DOĞU									
	BATI	X								
TAŞIYL. AHŞAP DİREK	VAR/SAYISI	X/5								
	YOK									
PENCERE SAYISI	KUZEY	0								
	GÜNEY	7								
	DOĞU	2								
	BATI	2								
YAPININ PLANI										
					(Özyurt, 2019)					

Sille Mezaryaka Cami Sille Mahallesi, Gökay Sokakta bulunmaktadır. Yapı Gayrimenkul Eski Eserler ve Anıtlar Yüksek Kurulu'nun 10.10.1991-1148 sayılı kararıyla tescillenmiştir [11]. Sille Mezaryaka Cami'nin harim bölümü dörtgen planlı olup yatay olarak düzenlenmiştir. Yapının harim bölümüne doğu duvarda yer alan tek kapıdan giriş sağlanmaktadır. Yapının taşıyıcı sisteminde kullanılan 6 adet ahşap direk harim bölümünde yer almaktadır. Harim bölümünün doğu duvarına paralel olarak dış mekanda düzenlenmiş son cemaat yeri bulunmaktadır. Harimin kuzey duvarının iç mekanında ise üst kat bulunmaktadır. Üst kat kadınlar yeri olarak kullanılmaktadır. Harimde imam odası bulunmamaktadır. Bununla birlikte camide minare görülmemektedir. Caminin minberi ise güney cepheye bitişik batı cephesine yakın şekilde konumlandırılmıştır. Bununla birlikte Sille Mezaryaka Cami'nin harimi güney duvarda 12, doğu duvarda 5 ve batı duvarda 8 pencere olmak üzere toplam 25 pencere ile aydınlatılmaktadır (Tablo 6.).

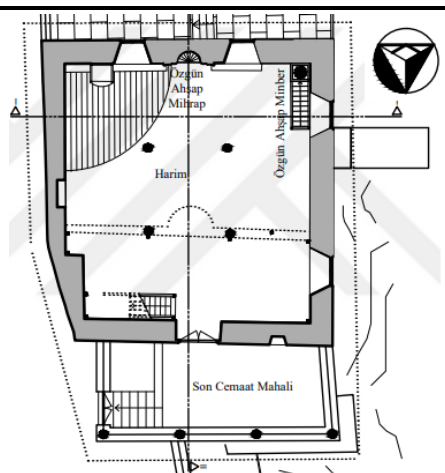

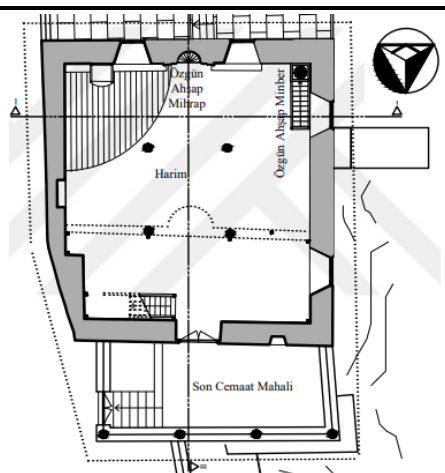
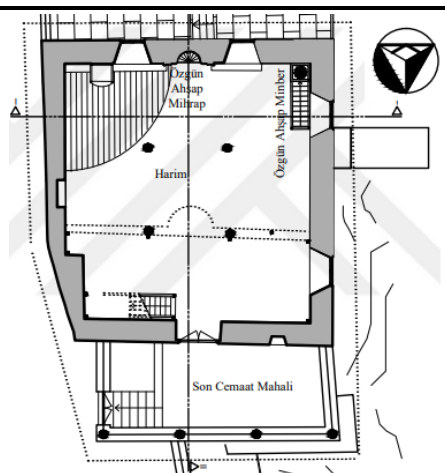
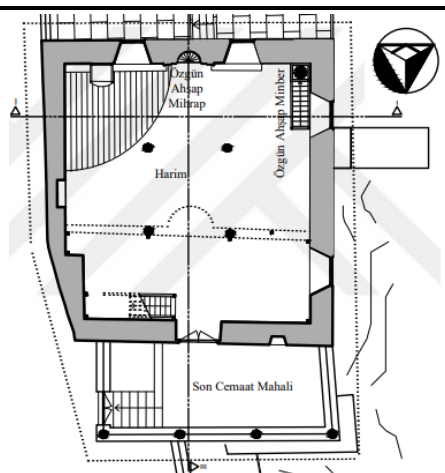
Tablo 6. Sille Mezaryaka Cami için hazırlanan katalog

PLAN ÖZELLİKLERİ	HARİM PLAN TİPİ	DÖRT GEN	KAREYE YAK.	YAPININ KÜNYESİ	İSİM	Mezaryaka Cami	
			YATAY		X	YAPIM YILI	1868-1869 (Özyurt, 2019)
SON CEMAAT MAHALİ	VAR	DIŞ MEKAN	X	ADRES	Sille Mahallesi, Gökay Sokak, No: 9 Selçuklu/Konya		
ÜST KAT	VAR	YOK	X	MİNARE	VAR	KUZEY	
						GÜNEY	
KADINLAR MAHİLİ	VAR	DOĞU		MİNBER	VAR	DOĞU	
						BATI	
İMAM ODASI	VAR	ÜST KAT	X	YOK	YOK	X	
						YOK	
GİRİŞ SAYISI	BİR	İKİ	X	YAPININ PLANI			
				ÜÇ			
GİRİŞ KAPISININ YÖNÜ	KUZUY	GÜNEY		YOK	YOK	X	
							DOĞU
TAŞIYI. AHŞAP DİREK	VAR/SAYISI	YOK	X/6	YOK	YOK	YOK	
							YOK
PENCERE SAYISI	KUZUY	GÜNEY	0	YOK	YOK	YOK	
							DOĞU
PENCERE SAYISI	GÜNEY	DOĞU	5	YOK	YOK	YOK	
							BATI
 <p>(Özyurt, 2019)</p>							

Mormi Cami, Sille Mahallesi, Ortayol Sokakta yer almaktadır. Yapı Gayrimenkul Eski Eserler ve Anıtlar Yüksek Kurulu'nun 10.10.1991-1148 sayılı kararıyla tescillenmiştir [11].

Yapının harim bölümü dörtgen plan tipine yakın olmakla birlikte kuzey-doğu köşesinde yapılmış pahlama nedeniyle altıgen halini almıştır. Yapının kuzey duvarı boyunca uzanan, harimin dışında bir son cemaat yeri bulunmaktadır. Harime kuzey duvarda bulunan tek kapıdan girilmektedir. Harimin kuzeyinde, kuzey duvarına paralel şekilde uzanan bir üst kat vardır. Üst kat kadınlar bölümü olarak kullanılmaktadır. Öte yandan harimde imam odası bulunmamaktadır. Yapıda minare de yer almamaktadır. Caminin minberi harimin güney-batı köşesinde bulunmaktadır. Caminin harim bölümünde yapının taşıyıcı sistemi olarak adlandırılabilir 4 adet ahşap direk vardır. Harimde 2 tanesi güney, 3 tanesi batı duvarında olmak üzere 5 tane pencere bulunmaktadır (Tablo 7.).

Tablo 7. Sille Mormi Cami için hazırlanan katalog

PLAN ÖZELLİKLERİ	HARİM PLANI TİPİ	ALTİGEN	KAREYE YAK.	X	YAPININ KÜNYESİ	İSİM	Mormi Cami		
			YATAY				YAPIM YILI	1842 (Özyurt, 2019)	
SON CEMAAT MAHALİ	VAR	VAR	DIŞ MEKAN	X	ADRES	Sille Mahallesi, Ortayol Sokak, No: 3 Selçuklu/Konya			
			İÇ MEKAN						
YOK									
ÜST KAT	VAR	X							
		YOK							
KADINLAR MAHFİLİ	VAR	VAR	KUZEY		MİNARE	VAR	KUZEY		
			GÜNEY				GÜNEY		
			DOĞU				DOĞU		
			BATI				BATI		
			ÜST KAT	X			YOK	X	
YOK									
İMAM ODASI	VAR	VAR	KUZEY		MİNBER	VAR	KUZEY		
			GÜNEY				GÜNEY	X	
			DOĞU				DOĞU		
			BATI				BATI	X	
			YOK	X			YOK		
GİRİŞ SAYISI	BİR	İKİ	ÜÇ	DÖRT	YAPININ PLANI				
									
GİRİŞ KAPISININ YÖNÜ	KUZUY	GÜNEY	DOĞU	BATI					
TAŞIYICI AHŞAP DİREK	VAR/SAYISI	YOK	X/4						
PENCERE SAYISI	KUZUY	GÜNEY	DOĞU	BATI					
									0
									2
									0
			3						

(Özyurt, 2019)

4. Camilerin Harim Planlarının Tipolojik Analizi

Sille’de yer alan tarihi camilerin harimlerinin plan tiplerine bakıldığında yapıların ağırlıklı olarak dörtgen plana sahip oldukları görülmektedir. Bu yapılarda Çay Cami, Orta Cami, Subaşı Cami, Karataş Cami ve Mezaryaka Camilerinin dörtgen planlı oldukları görülürken Mormi Cami’nin altıgen, Ak Cami’nin ise yedigen olduğu görülmektedir. Mormi ve Ak Camilerin harim planlarının dörtgenden farklılık göstermesinin temelinde yapıların buldukları konumlar etkili olmuştur. Yapıların çevresinden geçen yollar bu alanlarda pah yapılması gerekliliğini meydana getirmiş böylece yapılarda köşe sayısı artmıştır (Tablo 8.).

Tablo 8. Camilerin harim planlarının tipolojik analizi

	AK C.	ÇAY C.	ORTA C.	SUBAŞI C.	KARATAŞ C.	MEZARYAKA C.	MORMİ C.
DÖRTGEN		X	X	X	X	X	
BEŞGEN							
ALTIGEN							X
YEDİGEN	X						

Camilerin harim duvarlarının uzunlukları kendi içlerinde farklılık göstermektedir. Genel itibariyle yapıların kareye yakın şekilde düzenlendikleri söylenebilir. Ak Cami, Orta Cami, Karataş Cami ve Mormi Cami kareye yakın şekilde düzenlenen camilerdir. Bununla birlikte kible duvarı (güney duvar) odak olacak şekilde düşünüldüğünde Mezaryaka Caminin yatay; Çay Cami ve Subaşı Caminin ise dikey olarak düzenlendiği görülmektedir (Tablo 9.).

Tablo 9. Camilerin harim planlarının tipolojik analizi

	AK C.	ÇAY C.	ORTA C.	SUBAŞI C.	KARATAŞ C.	MEZARYAKA C.	MORMİ C.
KAREYE YAKIN	X		X		X		X
YATAY						X	
DİKEY		X		X			

Sille’deki tarihi camilerin son cemaat mahfilleri incelendiğinde mahfillerin genellikle yazlık namazgah olarak harimin dışında planlandığı görülmektedir. Orta Cami hariç çalışmada yer alan tüm camilerde son cemaat yeri bulunmakla birlikte bu mekan harimin dışında konumlandırılmıştır (Tablo 10.).

Tablo 10. Camilerin son cemaat mahallerinin tipolojik analizi

	AK C.	ÇAY C.	ORTA C.	SUBAŞI C.	KARATAŞ C.	MEZARYAKA C.	MORMİ C.
VAR	DIŞARIDA	X	X		X	X	X
	İÇERİDE						
YOK			X				

Sille’de yer alan tarihi camilerin ortak tipolojik özelliklerinden bir tanesi de camilerin tamamında üst katın var olmasıdır. Üst katlar yapılarda harimin kuzey duvarına paralel ve tüm duvarı kapsayacak şekilde düzenlenmiştir (Tablo 11.).

Tablo 11. Camilerin üst katlarının tipolojik analizi

	AK C.	ÇAY C.	ORTA C.	SUBAŞI C.	KARATAŞ C.	MEZARYAKA C.	MORMİ C.
VAR	X	X	X	X	X	X	X
YOK							

Camilerde kadınlar mahfillerinin yerleri farklılık gösterse de ortak olan nokta yapıların üst katlarının tüm camilerde kadınlar mahfili olarak kullanılmasıdır. Yapılarda üst katın ön tarafı bölücü panellerle ana mekandan ayrılmıştır. Bununla birlikte Ak Cami’de harimin dışında; Çay Cami’de ise harimin kuzey-batı köşesinde üst kata ek kadınlar mahfillerinin olduğu görülmektedir (Tablo 12.).

Tablo 12. Camilerin kadın mahfillerinin tipolojik analizi

		AK C.	ÇAY C.	ORTA C.	SUBAŞI C.	KARATAŞ C.	MEZARYAKA C.	MORMİ C.
VAR	KUZEY	X	X					
	GÜNEY							
	DOĞU							
	BATI		X					
	ÜSTKAT	X	X	X	X	X	X	X
YOK								

Çalışma kapsamında incelenen camilerden Karataş Cami, Mezaryaka Cami ve Mormi Cami'nde harim imam odası görülmemektedir. Çay Cami'nde harimin kuzey-doğu köşesinde; Ak Cami, Orta Cami ve Subaşı Cami'nde ise harimin kuzey-batı köşesinde imam odalarının düzenlendiği görülmektedir (Tablo 13.).

Tablo 13. Camilerin imam odalarının tipolojik analizi

		AK C.	ÇAY C.	ORTA C.	SUBAŞI C.	KARATAŞ C.	MEZARYAKA C.	MORMİ C.
VAR	KUZEY	X	X	X	X			
	GÜNEY							
	DOĞU		X					
	BATI	X		X	X			
YOK						X	X	X

Sille'de yer alan tarihi camilerdeki kapı sayısı da camilerin ortak tipolojik özellikleri arasında gösterilebilir. Camilerin tamamında harime giriş bir adet kapı ile sağlanmaktadır. Farklılık ise bu kapıların buldukları duvarlardadır. Çay Cami, Subaşı Cami ve Mormi Cami'nde kapı kuzey duvarı üzerinde yer alırken Ak Cami, Orta Cami ve Mezaryaka Camilerinde kapı doğu duvarı üzerinde; Karataş Cami'nde ise batı duvarı üzerinde yer almaktadır (Tablo 14.).

Tablo 14. Camilerin giriş kapılarının tipolojik analizi

	AK C.	ÇAY C.	ORTA C.	SUBAŞI C.	KARATAŞ C.	MEZARYAKA C.	MORMİ C.
KUZEY		X		X			X
GÜNEY							
DOĞU	X		X			X	
BATI					X		

Sille'de yer alan tarihi camilerin en önemli tipolojik özelliklerinden bir tanesi de camilerde harim bölümünün taşıyıcı sisteminde yer alan ahşap direklerdir. Ak Cami'de 12, Çay Cami'de 10, Orta Cami'de 6, Karataş Cami'de 5, Mezaryaka Cami'de 6 ve Mormi Cami'de 4 taşıyıcı ahşap direk bulunmaktadır. İncelenen camilerde Subaşı Cami hariç tüm camilerde taşıyıcı ahşap direkler görülmektedir. Subaşı caminde ise 8 adet ahşap direk görülmektedir ancak bu ahşap direkler sadece üst katı taşımak için kullanılmaktadır (Tablo 15.).

Tablo 15. Camilerin taşıyıcı ahşaplarının tipolojik analizi

	AK C.	ÇAY C.	ORTA C.	SUBAŞI C.	KARATAŞ C.	MEZARYAKA C.	MORMİ C.
VAR/SAYISI	12	10	6		5	6	4
YOK				0			

Camilerde harim bölümünü aydınlatan çok sayıda pencerenin varlığı dikkat çekmektedir. Ak Cami'nin güney duvarında 10, doğu duvarında 4, batı duvarında 3; Çay Cami'nin kuzey duvarında 5, güney duvarında 5, doğu duvarında 8, batı duvarında 8; Orta Cami'nin güney duvarında 8, doğu duvarında 7, batı duvarında 8; Subaşı Cami'nin kuzey duvarında 5, güney duvarında 2, doğu duvarında 3, batı duvarında 3; Karataş Cami'nin güney duvarında 7, doğu duvarında 2, batı duvarında 2; Mezaryaka Cami'nin güney duvarında 12, doğu duvarında 5, batı

duvarında 8; Mormi Cami'nin ise güney duvarında 2, batı duvarında 3 pencere bulunmaktadır. Camilerin tamamında güney ve batı duvarlarında pencere bulunurken Mormi Cami hariç tüm camilerin doğu duvarında da pencere bulunmaktadır. Öte yandan kuzey duvarların genellikle sağır duvarlar olarak düzenlendiği görülmekle birlikte sadece Çay Cami ve Subaşı Camilerinde kuzey duvarda pencereye rastlanılmaktadır (Tablo 16.).

Tablo 16. Camilerin pencerelerinin tipolojik analizi

	AK C.	ÇAY C.	ORTA C.	SUBAŞI C.	KARATAŞ C.	MEZARYAKA C.	MORMİ C.
KUZEY	0	5	0	5	0	0	0
GÜNEY	10	5	8	2	7	12	2
DOĞU	4	8	7	3	2	5	0
BATI	3	8	8	3	2	8	3

İncelenen tarihi camilerden Orta Cami, Mezaryaka Cami ve Mormi Cami'nde minare bulunmamaktadır. Bununla birlikte Ak Cami'de harimin kuzey duvarının içinden yükselen minare görülmektedir. Çay Cami'ndeki minare harimin dışında doğu duvarının kuzey duvarla birleştiği köşede yer almaktadır. Subaşı Cami'nde harimin içinde yer alan imam odasının içinde güney-batı köşesinde bulunmaktadır. Karataş Cami'nde ise minare harimin dışında harimin güney-batısında kalacak şekilde konumlanmaktadır (Tablo 17.).

Tablo 17. Camilerin minarelerinin tipolojik analizi

	AK C.	ÇAY C.	ORTA C.	SUBAŞI C.	KARATAŞ C.	MEZARYAKA C.	MORMİ C.
VAR	KUZEY	X	X		X		
	GÜNEY					X	
	DOĞU		X				
	BATI				X	X	
YOK			X			X	X

Camilerde minber, fonksiyonu gereği kible duvarında yer almaktadır. Sille'deki tarihi camilerde de bu kurala uyulmakla birlikte minberin konumlandırılmasında farklılık gösteren şey minberin köşede olup olmamasıdır. Tüm camilerdeki minberler güney yani kible duvarına bitişik olmakla birlikte duvarın batı bölümünde yer almaktadır ancak bazı minberler batı duvarına da bitişiktir. Orta Cami, Subaşı Cami ve Mormi Camilerinde bulunan minberler harimin güney-batı köşesinde yer almaları itibarıyla her iki duvara da bitişik olarak konumlandırılmıştır. Ak Cami, Çay Cami, Karataş Cami ve Mezaryaka Camilerinde ise batı duvarıyla minberler arasında mesafe olduğu görülmektedir (Tablo 18.).

Tablo 18. Camilerin minberlerinin tipolojik analizi

	AK C.	ÇAY C.	ORTA C.	SUBAŞI C.	KARATAŞ C.	MEZARYAKA C.	MORMİ C.
VAR	KUZEY						
	GÜNEY	X	X	X	X	X	X
	DOĞU						
	BATI			X	X		X
YOK							

5. Sonuç

Sille'deki tarihi camilerin incelenmesi sonucunda, birçok tipolojik özelliğin ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Camilerin harimlerinin kat planları incelendiğinde, bunların sıklıkla dörtgen plana sahip oldukları görülmüştür. Ancak Mormi Cami'nin altıgen, Ak Cami'nin yedigen planlı olduğu görülmüştür. Bu farkın yapıların konumlarıyla ilgili olduğu tespit edilmiştir. Yolların etkisiyle köşe sayıları artmış ve plan tipleri değişmiştir. Harim duvarlarının birbirleriyle olan oranları incelendiğinde genel hatlarıyla yapıların kareye yakın halde düzenlenmiş olduğu görülmüştür. Ak Cami, Orta Cami, Karataş Cami ve Mormi Cami kareye yakın bir plana sahipken, kible duvarına göre Mezaryaka Cami'nin yatay, Subaşı ve Çay Camilerinin ise dikey olarak düzenlenmiş olduğu saptanmıştır. Camilerde kapı sayısı incelendiğinde, tüm camilerde harime girişin tek kapı ile sağlandığı görülmüştür. Ancak bu

kapıların buldukları duvarlarda farklılıklar olduğu saptanmıştır. Çay Cami, Subaşı Cami ve Mormi Cami'nin kapıları kuzey duvarında yer alırken, Ak Cami, Orta Cami ve Mezaryaka Cami'nin kapıları doğu duvarında; Karataş Cami'nin ise batı duvarında bulunmaktadır. Son cemaat mahfilleri incelendiğinde genellikle harimin dışında planlandıkları gözlemlenmiştir. Tüm camilerde ortak olarak üst katın var olduğu belirlenmiştir. Üst katlar, harimin kuzey duvarına paralel bir şekilde düzenlenmiş ve bütün duvarı kapsayacak şekilde inşa edilmiştir. Kadınlar mahfillerine gelindiğinde, tüm camilerde üst katın kadınlar mahfili olarak kullanıldığı tespit edilmiştir. Üst katın ön tarafı, bölücü panellerle ana mekandan ayrılmıştır. Ak Cami'de harimin kuzeyinde ve dış tarafta, Çay Cami'de ise harimin kuzey-batı köşesinde ek kadınlar mahfilleri bulunmaktadır. İmam odalarının yerleri incelendiğinde, Karataş Cami, Mezaryaka Cami ve Mormi Cami'nde harimde imam odası bulunmadığı belirlenmiştir. Ak Cami ve Çay Cami'de harimin kuzey-doğu köşesinde, Orta Cami ve Subaşı Cami'de ise harimin kuzey-batı köşesinde imam odalarının düzenlendiği gözlemlenmiştir. Taşıyıcı sistem incelendiğinde, camilerin harim bölümünde ahşap direklerin kullanıldığı tespit edilmiştir. Her bir camide farklı sayıda ahşap direk bulunmakla birlikte, Subaşı Cami hariç tüm camilerde taşıyıcı ahşap direklere rastlanmıştır. Camilerin harim bölümünü aydınlatan pencerelerin sayısının oldukça fazla olduğu belirlenmiştir. Pencerelerin konumlandırılması da farklılık göstermektedir. Güney ve batı duvarlarında pencereler bulunurken, doğu duvarında pencere sadece Mormi Cami hariç diğer camilerde mevcuttur. Kuzey duvarlarının genellikle sağır duvarlar olarak düzenlendiği, sadece Çay Cami ve Subaşı Cami'nde kuzey duvarında pencereye rastlandığı gözlemlenmiştir.

İncelenen camilerden Orta Cami, Mezaryaka Cami ve Mormi Cami'de minare bulunmamaktadır. Ak Cami'de harimin kuzey duvarından yükselen bir minare bulunmaktadır. Çay Cami'nin minaresi harimin dışında doğu duvarının kuzey duvarla birleştiği köşede konumlandırılmıştır. Subaşı Cami'nde minare, harimin içinde yer alan imam odasının içine yerleştirilmiştir. Karataş Cami'nde ise minare harimin dışında, harimin güney-batısında yer almaktadır. Minberlerin konumlandırılmasında ise genellikle kible duvarına bitişik olarak yer aldığı görülmüştür. Ancak bazı minberlerin batı duvarına da bitişik olduğu tespit edilmiştir. Orta Cami, Subaşı Cami ve Mormi Cami'deki minberler, harimin güney-batı köşesinde yer aldığı için her iki duvara da bitişik olarak konumlandırılmıştır. Ak Cami, Çay Cami, Karataş Cami ve Mezaryaka Cami'deki minberler ile batı duvarı arasında bir mesafe bulunduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, Sille'deki tarihi camilerin plan tipleri, harim duvarlarının uzunlukları, son cemaat mahfilleri, üst katların varlığı, kadınlar mahfilleri, imam odaları, giriş kapı sayıları, taşıyıcı sistemler, pencereler, minareler ve minberler gibi tipolojik özellikler incelenmiştir. Bu özelliklerin her biri camiler arasında farklılık göstermektedir ve yapıların tarihi, coğrafi ve kültürel bağlarıyla ilişkilidir. Bu çalışma, Sille'deki tarihi camilerin mimari özelliklerini anlamak ve koruma çalışmalarında rehberlik etmek için önemli bir kaynak oluşturmaktadır.

Teşekkür

Çalışmanın tamamı F.B. tarafından hazırlanmıştır.

Kaynaklar

- [1] Özönder H. Sille: Tarih, Kültür, Sanat. Konya: Merhaba Basımevi, 1998.
- [2] Erdem R. Yıldırım H. Çiftçi Ç. Dülgerler O N. Çıbıkdiken A O. Levend S. Erdoğan A. Sille Bir Koruma Geliştirme Planı ve Sonrası. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi 2010; 25(2): 25-46.
- [3] Halaç H. Bademci F. Konya Turizminin Sille'ye Yansımaları. International Congress on Cultural Heritage and Tourism; 2017; Konya. 929-936.
- [4] Mimirolu İ. Sille Kültür Vadisi. Konya: Selçuklu Belediyesi, 2013.
- [5] Ertaş Ş. Sönmez E. Taş A. Tomar Z. Tarihi Yerleşimlerde Kültür Turizmine Yönelik Somut Kültür Varlıklarının İncelenmesi: Konya/Sille Örneği. Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi 2022; 7(1): 42-71.
- [6] Tapur T. Konya'da Tarihi Yerleşim Merkezi: Sille. Türk Coğrafya Dergisi 2009; 2(9), 473-477.
- [7] Sarıköse B. Osmanlı Döneminde Sille. Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi, 2008.
- [8] Halaç H. Bademci F. Şeb-i Arus'da Sille. The Journal of Academic Social Science Studies 2017; 64(3): 203-210.
- [9] Özyurt Ş. Sille Geleneksel Mimarisi Bağlamında Sille Mescitleri ve Koruma Uygulamaları. Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, 2019.
- [10] Eyice S. Cam-Mimarlık Tarihi, İslam Ansiklopedisi, Elektronik ansiklopedi, 1993; 55-90.
- [11] Konya Büyükşehir Belediyesi Arşivi.

24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ Depreminin Jeomorfolojiye Yansımaları ve Karakaya Baraj Gölünde Oluşan Çizgisel Hatların Analizi

Murat SUNKAR^{1*}, Vedat AVCI², Cevdet CANPOLAT³

¹ Coğrafya Bölümü, İnsani ve Sosyal Bilimler Fakültesi Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Coğrafya Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye

³ Millî Eğitim Bakanlığı, Balakgazi Anadolu Lisesi, Elazığ, Türkiye

*¹ msunkar@firat.edu.tr, ² vavci@bingol.edu.tr, ³ cevcanpol@hotmail.com

(Geliş/Received: 28/05/2023;

Kabul/Accepted: 22/08/2023)

Öz: Bu çalışmada, Sivrice-Elazığ depreminin jeomorfolojiye yansımaları ve depremden sonra Karakaya Baraj Gölü'nde oluşan çizgisel hatlar analiz edilmiştir. 24 Ocak 2020 tarihinde, Elazığ'ın güneybatısında, merkez üssü Sivrice ilçesine bağlı Çevrimtaş köyünde 6.8 büyüklüğünde şiddetli bir deprem yaşanmıştır. Bu depremde 37'si Elazığ'da, 4'ü Malatya'da olmak üzere 41 kişi hayatını kaybetmiş ve on binlerce bina ağır hasar almıştır. Depremden sonra, sahada araştırma yapan bir grup araştırmacı tarafından 30 Ocak 2020 tarihinde, Doğanöl kuzeyinde Karakaya Baraj Gölü üzerinde gözlenen ve fayla çakışan beyaz çizgisellikler, su veya gaz çıkışı olarak rapor edilmiştir. Ancak bu rapordan sonra farklı tarihlerde aynı alanlarda yapılan arazi çalışmalarında bu çizgiselliklerin tekrar oluştuğu görülmüştür. İlk arazi gözlemlerinde faylarla çakışan beyaz çizgisel hatların içerisinde köpük ve bitki parçalarının varlığı, beyaz çizgiselliklerin gaz çıkışı olduğunu şüpheli hale getirmiştir. Bu amaçla Doğu Anadolu Fayı'nın Fırat Vadisi'ni ötelediği alanlarda baraj gölü üzerine saman ve köpük bırakılarak deney yapılmıştır. Deney sonucunda dalganın olmadığı dönemde bırakılan malzemenin şekilsiz dağıldığı, dalganın başlaması ile oluşan köpükler ve su yüzeyine bırakılan malzemenin fayla aynı doğrultuda dizilerek beyaz çizgisel hatlar oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu veriler göl yüzeyinde oluşan beyaz çizgisel hatların gaz çıkışı dışında morfoloji ve hava hareketlerine bağlı, dalga etkisiyle oluşan özel bir oluşum olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depremi, Fırat Vadisi, Karakaya Baraj Gölü, Gaz çıkışı.

Reflections of the Sivrice-Elazig Earthquake on 24th January 2020 on Geomorphology and Analysis of the Linear Lines in the Karakaya Dam Lake

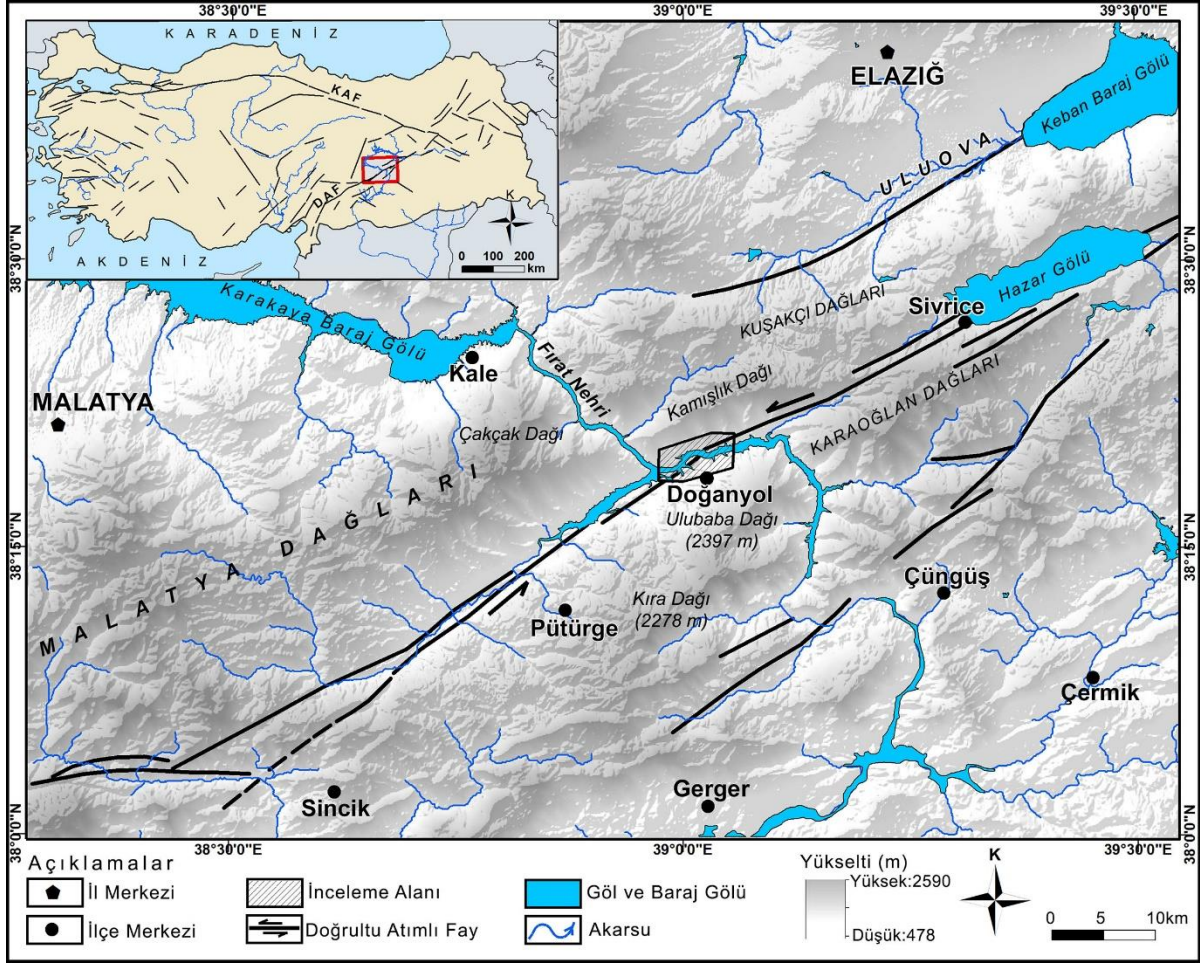
Abstract: In this study, the reflections of the Sivrice-Elazig earthquake on geomorphology and the linear lines formed in the Karakaya Dam Lake after the earthquake have been analysed. On 24th 2020, a 6.8 magnitude earthquake occurred in the village of Çevrimtaş, the epicenter of which is located in Sivrice district to the south of Elazig. In the earthquake, 41 people lost their lives, 37 of them in Elazig and 4 of them in Malatya, and tens of thousands of buildings were heavily damaged. After the earthquake on 30th January 2020, It was reported as water or gas outflow by a group of researchers doing research in the field that white lineaments on the dam were observed overlapping with the fault. However, after this report, it has been observed through field studies that these lineaments have recurred in the same areas on different dates. In the first field observations, the presence of foam and plant fragments in the white linear lines coinciding with faults that the white lineaments are outgassing have been found suspicious. For this reason, in the areas where East Anatolian Fault zone offsets Euphrates Valley, an experiment has been done by leaving straws and foam on the dam lake. According to the experiment's results, It was observed that the material left in the absence of the wave was randomly dispersed, and that foam formed by the wave onset and the material left on the surface of the water were aligned in the same direction with the fault and formed white linear lines. These data show that the white linear lines formed on the lake surface are a special form caused by the wave effect, depending on the morphology and air movements, apart from the gas outflow.

Key words: 24th January 2020 Sivrice-Elazig Earthquake, Euphrates Valley, Karakaya Dam Lake, Gas outflow.

1. Giriş

24 Ocak 2020 tarihinde saat 20:55'de Elazığ'ın Sivrice ilçesine bağlı Çevrimtaş köyü yakınlarında 6.8 büyüklüğünde şiddetli bir deprem meydana gelmiştir. Çevrimtaş köyü Sivrice ilçesinin batısında, Kömürhan Boğazı içerisinde, Karakaya Baraj Gölü kıyısında yer almaktadır. Köy ayrıca tektonik açıdan çok aktif olan Doğu Anadolu Fay Zonunun (DAFZ) segmenti üzerinde kurulmuştur (Şekil 1).

* Sorumlu yazar: msunkar@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹0000-0002-4479-5023, ²0000-0003-1439-3098, ³0000-0002-0490-4376



Şekil 1. Sivrice (Elazığ) ve Sincik (Adıyaman) arasındaki aktif faylar ve 24 Ocak Sivrice-Elazığ depremi sonrası su üzerinde oluşan çizgiselliklerin lokasyonu (Aktif faylar Emre vd. [1], Duman vd. [2], Emre vd. [3]'den alınmıştır.

Sivrice depreminden sonra, bu deprem ve etkileri ile ilgili olarak çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırmaların bir bölümü saha çalışmalarına [4], [5], [6], [7], [8], [9] bir bölümü ise sayısal analizlere [10], [11] yönelik olarak hazırlanmıştır. Bu araştırmaların hepsinde bu depremde önemli yüzey deformasyonlarının geliştiği belirtilmektedir. Ayrıca DAF'ın bu kesimi üzerinde “creep” hareketi olduğu ve dolayısıyla yüzey kırığının gelişmediği pek çok izlemsel yöntemle desteklenmiştir [12]. Kürçer vd. [4] Pütürge segmentinin yaklaşık 50 km'lik bölümü üzerinde yüzey deformasyonları dışında, Karakaya baraj gölü üzerinde yüzey kırığı izinin kaydıyla ilgili paylaşmış olduğu veriler dikkat çekmektedir.

Kürçer vd. [4], 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depreminden sonra bölgede yapmış oldukları arazi çalışmalarında DAF'ın Fırat vadisini kestiği alanda, Çevrimtaş ile Doğanyol arasında Karakaya Baraj Gölü üzerinde, 30 Ocak 2020 tarihinde gaz çıkışı olarak rapor edilen 3 dakika 37 saniyelik bir görüntü yayınlamışlardır [42]. İncak güneyinde oluşan bu çizgiselliklerin, Fırat Vadisi'ni kesen fayla örtüşmesi nedeniyle gaz veya su çıkışı şeklinde yorumlanmıştır. Bu yorumlar ulusal ve uluslararası platformlarda tartışılarak büyük ilgi çekmiştir. Gaz çıkışı olarak kaydedilen çizgiselliklerin, depremin merkez üssüne çok yakın olması ve fayın göl içerisinde kalan bölümü ile çakışması, olayın anlık oluştuğunun belirtilmesi bu oluşumun önemini artırmıştır. Depreme bağlı oluşan bu şekildeki gaz çıkışlarının anlık olması ve o anda gözlenmesi doğal olarak kabul edilmektedir [13], [14], [15], [16]. Kürçer ve diğerlerinin [4] baraj gölü üzerindeki gözlem ve tespitlerinden sonra, tarafımızdan aynı sahada farklı tarihlerde saha gözlemleri yapılmıştır. İlk saha gözleminin yapıldığı 26 Şubat 2020 tarihinde fayın göl içerisinde kalan bölümü üzerinde Kürçer ve diğerlerinin [4] kaydettiği görüntülere benzer beyaz çizgiselliklerin görülmesi dikkatimizi gaz çıkışı konusuna yöneltmiştir. Aynı oluşumun yaklaşık bir ay sonra tekrar görülmesi, ilk oluşumun gaz çıkışı dışında farklı bir oluşum olduğu düşüncesini doğurmuştur. Bu oluşumun gerçek

nedeni ile depremin jeomorfolojiye yansımaları belirlemek amacıyla bu çalışma yapılmıştır. Sahanın depremselliği ile jeomorfolojik gözlemler ve analizler sonucunda elde edilen bulgular aşağıda detaylandırılmıştır.

1.1. Doğu Anadolu Fayı Zonu (DAFZ)

DAFZ, Türkiye'nin en aktif diri fay kuşaklarından birini oluşturmaktadır olup Karlıova-Antakya arasında KD-GB doğrultusunda sol yanal doğrultu atımlı bir fay zonudur. Arap-Afrika levhası ile Avrasya levhası arasında kıta-kıta çarpışması sonucu oluşmuş, toplam 580 km uzunluğundadır [17], [18], (Şekil 1). Bu zon daha kapsamlı olarak Aksoy vd. [19] tarafından Doğu Anadolu Fay Sistemi (DAFS) olarak adlandırılmıştır. Bu sistem, Arap-Afrika levhaları arasında kuzeydoğuda Karlıova ile güneybatıda Karataş (Adana)-Samandağ (Antakya) arasında, 30 km genişlik, 700 km uzunlukta sol yanal atımlı ve KD gidişli bir makaslama kuşağı olarak tanımlanmıştır.

Barka ve Kadinsky-Cade [20], DAFZ'nin, doğuda Karlıova, batıda Türkoğlu (Kahramanmaraş) arasında 14 segmentten oluştuğunu belirtmiştir. Şaroğlu vd. [21] ise DAFZ'ı, uzunlukları 45–145 km arasında değişen 6 ana yapısal bölüme ayırmışlardır. Son olarak Duman ve Emre [22], DAFZ'ı, kuzeydoğuda Karlıova'dan, güneybatıya doğru Karlıova, Ilıca, Palu, Pütürge, Erkenek, Pazarcık ve Amanos segmentleri olarak 7 ana segmente ayırmış ve haritalamışlardır.

24 Ocak 2020 tarihinde meydana gelen depremle Sivrice-Sincik arasında kalan segment kırılmıştır. Bu alanda kalan segment için Hazar Gölü-Sincik, Sivrice-Doğanyol, Doğanyol-Pütürge ve Pütürge adları kullanılmaktadır. Fakat Herece [23] ise Sivrice-Sincik arasındaki segment için Şiro Bölütü ifadesini kullanmıştır. Bu bölütün yaklaşık 90 km uzunluğunda olduğu, Hazar Gölü'nden Doğanyol batısına kadar 35 km'lik kuzey bölümünün 064° ve Doğanyol batısından Sincik'e kadar olan 55 km'lik uzunluğundaki güney bölümünün 055° doğrultusunda olduğu belirtilmiştir. Bütün bunlarla birlikte bu segment için Sivrice-Pütürge ismi yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sivrice-Sincik arasında kalan sahada fay morfolojisi belirgin olup topografyaya damgasını vurmuş durumdadır. Bu alanda geniş bir zonda fay vadileri, fay diklikleri, geniş alanlı kütle hareketleri ve Fırat vadisindeki belirgin ötelenme en dikkat çekici morfolojik unsurlardır. Fırat Nehri vadisi DAF tarafından 13 km sol yanal ötelenmiştir [24], [25], [26], [27]. Bu ötelenme miktarı bu alandaki fayın çok aktif olduğunu ve büyük depremlerin yaşanmış olduğunu göstermektedir.

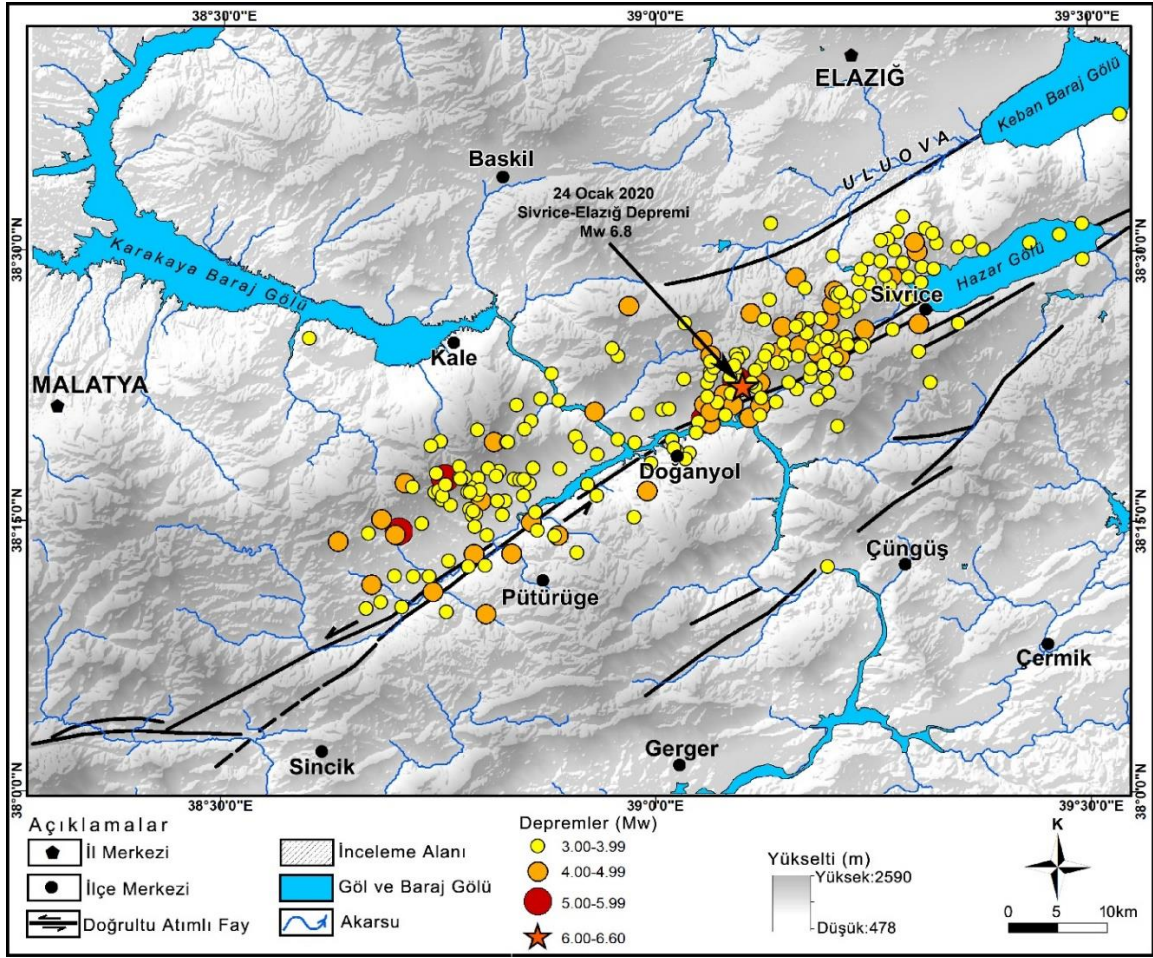
Fayın morfolojiye yansımaları dışında tarihsel ve aletsel döneme ait deprem kayıtları DAFZ üzerinde çok sayıda yıkıcı depremin yaşandığını göstermektedir. Tarihi kayıtlar dışında aletsel dönem kayıtlarına ait depremler Sivrice-Sincik arasında yoğunlaşmaktadır. 2000 yılından 2020 yılına kadar Sivrice çevresinde deprem yoğunluğu artarak, 24 Ocak 2020 tarihinde 6.8 büyüklüğündeki deprem ile zirve yapmıştır. Bu depremde 37'si Elazığ, 4'ü Malatya olmak üzere 41 kişi hayatını kaybetmiştir [28]. Depremde yaşanan panik ve diğer nedenlerle Kahramanmaraş, Diyarbakır ve Adıyaman illerinde birer kişi hayatını kaybetmiştir. Böylece deprem nedeniyle toplam 44 kişi yaşamını yitirmiş ve 1600'den fazla yaralanma olmuştur. Can kaybı dışında başta Elazığ ve Malatya olmak üzere bölgede on binlerce bina ağır hasar görmüştür.

1.2. 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depremi

Depremler genelde meydana geldikleri yere göre adlandırılmaktadır. Bu deprem de Sivrice ilçesi sınırlarında meydana gelmiştir. Ancak depremin merkez üssü ile birlikte Elazığ'da da etkisinin yüksek olması nedeniyle Sivrice-Elazığ depremi şeklinde adlandırılmanın uygun olacağı düşünülmektedir.

24 Ocak 2020 tarihinde yaşanan 6.8 büyüklüğündeki depremin merkez üssü Elazığ'a bağlı Sivrice ilçesinin Çevrimtaş köyüdür (Şekil 2). DAFZ'da, Sivrice-Sincik segmenti üzerinde meydana gelen bu deprem, 38° 35'3" kuzey enlemi ve 39° 06'30" doğu boylamı üzerinde Çevrimtaş köyüne 0.81 km uzaklıkta, yerin 8.06 km derinliğinde yaşanmıştır [28]. Deprem, Türkiye ile birlikte komşu ülkelerde de hissedilmiş olup, 100 milyondan fazla insanı etkilediği tahmin edilmektedir.

Depremin meydana geldiği Çevrimtaş köyü, Elazığ'ın Sivrice ilçesi ile Adıyaman'ın Sincik ilçesi arasında DAFZ üzerinde yer almaktadır. Sivrice-Sincik arası tektonik açıdan çok hareketli olup tarihsel ve aletsel dönemde büyük depremlerin yaşandığı bir sahadır. Bu alanda hem tarihsel hem de aletsel dönemde çok büyük ve yıkıcı depremler kayıtlara geçmiştir. Tarihsel dönem içerisinde yakın dönem olarak nitelendirilecek 1875 yılında 6'dan büyük yıkıcı deprem yaşanmıştır. Bu depremde en büyük yıkımın Çevrimtaş köyü ve çevresinde görülmesi, bu deprem ile 24 Ocak 2020 tarihindeki depremin aynı fayın hareketine bağlı oluştuğunu göstermektedir. Aletsel dönem depremlerinde kayıtlar daha sağlıklı olup bu dönemde de Sivrice-Sincik arasında magnitüd değeri 6 ve üzeri olan 2 büyük deprem kayıtlara geçmiştir (Tablo 1). Bunlardan sonuncusu ve en şiddetli olanı 24 Ocak 2020 tarihindeki 6.8 büyüklüğündeki depremdir.



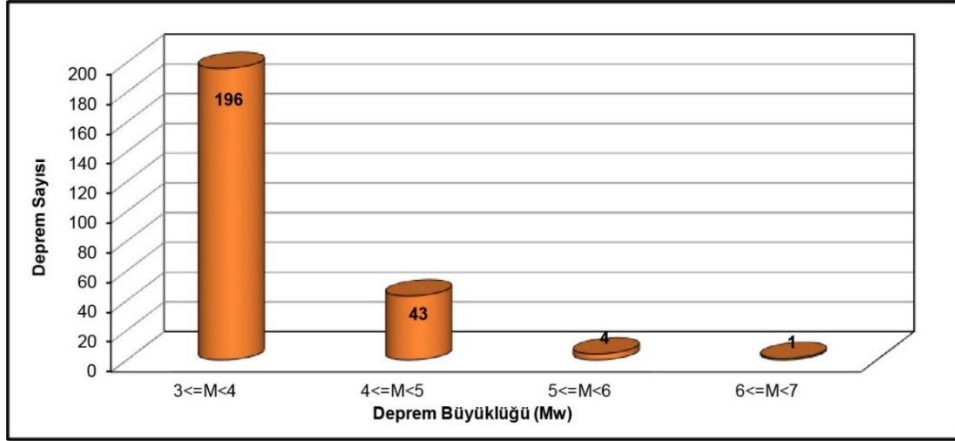
Şekil 2. 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depreminde ana şok ve artçı depremlerin dağılışı (Deprem verileri Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'ne [29] ait olup 19.06.2020 saat 14:38'e kadar oluşan depremleri ($m \geq 3$) kapsamaktadır).

Tablo 1. Sivrice-Sincik Arasında Tarihsel ve Aletsel Dönemde (1875-2019) Görülen Büyük Depremler ($M \geq 6.0$).

Sıra No	Tarih	Enlem	Boylam	Derinlik (km)	Elazığ'a Uzaklık (km)	Magnitüd	Lokasyon
1	27.03.1875	-	-	-	-	6.7	Keban-Hazar-Sincik
2*	14.06.1964	38.13	38.51	3	86	6.0	Aksu-Sincik (Adıyaman)
3*	24.01.2020	38.35	39.06	8.06	40	6.8	Sivrice (Elazığ)

* KANDİLLİ B.Ü. KRDAE Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi, Basın Bülteni'nden [29] alınmıştır.

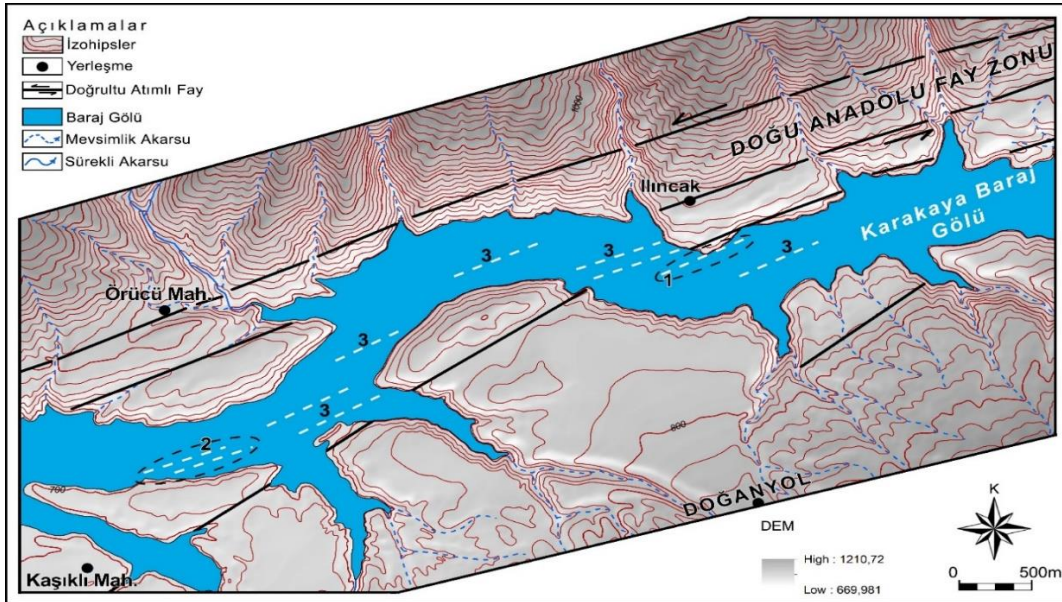
Sivrice-Sincik arasında aletsel dönem depremleri, Sivrice'nin batısında kümelenmekte olup, iki yerleşme arasındaki fay zonunda magnitüd değeri 4 ve üzeri ($M \geq 4.0$) olan çok sayıda deprem yaşanmıştır. 24 Ocak 2020 Sivrice depremi ise sismik açıdan kendi içerisinde çok iyi analiz edilmesi gereken bir deprem özelliğindedir. 24 Ocak 2020 saat 20:55'ten sonra 19.06.2020 saat 14:38'e kadar magnitüdü 3 ve üzeri 244 artçı deprem kaydedilmiştir (Şekil 3). Artçıların büyük bölümü depremin yaşandığı gün ve sonrasında meydana gelmiştir. Büyük depremden sonraki 15 gün içerisinde meydana gelen depremlerin 136 tanesinin büyüklüğü 3 ile 4 arasında iken, 4'ün üzerinde 28 artçı deprem kaydedilmiştir. İlk 15 günden sonra artçıların frekansı düşmekle birlikte sonraki 4.5 aylık sürede magnitüdü 3 ve üzeri 80 deprem daha yaşanmıştır (Şekil 3). Artçılardan 3'ü 5 ve üzerinde olup ana şokla etkilenen yapılarda hasarın artmasına neden olmuştur.



Şekil 3. 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depremi ve sonrasında oluşan depremlerin ($m \geq 3$) sayı-magnitüd ilişkileri (Deprem verileri Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'ne [29] ait olup 19.06.2020 saat 14:38'e kadar oluşan depremleri ($m \geq 3$) kapsamaktadır).

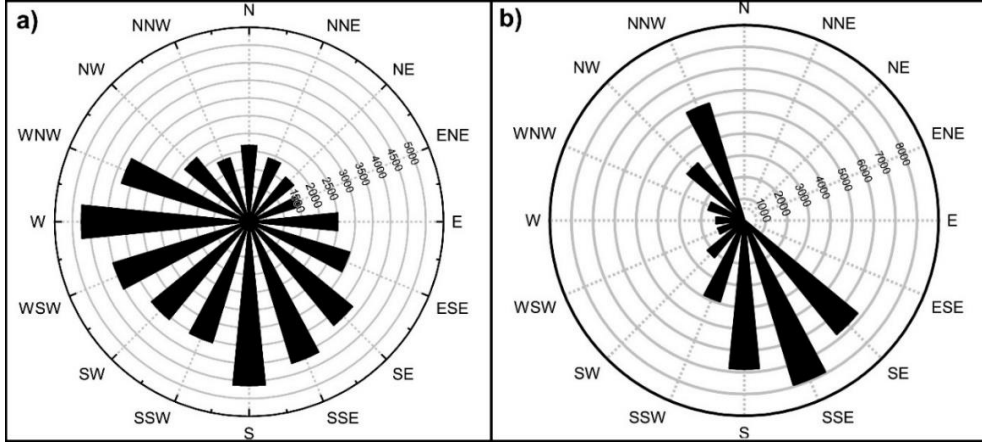
2. Materyal ve Metot

Sivrice depreminden hemen sonra, Sivrice-Pütürge arasında DAFZ boyunca fayın jeomorfolojiye yansımaları belirlemeye yönelik arazi çalışmaları yapılmıştır. Saha çalışmalarında depreme bağlı oluşan heyelan, kaya düşmesi ve yüzey deformasyonları gibi şekillerin dağılımlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç dışında Kürçer vd. [4] tarafından hazırlanan raporda, baraj gölü üzerinde oluşan çizgisel hattın fayın yüzey kırığı izine karşılık geldiğinin belirtilmiş olması dikkate alınarak, böyle bir oluşumun tekrar gerçekleşme ihtimali araştırılmıştır. Bu amaçla farklı tarihlerde Doğanyol ile Çevrimtaş arasında baraj gölü ve çevresinde gözlemler yapılmıştır. 26 Şubat 2020 tarihinde DAFZ'nin Karakaya Baraj Gölü içerisinde kalan bölümü üzerinde gözlenen bulguların doğrulanması amacıyla 29 Mayıs 2020 tarihinde Koldere (Doğanyol)-İlincak (Sivrice) arasında baraj gölü üzerinde deneyler yapılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depreminin meydana geldiği alanın topografya ve tektonik haritası. 1) 30 Ocak 2020 tarihinde Kürçer vd. [4] tarafından Doğanyol kuzeyinde Karakaya Baraj Gölü üzerinde görüntülemiş oldukları, fay ile kesişen beyaz çizgiselliklerin lokasyonu. 2) 26 Şubat 2020 tarihinde Kaşıklı Mahallesi kuzeydoğusunda su üzerinde gözlenen beyaz çizgisel hatların lokasyonu. 3) 29 Mayıs 2020 tarihinde İlincak Kaşıklı Mahallesi arasında baraj gölü üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre su üzerinde faya paralel ve fayla kesişen beyaz çizgiselliklerin lokasyonu.

Baraj gölü üzerindeki deney için su yüzeyine malzeme bırakma işlemine sabah saat 09:00 gibi başlanmış ve yaklaşık bir-bir buçuk saatlik süre içerisinde parça parça devam edilmiştir. Kaşıklı ile Ilıncak arasında su yüzeyine malzeme döküldüğünde havanın sakin olduğu gözlemlenmiştir. Bir iki saat beklendikten sonra bırakılan malzemenin dağılımını gözlemek amacıyla aynı hattan tekrar geri dönülmüştür. Fakat geri dönüşle birlikte saat 11:00 gibi hafif bir rüzgarın başladığı, oluşan bu rüzgarla birlikte bırakılan malzemenin bir hat boyunca dizildiği görülmüştür. Bu dizilimin hakim rüzgar yönü ve morfoloji ile ilişkili olabileceği düşüncesiyle sahaya ait rüzgar verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınarak analiz edilmiştir ([30]; Şekil 5). Bu deneyde ortalama 30 kg saman ve bir miktar köpük kullanılmıştır. Dalganın olmadığı sabah saatlerinde üç farklı alana saman, dar bir alana ise köpük (strafor parçaları) dökülerek bırakılan malzemenin davranışı gözlemlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 5. Doğançayol (a) ve Pütürge (b) meteoroloji istasyonlarının uzun yıllar (Doğançayol 2014-2019; Pütürge 2013-2019) toplam rüzgar esme sayılarına göre hazırlanmış rüzgar gülleri. Bu verilere göre Doğançayol'da hakim rüzgar yönü SW, Pütürge'de SSE'dir (Meteoroloji 13. Bölge Müdürlüğü, Doğanşehir ve Pütürge meteoroloji istasyonu verilerine göre hazırlanmıştır [30].



Şekil 6. Doğançayol kuzeyinde Karakaya Baraj Gölü'nde suyun sakin olduğu dönemde su üzerine farklı alanlara saman (a, c, d) ve köpük (strafor parçası) (b) bırakılmıştır. Suyun sakin olduğu dönemde su üzerindeki parçaların düzensiz bir dağılım sergilediği dikkati çekmektedir.

3. Bulgular

3.1. 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depreminin jeomorfolojiye yansması

Sivrice-Elazığ depreminden sonra Sivrice-Sincik arasında DAFZ boyunca, depreme neden olan fayın morfolojiye yansmasını belirlemeye yönelik gözlemlerde, depreme neden olan ve iki bölümden oluşan Sivrice-Sincik segmentinde yüzey deformasyonları belirlenmiştir. Akbayram vd. [8] bu depremin Pütürge Segmenti boyunca ~54 km uzunluğunda bir yüzey deformasyonu oluşturduğunu, bu zonun yoğun zemin çatlakları, kaya düşmeleri, heyelanlar, çeşitli uzunluklarda sıvılaşmalardan oluştuğunu belirtmiştir. Sivrice merkezde yol ve yapılarda belirgin yüzey deformasyonları ve çatlaklar gözlenmiştir. Bu çatlak ve deformasyonlar, Sivrice-Pütürge arasında daha yoğun bir şekilde gelişmiştir. Hatta bu alanda yer yer heyelan kütlelerinde ve yol şevlerinde kaymalar, çok sınırlı alanlarda sıvılaşma ve yanal yayılma hareketleri de gözlemlenmiştir (Şekil 7).

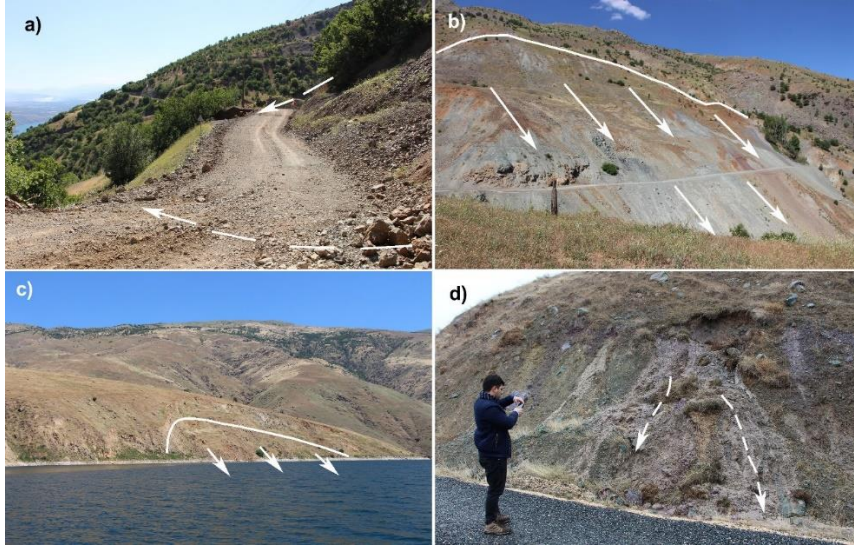
Uslu-Çevrimtaş arasında depreme tetiklenen çok sayıda kaya düşmesi ve heyelan meydana gelmiştir. Ancak depremin olduğu dönemdeki mevsimsel özellikler nedeniyle zemin kısmen kuru olduğundan heyelanların hareketi belirgin değildir. Buna karşın baraj gölü kıyısı, Kalaba çevresi ve Uslu kuzeyinde meydana gelen heyelanlarda belirgin kaymalar yaşanmıştır (Şekil 8). Bu alanların dışında tetiklenen heyelanların büyük bölümünün üst bölümlerinde hafif çatlaklar oluşmuştur. Bu durum depremden sonra deprem bölgesi ile ilgili hazırlanan çalışmalarda da teyit edilmiştir. Karakaş vd. [10], [11] deprem öncesi ve sonrası hava fotoğrafları kullanılarak elde etmiş oldukları yüksek çözünürlüklü 3B dijital yüzey modellerine göre yeni gelişen kütle hareketlerinin mekânsal dağılımlarının oldukça sınırlı olduğu, bunların genellikle yol yarmalarında, göl kıyılarında olduğu, kütleli göçmelere ek olarak, çok sayıda kaya düşmesinin de meydana geldiği belirtilmiştir. Köküm [9] depreme yaklaşık 55 km²'lik bir alanda heyelanların tetiklendiğini, depremin zeminde yırtılmalara, yüzey çatlaklarının açılmasına ve düz zeminde (>%5 zemin eğimi) çatlaklara neden olduğunu belirtmiştir. Tatar vd. [5], [6] göre bu deformasyonların büyük bölümü deprem sırasında gelişen sismik sarsılma ve yer çekimi (gravite) ile ilişkilidir.



Şekil 7. 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depreminde DAFZ üzerinde görülen deformasyonlar. a) Sivrice merkezde görülen yüzey deformasyonları, b) Sivrice batısında fay zonu üzerinde yol boyunca görülen deformasyon, c) Pütürge Ormaniçi köyü güneyinde yüzeye yansıyan deformasyonlar.

Arazi gözlemleri ve literatüre göre bu deprem jeomorfolojiye heyelan, kaya düşmesi, yanal yayılma ve yüzey çatlakları meydana getirerek yansmıştır. Uslu kuzeyi ve Kalaba çevresinde heyelan kütlelerinde yaşanan kaymalar ve kaya düşmeleri sonucunda Kalaba yolu kapanmıştır (Şekil 8).

Bu morfolojik yansımalar dışında, 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depreminde Pütürge'ye bağlı Taşmış köyü kuzeyinde çıkan Çermik sıcak suyunun debisi 10 kata yakın artış göstermiştir. Debi artışı ile birlikte ince kumlu çamur ve gaz çıkışları yaşanmıştır (Şekil 9). Bu oluşumun fay üzerinde meydana gelmesi çamur ve gaz çıkışının doğrudan fayın aktivitesi ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Özdemir [24] yapmış olduğu araştırmalarda yöre halkının ifadelerine göre bu sıcak su kaynağının bulunduğu alanda, 1900'lü yıllarda gaz patlamaları ile çamur bloklarının geniş alanlara yayıldığını belirtmektedir. Tarih net olmazsa da bu olayın 1874-75 yıllarındaki depreme birlikte yaşanmış olması ihtimali bulunmaktadır. Büyük çamur bloklarının çevreye yayılmış olması büyük gaz çıkışının yaşandığına işaret etmektedir.



Şekil 8. Sivrice-Pütürge arasında depremle tetiklenen heyelanlar ve sıvılaşma olayı. a) Uslu kuzeyinde Kalaba yolu şevlerinde meydana gelen küçük çaplı kayma ve kaya düşmeleri. b) Kalaba doğusunda depremle tetiklenen en belirgin kaymanın yaşandığı Kalaba heyelanı. c) Ilıncak kuzeybatısında göl kıyısında oluşan heyelan ve d) Çevrimtaş doğusunda yol şevlerinde görülen küçük çaplı sıvılaşma olayları.

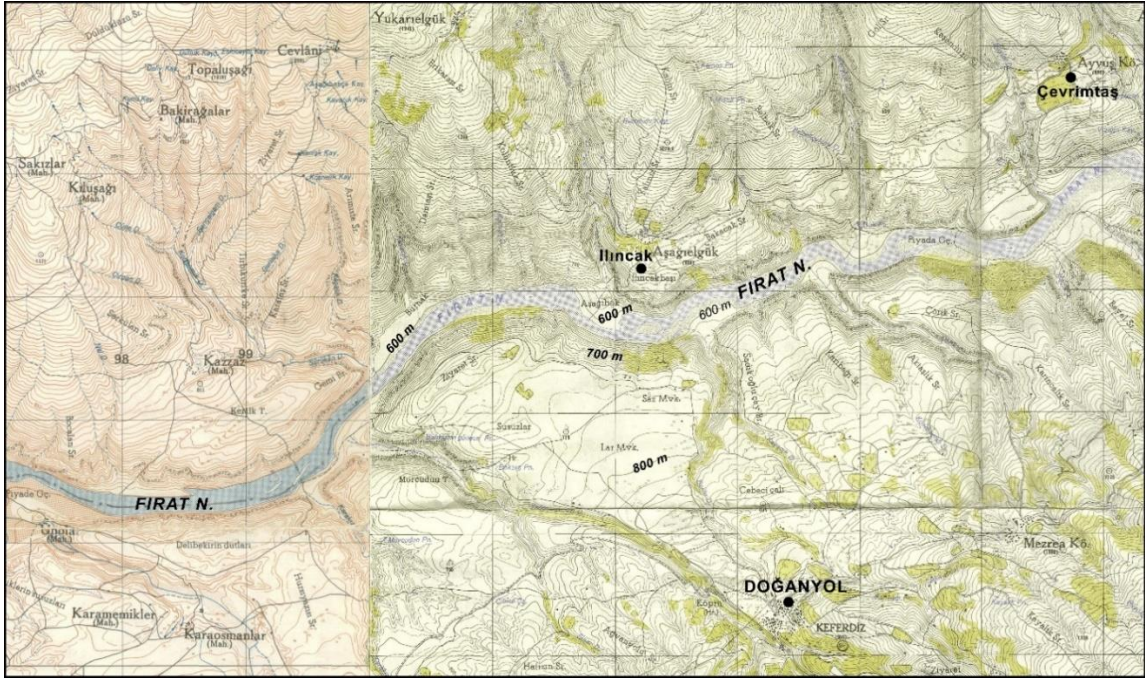


Şekil 9. 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depreminden sonra Taşmış köyü kuzeyinde fay hattı üzerindeki Çermik sıcak su kaynağındaki çamur, ince kum, sıvı ve gaz çıkışları. a) Çermik sıcak su kaynağının debisi depremle birlikte 10 kata kadar artmıştır. b) 25 Ocak sabahı kaynaktan basınçlı su ve katı malzeme çıkmıştır. c) 26 Şubat 2020 tarihinde kaynak çevresinde dairesel kabarcıklar halinde sıvı ve gaz çıkışlarının devam ettiği gözlemlenmiştir.

3.2. Karakaya Baraj Gölü'nde gözlenen çizgisel hatlar

Doğanyol-Pütürge arasında fayın morfoloji üzerindeki etkileri dışında, Çevrimtaş doğusunda Ilıncak ile Doğanyol arasında Karakaya Baraj Gölü üzerinde depremden sonra oluşan beyaz çizgisellikler dikkati çekmektedir (Şekil 4). Su yüzeyindeki beyaz çizgiselliklerin fay hatları ile olan ilişkisini incelemek amacıyla Doğanyol kuzeyinde Fırat vadisinin çok iyi analiz edilmesi gereklidir. Çünkü baraj gölü üzerindeki çizgiselliklerin oluşumunda hava hareketleri ve morfoloji öne çıkmaktadır. Bu alanda, Fırat Nehri vadisi DAF tarafından 13 km sol yanal ötelenmiştir [24], [25], [26], [27]. Fırat Vadisi baraj gölü suları altında kalmasına rağmen bu morfoloji belirgin bir şekilde gözlenmektedir. Doğanyol kuzeyinde baraj gölünün kuzey ve güney sahilinde fay tarafından kesilen yüzeyler sahil çizgisini oluşturmaktadır. Fay dikliklerine karşılık gelen yüzeyler güney yamaçlarda daha geniş alan kaplamakta olup su üzerindeki çizgisel hatların oluşumunda anahtar rolü üstlenmektedir (Şekil 4).

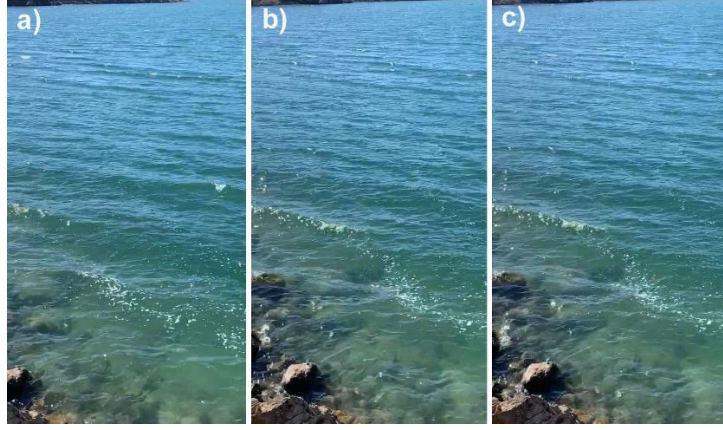
Kürçer vd. [4] tarafından 30 Ocak 2020 tarihinde su üzerinde oluşan beyaz çizgiselliklerin gözlemlendiği lokasyonlarda, 26 Şubat 2020 tarihinde saat 14:30 civarında yapılan saha araştırmalarında benzer görüntüler kaydedilmiştir. İlk kayıttan 27 gün sonra fayın baraj gölü altında kaldığı lokasyonda aynı görüntünün olması dikkate alınarak bu oluşumun deprem dışında farklı bir nedene bağlı olarak meydana geldiği değerlendirilmiştir. Çünkü baraj öncesinin topografya haritasına göre derinliği 100 m'den fazla bir su kolununun üzerinde sıklıkla yüzeye yansıyacak gaz çıkışı imkânsız görülmektedir (Şekil 10).



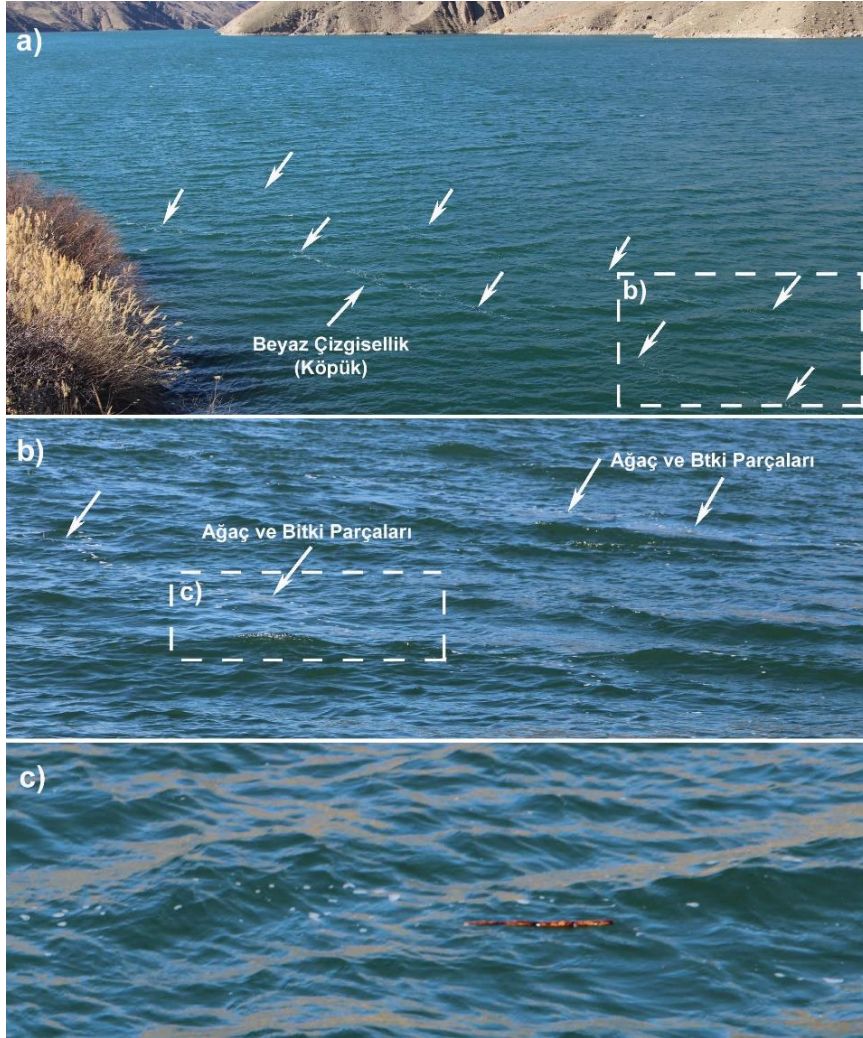
Şekil 10. Doğanyol kuzeyinde Fırat Nehri Vadisi'nin baraj gölü öncesine ait topografya haritası (Harita Genel Müdürlüğü [31], 1/25.000 ölçekli Malatya L41 b3 paftası (1958) ile Elazığ L42 a4 (1953) paftalarından alınmıştır).

İlk gözlemlerde Kaşıklı Mahallesi kuzeydoğusunda göl kıyısında fayın su altında kalan bölümünün su yüzeyine karşılık gelecek hatta, su üzerinde beyaz bir çizgiselliğin varlığı belirlenmiştir. Bu beyaz hattın oluşumunu anlamak amacıyla su üzerinde suni dalga oluşturulduğunda beyaz hattın bozulduğu görülmüştür. Bu ilk denemede çizgiselliği sağlayan beyazlığın köpük olduğu belirlenmiştir. Bu denemede beyazlığı su üzerindeki köpüklerin sağladığı, suni dalgada köpüklerin dağıldığı alanlarda beyazlığın kaybolduğu ve kısa sürede de tekrar köpük birikiminin olmadığı görülmüştür. Ayrıca suyun sıg olduğu alanlarda da beyaz hattın olmasına rağmen zeminden herhangi bir su veya gaz çıkışı görülmemiştir. Bütün bu gözlemlerin dışında Kaşıklı Mahallesi kuzeybatısındaki lokasyonda kıyıya çarpan dalganın etkisiyle belirgin bir köpüklenme oluştuğu, oluşan bu köpüklerin de rüzgâr etkisiyle fay doğrultusunda sürüklenerek çizgisel hatlar oluşturduğu belirlenmiştir (Şekil 11).

Kaşıklı mahallesi kuzeydoğusunda kıyının hemen önünde 300-500 m uzunluğundaki beyaz çizgisel hat içerisinde bitki parçalarının varlığı ve bunların çizgisel hattın içerisinde aynı doğrultuda bulunması, bu oluşumun dalga etkisiyle olduğunu göstermektedir (Şekil 12).



Şekil 11. 26 Şubat 2020 tarihinde Kaşıklı mahallesi kuzeydoğusunda Karakaya Baraj Gölü üzerinde, faya paralel olarak görülen beyaz çizgiselliklerin gelişiminde etkili olan dalga hareketleri (a, b, c).



Şekil 12. 26 Şubat 2020 tarihinde Kaşıklı Mahallesi kuzeydoğusunda baraj gölü üzerindeki köpükler dalga etkisi ile toplanarak beyaz bir çizgisel hat oluşturmuştur (a). Birden fazla olan çizgisel hatların her biri ortalama 500 m uzunluğunda olup 1-2 km'lik bir mesafede görülmüştür. Doğu Anadolu Fayı'nın göl altında kalan bölümü üzerinde görülen bu çizgiselliklerin içerisinde ağaç parçası ve bitki kökleri çizgisel hatlara paralel durmaktadır (b, c).

3.3. Karakaya Baraj Gölü'nde deney sonucuna göre oluşan çizgisel hatlar

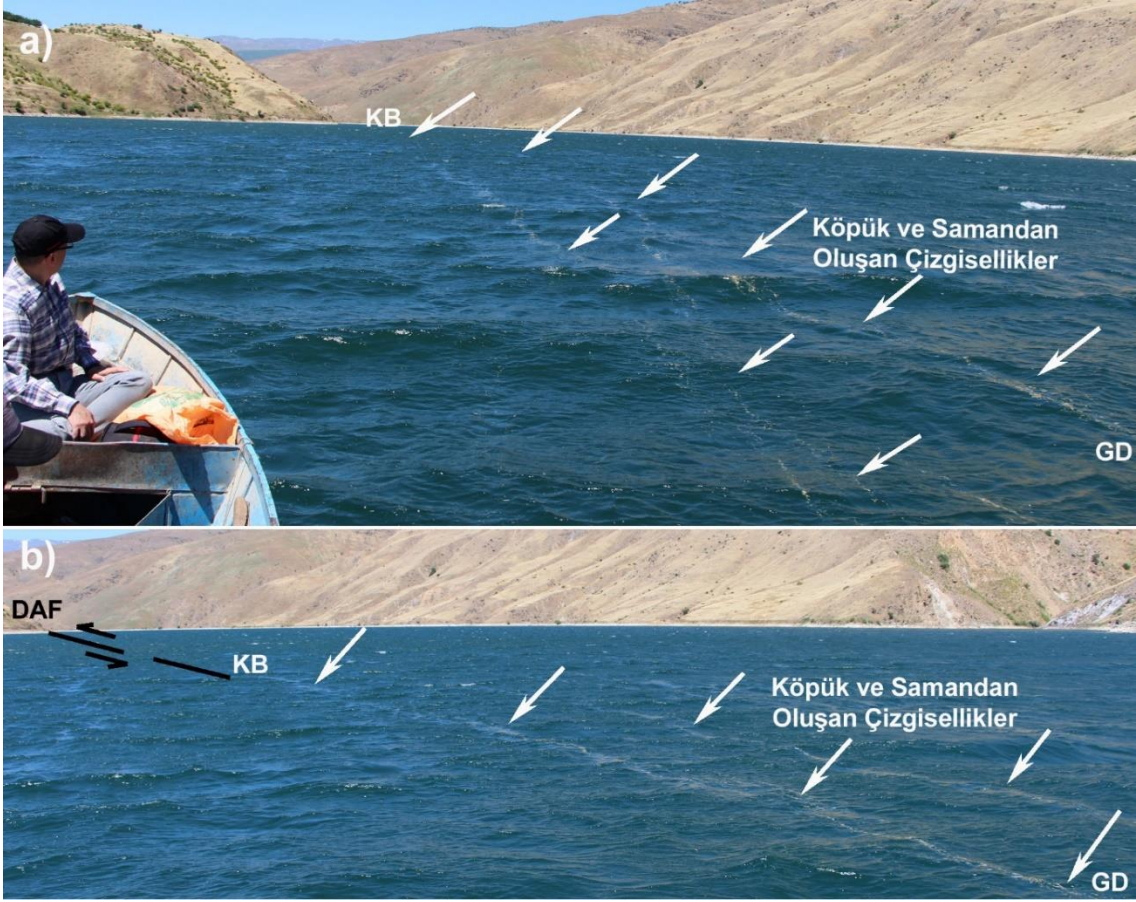
Saha gözlemlerinde tespit edilen bulguların doğruluğunu test etmek amacıyla, Fırat Vadisi'nin DAF tarafından ötelenen bölümünde, baraj gölü üzerinde, 29 Mayıs 2020 tarihinde deneyler yapılmıştır. Rüzgârın olmadığı sabah saatlerinde su üzerinde farklı lokasyonlara saman dökülmüştür. Bu madde hafif olduğu için su üzerinde uzun süre kalmakta ve ışığı yansıtmaktadır. Havanın sakin olduğu, dalganın olmadığı dönemde bırakılan malzemenin rastgele yayılım sergilediği görülmüştür (Şekil 6). Öğlene doğru başlayan hafif rüzgarla oluşan dalgalar, bırakılan malzemeyi sürükleyerek fay doğrultusunda beyaz çizgisel hatların oluşumunu sağlamıştır. Bu durum ikinci defa gözlem yapılan Kaşıklı mahallesi kuzeydoğusundaki Örücü mahallesi güneyinde çok net gözlenmiştir (Şekil 13).



Şekil 13. 29 Mayıs 2020 tarihinde Örücü Mahallesi güneyinde baraj gölü yüzeyinde havanın durgun, suyun dalgasız olduğu dönemdeki sakin yüzey görüntüsü (a). Aynı lokasyonda havanın rüzgarlı, suyun dalgalı olduğu dönemde dalga etkisiyle su yüzeyinde faylara paralel beyaz çizgisel hatlar oluşmuştur (b).

İlncak güneyinde su üzerine bırakılan samanlar ve dalga etkisiyle oluşan köpükler, DAF'ın su altında kalan bölümü üzerinde fayla çakışan bir durum sergilemiştir (Şekil 14). Oluşan çizgisel hatlar karadaki gibi birbirine paralel ve faya uyumlu bir gidiş göstermektedir. Belki de en önemli sonuç Kürçer vd. [4] tarafından kaydedilen ve gaz çıkışı olarak rapor edilen oluşumun görüldüğü yer ile deney sonucunda oluşan çizgiselliğin aynı hatta oluşmasıdır. Eski kayıtlar ile 29 Mayıs tarihinde deney sonucunda oluşan çizgiselliklerin aynı lokasyonda olması bu oluşumun, bu alana ait özel bir durum olduğunu göstermektedir.

Doğanyol çevresinde hâkim rüzgâr yönü güneybatıdır. Frekansın en yüksek olduğu bu yönden esen rüzgarlar Şiro ve Fırat vadisinde kanalize olarak kuzeydoğuya doğru esmektedir. Kuzeydoğudan ve güneyden esen rüzgarlar da yine aynı vadiye kanalize olarak güneybatıya doğru esmektedir. Bu sistemin ortaya çıkmasında da Fırat vadisinin DAF tarafından ötelenmesi etkilidir. Kısaca Fırat vadisinin DAF tarafından ötelenmesi, bu alanda KD-GB doğrultusunda derin bir vadi oluşturmuştur. Bu morfoloji nedeniyle hâkim rüzgâr yönü güneybatıdan kuzeydoğuya doğru gelişmiştir. Sonuçta Doğanyol kuzeyinde Karakaya Baraj Gölü üzerinde oluşan ve fayla çakışan beyaz çizgiselliklerin oluşmasında DAF'ın morfolojiyi şekillendirmesi etkili olmuştur.



Şekil 14. 29 Mayıs 2020 tarihinde Doğanyol kuzeyinde, İlıncak güneyinde baraj gölü üzerinde yapılan deney sonucunda İlıncak batısında su üzerinde oluşan ve DAF ile çakışan köpük ve saman birikiminden oluşan beyaz çizgisel hatlar (a, b).

4. Tartışma

Karada ve deniz tabanındaki gaz çıkışları genelde aktif faylar boyunca görülmekte olup aktif faylar gazın yukarı doğru çıkışında önemli rol oynamaktadır [13], [14], [15], [16], [32]. Aktif fay hatları boyunca, depremlerin olmadığı dönemlerde fay hatlarında yaygın olarak soğuk ve sıcak su çıkışları görülmektedir. Depremlerde sıvı madde ile birlikte kil, mil, ince kum ve diğer bazı maddelerle gaz çıkışları da yaşanabilmektedir. Ancak depremlerle birlikte çıkan sıvı maddenin fiziksel ve kimyasal yapısında ciddi değişiklikler ortaya çıkmaktadır.

Fay hatları boyunca gaz çıkışı konusu ile ilgili dünyada ve Türkiye’de önemli çalışmalar yapılarak sürecin gelişimi net olarak ortaya konulmuş durumdadır. Fay hatları boyunca gözlenen gaz çıkışları, genelde olumsuz göç süreçlerinden kaynaklanmakta olup yeraltı gaz basıncı gradyanları, gazın kaldırma kuvveti ve fayın kestiği kayaların geçirgenliği ile ilişkilidir. Bu ilişki aktif tektonikle belirlenmekte olup [33], [34], [35], depremlerle bağlantılı olarak gaz göçü ve yüzey gazı değişimlerinin önemli ölçüde artabileceği öne sürülmüştür [35], [36], [37]. Sonuç olarak, aktif fay hatları, depremlerle ilişkili olarak yüzeydeki gaz değişiminin gözlemlendiği ideal alanlar olarak kabul edilmektedir [38].

Türkiye’de de 1999 Marmara depreminden sonra özellikle Marmara Denizi üzerinde yapılan sismik çalışmalarda gaz çıkışları ile faylar arasındaki ilişki analiz edilerek önemli sonuçlara ulaşılmıştır [32], [35], [39], [40], [41]. Bu gözlemlerden ilki 1999 İzmit depreminde kırılan segment üzerinde, İzmit Körfezi gibi sığ su alanlarında yapılmıştır [39]. Bu araştırmadan sonra İzmit Körfezi’nde yapılan jeofizik araştırmaları sonucunda hazırlanan morfo-batimetri haritalarında gaz çıkışları ve gaz basıncını gösteren tortul yapılarındaki basınç sırtları belirlenmiştir. Yapılan analizlerde de deniz suyunun alt bölümünde metan gazı birikimi ile toplanan su örneklerinde CH₄, N₂ ve CO₂ konsantrasyonları ile anormal çözülmüş gaz içerikleri tespit edilmiştir [35].

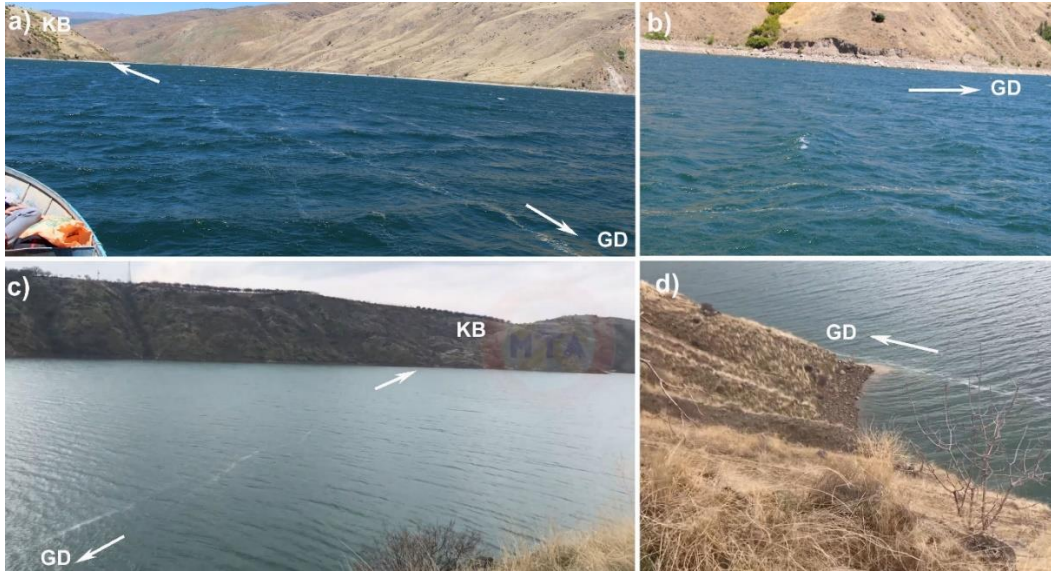
Aktif fay hatları boyunca depremlerden sonra gaz anomalilerine yönelik çalışmalarda fiziksel ve kimyasal bulguların ön planda olduğu görülmektedir. Fakat 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depreminde Karakaya Baraj Gölü

üzerinde görülen beyaz çizgiselliğin bunlardan farklı bir oluşum özelliği göstermektedir. Elde edilen bulgular ve literatüre göre 30 Ocak 2020 tarihinde su üzerinde gözlenen beyaz çizgiselliğin gaz çıkışı dışında morfoloji ve rüzgar ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Elde edilen deneysel veriler dışında beyaz çizgiselliğin gaz çıkışı olamayacağını 4 maddede özetlemek mümkündür.

- 1- Gaz çıkışının raporlandığı alanda Fırat vadisi derinliği 100 m'den fazla olan baraj gölü suları ile doldurulmuştur. Çıkan gazın yüzeyde çizgisel bir hat oluşturması için bu kalınlıktaki su kütlelerini çok hızlı geçmesi gerekmektedir. Gazların sıvı maddeler içerisindeki hareketi ve suyun derinliği düşünüldüğünde böyle bir çizgisel hattın oluşması mümkün görülmemektedir.
- 2- Yüksek gaz basıncı ile bu kalınlıktaki su kolonunun kesilerek gazın yüzeye çıktığı düşünüldüğünde su üzerinde farklı hareketlerin görülmesi beklenir. Çünkü bu oluşumun görüldüğü alan Fırat vadisinde derin bir boğaza karşılık gelmektedir. Su altı topografyasının farklı olduğu düşünüldüğünde gaz çıkışının sahile yakın alanlarda farklı duruş sergilemesi gereklidir. Çünkü 100 m'den fazla kalınlığa sahip su ile 1-3 m derinliğindeki su yüzeyindeki hareketin doğal olarak aynı olması beklenmez. Sığ su alanlarında gazın suyu adeta fukurdatarak çıkarması gereklidir. Fakat kaydedilen görüntüde beyaz çizgisellik sahilden açığa kadar hep aynı özellikte olup bu yönü ile tartışmalıdır.
- 3- 30 Ocak 2020 tarihinde oluşan çizgiselliğin gaz çıkışı olarak değerlendirilmesi halinde bu hattın çevresinde farklı alanlarda beyaz kabarcıkların görülmesi gereklidir. Halbuki raporlanan beyaz çizgisellik çok net ve çevresinde gaz çıkışını gösteren bir görüntü yoktur.
- 4- Bu tip özel gaz çıkışlarının oluşturacağı beyaz çizgisellikler deprem ve sonrasında sınırlı zaman dilimlerinde görülebilir. Ancak bu alanda farklı tarihlerde benzer oluşumun görülmesi bu oluşumun gaz çıkışı olmadığını göstermektedir.

5. Sonuçlar

Sivrice depreminden sonra Sivrice-Pütürge arasında DAFZ buyunca heyelan, kaya düşmesi, yanal yayılma gibi deformasyonlar meydana gelmiştir. Bu deformasyonların en önemlisini Sivrice-Çevrimtaş arasındaki heyelanlar oluşturmaktadır. Bu alandaki deformasyonlar ile kütle hareketlerinin yoğunluğu, Fırat Vadisi'nin batısından çok yüksektir. Yüzey deformasyonları dışında Pütürge Taşmış köyünde Çermik su kaynağındaki katı ve gaz çıkışı dikkat çekmektedir.



Şekil 15. 29 Mayıs 2020 tarihinde Ilıncak batısında baraj gölü (Eski Fırat vadisi) üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre oluşan beyaz çizgisellikler (a, b). 30 Ocak 2020 tarihinde Kürçer vd. [4] tarafından aynı lokasyonda görüntülenen ve gaz çıkışı olarak değerlendirilen beyaz çizgisellikler (c, d).

Depremim morfolojiye yansımaları dışında Doğanyol kuzeyinde Fırat Vadisi'nde farklı tarihlerde yapılan gözlem ve deneylerde baraj gölü üzerinde fayla çakışan beyaz çizgisellikler gözlemlenmiştir. Su yüzeyine bırakılan saman ile birlikte su üzerinde dalga etkisiyle oluşan beyaz köpüklerin birleşerek çizgisel hatlar

oluşturduğu görülmüştür. Birbirine paralel birden fazla beyaz hatlar halinde görülen çizgisellikler adeta fayın su altında kalan bölümü ile çakışarak gaz çıkışı izlenimi vermiştir. Fakat bu durum, bu alanda rüzgar hızının 10 m/sn'den fazla olduğu günlerde gözlenen rüzgar, dalga ve morfoloji etkisiyle oluşan özel bir oluşumdur. Bu çizgisel hatlar Kürçer vd. [4] tarafından gaz çıkışı olarak raporlanan çizgiselliklerin görüldüğü hat ile adeta çakışmaktadır (Şekil 15). Doğanyol meteoroloji istasyonu verilerine göre hâkim rüzgâr yönü güneybatıdır. Mevsimlik olarak hâkim rüzgâr yönü kış mevsiminde kuzeydoğudan esmektedir. Her iki yönde de esen rüzgarlar Doğanyol kuzeyinde baraj gölü üzerinde köpüklerden oluşan beyaz çizgisel hatların oluşumunu sağlamaktadır.

Şekil 15(a) ile gösterilen alan ile Kürçer vd. [4] tarafından çizgiselliklerin kaydedildiği alan birebir örtüşmektedir. Video kayıtlarında (d) bu çizgiselliğin su üzerindeki köpük birikimi olduğu, görüntünün 3. dakikasında çok belirgin olarak görülmektedir. Sonuç olarak deprem sonrasında fayların su altında kalan bölümleri üzerindeki bu tip oluşumların sismik, sedimentolojik, jeomorfolojik ve klimatolojik verilerin analizi ile açıklanması gerekmektedir.

Teşekkür

Makalenin olgunlaşması için katkı sunan Editör Kurulu ve Hakemlere teşekkür ederiz. Bu çalışmada Murat Sunkar: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Arazi gözlemleri, Deneyler, Orijinal taslak yazma ve hakem önerilerine göre değerlendirme ve düzenlemeleri yapmıştır. Vedat Avcı: Arazi çalışmaları ve deneylerin yapımına katılmış, taslak metin hazırlamış, harita ve şekilleri hazırlayıp düzenlemiştir. Cevdet Canpolat: Arazi çalışmalarına ve deneylerin yapımına katılmış, taslak metin hazırlamış ve fotoğraf düzenlemelerini yapmıştır.

Kaynaklar

- [1] Emre Ö. Duman T. Y, Elmacı H, Özalp S, Olgun Ş. 1:250.000 ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası serisi No: 42 2012, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye
- [2] Duman T. Y, Emre Ö, Özalp S, Elmacı H, Olgun Ş. 1:250.000 ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası serisi No: 45 2012, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye
- [3] Emre Ö, Duman TY, Özalp S, Elmacı H, Olgun Ş. Şaroğlu, F. Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası. Ölçek 1:1.250.000, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, 2013, Ankara-Türkiye. ISBN: 978-605-5310-56-1
- [4] Kürçer, A., Elmacı, H., Yıldırım, N. Özalp, S. 24 Ocak 2020 Sivrice (Elazığ) Depremi (Mw=6,8) Saha Gözlemleri ve Değerlendirme Raporu, 2020, https://www.mta.gov.tr/images/duyuru_ek/belgeler/609_07-02-2020_2b82a14b.pdf Son erişim (26.06.2020)
- [5] Tatar O, Sözbilir H, Bozkurt E, Aksoy E, Koçbulut F, Özmen B, Alan H, Metin Y. 24 Ocak 2020 Sivrice (Elazığ)-Doğanyol (Malatya) Depremi: Arazi Gözlemleri ve Değerlendirmesi, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları 2020a, No: 145
- [6] Tatar O, Sözbilir H, Koçbulut F, Bozkurt E, Aksoy E, Eski S, Özmen B, Alan H, Metin Y. Surface deformations of 24 January 2020 Sivrice (Elazığ)-Doğanyol (Malatya) earthquake (Mw= 6.8) along the Pütürge segment of the East Anatolian Fault Zone and its comparison with Turkey's 100-year-surface ruptures. *Mediterranean Geoscience Reviews*, 2020b, 2, 385-410.
- [7] Sayın E, Yön B, Onat O, Gör M, Öncü M. E. Tunç E. T. Bakır D. Karaton M, Calayır, Y. 24 January 2020 Sivrice-Elazığ, Turkey earthquake: geotechnical evaluation and performance of structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2021, 19, 657-684.
- [8] Akbayram K, Kıranşan K, Özer Ç, Varolüneş S. The surface deformation of the 2020 Doğanyol-Sivrice earthquake (Mw 6.8) and the earlier events suggest Mw< 7.0 earthquakes do not create significant surface slip along the East Anatolian Fault Zone. 2021. <https://doi.org/10.31223/X5QP5Q>
- [9] Köküm M. Landslides and lateral spreading triggered by the 24 January 2020 Sivrice earthquake (East Anatolian Fault). *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 2021, 11(3), 751-760.
- [10] Karakaş G, Nefeslioğlu H. A, Kocaman S, Büyükdemircioğlu M, Yürür T, Gökçeoğlu C. Derivation of earthquake-induced landslide distribution using aerial photogrammetry: the January 24, 2020, Elazığ (Turkey) earthquake. *Landslides* 2021, 18, 2193-2209.
- [11] Karakaş G, Kocaman S, Gökçeoğlu C. Comprehensive performance assessment of landslide susceptibility mapping with MLP and random forest: a case study after Elazığ earthquake (24 Jan 2020, Mw 6.8), Turkey. *Environmental Earth Sciences* 2022, 81, 144.
- [12] Cakır Z, Doğan U, Akoğlu A M, Ergintav S, Özarpacı S, Özdemir A, Nozadkhalil T, Çakır N, Zabcı C, Erkoç M H, Basmenji M, Köküm M, Bilham, R. Arrest of the Mw 6.8 January 24, 2020 Elazığ (Turkey) earthquake by shallow fault creep. *Earth and Planetary Science Letters* 2023, 608, 118085.
- [13] Lepichon X, Henry P. Erosion and accretion along subduction zones - a model of evolution. *Proc. K. Ned. Akad. Wetensc* 1992, 95 (3), 297-310.

- [14] Sahling H, Masson D G, Ranero C R, Huhnerbach V, Weinrebe W, Klauke I, Bürk D, Brückmann W, Suess E. Fluid seepage at the continental margin offshore Costa Rica and southern Nicaragua. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 2008, 9(5), 1-22.
- [15] Ranero C.R, Grevemeyer I, Sahling H, Barckhausen U, Hensen C, Wallmann K, Weinrebe W, Vannucchi P, von Huene R, McIntosh K. Hydrogeological system of erosional convergent margins and its influence on tectonics and interplate seismogenesis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2008, 9 (3), 1-18.
- [16] Henry P, Lallemand S, Nakamura Ko-ichi, Tsunogai U, Mazzotti S, Kobayashi K. Surface expression of fluid venting at the toe of the Nankai wedge and implications for flow paths. *Marine Geology*. 2002, 187 (1-2), 119-143.
- [17] Arpat E, Şaroğlu F. Doğu Anadolu Fayı ile İlgili Bazı Gözlemler ve Düşünceler. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 1972, 78, 44-50.
- [18] Şengör A M C, Görür N, Şaroğlu F. Strike slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape; Turkey as a case study, *The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM), Strike-Slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation* 1985, 37, 227-264
- [19] Aksoy E, İnceöz M, Koçyiğit A. Lake Hazar basin: A negative flower structure on the East Anatolian Fault System (EAFS), SE Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences* 2007, 16(3), 319-338.
- [20] Barka A. A, Kadinsky-Cade K. Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics*, 1988, 7(3), 663-684.
- [21] Şaroğlu F, Emre Ö, Kuşçu İ. The East Anatolian Fault Zone of Turkey. *Annales Tectonicae* 1992, 6, 99-125.
- [22] Duman T Y, Emre Ö. The East Anatolian Fault: geometry, segmentation and jog characteristics. *Geological Society, London, Special Publications* 2013, 372(1), 495-529.
- [23] Hecce E. Doğu Anadolu Fayı (DAF) Atlası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi, 13. 359 Sayfa. Ankara, 2008.
- [24] Özdemir M A. Örmeli Çayı Havzasının (Pütürge-Malatya) Genel ve Uygulamalı Jeomorfolojisi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Elazığ, 1994.
- [25] Özdemir M A. Doğu Anadolu Fay Zonu'nun Sincik (Adıyaman) ile Hazar Gölü (Elazığ) Arasındaki Jeomorfolojik Özellikleri Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi 1996, 8(1), 191-217.
- [26] Özdemir M A, Tonbul S. Kömürhan Boğazı (Malatya-Elazığ), Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi 1996, 8(1), 239-262
- [27] Özdemir M A, İnceöz M. Doğu Anadolu Fay Zonunda (Karlhova-Türkoğlu Arasında) Akarsu Ötelenmelerinin Tektonik Verilerle Karşılaştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi 2003, 5(1), 89-114.
- [28] AFAD, 24 Ocak 2020 Sivrice (Elazığ) Mw 6.8 Depremine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu 2020, T.C. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara
- [29] KANDİLLİ B.Ü. KRDAE Bölgesel Deprem-Tsunami İzlem ve Değerlendirme Merkezi, Basın Bülteni, 24 Ocak Sivrice-Elazığ Depremi 2020, <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/24-ocak-sivrice-elazig-depremi-2/> (26.06.2020)
- [30] MGM (Meteoroloji 13. Bölge Müdürlüğü). Doğanşehir ve Pütürge Meteoroloji İstasyonu, Meteorolojik Verileri. 2020.
- [31] Harita Genel Müdürlüğü, 1/25.000 ölçekli Malatya L41 b3 paftası (1958) ve Elazığ L42 a4 (1953) paftası
- [32] Grall C, Henry P, Dupré S, Géli L, Scalabrin C, Zitter T. A, Şengör A. M.C, Çağatay M. N, Cifci G. Upward migration of gas in an active tectonic basin: An example from the sea of Marmara. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2018, 153, 17-35.
- [33] Macgregor D. S. Relationships between seepage, tectonics and subsurface petroleum reserves. *Marine and Petroleum Geology*, 1993, 10(6), 606-619.
- [34] Etiope G, Martinelli G. Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. *Physics of the earth and planetary interiors*, 2002, 129(3-4), 185-204.
- [35] Gasperini L, Polonia A, Del Bianco F, Etiope G, Marinaro G, Favali P, Italiano F, Çağatay M. N. Gas seepage and seismogenic structures along the North Anatolian Fault in the eastern Sea of Marmara. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2012, 13(10), 1-19.
- [36] Cicerone R. D, Ebel J. E, Britton J. A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 2009, 476(3-4), 371-396.
- [37] Heinicke J, Italiano F, Koch U, Martinelli G, Telesca L. Anomalous fluid emission of a deep borehole in a seismically active area of Northern Apennines (Italy). *Applied Geochemistry*, 2010, 25(4), 555-571.
- [38] Yang T. F, David R Hilton, Italiano F, Heinicke J. Applications of fluid and gas geochemistry for geohazards investigation, *Applied Geochemistry*, 2010, 25, 503-504, doi:10.1016/j.apgeochem.2010.01.007.
- [39] Kuşçu İ, Okamura M, Matsuoka H, Gökaşan E, Awata Y, Tur H, Şimşek M, Keçer M. Seafloor gas seeps and sediment failures triggered by the August 17, 1999 earthquake in the eastern part of the Gulf of İzmit, Sea of Marmara, NW Turkey. *Marine Geology*, 2005, 215(3-4), 193-214.
- [40] Bourry C, Chazallon B, Charlou J.L, Donval J.P, Ruffine L, Henry P, Geli L, Çağatay M.N, Inan S, Moreau M, Free gas and gas hydrates from the Sea of Marmara, Turkey Chemical and structural characterization. *Chemical Geology*. 2009, 264 (1-4), 197-206.
- [41] Dupre S, Scalabrin C, Grall C, Augustin J.M, Henry P, Sengor A M C, Görür N, Çağatay M.N, Geli L. Tectonic and sedimentary controls on widespread gas emissions in the Sea of Marmara: results from systematic, shipborne multibeam echo sounder water column imaging. *J. Geophys Res-Solid Earth* 2015, 120 (5), 2891-2912.
- [42] [URL-1] <https://www.mta.gov.tr/v3.0/mta/ilan/609> Son erişim 24.06.2020

Ofislerde LED Tüp Retrofit Uygulamalarının Tekno-Ekonomik Analizi

Bilal CANOL¹, Alpaslan DEMİRCİ^{2*}, Ramazan AYAZ³

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye

²Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Elektronik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

³Temiz Enerji Teknolojileri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

¹bilal.canol@kocaeli.edu.tr, ^{2*}ademirci@yildiz.edu.tr, ³ayaz@yildiz.edu.tr

(Geliş/Received: 13/06/2023;

Kabul/Accepted: 23/08/2023)

Öz: Aydınlatma sektöründe enerji verimliliğini arttırmak için konvansiyonel aydınlatma aygıtlarının yerine yüksek enerji verimliliğine sahip LED aydınlatma ürünleri tercih edilmektedir. Bu çalışmada, ofislerde kullanılan 4x18W T8 armatürlerdeki floresan lambalarının yerine, farklı tiplerdeki T8 LED tüpler uygulanarak, retrofit işlemleri hem aydınlatma tasarımı hem de ekonomik açıdan incelenerek fayda-maliyet analizleri yapılmıştır. Gerçek bir ofis ortamı DIALux EVO aydınlatma tasarım programında modellenmiş olup; düşük, orta ve yüksek verimli olmak üzere toplam üç farklı T8 LED tüp modelinin minimum aydınlık düzeyi, ortalama aydınlık düzeyi, düzgünlük faktörü ve kamaşma performansları incelenmiştir. Ekonomik açıdan ise farklı verime sahip LED tüplerin retrofit uygulamalarındaki yatırım ve işletme maliyetleri, enerji tasarrufu ve geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. Sonuç olarak; TS EN 12464-1:2021-09 standardına göre minimum aydınlatma kriterlerini orta ve yüksek verimli LED tüplerin sağladığı görülmüştür. Diğer taraftan düşük etkinlik faktörüne sahip LED tüplerin istenilen aydınlatma performansını sağlamadığı belirlenmiştir. Ayrıca yüksek verimli LED tüpler konvansiyonel floresan lambalara ve düşük verimli LED tüplere göre sırasıyla %57 ve %24 daha az enerji tüketimi sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Aydınlatma verimliliği, enerji tasarrufu, fayda-maliyet analizi, geri ödeme süresi, LED tüp lambalar.

Techno-Economic Analysis of LED Tube Retrofit Applications in Offices

Abstract: In the lighting sector, high energy-efficient LED lighting products are preferred instead of conventional lighting devices to increase energy efficiency. In this study, benefit-cost analyses were conducted by examining retrofit operations both in terms of lighting design and economically by applying different types of T8 LED tubes instead of fluorescent lamps in 4x18W T8 fixtures used in offices. A real office environment was modeled in the DIALux EVO lighting design program, and a total of three different T8 LED tube models with low, medium, and high efficiency were studied in terms of minimum luminance level, average luminance level, uniformity factor, and glare performance. Economically, investment and operating costs, energy savings, and payback periods in retrofit applications of LED tubes with different efficiencies were calculated. As a result, it was observed that medium and high-efficiency LED tubes provided the minimum lighting criteria according to the TS EN 12464-1:2021-09 standard. On the other hand, it was determined that LED tubes with low efficacy factor did not provide the desired lighting performance. Furthermore, high-efficiency LED tubes provided respectively 57% and 24% less energy consumption compared to conventional fluorescent lamps and low-efficiency LED tubes.

Keywords: Cost-benefit analysis, energy saving, lighting efficiency, LED tube lamps, payback period.

1. Giriş

Elektrik enerjisi tüketimi gün geçtikçe hızlı bir artış göstermekle birlikte bunun yanı sıra insanoğlunun yaşamını tehdit edebilecek boyutlarda karbon emisyonu değerlerini de arttırmaktadır. Dünyadaki toplam net elektrik enerjisi tüketiminin ABD Enerji Bilgi İdaresi verilerine göre 2021 yılında 25343 TWh/yıl'dır [1]. Aydınlatma ihtiyacı için kullanılan elektrik enerjisi ise Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 2021 yılı verilerine göre dünya çapında %28,4'ü konut, %71,6'sı ticari alanda olmak üzere toplam 1805 TWh/yıl'dır [2]. Ayrıca IEA'ya göre dünya çapındaki aydınlatma enerjisi tüketiminin 2030 yılında, 2021 yılına göre azalarak, 1626 TWh/yıl olması tahmin edilmektedir [2]. Küresel boyutta aydınlatma için kullanılan elektrik enerjisi tüketiminin toplam enerji tüketimindeki payı incelendiğinde %7,12 ile büyük bir yer kapladığı görülmektedir. Aydınlatma sektörünün enerji tüketimindeki payının düşürülmesine yönelik olarak enerji verimliliği yüksek olan aydınlatma ürünlerinin tercih edilmesi gerektiği görülmektedir. Daha düşük enerji tüketimi sayesinde sera gazı emisyonlarının azaltılması açısından insanoğlunun yaşam döngüsüne fayda sağlamaktadır [3]. Geçmiş dönemlerde akkor flamanlı lambaların

* Sorumlu yazar: ademirci@yildiz.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹0000-0001-5618-9787, ²0000-0002-1038-7224, ³0000-0002-6201-1181.

floresan lambalara geçişi önerilirken [4]; son 10-15 sene içerisinde ise floresan lambaların yerini, fiyatlarının ucuzlaması ve teknolojisindeki gelişmelerden dolayı çoğunlukla LED ürünlerin tercih edildiği bilinmektedir. LED maliyetlerinin azalması, verimliliklerinin artması ve güvenilir yapılarıyla birlikte pazar payını kayda değer miktarda arttırarak günümüzde ana ışık kaynağı olarak geçmiş teknolojilerin yerini devralmaktadır [5, 6].

Aydınlatma sektöründe; LED ürünleri hem kapalı mekânda hem de sokak ve yol aydınlatmasında tercih edilmekte olup, mevcut bulunan konvansiyonel tiplerdekilerle değiştirilmesi tavsiye edilmektedir. LED'lerin tercih edilmesinin sebebi her geçen gün artan ışıksal verimlilikleri, farklı renk sıcaklıklarının tercih edilebilmesi ile renksel geriverim indeksinin (CRI) yüksek olması, artan görsel konfor, uzun ömrü, floresan lambalara göre cıva içermediğinden daha güvenli işletim sunması, daha düşük titremeye (flicker) sahip olması, kontrol edilebilirliği yönünden avantajları, aydınlatma sistemlerinin işletme maliyetlerini düşürmesi ve daha büyük sürdürülebilirlik sağlamasıdır. Floresan lambalar; herhangi bir kompanzasyon işleminin olmadığı manyetik balast ile kullanıldığı durumda güç faktörü 0,50 – 0,60 seviyelerinde iken, LED lambalar ve elektronik balast ile floresan lambaların kullanıldığı durumda ise 0,90 – 0,99 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Bu durum LED'leri avantajlı duruma koyarken diğer yandan lineer olmayan karakteristikleri nedeniyle LED sürücülerin yüksek derecede harmonik akımlar üretmesi, LED'lerin diğer ürünlere göre negatif taraflarından birisidir [7]. Bu harmonik akımlar, herhangi bir filtre işlemi yapılmadığı durumlarda elektrik güç sisteminde dolaşmakta ve güç sisteminin enerji kalitesini de düşürmektedir. Fakat LED'lerin genellikle ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasından kaynaklı olarak geri ödeme süresinin de fazla olması, LED'lerin ekonomik açıdan tercih edilmesinde dikkat edilmesi gereken bir konudur [8]. Mevcutta kullanılmakta olan aydınlatma ürün veya sistemlerinin verimli olanlarla değiştirilmesi işlemi retrofit olarak adlandırılmaktadır. Retrofit işlemleri; yönetmelikler ve yönergelere, ürünü kullanacak kişinin beklentilerine, bina özelliklerinden başlayarak insan faktörü gibi farklı tipteki etkenlere bağlı olabilmektedir [9]. Ofislerde genellikle 4x18 W T8 tip floresan lambalar kullanılmakta olduğundan dolayı üreticiler enerji tüketiminde ani bir düşüş sağlamak için floresan lambaların T8 LED tüp lambalarla değişimini önermektedirler [10, 11]. Aydınlatma ürünlerinin retrofit işlemlerinde güç tüketimini düşürmesinin yanı sıra yeni durum için de aydınlatma tasarımının yapılarak minimum aydınlatma kriterlerini ve diğer kullanıcılardan istenen özellikleri de sağlayacak şekilde ürün tercihinin yapılması gerekmektedir [12].

Floresan lambaların LED lambalara geçişini teknik ve ekonomik olarak inceleyen birçok çalışma yapılmıştır. Uken ve diğerleri [13], floresan lambaların LED tüplerle değiştirilmesinin armatürü değiştirme zorunluluğunu ortadan kaldırdığı için cazip hale geldiğine dikkat çekmiş ve 2 farklı çalışma için LED tüp retrofit işlemi uygulamıştır. Yol aydınlatmasıyla ilgili yapılan bir çalışmada ise yüksek basınçlı sodyum buharlı lambaların yerine LED ile aydınlatma yapılmasının renksel görünüm ile CRI'nın kayda değer ölçüde iyileşme gösterdiği ve bu retrofit işlemi sonucunda oluşan enerji tasarrufunun %80'nin üzerinde olabileceği belirtilmiştir [14]. Türkiye'de M1 ve M2 sınıfı yol aydınlatmasıyla ilgili olarak yapılan başka bir çalışmada ise M1 aydınlatma sınıfı için yüksek basınçlı sodyum lambalar yerine LED aydınlatma tercihinde toplam maliyetin yüksek basınçlı sodyum lambalardan yaklaşık %11,5 daha az olduğunu göstermiştir [15]. LED tüp ve lambalar ile retrofit işleminin yapılması halinde %44 oranında enerji tasarrufu elde edileceğini ve yatırımın geri ödeme süresinin 4 yıl olacağına dikkat çekmişlerdir [16]. LED tüp ile yapılan retrofit işlemlerinde güç tüketiminin azaltılmasıyla ilişkili tasarruflardan dolayı önermekte olup; aydınlık düzeyi ve ışık kalitesi gibi faktörlere de dikkat edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir [17]. Ayrıca, 6 saatten az işletme süresine sahip yapılarda yapılan LED retrofit işlemlerinde önemli bir ekonomik gelir sağlanmayacağına dikkat çekmişlerdir. Diğer bir çalışmada idari binalarda LED tüp retrofit performansı incelenmiş ve floresan lambalardaki aydınlık düzeyinden %33,84 daha fazla verimli olduğu ve ekonomik olarak uygulanabilirliği tespit edilmiştir [18]. Brezilya'da Juazeiro do Norte şehrindeki bir mağaza uygulaması için T5 ve T8 floresan lambaların LED tüplerle 3 farklı durum için retrofit işlemini uygulanmış ve 3,5 ay gibi kısa bir geri ödeme süresi belirlenmiştir [19]. ABD'nin Washington eyaletindeki Chelan ilçesinde 3693 adet yüksek basınçlı sodyum buharlı sokak lambalarının yerine LED lambalar ile retrofit işlemi yapılan bir çalışmada gökyüzünün gece parlaklığındaki değişiklik incelenmiş ve gökyüzü parlaklığında herhangi bir artış tespit etmemişlerdir [20]. İstanbul Şemsi Ahmet Paşa Camii'nde yapılan başka bir çalışmada ise akkor telli lambalar yerine LED tercih edilmiş olup ciddi enerji tasarrufları elde edilmiş ve camiinin içindeki tüm bölümlerde aydınlık düzeyi değerleri arttırılmış ancak bunun yanı sıra birleşik kamaşma endeksi (UGR) değerinde de artış gözlemlenmiştir [21].

Bu çalışmada, ofis ortamlarında sıklıkla kullanılan 60x60 cm boyutlarında 4x18W floresan armatürlerinin yerine, T8 tipi 4x9 W'lık LED tüplerin kullanılması, bununla birlikte bu LED tüplerin balast ve sürücü yapısının değişiklik gösterip – göstermediği ayrı ayrı senaryolar için ofis ortamının aydınlatma kriterleri açısından ve ekonomik açıdan detaylıca analiz edilmiştir. Ofis ortamı için aydınlatma tasarımı DIALux EVO 11.0 ortamında yapılarak minimum aydınlık düzeyi ve kamaşma gibi aydınlatma kriterleri için uygun olan LED tüpler seçilmiştir. Literatürde LED aydınlatmanın farklı çeşitleriyle retrofit işlemleriyle ilgili olarak birçok çalışma yapılmıştır.

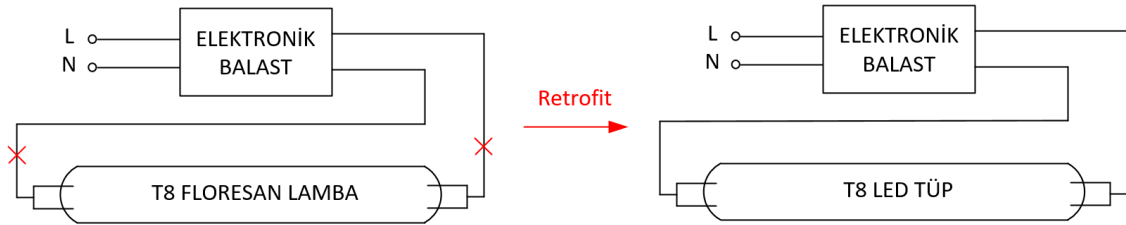
Ancak T8 LED tüpler hem aydınlatma tasarımı hem de ekonomik açıdan ilk defa bu çalışmada ele alınmıştır. Ayrıca bu çalışmada floresan lambaların LED tüp lambalarla yapılan retrofit işlemlerinde, balastın hurda değerinin yatırım maliyetinden düşülmesiyle balastsız kullanımı gibi farklı senaryolarda ekonomik analizler ilk defa bu çalışmada dikkate alınmıştır. Makalenin geri kalan kısmında; 2. bölüm olan LED tüp teknolojisi ve senaryolar kısmında retrofit işleminde kullanılabilecek olan tüm LED tüp lamba tipleri detaylıca incelenmiştir. Hemen ardından, geleneksel T8 floresan lambaların yerine gelebilecek farklı LED tüp modelleri seçilerek retrofit işlemleri senaryo tabanlı olarak açıklanmış ve LED tüp seçiminin nasıl yapıldığına ilişkin kullanılan akış diyagramı detaylıca anlatılmıştır. 3. bölümde belirlenen senaryolarda kullanılan lambalar için aydınlatma tasarımları yapılmıştır. 4. bölümde ise oluşturulan senaryoların ekonomik analizleri yapılmış ve yatırım yapılabilirliği ortaya konulmuştur. 5. bölüm olan Sonuç kısmında ise öne sürülen retrofit işlemlerini içeren tüm senaryolar hem aydınlatma kriteri hem de ekonomik analiz açısından birlikte tartışılmıştır.

2. LED Tüp Teknolojisi ve Senaryolar

İç aydınlatmada, özellikle konutlarda sıklıkla kullanılan E27 ve E14 tipi LED lambalar ile yapılan retrofit işlemleri için elektrik bağlantısında herhangi bir değişiklik yapılmamaktadır. Ancak bu durum LED tüplerle yapılan retrofit işlemleriyle karıştırılmamalıdır. LED üretici firmaları eski floresan lambaların balastıyla uyumlu olan veya eski balastın devre dışı bırakılmasıyla dahili LED sürücüsünün kullanılmasına imkân veren çeşitli ihtiyaca uygun LED ürünleri üretmektedirler [22]. LED tüp lambalar balast ile uyumluluklarına bağlı olarak toplamda dört farklı çeşide sahiptirler ve aşağıda detaylıca açıklanmıştır:

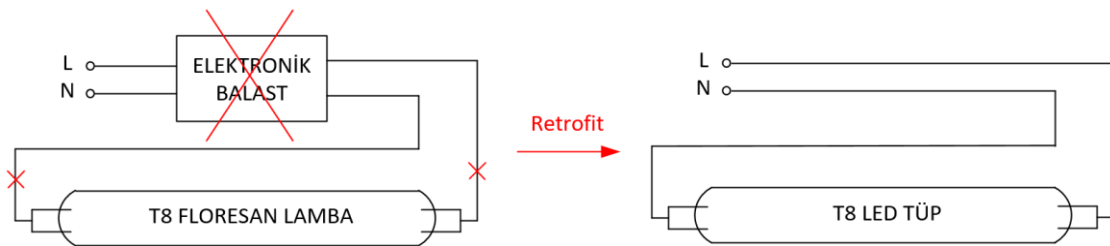
2.1. Balast ile uyumlu LED tüp

Balast ile uyumlu sadece LED tüpün değiştirilmesiyle kullanılabilen lamba çeşididir. LED tüp içerisinde balast ile uyumlu dahili bir sürücüye sahiptir ve mevcut bulunan elektronik veya manyetik balast, alınan LED tüp üretici firmanın katalogundaki balast çeşidiyle uyumlu olması koşuluyla kullanılabilir [23]. Diğer tiplere göre kurulumu çok kolaydır. Ancak ilgili balastın retrofit işlemi sonrasında da kullanılıyor olması, 2. tip LED tüplere göre hem güç tüketimini arttırmakta hem de balast arızası durumunda tekrar bağlantı yapılmasını gerektirmektedir. Şekil 1’de balast uyumlu LED tüplerin retrofit işlemlerine yönelik elektrik bağlantılarına ait devre şemaları verilmiştir. LED tüp üretici firmaları, ürünlerinin hangi balastlarla uyumlu oldukları ve devre şemalarını ilgili ürünlerinin veri sayfasında paylaşmaktadır.



Şekil 1. Balast uyumlu LED tüplerin elektrik bağlantısı.

2.2. Balast by-pass LED tüp

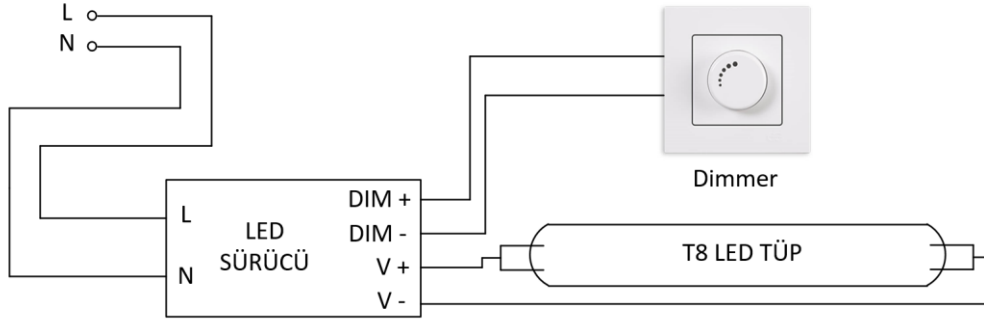


Şekil 2. Balastın devre dışı edilerek kullanıldığı LED tüplerin elektrik bağlantısı.

Balastın devre dışı edildiği LED tüp çeşididir. LED tüp içerisinde balast kullanımına imkân vermeyen dahili sürücüye sahiptir ve bu sebeple balast kullanılmaz [23]. 1. tip LED tüplere göre daha düşük bakım masraflarına ve daha yüksek verimliliğe sahiptirler. Single-ended tipi elektrik bağlantısına sahip olan LED tüplerin AC Giriş kısımlarına oldukça dikkat edilmelidir. Double-ended tipi yapıya sahip bir T8 LED tüp bağlantısı Şekil 2’de verilmiştir. Elektrik bağlantısı 1.tip’e göre son kullanıcı açısından daha zor gözükmemektedir ve devre dışı bırakılan balast hurda değeri olarak düşünülebilmektedir.

2.3. Harici sürüclü LED tüp

Balastın devre dışı edildiği ve harici LED sürücünün armatüre yerleştirildiği LED tüp çeşididir. LED tüp içerisinde dahili bir sürücü bulunmamaktadır. Harici sürücü, balast ile birlikte kullanımına uygun değildir [24]. Şekil 3’te 3. tip harici sürüclü LED tüpe ait bağlantı şeması verilmiştir. 1. ve 2. tip LED tüpler ile karşılaştırıldığında, direnç, DC gerilim veya darbe genişlik modülasyonu yapılarıyla dimmer yeteneği olan, nesnelere interneti konseptine uyumlu olabilen, en uzun ömürlü ve verimliliğe sahip olan LED tüp çeşididir. Ancak ilk yatırım maliyetinin diğer LED tüplere kıyasla daha yüksek olması ve son kullanıcı açısından en zor bağlantı yapısına sahip olmasından dolayı diğer LED tüp tiplerine göre daha az tercih edilmektedirler.



Şekil 3. Harici sürüclü dimmerlenebilir LED tüp için elektrik bağlantısı.

2.4. Hibrit LED tüp

Hem balast ile uyumlu olarak hem de balastın devre dışı edilmesi halinde de çalışabilen LED tüp çeşididir. Bu bakımdan 1. tip ile 2. tipi kapsamaktadır. 1. tipte olduğu gibi mevcut balastın kullanılması durumunda sadece T8 LED tüp modelinin uyumlu olduğu balast modelleri ile kullanılabilir ve bu uyumlu modeller üretici firma tarafından paylaşılmaktadır. Bu LED tüp tipi tak-çalıştır olarak pazarlanmaktadır. Böylece kurulum sorunları ortadan kalkmakla birlikte kullanıcı açısından daha fazla güvenilirlik ve esneklik sağlamaktadır.

Retrofit işlemleri için gerçekleştirilmesi düşünülen senaryolar aşağıda açıklanmıştır:

Referans Senaryo (T8 Floresan Lamba Kullanımı): Ofis ortamında mevcut olarak halihazırda bulunan 60x60 cm ebatlarında 4x18 W T8 tipi floresan armatürlerin işletilmesi söz konusudur. Armatürde herhangi bir tadilat yapılmadan sadece floresan lamba ve/veya elektronik elemanların LED tüp veya LED sürücü ile değiştirilmesi düşünülmektedir. Bu mevcut durum, iyileştirilmesi için düşünülen retrofit işlemleriyle karşılaştırılacaktır.

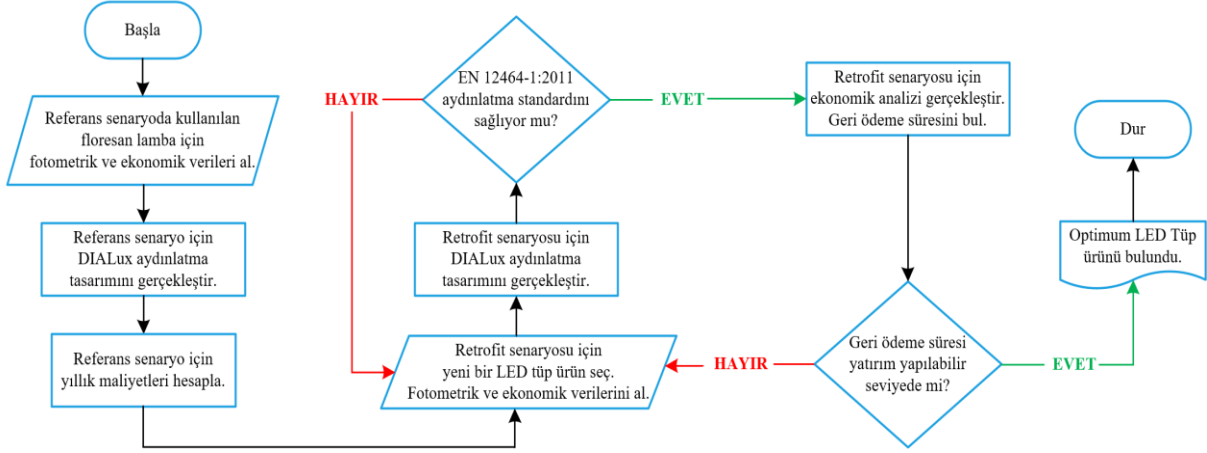
Senaryo 1 (Düşük Verimli T8 LED Tüp Kullanımı): Senaryo 1 için 2. tip balast by-pass LED tüp seçilmiştir. Bu LED tüp piyasada bulunan diğer LED tüplere göre etkinlik faktörü daha düşük olmasına rağmen daha ucuz olduğundan kullanıcı açısından tercih edilebilirliği yüksektir. Balastsız olarak çalıştığı için balast hurda değeri olarak yatırım maliyetinden düşülmüştür.

Senaryo 2 (Orta Verimli T8 LED Tüp Kullanımı): Senaryo 2 için 4. tip olan hibrit LED tüp seçilmiştir. Bu LED tüp hem elektronik balastlı hem de doğrudan şebekeye bağlanabilir şekilde kullanılabilir. Senaryo 1’de bahsedilen LED tüpten daha yüksek etkinlik faktörüne sahiptir. Diğer yandan harici elektronik balastlarla da çalışmaya uyumlu üretilmeleri nedeniyle maliyetleri diğer led tüp teknolojilerine göre yüksek olabilmektedir. Bu senaryoda da orta verimli LED tüp balastsız olarak çalıştırılmış olup; elektronik balast, hurda değeri olarak yatırım maliyetinden düşülmüştür.

Senaryo 3 (Yüksek Verimli T8 LED Tüp Kullanımı): Senaryo 3 için 2. tip balast by-pass LED tüp kullanılmıştır. Senaryo 1 ve 2’de kullanılan LED tüplere göre daha yüksek etkinlik faktörü değerine sahiptir.

Lamba fiyatı ise senaryo 1'den pahalı olmasına karşılık senaryo 2'den ucuzdur. Bu senaryoda da elektronik balast, led tüp retrofit işleminde hurda değeri olarak düşünülmüştür.

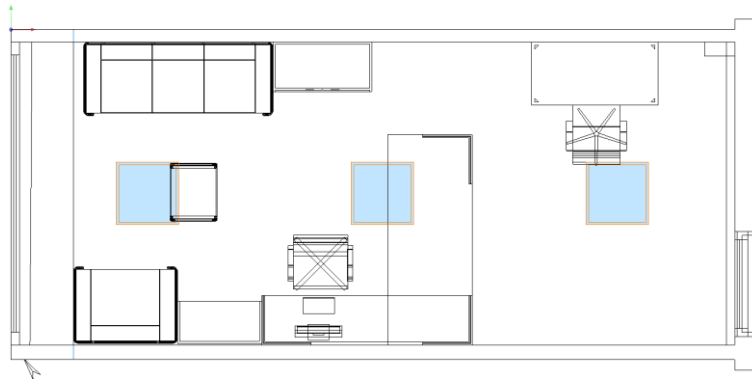
Bu çalışmada kullanılan metodoloji şu şekildedir: İlk olarak ofis odasında mevcut bulunan geleneksel floresan lambaların fotometrik ve ekonomik verileri kullanılarak sırasıyla aydınlatma ve ekonomik hesaplamaları yapılır. İlgili işlemler sonrasında retrofit işlemi için düşünülen uygun bir LED tüp ürünü seçilir. Seçilen LED tüp ürünün öncelikle aydınlatma tasarımı daha sonra geri ödeme süreleri hesaplanarak yatırım yapılabilirliği ölçülür. Hem aydınlatma hem de ekonomik kriterleri sağlayan optimum LED tüp ürünü, retrofit işlemi için uygun bir seçim olduğu anlaşılır. Retrofit işlemi için LED tüp seçiminde kullanılan akış diyagramı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. LED tüp ürün seçiminde kullanılan akış diyagramı.

3. Aydınlatma Tasarımı

Retrofit işlemindeki ekonomik kriterleri uygulamadan önce seçilen lambaların aydınlatma tasarımı yapılmıştır. Retrofit işlemi için uygulanacak olan örnek ofis ortamının özellikleri dosyalama-kopyalama gibi işlemler için kullanılan bir alan niteliği taşımaktadır. Modellenen odanın uzunluğu, genişliği ve yüksekliği sırasıyla 7 m, 3,3 m ve 2,8 m'dir. İlgili çalışma masasının yerden yüksekliği ise 0,85 m'dir. Odada tavan, duvar ve zemin bölümleri ile çalışma düzleminin yansıtma katsayıları sırasıyla 0,9, 0,8, 0,4 ve 0,35 olarak alınmıştır. Referans senaryoda mevcut olarak bulunan 4x18 W T8 floresan armatür 7 lamelli çift parabolik özelliğine sahiptir. Modellenen odanın 2D ve farklı açılardan 3D görünümü sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 5. DIALux ortamında modellenen odanın 2D görünümü.



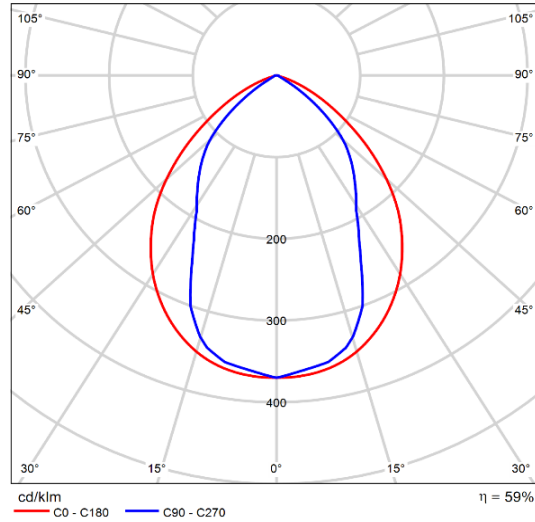
Şekil 6. DIALux ortamında modellenen odanın farklı açılardan 3D görünümüleri.

Tablo 1’de tüm senaryolarda kullanılan lambaların uyumlu oldukları balast tipleri, ışık akısı, güç, armatür etkinlik faktörü, armatür ömrü, açma-kapama sayıları, renk sıcaklıkları, renksel geriverim gibi özellikleri sırasıyla belirtilmiş olup; hacim, duvar, çalışma masası ortalama aydınlık düzeyleri ile UGR değerleri de verilmiştir.

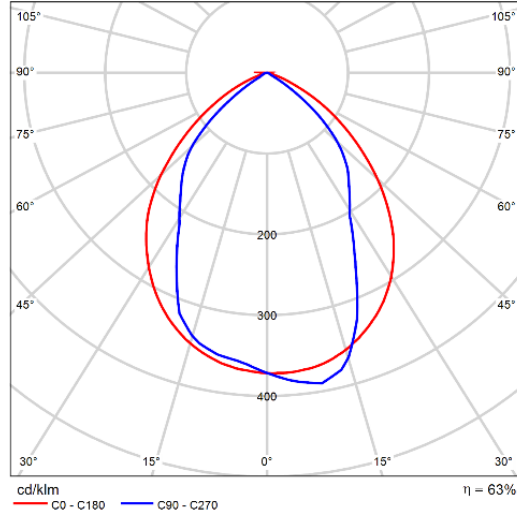
Tablo 1. Tüm senaryolardaki lamba tiplerinin özellikleri.

Lamba Tipi	T8 Floresan	Düşük Verimli LED Tüp	Orta Verimli LED Tüp	Yüksek Verimli LED Tüp
Kullanılabilecek Balast Tipleri	- Manyetik - Elektronik*	- Balastsız*	- Balastsız* - Elektronik	- Balastsız*
Lamba Işık Akısı (lm)	1300	720	1050	1050
Lamba Güç Değeri (W)	18	9	10,5	8
Lamba Etkinlik Faktörü (lm/W)	72,2	80	100	131,25
Lamba Ömrü (saat)	15000	30000	50000	75000
Açma / Kapama Sayısı	20000	20000	50000	200000
Renk Sıcaklığı (°K)	4000	4000	4000	4000
Renksel Geriverim (Ra)	75	>80	83	83
Çalışma Masası (E_{ort} , lüx)	515	300	438	445
Aydınlığın Dağılım Düzgünlüğü (U_0)	0,72	0,74	0,75	0,75
UGR	16,7	15,1	16,6	16,7

* ile işaretlenen balast tipi ilgili senaryoda kullanılmıştır.



Şekil 7. DIALux ortamında floresan armatüre ait ışık dağılım eğrisi.



Şekil 8. DIALux ortamında LED armatüre ait ışık dağılım eğrisi.

Şekil 7 ve Şekil 8’de sırasıyla referans senaryoda kullanılan floresan ve diğer senaryolarda kullanılan LED armatürlere ait fotometrik çıktılar görülmektedir. Bu senaryolarda kullanılan floresan ve LED armatürlerin aygıt verimleri sırasıyla %59,5 ve %62,6’dır. Her üç senaryo içinde armatür verimlilikleri de dikkate alınarak yapılan işlemlerde aydınlatma düzeylerinde bir düşüş olsa da TS EN 12464-1:2021-09 – Işık ve aydınlatma – Çalışma yerlerinin aydınlatılması [6] standardına göre çalışma masası düzleminde ortalama aydınlık düzeyinin uygun olduğu yani ofis ortamı için minimum aydınlık düzeyi şartlarını sağladıkları gözlemlenmiştir. LED tüplerin açma kapama sayısının floresan lambalara göre fazla olması ömrünü arttırmakta olup, mevcut durumdaki balastla uyumlu olan tipleri ile değişim maliyetini de azaltmaktadır. LED tüplerin dezavantajı fiyatlarının floresan lambalara göre fazla olmasının yanı sıra incelenen 0,6 m uzunluğundaki LED tüplerde ışık akısının floresan lambalara göre biraz daha düşük olmasıdır. Yapılan incelemelerde LED tüp ürünlerinin etkinlik faktörleri floresan lambalara göre yüksek olmakla birlikte; güç tüketimi floresan lambalara göre yarı yarıya düşüktür ve elektrik enerjisinde kayda değer bir tasarruf sağladığı görülmektedir.

4. Aydınlatma Tasarımı

Bu bölümde LED tüpler için yapılacak retrofit işleminin fayda-maliyet analizi yapılmıştır. Ofiste mevcut olarak bulunan 4x18 W T8 floresan armatürün yerine diğer lamba tiplerinin armatüre yerleştirilmesiyle oluşacak durumdaki ekonomik durum ve yatırım kârlılığı ortaya konulmuştur. Ofisin cumartesi ve pazar günleri kapalı olduğu varsayımı yapılmış olup, üç armatürün de hafta içi beş gün olmak üzere günde sekiz saat çalıştığı kabul edilmiştir. Elektrik birim fiyatı, lamba değişimi için birim işçilik maliyeti, balast hurda değeri gibi diğer değerleri içeren parametreler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Tüm senaryolardaki lamba tiplerinin özellikleri.

Ofisteki toplam armatür sayısı	3 adet
Günlük çalışma saati	8 saat/gün
Yıldaki çalışılan gün sayısı	261 gün/yıl
Yıldaki çalışma saati	2088 saat/yıl
Elektrik birim fiyatı	3,78 TL/kWh
Lamba değişimi birim işçilik maliyeti	5 TL/lamba değişimi
Balast hurda değeri	50 TL/lamba

Elektrik enerjisinden ne kadar tasarruf edilebileceği retrofit işlemleri için ilk başta düşünülmesi gereken konudur. Öncelikle ele alınan sistemin 1 yıl boyunca çalışma saati (T_i), Denklem 1’de verilmiştir.

$$T_i = \text{Günlük çalışma saati} \left(\frac{\text{saat}}{\text{gün}} \right) \times \text{Yıldaki aktif gün sayısı} \left(\frac{\text{gün}}{\text{yıl}} \right) \quad (1)$$

Mevcut sistemdeki armatürlerin 1 yılda harcadığı enerjiyi (W_i) bulabilmek için Denklem 2 kullanılmıştır ve böylece sistem tek zamanlı, üç zamanlı veya dinamik fiyatlandırmayı içeren herhangi bir elektrik tarifesinin kullanılmasına göre armatürlerin 1 yılda tükettiği elektrik enerjisi fiyatı ($C_{el,i}$) Denklem 3 ile hesaplanmıştır.

$$W_i = \frac{n \cdot z_i \cdot P_i \cdot T_i}{1000} \quad (2)$$

$$C_{el,i} = E_{birim} \cdot W_i \quad (3)$$

Denklem 1-3'te, önerilen sistem için de sırasıyla uygulanır. Önerilen sistemin mevcut durumdaki yapıya göre 1 yılda oluşturacağı enerji tasarrufu ($C_{ts,el}$) Denklem 4 ile belirlenir. Burada sırasıyla; n , toplam armatür sayısını, z_i , i armatüründe bulunan toplam lamba sayısını, P_i , i lamba tipinin gücünü, $C_{el,i}$, i lamba tipinin oluşturduğu tüm armatürlerin 1 yılda tükettiği elektrik enerjisinin fiyatını, $C_{ts,el}$ ise 1 yılda oluşacak olan toplam elektrik enerjisi tasarrufunu ifade etmektedir.

$$C_{ts,el} = C_{el,floresan} - C_{el,LED} \quad (4)$$

LED'lerin ömrünün daha uzun olması ve böylece LED'lerin mevcut sistemdeki lamba tipinden daha az değişim gerektireceği ve maliyetinin daha az olduğu düşünülür. Diğer yandan LED'lerin fiyatının mevcut sistemdeki lamba fiyatından daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bu yüzden yıllık yedek lamba sayısının tasarruf mu yoksa gidere mi yol açtığı belirlenmelidir. Her iki sistem için de toplam yıllık yedek lamba sayısı ($n_{deg,i}$) ile maliyeti ($C_{deg,i}$) ve elde edilen tasarruf veya gider ($C_{ts,deg}$) sırasıyla Denklem 5, Denklem 6 ve Denklem 7 ile bulunmaktadır. Burada sırasıyla; $h_{ömür,i}$, i lamba tipinin ömrünü, $C_{m,i}$, i lamba tipinin birim fiyatı belirtmektedir.

$$n_{deg,i} = \frac{n \cdot z_i \cdot T_i}{h_{ömür,i}} \quad (5)$$

$$C_{deg,i} = C_{m,i} \cdot n_{deg,i} \quad (6)$$

$$C_{ts,deg} = C_{deg,floresan} - C_{deg,LED} \quad (7)$$

Aynı durum yıllık işçilik maliyetinden elde edilecek tasarruf için de uygulanacak olursa; her iki durum için de değişecek lambaların yıllık işçilik maliyeti $C_{iş,i}$ ve işçilik maliyetinden elde edilen tasarruf veya gider $C_{ts,işçilik}$ sırasıyla Denklem 8 ve Denklem 9 ile hesaplanmaktadır. Yıllık lamba değişimi nedeniyle oluşabilecek başka durumlar benzer ifadelerle de elde edilebilir. Hesaplanan tasarruflar toplam yıllık tasarruf $C_{ts,toplam}$ olarak Denklem 10 ile ifade edilir. Burada; L_{birim} , birim lamba başına işçilik maliyetini göstermektedir.

$$C_{iş,i} = L_{birim} \cdot n_{deg,i} \quad (8)$$

$$C_{ts,işçilik} = C_{iş,floresan} - C_{iş,LED} \quad (9)$$

$$C_{ts,toplam} = C_{ts,el} + C_{ts,deg} + C_{ts,işçilik} \quad (10)$$

İlk yatırım maliyetinin hesaplanmasında değiştirilmesi önerilen tüm lambaların maliyetleri, işçiliği ve önceki sistemden kalan varsa hurda değerlerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu yüzden toplam yatırım maliyeti ($C_{yt,toplam}$) Denklem 11, değiştirilmesi önerilen LED'lerin toplam satın alma maliyeti ($C_{tm,LED}$) Denklem 12 ile lamba değişimi için ilk yatırım işçilik maliyetinin ($C_{iş,LED}$) Denklem 13 toplamıyla önceki sistemden kalan hurda tasarruflarının oluşturduğu gelirlerinin ($C_{ts,hurda}$) Denklem 14 çıkarılmasıyla belirlenmektedir. Burada C_{hurda} mevcut balast için hurda değerini gösterir.

$$C_{yt,toplam} = C_{tm,LED} + C_{iş,LED} - C_{ts,hurda} \quad (11)$$

$$C_{tm,LED} = n \cdot z_{LED} \cdot C_{m,LED} \quad (12)$$

$$C_{i\dot{s},LED} = n \cdot z_{LED} \cdot L_{birim} \quad (13)$$

$$C_{ts,hurda} = n \cdot z_{floresan} \cdot C_{hurda} \quad (14)$$

Son olarak geri ödeme süresi Denklem 15 ifade edilmiş olup yıllık tasarrufların oluşturduğu kazançların yatırım maliyetine ne kadar sürede ulaştığını tanımlamaktadır. Kısaca geri ödeme süresi önerilen sistemin yatırım yapılabilirliğini başka bir ifadeyle fizibilitesini göstermektedir.

$$\text{Geri ödeme süresi} = \frac{\text{Yatırım maliyeti}}{\text{Yıllık tasarruf}} = \frac{C_{yt,toplam}}{C_{ts,toplam}} \quad (15)$$

Mevcut bulunan floresan lambaların yerine değiştirilecek LED tüp lamba durumları ayrı ayrı senaryolarla ekonomik olarak incelenmiştir. Tüm senaryolar için Denklem 1-15'te uygulanmış olup; elde edilen toplam maliyet, yıllık tasarruf ve geri ödeme süreleri gibi sonuçlar Tablo 3'te paylaşılmıştır. Tablo incelendiğinde, toplam yıllık tasarruf miktarı Senaryo 1, 2 ve 3'te sırasıyla 925,38 ₺/yıl, 779,30 ₺/yıl ve 1035,96 ₺/yıl olarak hesaplanmıştır. Böylece bu senaryolarda geri ödeme süreleri sırasıyla 5 ay, 13 ay ve 7,3 ay olarak belirlenmiştir. Bu çalışma, geçmişte yapılan araştırmalarla [16] karşılaştırıldığında LED retrofit sonucunda hesaplanan 4 yıl geri ödeme süresinden daha iyi bir sonuç alınmıştır.

Tablo 3. Fayda-maliyet analizi.

Özellikler		Referans	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
Lamba tiplerinin özellikleri	Armatür başına lamba sayısı (adet)	4	4	4	4
	Lamba başına güç değeri (W)	18,55*	9	10,5	8
	Lamba fiyatı (₺)	30	40	78	60
	Lamba ömrü (saat)	15000	30000	50000	75000
	Yedek lamba sayısı (adet)	1,6704	0,8352	0,5011	0,3341
Retrofit sonucu oluşan yatırım maliyeti	Toplam lamba fiyatı (₺)	-	480	936	720
	Teslimat ve kurulum (₺)	-	60	60	60
	Diğer, hurda değeri (₺)	-	150	150	150
	Toplam yatırım maliyeti (₺)	-	390	846	630
Retrofit sonucu oluşan yıllık maliyetler	Yedek lamba satın alma maliyeti (₺/yıl)	50,11	33,41	39,09	20,04
	Enerji tüketimi (kWh/yıl)	38,732	18,792	21,924	16,704
	Enerji tüketim maliyeti (₺/yıl)	1756,90	852,41	994,47	757,69
	İşçilik (₺/yıl)	8,35	4,18	2,51	1,67
	Toplam yıllık maliyet (₺/yıl)	1815,37	889,99	1036,07	779,41
Retrofit sonucu yatırımın kârlılığı	Toplam yıllık tasarruf (₺/yıl)	-	925,38	779,30	1035,96
	Geri ödeme süresi (ay)	-	5	13	7,3

* Elektronik balast güç kaybı dahil edilmiştir.

5. Tartışma ve Sonuç

LED ürünleri artan enerji verimliliğine ve satın alma maliyetlerindeki azalışa bağlı olarak hızla yaygınlaşmaktadır. Dahası, yıllık maliyetlerde büyük bir paya sahip olan enerji tüketiminin floresan lambalara göre düşük olması amortisman sürelerini kısaltmaktadır. Bu nedenle yatırım maliyetleri görece floresan lambalara yakın olan LED tüp ürünlerinin floresan lambalarla değişimi halinde geri ödeme sürelerinin avantajlı olacağı ve bu yatırımların kârlı olacağı görülmektedir. Bu çalışmada; ofislerde yaygın olarak kullanılan floresan lambaların yerine LED tüp lambaların kullanılması durumunda aydınlatma kalitesi, enerji verimliliği ve ekonomisi yönetsel olarak karşılaştırılmıştır.

TS EN 12464-1:2021-09 standardına göre orta ve yüksek verimli LED tüplerin kullanıldığı senaryolarda minimum aydınlık düzeyi şartları sağlanmış, ancak düşük verimli LED tüplerin kullanılmasında ortalama aydınlık düzeyi sağlanamamıştır. Ayrıca düşük verimli LED tüp kullanılan 1. senaryoda UGR değerinin mevcut durumdaki floresan armatürlü yapıdaki UGR değerine göre düşük olduğu hesaplanmış olup diğer 2. ve 3. senaryolarda kamaşma değerinin referans senaryoya neredeyse aynı değere sahip olduğu görülmüştür.

Fayda-maliyet analizleri; düşük, orta ve yüksek verimli LED tüplerde geri ödeme sürelerinin sırasıyla 0,42 yıl, 1,08 yıl ve 0,6 yıl olduğunu göstermiştir. Yıllık enerji tüketimi açısından bakıldığında ise yüksek verimli LED tüplerin; düşük verimli LED tüp versiyonlarına göre %24, geleneksel floresan lambalara göre %57 daha az enerji

harcadığı görülmüştür. LED tüp ile yapılan retrofit işlemlerinde, incelenen orta ve yüksek verimli LED tüpler için yatırım yapılabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sonuçlar, LED tüp retrofit uygulamalarının ofisler için uygun olduğunu, ayrıca uzun aydınlatma süreleri olan ve sayıca daha fazla ışık kaynağına sahip kamu binaları, endüstriyel ve ticari tesislerde daha ekonomik sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir. Sonraki çalışmalarda, doğal ışık etkisi ve LED armatürlerin dimmerlenmesi dikkate alınarak aydınlatma kalitesi ve enerji verimliliği performanslarının incelenmesi planlanmaktadır.

Kaynaklar

- [1] International Energy Statistics- World. <https://www.eia.gov/international/data/world> (Erişim Tarihi: 02.04.2023).
- [2] IEA, Global electricity consumption by lighting in the Net Zero Scenario, 2010-2030, IEA, Paris. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electricity-consumption-by-lighting-in-the-net-zero-scenario-2010-2030> (Erişim Tarihi: 02.04.2023).
- [3] Soori PK, Vishwas M. Lighting control strategy for energy efficient office lighting system design. *Energy and Buildings* 2013; 66: 329–337.
- [4] Khan N, Abas N. Comparative study of energy saving light sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011; 15(1): 296–309.
- [5] Esteki M, Khajehoddin SA, Safaee A, Li Y. LED Systems Applications and LED Driver Topologies: A Review. *IEEE Access* 2023; 11: 38324-38358.
- [6] TS EN 12464-1:2021-09 – Işık ve aydınlatma – Çalışma yerlerinin aydınlatılması – Bölüm 1: Kapalı çalışma alanları. Türk Standartları Enstitüsü, Eylül 2021.
- [7] De D, Sahana S, Roy B. Performance analysis of fluorescent and led lamp system. In: *International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering*; 16-17 December 2016; India.
- [8] Vahl FP, Campos LMS, Filho NC. Sustainability constraints in techno-economic analysis of general lighting retrofits. *Energy and Buildings* 2013; 67: 500-507.
- [9] Ma Z, Cooper P, Daly D, Ledo L. Existing building retrofits: methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings* 2012; 55: 889–902.
- [10] Ryckaert WR, Smet KAG, Roelandts IAA, Gils MV, Hanselaer P. Linear LED tubes versus fluorescent lamps: An evaluation. *Energy and Buildings* 2012; 49: 429-436.
- [11] Myer MA, Paget ML, Lingard RD. CALiPER Benchmark Report–Performance of T12 and T8 Fluorescent Lamps and Troffers and LED Linear Replacement Lamps, Prepared for the U.S. Department of Energy by Pacific Northwest National Laboratory, 2009. https://www.pnml.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-18076.pdf (Erişim Tarihi: 02.04.2023).
- [12] Fantozzi F, Bail LL, Leccese F, Rocca M, Salvadori G. General lighting in offices building: Techno-economic considerations on the fluorescent tubes replacement with LED tubes. *International Journal of Engineering and Technology Innovation* 2017; 7(3): 143–156.
- [13] Uken E, Bevan G, Smith R. LED tube retrofits for fluorescent lighting in offices. In: *Proceedings of the 10th Industrial and Commercial Use of Energy Conference*; 20-21 August 2013; South Africa. pp. 1-4.
- [14] Davidovic M, Kostic M. Comparison of energy efficiency and costs related to conventional and LED road lighting installations. *Energy* 2022; 254(B): 124299.
- [15] Ayaz R, Ozcanli AK, Nakir I, Bhusal P, Unal A. Life Cycle Cost Analysis on M1 and M2 Road Class Luminaires Installed In Turkey. *Light & Engineering* 2019; 27(1): 61-70.
- [16] Ganandran GSB, Mahlia TMI, Ong HC, Rismanchi B, Chong WT. Cost-Benefit Analysis and Emission Reduction of Energy Efficient Lighting at the Universiti Tenaga Nasional. *The Scientific World Journal* 2014; 11.
- [17] Gan, CK, Sapar AF, Mun YC, Chong KE. Techno-Economic Analysis of LED Lighting: A Case Study in UTeM's Faculty Building. *Procedia Engineering* 2013; 53: 208-216.
- [18] Lusijarto TT, Subekti RA, Susanti V. In: *Economic analysis and energy consumption approaches for lighting improvement of government building facilities. International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application*; 23-24 October 2017; Indonesia. pp. 106-112.
- [19] Pereira LS, Pontes Y, da Costa FMPR. Energy efficiency in the replacement of fluorescent lamps by led: Application in a store. In: *Brazilian Power Electronics Conference*; 19-22 November 2017; Brazil. pp. 1-4.
- [20] Hung L, Anderson SJ, Pipkin A, Fristrup K. Changes in night sky brightness after a countywide LED retrofit. *Journal of Environmental Management* 2021; 292: 112776.
- [21] Atılğan LE, Enarun D. A case study of lighting Turkish historic mosques using LEDs: Semsî Ahmet Pasha Mosque. *Lighting Research & Technology* 2017; 50(6): 894-910.
- [22] Dubnička R, Lipnický L, Barčík M, Gašparovský D. Comprehensive view of LED products in luminaires. In: *Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering*; 20-22 June 2016; Slovakia. pp. 66-70.
- [23] RAB Lighting, LED T8 Tube Series – Ballast Compatible & Ballast Bypass, 2019. https://www.rablighting.com/sites/default/files/features/instructions/hybrid_led_tubes_0.pdf (Erişim Tarihi: 02.04.2023).
- [24] LEDISON Lighting, “Wiring Instructions T8/T5 Dimmable LED Tubes – 3 in 1 Dimming Function”, Ver. 4.0. https://ledison-led-lights.co.uk/mpattachments/file/download/id/102/product_id/733/ (Erişim Tarihi: 02.04.2023).

Küçük İHA'lar İçin 3D Baskılı Şekil Değiştirebilir Kanat Tasarımı ve Testleri

Fatma İlayda AYTAÇ¹, Ümit ÇELİK^{2*}, Muhsin Tunay GENÇOĞLU³

^{1,2} Uçak Bakım Onarım Böl., Sivil Havacılık Yüksekokulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

³ Elektrik-Elektronik Müh. Böl., Müh. Fak., Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

¹ fatma.ilayda00@gmail.com, ^{2*} u.celik@firat.edu.tr, ³ mtgencoglu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 02/12/2022;

Kabul/Accepted: 24/08/2023)

Öz: Kuşlar; tırmanış, düz uçuş, alçalma vb. değişik uçuş fazlarını, şekillendirilebilir kanatları sayesinde verimli bir şekilde gerçekleştirebilmektedirler. Geleneksel hava araçlarında ise değişik uçuş fazları için yardımcı kontrol yüzeyleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada şekil değiştirebilir esnek kanat yaklaşımı ile mini sınıf insansız hava araçlarının uçuş verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Esnek kanat 3 boyutlu yazıcı ile üretilebilir şekilde tasarlanmıştır. Kanat profilleri simetrik, yarı simetrik ve bombeli (kambur) olarak sınıflandırılabilir. Simetrik kanatlar daha yüksek hızlara ulaşılabilmesine olanak sağlarken bombeli kanat profilleri daha fazla kaldırma kuvveti üretilmesini sağlar. Hava aracı kanadının belirtilen kanat profillerine dönüştürülebilmesi amaçlanmıştır. Kanat, uyumlu hücum kenarı ve firar kenarına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede uçuş sırasında kanadın değişken kamburlu olabilmesi hedeflenmiştir. Kanadın şekillenebilmesi için kanadın üst yüzeyinde elastik deforme edilebilir esnek 3D baskılı yapılar, alt yüzeyinde ise yuva-yol ilişkisine sahip bir yapı tasarlanmıştır. Tasarlanan kanadın statik ve aerodinamik analizleri simülasyon araçları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmalarından sonra 3 boyutlu (3B) yazıcı kullanılarak prototip kanat üretimi ve daha sonra rüzgâr tüneline şekil değiştirebilir kanadın testleri gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan şekil değiştirebilir kanadın değişik durumlardaki aerodinamik davranışı XFRL5 yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Aerodinamik analizler sonucunda kambur kanadın en yüksek kaldırma katsayısına (CL) sahip olduğu görülmüştür. Simetrik kanadın daha düşük sürüklenme katsayısına (CD) sahip olduğu ve sonuç olarak aerodinamik verimliliğinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Rüzgâr tüneli testlerinde farklı rüzgâr hızları ve hücum açıları için kanat kaldırma kuvveti ölçümleri yapılmıştır. Geliştirilen uyumlu kanat ile çok geniş yelpazede farklı kanat davranışlarının elde edilebildiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Şekil değiştirebilir kanat, uyumlu kanat, İHA

Design and Tests of a 3D-printed Morphing Wing for Small UAVs

Abstract: Birds can perform different flight phases such as climb, cruise and descent efficiently thanks to their adaptive wings. In conventional aircrafts, auxiliary control surfaces are used for different flight phases. In this study, it is aimed to increase the flight efficiency of small unmanned aerial vehicles with the morphing wing approach. The flexible wing is designed to be produced using a 3D printer. Airfoils can be classified as symmetrical, semi-symmetrical and cambered. Symmetrical wings allow higher speeds to be achieved, while cambered wing profiles provide more lift. It is intended that the aircraft wing can be transformed to specified airfoils. The wing is designed to have a morphing leading and trailing edge. In this way, it is aimed that the wing can have variable camber during flight. In order to shape the wing during flight, deformable flexible 3D printed structures were designed on the upper surface of the wing, and a structure with a slotted guide on the lower surface. Static and aerodynamic analyzes of the designed wing were carried out using simulation tools. After the optimization studies, prototype wing was manufactured using a FDM 3D printer, and then the morphing wing was tested in the wind tunnel. The aerodynamic behavior of the designed deformable wing in different conditions was analyzed using XFRL5 software. As a result of the aerodynamic analysis, it was seen that the camber wing had the highest lift coefficient (C_L). It has been observed that the symmetrical wing has a lower drag coefficient (C_D), resulting in higher aerodynamic efficiency. In wind tunnel tests, wing lift measurements were made for different wind speeds and angles of attacks. It has been observed that a wide range of different wing behaviors can be obtained with the developed morphing wing.

Key words: Morphing wing, adaptive wing, UAV.

1. Giriş

İnsanlar her zaman gökyüzüne tutkuyla bakmıştır. Tarihte ilk motorlu uçak 1903 yılında Wright kardeşler tarafından uçuşurabilmiştir. Bu başarının arkasında süzülen kuşları taklit etme fikrinin olduğu bilinmektedir. Daha sonra havacılık endüstrisinde hızlı bir gelişim görülmüştür. Günümüzde biyomimetik yaklaşımla ürün geliştirme

* Sorumlu yazar: u.celik@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-5882-7321, ² 0000-0002-7759-6821, ³ 0000-0002-1774-1986

yöntemi geçerliliğini sürdürmektedir. Bilindiği üzere sabit kanatlı hava araçlarında kaldırma kuvveti hava aracı kanatları tarafından üretilmektedir. Hava aracı kanatları, yüksek kaldırma / sürüklenme oranı hedeflenerek tasarlanmaktadır. Uçağın ileriye doğru hareket edebilmesi ve sürtünmenin üstesinden gelinebilmesi için de itki sistemleri geliştirilmiştir [1]. Uçak kanatları belirli uçuş görevlerini yerine getirecek şekilde tasarlanmıştır. Hava aracı uçuş süresince tırmanış, seyir uçuşu ve alçalma gibi farklı uçuş fazlarında bulunmaktadır. Geleneksel hava aracı kanatları farklı uçuş fazlarının gereksinimlerini karşılayabilecek uyarlanabilir kanat yapısına sahip değildir. Uçuşun bu evreleri kanatçıklar, flaplar, spoiler ve diğer kontrol yüzeyleri yardımıyla gerçekleştirilmektedir [2]. Tırmanış, seyir uçuşu ve alçalma gibi farklı uçuş fazları uçuş boyunca gerçekleştirilmektedir. Doğada kuşlar tarafından bu olayların zahmetsizce gerçekleştirildiği görülmektedir. Kuşlar şekil değiştirebilen kanatları sayesinde farklı uçuş fazlarına uygun kanat profilleri arasında geçiş yapabilirler. Bu sayede kuşlar tarafından uçuş sırasında enerji daha verimli olarak kullanılabilir. Geleneksel hava araçları şekil değiştirebilir kanatlara sahip olmadığından, hava araçlarının kuşları tam olarak taklit edemediği söylenemez. Şekil değiştirebilir kanat fikri enerjinin daha verimli kullanılabilmesi amacıyla ortaya çıkmıştır.

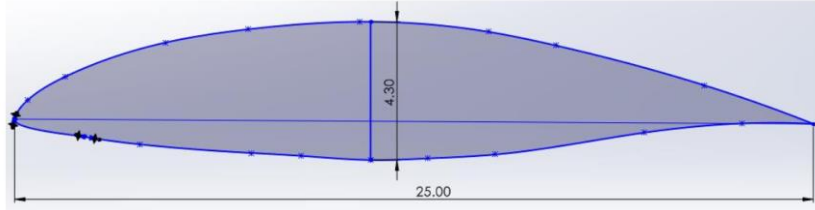
Dönüştürülebilir kanat yaklaşımı ilk olarak 1890'da bir Fransız mucit ve mühendis Clement Ader tarafından gösterilmiştir [3]. Ader'in "Eole" adlı uçan makinesi uçuş sırasında kanat şeklini değiştirebilmiştir. 1899'da Wright kardeşler uçağın kontrolünü geliştirmek için kontrol kabloları ile hareket ettirilebilir mekanizmalar geliştirmiştir [4]. 1937'de Baksaev tarafından kayan kanat folyosu mekanizması ile kanat alanının kontrol edilebilir bir şekilde artırılması sağlanmıştır [3]. Son yıllarda, değiştirilebilir kanat yaklaşımı ile ilgili akademik araştırmalar uçuş verimliliğine olabilecek potansiyel katkısından dolayı önemli ölçüde artmıştır. Vasista vd. şekil değiştirilebilir kanat ucu mekanizması tasarlamış ve üretmiştir [5]. Bu çalışmada esnek bir kaplama ve monolitik bir iç yapıya sahip bir tasarım sunulmuştur. Model üretilerek konseptin işlevselliği ve uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Anmin vd. insansız hava araçlarında kullanılması amaçlanan uyarlanabilir eğimli kanat tasarımı geliştirmiştir ve değişken eğimli kanadın aerodinamik performansı büyük ölçüde etkilediğini göstermiştir [6]. Simülasyon sonuçlarına göre uyarlanabilir eğimli kanadın kaldırma katsayısını aynı hücum açısına karşı kademeli olarak artırdığı görülmüştür.

Rafic vd. tarafından simetrik ve asimetrik kanat açıklığı geçişine olanak sağlayan çok görevli bir İHA geliştirilmiştir [7]. Bu çalışmada kanat geçiş mekanizmasında kremayer ve pinyon mekanizması kullanılmıştır. Kaldırma katsayısının açıklık uzantısı ile doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Açıklık boyunca uniform olmayan hava profili şekli bu çalışmanın bir dezavantajı olarak sıralanabilir. Fasel vd. tarafından kompozit eklemeli imalatın dönülebilen havacılık yapılarına uygulanabilirliği gösterilmiştir [8]. Bu çalışmada dönülebilen kanada sahip küçük ölçekli bir sabit kanat İHA, eklemeli üretim tekniği ile üretilmiştir. Hugo ve ark. kanat ucunun dönmesine olanak sağlayan biçim değiştiren kanat tasarımı geliştirmiştir [9]. Başka bir çalışmada, kiriş ve kamber geçişi yapabilen uyumlu, çok biçimli bir kanat geliştirilmiştir [10]. Aerodinamik analizin sonuçları, kiriş geçişinin daha düşük saldırı açılarında aerodinamik etkinliği iyileştirdiğini, kamber geçişinin ise daha yüksek saldırı açılarında etkinliği geliştirdiğini göstermiştir. Amoozgar vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada polimorfik kanat tasarımının aerodinamik performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda ve sayısal analizler, polimorfik kanatların genişlik uzatma ve değişken açıklık özelliklerinin, uçak performansını önemli ölçüde artırabileceği gösterilmiştir [11]. Diğer bir çalışmada, örgü şekillendirme kanadının tasarımı, analizi ve performans değerlendirmesi üzerinde durulmuştur [12]. Yapılan sayısal analizler ve deneysel çalışmalarda, örgü şekillendirme kanadının aerodinamik performansını artırabileceğini ve uçakların daha iyi manevra kabiliyeti sağlayabileceği gösterilmiştir. Sepulveda vd. tarafından yeni bir genişlik şekillendirme kanat çekirdek tasarımının geliştirilmesi ele alınmıştır [13]. Yapılan deneysel çalışmalarda, yeni çekirdek tasarımının genişlik şekillendirme kanadının performansını artırabileceği ve uçakların daha iyi manevra kabiliyeti sağlayabileceği gösterilmiştir.

Kuşlarla yaklaşık olarak benzer boyutlara sahip olan mikro ve mini sınıf insansız hava araçlarının kanat yüzey alanlarının küçük olmasından dolayı verim anlamında dezavantajlı bir durumda oldukları söylenebilir. Bu çalışmada biyomimetik yaklaşımdan yola çıkılarak, mikro ve mini sınıf insansız hava araçları için kolay üretilebilir, şekil değiştirebilen kanat yapısının tasarlanması ve prototip üretim yapılmıştır. Sonrasında şekil değiştirebilir kanadın rüzgar tüneli testleri gerçekleştirilmiştir. Değiştirilebilir kanat yaklaşımı maksimum hız, manevra kabiliyeti, taşıma kapasitesi, menzil, dayanıklılık, stabilite vb. parametrelerin kontrol edilebilmesine olanak sağlar. Bu parametrelerin iyileştirilmesi uçuş verimliliğini ve uçağın gerçekleştirilebileceği görevleri arttırabilir. Tüm bunların yanı sıra şekil değiştirebilir kanat tasarımı yakıt tasarrufu, düşük karbon salınımı ve azaltılmış gürültü dâhil olmak üzere uçuş performansında önemli avantajlar sağlamaktadır.

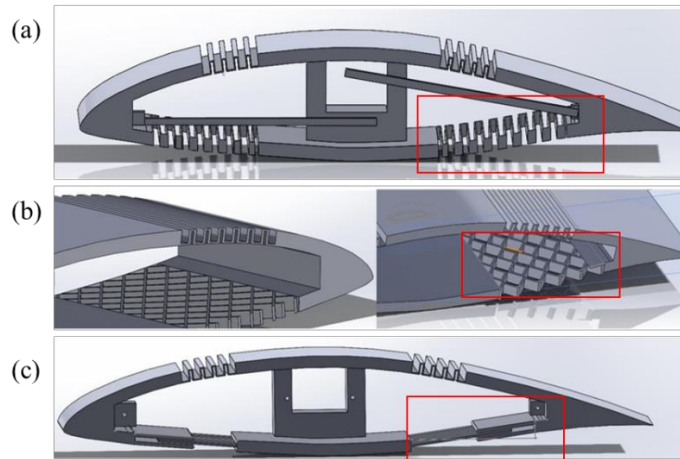
2. Şekil Değiştirebilen Kanat Tasarımı

Bu çalışmada AH 82-150A kanat profili kullanılmıştır [14]. Althaus AH 82-150 A kanat profili maksimum kalınlık %15, %40,2 kirişte ve %43,5 kirişte maksimum bombe %3,3 olarak verilmiştir. Çalışmada önerilen yaklaşım tüm kanat profillerine uygulanabilir ancak bu çalışmada gerekli hareket mekanizmalarını kanat içyapısına yerleştirebilmek için yüksek kamburluk oranına sahip olan kanat profillerinden biri seçilmiştir. Kanat profilinin şekil değiştirebilen kanat özelliğine kavuşması hedeflenmiştir. Değişken kamburluk geçişini elde edebilmek için servo motor tabanlı bir uyarıcı mekanizması kullanılmıştır. Bilindiği üzere uçaklarda bulunan slatlar, sabit kanatlı bir uçağın kanadının ön kenarında yer alan ve kanadın daha yüksek bir hücum açısında çalışmasına izin veren aerodinamik yüzeylerdir. Tasarımda, kanadın servo motor kontrollü uyumlu hücum kenarı ve firar kenarına sahip olması sağlanmıştır. Şekil 1’de şekil değişim öncesi AH 82-150A kanat profili verilmiştir. Servo motor ve destek kirişleri kanat geometrisinin içerisine yerleştirilmiştir. Tasarlanan prototip kanat profilinin boyu 25 cm ve kalınlığı 4.3 cm’dir.



Şekil 1. AH 82-150A kanat profili

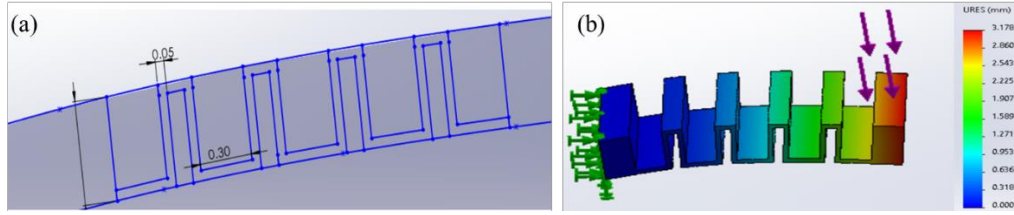
Şekil değiştirebilen kanat geometrisi tasarımında kanadın alt ve üst yüzeylerinin esnek, hareket edebilir bir mekanizmaya sahip olması beklenmektedir. Bu çalışmada, üç farklı esnek kol mimarisi tasarlanmış olup deformasyon ömrü en iyi sonucu veren kanat geometrisinin prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan farklı esnek kol mimarileri Şekil 2’de verilmiştir. Kanat üst kabuğu için kare dalga formunda bir esnek yüzey mimarisi tercih edilmiştir. Şekil 2(a)’da geliştirilen kanat alt yüzeyinde yer alan esnek kol yapısının üretim sonrasında yaklaşık olarak 60 çevrim sonrasında kırıldığı görülmüştür. Şekil 2(b)’de tasarlanan mimari statik analizler neticesinde yapının hedeflenen hareket aralığında plastik deformasyona uğradığı görüldüğü için bu tasarım üretilmemiştir. Şekil 2(c)’de kanadın alt yüzeyine yuva-yol ilişkili bir hareket mekanizması geliştirilmiştir. Bu sayede geniş bir aralıkta kanat alt yüzeyinde esneklik ve kayma sağlanmıştır. Tasarımda alt kanat yüzeyinde hücum ve firar kenar bölgelerine yakın olmak üzere 2 adet yuva-yol mekanizması bulunmaktadır. Bu sayede kanadın hem hücum hem de firar kenarının kamburluk oranlarının ayarlanabilmesi sağlanmıştır. Geliştirilen esnek mekanizmalarla kanat profilinin simetrik, yarı simetrik ve değişken kambur oranlı kanat profiline dönüştürülebilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 2. Şekil değiştirebilen kanat esnek kol yapıları (a) kare dalga formunda esnek kol, (b) baklava dilimi tipi esnek kol, (c) yuva-yol ilişkili esnek mekanizma

2.1. Statik analizler

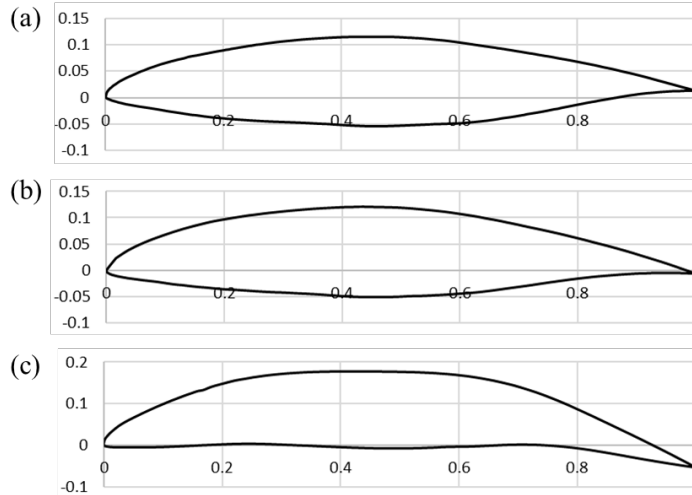
Konsept tasarım aşamasından sonra kanat yüzeyleri için tasarlanan esnek kol yapısının statik simülasyonları ANSYS sonlu elemanlar analizi (FEA) paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil değiştirebilen kanat yapısının hem üst hem de alt yüzeylerinin esneyebilmesi gerekmektedir. Kanat alt yüzeyinde bulunan yuva yol ilişkisi kayar mimariye sahip olduğu için esnemesi için sürtünme hariç ekstra kuvvet gerekmemektedir. Kanat üst yüzeyine yerleştirilen esnek kol yapısı ve statik simülasyonu Şekil 3'te verilmiştir. Kullanılan servo motorlu mekanizmanın 300gr (2.94N) kaldırdığı görülmüştür. Esnek kol yapısının bir ucu sabit uç olarak alınmış ve diğer uca 0.5 N kuvvet uygulanmıştır. Bu durumda esnek kol yapısının 3.178 mm hareket edebildiği yer değiştirme analizinde görülmüştür. Analizler neticesinde servo motorlu hareket mekanizmasının istenen oranda esnek kanat mekanizmasını hareket ettirebileceği görülmüştür.



Şekil 3. Esnek kol statik analizi

2.2. Aerodinamik analizler

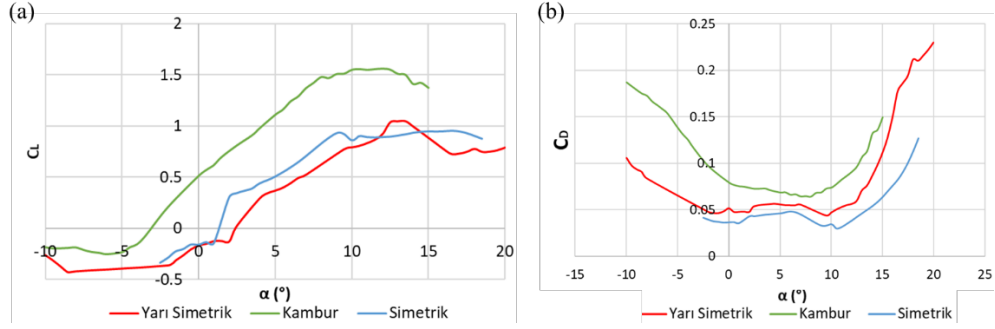
Bir uçağın verimliliği ve performansı çoğunlukla kanatların kaldırma, sürüklenme, kaldırma/sürüklenme oranı vb. aerodinamik özelliklerine bağlıdır. Şekil değiştirebilen kanat tasarımının 3 farklı durumu için (simetrik, yarı simetrik ve kambur) farklı hücum açıları C_L / α ve C_D / α verileri analiz edilmiştir. Şekil 4(a)'da simetrik kanat profili, Şekil 4(b)'de yarı simetrik ve Şekil 4(c)'de kambur kanat profilleri verilmiştir. Şekil değiştirebilir kanat tüm ara kanat profillerine dönüşebilmekle birlikte kanadın ulaşabileceği uç profiller analizlerde kullanılmıştır. Geliştirilen şekil değiştirilebilir kanadın mini-sınıf İHA'larda kullanımı hedeflendiğinden dolayı aerodinamik analizler düşük Reynolds sayısında ($Re=100000$) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Kanat profilleri. (a) Simetrik kanat profili (b) Yarı simetrik kanat profili, (c) Kambur kanat profili

Dönüşebilir kanat aerodinamik analizleri XFLR5 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [15]. İlk olarak belirtilen kanat profilleri için C_L (kaldırma katsayısı) - α (hücum açısı) analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5(a)'da C_L - α grafiği verilmiştir. Orijinal AH 82-150A kanat profili analizi incelendiğinde maksimum kaldırma katsayısının $C_L = 1.2$ ve hücum açısının 12° olduğu görülmektedir. Kambur kanat için yaklaşık olarak 12° hücum

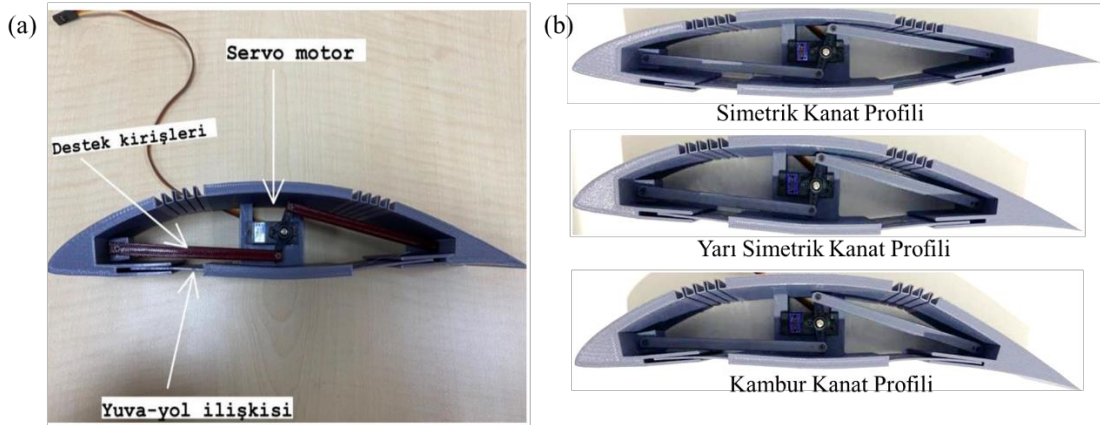
açısında maksimum kaldırma katsayısına ($C_L=1.6$) ulaşıldığı görülmüştür. Kanat kamburluk oranının artması ile birlikte kaldırma katsayısı $C_L=1.2$ 'den $C_L=1.6$ 'ya ulaşmıştır. Simetrik kanat ile normal profil kaldırma katsayıları arasında belirgin bir fark görülememiştir. Çünkü, Şekil 4(a) ve (b) de görüldüğü gibi AH 82-150A kanat profili simetrik kanat profiline yakın bir geometriye sahiptir. Ayrıca Şekil 4(a), (b) ve (c)'de verilen 3 farklı durumdaki kanat yapıları için hücum açısına karşın sürükleme katsayısı (C_D - α) analizleri gerçekleştirilmiştir. C_D - α grafiği Şekil 5(b)'de verilmiştir. Beklendiği gibi simetrik kanat yapısının en düşük sürükleme katsayısına, kambur kanat profilinin de en yüksek sürükleme katsayısına sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 5. Dönüştürülebilir kanadın üç farklı durumu için C_L - α grafikleri

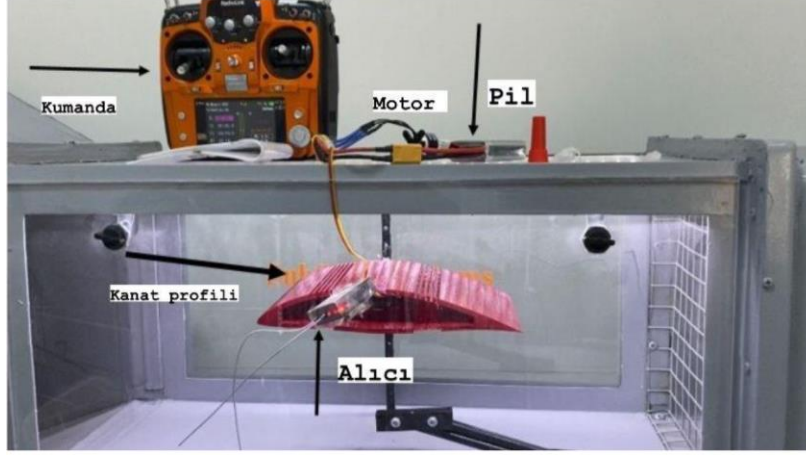
3. Üretim ve Testler

Prototip kanat üretimi filament tabanlı 3 boyutlu yazıcı (Raise 3D N2 Plus, Raise3D INC., Costa Mesa, USA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretimde düşük hız, yüksek kalite seçeneği kullanılmıştır. Şekil değişebilir kanat üretiminde PLA filament kullanılmıştır. Üretim sırasında 215°C nozle sıcaklığı ve 45°C tabla sıcaklığı kullanılmıştır. Üretilen kanat yapısı Şekil 6(a)'da verilmiştir. Servo motorun kontrolü ile birlikte elde edilebilen kanat profilleri Şekil 6(b)'de verilmiştir. Kontrol edilebilir hücum ve firar kenarı için tek metal dişli servo motor kullanılmıştır. Çift servo motor kullanılarak hücum ve firar kenarı ayrı ayrı kontrol edilebilir, ancak kullanım kolaylığı açısından bu çalışmada tek servo motorla hem hücum hem de firar kenarı burulma oranları kontrol edilmiştir.



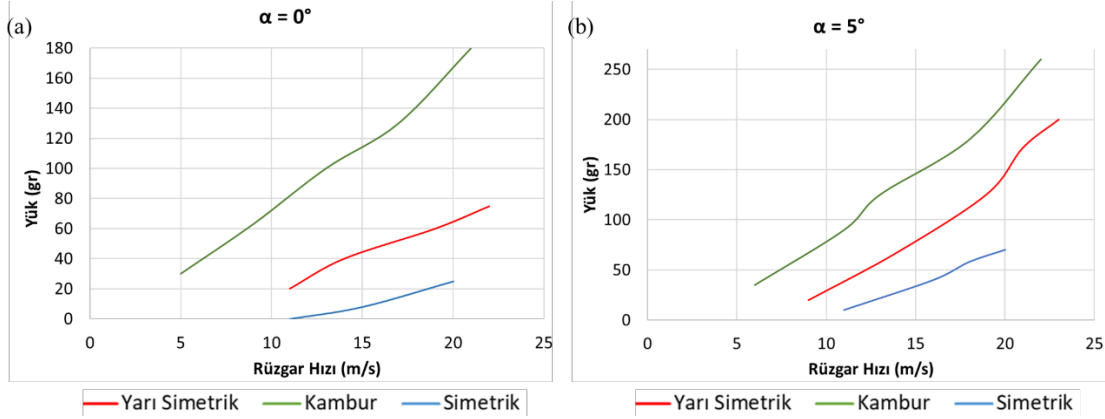
Şekil 6. Üretilen prototip şekil değiştirebilen kanat modeli, (a) Kanat montajı, (b) Şekil değişikliği ile elde edilen kanat profilleri

Rüzgâr tüneli cisimlerle havanın etkileşiminin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Dönüştürülebilir kanat rüzgâr tüneli (SubSonic Rüzgâr Tüneli, Elkimak, Elazığ, Türkiye) kanat test alanına sabitlenmiştir. Dönüştürülebilir kanadın rüzgâr tüneli içerisinde hareket ettirilebilmesi için servo motor kullanılmıştır. Servo motoru sürmek için 3S Lipo batarya ve Radiolink AT10 kumanda kullanılmıştır. Test düzeneği Şekil 7'de verilmiştir. Kambur, yarı simetrik ve tam simetrik kanat profili için rüzgâr tüneli testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7. Şekil değiştirebilir kanat rüzgâr tüneli test düzeneği

İlk olarak Şekil 4'te verilen 3 farklı durumdaki kanat profili için 0° hücum açısında farklı rüzgâr hızları için üretilen kaldırma kuvvetleri ölçülmüştür. Şekil 8(a)'da verilen, 20 m/s rüzgâr hızı için kanat profillerinin kaldırma kuvvetleri karşılaştırıldığında, kambur kanat profilinin yarı simetrik kanat profiline göre 2.2 kat, simetrik kanat profiline göre ise 6.8 kat daha fazla kaldırma kuvveti ürettiği görülmektedir. Şekil 8(b)'de, 5° hücum açısında farklı rüzgâr hızları için üretilen kaldırma kuvvetleri ölçülmüştür. 5° hücum açısı ile 3 farklı kanat profili için elde edilen kaldırma kuvvetleri ölçülmüştür. Kambur kanat profili için hücum açısı 0° 'den 5° 'ye çıkarıldığında kaldırma kuvvetinin 1.3 kat arttığı görülmektedir. Yarı simetrik ve tam simetrik kanat profili için ise sırasıyla 2 ve 3 kat kaldırma kuvvetinin arttığı görülmüştür.



Şekil 8. 0° hücum açısında 3 farklı kanat profili için (rüzgâr hızı-yük) rüzgâr tüneli testi

4. Sonuç

Geleneksel hava araçlarında uçuş koşullarına uygun davranışlar yardımcı kontrol yüzeyleri sayesinde sağlanmaktadır. Bu durum ekstra ağırlık ve karmaşıklığın yanında sürüklenme kuvvetinin de artmasına sebep olmaktadır. Doğada uçabilen canlılara bakıldığında uçuş fazlarına göre dönüşebilir kanat mimarilerine sahip oldukları görülmektedir. Bu çalışmada biyomimetik temelli araştırmalardan yola çıkılarak mini sınıf insansız hava araçları için şekil değiştirebilir kanat tasarımı geliştirilmiştir. Kanadın simülasyonları gerçekleştirilerek optimizasyon sonrasında prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve rüzgâr tüneli testleri ile sonuçlar doğrulanmıştır. İlk olarak üst kanat dış kabuğunun plastik deformasyon limitleri içerisinde hareket edebilmesi için esnek kol mimarisi tasarlanarak statik analizleri gerçekleştirilmiştir. Kanat alt kabuğunun hareketli olabilmesi için yuva-yol ilişkisi ile

hareket edebilen bir mekanizma geliştirilmiştir. Dönüştürülebilir kanat aerodinamik analizleri XFRL5 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kanadın prototip üretimi 3B yazıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr tüneli kullanılarak şekil değiştirebilen prototip kanadın testleri farklı rüzgâr hızlarında ve hücum açılarında gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda tüm hücum açılarında en fazla kaldırma üreten kanadın kambur kanat olduğu görülmüştür. Yapılan analizler ve rüzgâr tüneli testleri sonucunda şekil değiştirebilir kanadın farklı uçuş koşullarında kullanılmasının uçuş verimliliğini arttırabileceği görülmüştür. Kalkış ve iniş fazlarında kambur kanadın kullanılabilirliği, seyir uçuşu sırasında ise daha düşük sürüklenme kuvveti oluşturduğundan dolayı simetrik kanadın kullanılabilirliği düşünülmektedir. Daha sonraki çalışmalarda, geliştirilen kanadın mini sınıf bir insansız hava aracında kullanılarak uçuş testlerinin gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Teşekkür

Ü.Ç. ve M.T.G. fikir sahibi, F.İ.A. ve Ü.Ç. deneyleri gerçekleştirdi ve sonuçları yorumladı, Ü.Ç., F.İ.A. ve M.T.G. makaleyi yazdı.

Kaynaklar

- [1] Sadraey MH. Aircraft design: A systems engineering approach. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2012.
- [2] Jha AK, Kudva JN. Morphing aircraft concepts, classifications, and challenges. Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies. San Diego, SPIE Publishing, 2004; 213–224.
- [3] Weisshaar T, Terrence A. Morphing Aircraft Technology-New Shapes for Aircraft Design. Defense Technical Information Center: Fort Belvoir, VA, USA, 2006.
- [4] Kelly FC. The Wright Brothers: A Biography. Courier Corporation, 2012.
- [5] Vasista S, Riemenschneider J, Monner HP. Design and testing of a compliant mechanism-based demonstrator for a droop-nose morphing device. 23rd AIAA/AHS adaptive structures conference; 2015 Jan 5-9; Kissimmee, USA. Reston: AIAA; 2015; pp. 1-16.
- [6] Zhao A, Zou H, Jin H, Wen D. Structural design and verification of an innovative whole adaptive variable camber wing. Aerosp Sci Technol 2019; vol. 89: 11-18.
- [7] Ajaj RM, Jankee GK. The Transformer aircraft: A multimission unmanned aerial vehicle capable of symmetric and asymmetric span morphing. Aerosp Sci Technol 2018; vol. 76: 512-522.
- [8] Fasel U, Keidel D, Baumann L, Cavolina G, Eichenhofer M, Ermanni P. Composite additive manufacturing of morphing aerospace structures. Manuf Lett 2020; vol. 23: 85-88.
- [9] Rodrigue H, Cho S, Han MW, Bhandari B, Shim JE, Ahn SH. Effect of twist morphing wing segment on aerodynamic performance of UAV. J Mech Sci Technol 2016; vol. 30(1): 229-236.
- [10] Parancheerivilakkathil MS. A compliant polymorphing wing for small UAVs. Chin J Aeronaut 2020, vol. 33(10): 2575-2588.
- [11] Parancheerivilakkathil MS, Haider Z, Ajaj RM, Amoozgar M. A polymorphing wing capable of span extension and variable pitch. Aerospace 2022, vol. 9(4), pp. 205.
- [12] Keidel D, Fasel U, Ermanni P. Concept investigation of a lightweight composite lattice morphing wing. AIAA Journal 2021, vol. 59(6): 2242-2250.
- [13] Bishay PL, Burg E, Akinwunmi A, Phan R, Sepulveda K. Development of a new span-morphing wing core design. Designs 2019, vol. 3(1): pp. 12.
- [14] Althaus D, Niedrig F. Niedrig-geschwindigkeits-profile. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1996.
- [15] Deperrois A. XFRL5 Analysis of foils and wings operating at low Reynolds numbers. Guidelines for XFRL5, vol. 142, 2009.

Derin Q Ağları Tabanlı Parçacık Sürü Optimizasyonu

Özlem TÜLEK^{1*}, İhsan Hakan SELVİ²

^{1,2} Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Bilişim Sistemleri Mühendisliği, Sakarya, Türkiye
^{*}ozlemtulek@ogr.sakarya.edu.tr, ²ihselvi@sakarya.edu.tr

(Geliş/Received: 13/06/2023;

Kabul/Accepted: 26/08/2023)

Öz: Günümüzde, yapay zekâ ve makine öğrenmesi teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, optimizasyon problemlerinin çözümüne farklı ve yenilikçi yaklaşımlar getirmiştir. Bu yöntemler, problem çözümünde klasik optimizasyon tekniklerine alternatif yaklaşımlar sunmaktadır. Optimizasyon problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılan metasezgisel algoritmaları makine öğrenmesi teknikleriyle birlikte kullanmak güçlü bir potansiyel sunmaktadır. Bu çalışmada doğa esinli bir metasezgisel algoritma olan parçacık sürü optimizasyonu ile bir makine öğrenmesi yöntemi olan pekiştirmeli öğrenmeyi birlikte kullanan bir model önerilmiştir. Önerilen model 9 tane kıyaslama problemi kullanılarak 50 ve 100 boyut için test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar pekiştirmeli öğrenmenin PSO'nun yakınsama ve küresel keşif yeteneklerini geliştirmek için büyük bir potansiyel sunduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Pekiştirmeli öğrenme, DQN, metasezgisel optimizasyon, parçacık sürü optimizasyonu.

Deep Q Networks Based Particle Swarm Optimization

Abstract: Today, rapid developments in artificial intelligence and machine learning technologies have brought different and innovative approaches to the solution of optimization problems. These methods offer alternative approaches to classical optimization techniques in problem solving. Using metaheuristic algorithms, which are frequently used in solving optimization problems, together with machine learning techniques offers a strong potential. In this study, a model that uses particle swarm optimization, which is a nature-inspired metaheuristic algorithm, and reinforcement learning, which is a machine learning method, is proposed. The proposed model is tested for 50 and 100 dimensions using 9 comparison problems. The results show that reinforcement learning offers great potential to enhance the convergence and global exploration capabilities of PSO.

Key words: Reinforcement learning, DQN, metaheuristic optimization, particle swarm optimization.

1. Giriş

Optimizasyon problemleri, birçok farklı alanda karşılaşılan önemli matematiksel problemlerdir. Bu problemler, verilen kısıtlar altında, bir hedef fonksiyonunun en büyüklmesi veya en küçüklmesi ile ilgilidir. Örneğin, bir üretim sürecinde malzeme kullanımının minimize edilmesi, bir taşıma planının maliyetinin minimize edilmesi veya bir yatırım portföyünün getirisinin maksimize edilmesi gibi durumlar optimizasyon problemlerine örnek olarak verilebilir. Optimizasyon problemlerinin çözümü, matematiksel modeller kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu modeller, problemin özelliklerine ve hedefine göre tasarlanmakta ve matematiksel ifadelerle gösterilmektedir. Bu problemlerin çözümü, matematiksel modeller ve optimizasyon algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilmektedir [1].

Optimizasyon problemlerinin çözümü için pekiştirmeli öğrenme ve meta-sezgisel algoritmaların kullanımı, karmaşık problemleri daha etkili bir şekilde çözmeye yardımcı olabilmektedir [2]. Bu yöntemlerin, farklı disiplinlerdeki araştırmacılar tarafından aktif olarak kullanılması ve geliştirilmesi, optimizasyon problemlerinin çözümünde yeni bir çağ açabilir.

Son yıllarda doğa esinli algoritmalarla ilgili yoğun araştırmaların yapıldığı görülmektedir. Doğada gözlemlenen canlı sürülerinin hareketleri, evrim teorisi, insan vücudu ya da fizik kurallarından ilham alan bu algoritmalar, birden çok disiplinde kullanılmaktadır. Basit bir matematiksel model kullanan, kolay anlaşılır ve uygulanabilir olan parçacık sürü optimizasyonu (PSO) da bu algoritmalarından biridir. 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından önerilen algoritma, kuşların gökyüzünde yapmış oldukları akınlardan esinlenilerek geliştirilmiştir [3]. PSO, çok sayıda parçacığı aynı anda kullanabilen, çok boyutlu problemlerin çözümü için hızlı ve etkili bir yöntemdir. PSO'da çözüm uzayında arama yapan bireyler parçacık; parçacıklardan oluşan popülasyon ise sürü olarak adlandırılmıştır. PSO'da parçacıklar çözüme en yakın oldukları konum ile tüm sürü içinde elde

*Sorumlu Yazar: ozlemtulek@ogr.sakarya.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-4466-8515, ² 0000-0002-8837-2137

edilmiş en iyi konumu takip ettiği için, global optimuma ulaşma olasılığı yüksektir. Bu nedenle, PSO, doğa esinli algoritmalar arasında en popüler ve sık kullanılan yöntemlerden biridir.

PSO'nun bazı durumlarda yerel minimumlara yakalanabildiği bilinmektedir. Bu durumda, çözüm alanında daha iyi sonuçlar elde etmek için global arama stratejileri kullanılmalıdır. Ayrıca, bu yöntemin bazı durumlarda yakınsama hızı yavaşlayabilmektedir. Bunun nedeni, parçacıkların birbirlerinden farklı hız ve yönlerde hareket ederek arama alanının genişliğini keşfetmeleri ve daha iyi çözümlere ulaşmaları gereken durumlarda zaman kaybedebilmeleridir.

Basitliği, hızı ve yüksek performansı sebebiyle PSO'nun başarımını arttırmak üzere pek çok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalardan bazıları PSO için uygun parametre değerleri seçimiyle ilgilidir. PSO'nun performansında parametre seçimi önemli bir role sahip olduğu için bu konuda çok sayıda çalışma yapılmıştır [4-6]. PSO'nun performansını arttırmak için yapılan diğer bazı çalışmalar [7-13] ise diğer algoritmalar ile PSO'yu hibrit olarak kullanmak üzerinedir. Hibrit algoritmalar, bir yöntemin zayıf yönlerini bir başka yöntemin güçlü yönleriyle telafi ederek, daha iyi sonuçlar elde etmeyi amaçlamaktadır. PSO ile diğer algoritmaların birlikte kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde bu çalışmalarda standart PSO'ya göre daha iyi sonuçların elde edildiği ve yerel minimumlara takılma gibi birtakım sorunların üstesinden gelindiği görülmüştür.

Pekiştirmeli öğrenme, makine öğrenmesi alanında önemli bir tekniktir. Bu yöntem, bir makinenin bir dizi adımı takip ederek bir görevi öğrenmesini sağlamaktadır. Pekiştirmeli öğrenme, bir ajanın belirli bir ortamda belirli bir davranışı gerçekleştirerek ödüller kazanmasını hedeflemektedir. Bu ödüller, ajanın doğru davranışları öğrenmesini teşvik etmekte ve yanlış davranışları engellemektedir. Bu teknik, genellikle robotik, oyunlar, otomatik pilotlu araçlar, doğal dil işleme ve finansal uygulamalar gibi alanlarda kullanılmaktadır. Pekiştirmeli öğrenme, makine öğrenmesi için önemli bir adımdır ve yapay zekânın insan benzeri öğrenme ve karar verme yeteneklerini geliştirmede önemli bir rol oynamaktadır [14]. Pekiştirmeli öğrenme alanında kullanılan bir derin öğrenme modeli olan Derin Q-ağları (DQN) öğrenme sürecinde bir ajanın, çevreyle etkileşime girerek en yüksek ödülü kazanması için optimal eylem seçimini öğrenmesine olanak tanımaktadır. DQN, Q-öğrenme algoritmasının derin öğrenme ağı ile genişletilmesiyle oluşturulmuştur. Bu sayede daha büyük ve karmaşık problemleri çözmekte etkili olabilmektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda PSO'nun performansı arttırmak üzere pekiştirmeli öğrenmenin kullanıldığı görülmektedir. Yin vd. [15] yaptıkları çalışmada PSO'nun katsayılarını kontrol etmek için bir ağ tasarlayarak PSO yakınsamasını geliştirmek için pekiştirmeli öğrenmeye dayalı bir parametre uyarlama yöntemi önermişlerdir. Meng vd. [16] pekiştirmeli öğrenme tarafından yönlendirilen çok stratejili kendi kendine öğrenme mekanizmasını önermişlerdir. Wang vd. [17] ise PSO'nun geniş ölçekli optimizasyon problemlerindeki performansını arttırmak için PSO'nun popülasyon çeşitliliğini iyileştirmeyi hedeflemişler ve seviye tabanlı bir popülasyon yapısı oluşturmuşlardır. Önerdikleri algoritmanın arama verimliliğini artırmak için ise seviye numarası kontrolü yapmak üzere bir pekiştirmeli öğrenme stratejisi kullanmışlardır. Lu vd. [18] yaptıkları çalışmada pekiştirmeli öğrenme stratejisi yoluyla PSO parçacıklarının davranışına rehberlik etmek için geçerli geçmiş bilgisinden yararlanmaya çalışan bir model önermiştir. Wu ve Wang [19] güncelleme işlevindeki düzgün dağılmış rasgele sayıyı, seçilen bir normal dağılımdan üretilen rasgele bir sayı ile değiştirerek yakınsamadaki PSO'yu geliştirmek için bir pekiştirmeli öğrenme stratejisi geliştirmiştir.

Bu çalışmada, bir pekiştirmeli öğrenme algoritması olan DQN ile PSO birbirleriyle entegre edilerek yeni bir model önerilmiştir. Önerilen model ile parçacık sürü optimizasyonunun tüm avantajları korunurken, aynı zamanda pekiştirmeli öğrenmenin esnekliği ve adaptif öğrenme yeteneklerini de kullanabilmek amaçlanmıştır. Modelin ana fikrinde lokal minimumlardan kaçınmak için yalnızca rasgeleliliği kullanan parçacıklar değil, bunun yanında ona sunulan hareket seçeneklerinden en uygununu tercih etmeyi öğrenerek çözüm uzayında arama yapan parçacıklar düşünülmüştür.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada doğa esinli optimizasyon algoritması olan parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritmasının lokal minimumlarda takılmasını önleyerek daha iyi çözümler elde etmesini sağlayan pekiştirmeli öğrenme stratejisine dayanan bir model geliştirilmiştir. Pekiştirmeli öğrenme algoritması olarak Derin Q Ağları (DQN) kullanılmıştır. Bu bölümde PSO ve DQN algoritmaları incelendikten sonra önerilen model hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir.

2.1 Parçacık sürü optimizasyonu (PSO)

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), çok sayıda karmaşık optimizasyon problemini çözmek için kullanılan güçlü bir metasezgisel algoritmadır. Algoritmada çözüm uzayı kuş sürüsü, her bir kuş (parçacık) da olası çözümleri temsil etmektedir. Daha yüksek parçacık sayısı, daha iyi sonuçlar elde edilmesine yardımcı olabilmekte, ancak hesaplama maliyeti de bununla birlikte artmaktadır.

Parçacıkların çözüme ne kadar yakın olduklarını bulmak için uygunluk fonksiyonu kullanılmaktadır. Her iterasyonda tüm parçacıkların uygunluk değeri hesaplanmaktadır. Bir parçacığın çözüme en yakın olduğu konum kişisel en iyi değer (pbest), tüm parçacıklar arasında çözüme en yakın olunan konum ise global en iyi değer (gbest) olarak adlandırılır. Sürüdeki her parçacık, mevcut konum ve hız bilgisi ile çözüme en yakın olduğu konum olan pbest bilgisine sahiptir. Parçacıkların yeni konumları hesaplanırken mevcut konumlarıyla birlikte pbest ve gbest değerleri de kullanılmaktadır.

Standart PSO algoritmasında tüm sürü başlangıçta arama uzayında keşif yapmaktadır. Arama işleminin sonuna doğru yakınsama durumuna geçilir. PSO algoritmasının başarısında, başlangıç popülasyonunun çeşitliliği algoritma başarımında oldukça etkilidir. Parçacıkların hızları Denklem 1’de belirtilen formülle ve konumları ise Denklem 2’de belirtilen formül ile hesaplanmaktadır:

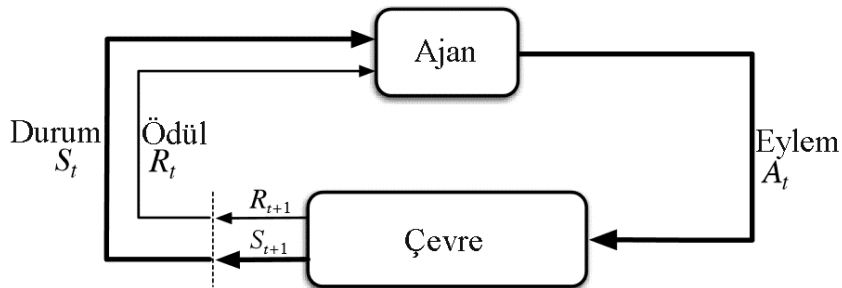
$$v_{ij}(t+1) = w \times v_{ij}(t) + c_1 \times rand \times (p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 \times rand \times (p_{gj}(t) - x_{ij}(t)) \quad (1)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (2)$$

Eşitlik 1’de v_{ij} , i parçacığının j boyutundaki hız değeridir. w eylemsizlik ağırlığıdır. PSO’da eylemsizlik ağırlığı global ve yerel arama arasındaki dengeyi sağlamak için kullanılmaktadır. Eylemsizlik ağırlığı büyük bir değer olduğunda global arama, küçük bir değer olduğunda ise yerel arama yapılması kolaylaşmaktadır. Eylemsizlik ağırlığı ile yerel ve global arama yeteneği ayarlanabilmektedir. C1 ve c2 ivme katsayıları [0,1] aralığında rasgele bir sayıdır. C1 ile parçacıkların kişisel en iyi çözümlerden, c2 ile ise global en iyi çözümden etkilenme düzeyi ayarlanmaktadır. x_{ij} i parçacığının j boyutundaki pozisyonu, p_{ij} i parçacığının j boyutunda şimdiye kadar elde ettiği en iyi değer, p_{gj} ise tüm popülasyonda, j boyutunda elde edilen en iyi değerdir. Bir sonraki adım için hesaplanan hız değeri parametreleri, önceden belirlenmiş olan $[-Vmax, Vmax]$ sınırları içinde tutulmalıdır. Sınırlama işlemi, arama sırasında belirlenen limitlerin aşılmaması ve küresel aramanın kontrolden çıkması için gereklidir.

2.2 Derin q ağırları

Yapay zekâ, bilgisayar sistemlerinin insanların yaptığı zekâsal işlemleri gerçekleştirmek üzere tasarlanmasıdır. Bu amaca yönelik olarak kullanılan bir yöntem olan makine öğrenimi, bilgisayar sistemlerinin verilerden öğrenerek deneyimlerini geliştirmesine olanak sağlamaktadır. Pekiştirmeli öğrenme, makine öğrenimi türlerinden biridir. Bu yöntemde, ajan adı verilen öğrenen makine çevreyle etkileşimde bulunarak belirli eylemler gerçekleştirmektedir ve bu eylemler sonucunda (negatif ya da pozitif) ödüller almaktadır. Diğer makine öğrenimi yöntemlerinden farklı olarak, ajana doğrudan hangi eylemleri yapması gerektiği söylenmemektedir. Bunun yerine, ajanın deneme yanılma yoluyla hangi eylemlerin en fazla ödül getirdiğini öğrenmesi beklenmektedir [20]. Şekil 1’de standart bir pekiştirmeli öğrenme mimarisi gösterilmektedir.



Şekil 1. Pekiştirmeli öğrenme çerçevesi.

Pekiştirmeli öğrenme algoritmalarının bir türü olan Derin Q Ağları (DQN), pekiştirmeli öğrenmede kullanılan bir yapay sinir ağı mimarisidir ve Q-öğrenme algoritmasına dayanmaktadır. Q-öğrenme algoritmasında ajan, ödüle giderken her iterasyonda edindiği tecrübeleri toplamda elde edebileceği ödül (kümülatif ödül) en çoklamak için kullanmaktadır. Bu tecrübeleri Q-tablosu adı verilen bir tabloda tutmaktadır. Q-tablosu, başlangıçta ajanın hiçbir tecrübesi olmadığı için sıfırlarla doludur ve bu yüzden ajan ilk seçimlerinde rastgele hareket etmektedir. Ajan bir ödül elde ettiğinde onu ödüle ulaştırın adımları bilmekte ve elde ettiği tecrübeleri Q-tablosuna yazmaktadır. Q-tablosu, ajanın ortamdaki her durum için en iyi eylemi bulmasına yardımcı olmaktadır. Temel olarak, bir Q-tablosu durum ve eylem çiftlerini bir Q değerine eşlemek için kullanılmaktadır. Q-tablosunu güncellemek için Bellman eşitliğinden yararlanılmaktadır [21].

Q-öğrenme algoritmasında;

$S = [s_1, s_2, \dots, s_n]$ durumlar kümesi,

$A = [a_1, a_2, \dots, a_n]$ ajanın yürütebileceği eylemlerin kümesi,

r_{t+1} , a eyleminin yürütülmesinden elde edilen anlık ödül,

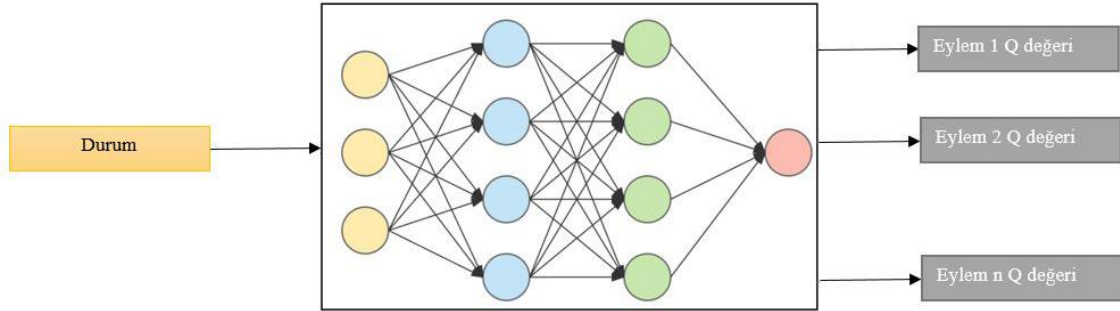
γ , $[0,1]$ aralığında değer alan indirim faktörü,

α , $[0,1]$ aralığında değer alan öğrenme oranı

olmak üzere $Q(s_t, a_t)$, ajanın t zamanda kazandığı toplam kümülatif ödüldür ve Denklem 3 ile hesaplanmaktadır:

$$Q_{yeni}(s_t, a_t) = Q(s_t, a_t) + \alpha[r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)] \quad (3)$$

Derin Q ağları (DQN), pekiştirmeli öğrenme alanında oldukça popüler bir tekniktir. DQN, pekiştirmeli öğrenme ajanlarının hızlı bir şekilde karar vermelerini sağlayan bir derin öğrenme yaklaşımdır. DQN'ler, Q değerlerini tahmin etmek için bir yapay sinir ağı kullanmaktadır. Şekil 2'de gösterildiği gibi DQN'lerde, yapay sinir ağına bir durum (gözlem) verilir ve ağ, her bir eylem için bir Q değeri üretir. DQN'lerde, bir ajanın bir ortamda en iyi eylemi seçmesine yardımcı olmak için bu Q değerleri kullanılmaktadır.



Şekil 2. Derin q ağı yapısı.

Bir durumun Q değeri, Bellman Eşitliği kullanılarak o durumda alınabilecek eylemler ve sonraki durumlardaki Q değerleri ile ilişkilendirilmektedir. Q değerini hesaplamak için Q değer fonksiyonu kullanılmaktadır. Daha sonra, ajan, verilen bir durumda, elde edebileceği en yüksek Q değerine sahip eylemi seçmektedir. Ajan, bu eylemi gerçekleştirerek ödül kazanmakta ve yeni bir duruma geçmektedir. Bu süreç, ajanın çevreyi keşfederek ve öğrenerek daha yüksek ödüller kazanmasını sağlamaktadır. Ödüller, ajanın yaptığı eylemlerin doğru veya yanlış olduğunu belirlemek için kullanılmaktadır. Ajan, doğru bir eylem gerçekleştirdiğinde pozitif bir ödül alırken, yanlış bir eylem gerçekleştirdiğinde ise negatif bir ödül almaktadır. Bu ödüller, ajanın optimal eylem seçimini öğrenmesini sağlamaktadır.

DQN'ler, bir ajanın bir ortamda hedeflenen bir davranışı öğrenmesine izin vermek için kullanılabilir. Bu, özellikle oyun oynama, robotik ve otonom sürüş gibi alanlarda yaygın bir kullanım alanıdır. DQN'lerin en büyük avantajlarından biri, çevreye doğrudan müdahale etmeden öğrenme yapabilme yeteneğidir. Bu, ajanın gerçek dünyada öğrenmesini sağlamadan önce simüle edilmiş bir ortamda eğitilebileceği anlamına gelmektedir. DQN'ler, öğrenme sürecinde birden fazla gözlem kullanarak eylem seçimini iyileştirebilir.

2.3 Önerilen model

Önerilen modelde ajanın gerçekleştirebileceği ayrıık olarak tanımlanan 5 farklı eylem bulunmaktadır. Her eylem farklı özelliklere sahip bir PSO algoritması şeklinde tanımlanmıştır. Bu eylemler literatürde PSO'nun performansını arttırmak için yapılmış çalışmalar incelenerek oluşturulmuştur [22-25]. Durum, PSO'lardan birinin çalıştırılması sonucunda hesaplanan global en iyi uygunluk değeri (Gbest değeri) olarak tanımlanmıştır.

Ajan bir eylem gerçekleştirdikten sonra uygunluk değeri hesaplanmaktadır. Ajanın alacağı ödül, uygunluk değerinin bir önceki uygunluk değerine göre daha iyi olup olmadığına bakılarak belirlenmektedir. Bu çalışmada kullanılan test fonksiyonları birer minimizasyon problemi olduğundan dolayı ödül/ceza işlevi Denklem 4'e uygun olarak tanımlanmıştır. Bu eşitlikte r ödül, $Gbest(t-1)$ bir önceki iterasyonda elde edilmiş global en iyi uygunluk değeri ve $Gbest(t)$ de mevcut iterasyonda elde edilmiş global en iyi uygunluk değeridir.

$$r = \begin{cases} 1, & Gbest(t) < Gbest(t-1) \\ -1, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (4)$$

Ajan, beklenen toplam ödülü maksimize etmeyi amaçlamaktadır. Derin Q ağlarında, ağa bir durum (gözlem) verilir ve ağ, her bir eylem için bir Q değeri üretir. Bu Q değerleri, bir durumda herhangi bir eylemin ne kadar iyi olabileceğini belirtmektedir. Daha sonra, ajan, verilen bir durumda, elde edebileceği en yüksek Q değerine sahip eylemi seçmektedir. Ajan, bu eylemi gerçekleştirerek ödül kazanmakta ve yeni bir duruma geçmektedir. Bu süreç, ajanın çevreyi keşfederek ve öğrenerek daha yüksek ödüller kazanmasını sağlamaktadır. Önerilen modelde Q değerlerini tahmin etmek için kullanılan yapay sinir ağı şu katmanları içermektedir:

- Giriş katmanı: Derin Q ağlarında, ağa giriş bilgisi olarak durum bilgisi verilmektedir. Önerilen modelde durum bilgisi, 5 ayrıık eylem olarak tanımlanan farklı türdeki PSO algoritmalarından birinin seçilip yürütülmesiyle elde edilen global en iyi uygunluk değeri (Gbest)'dir.
- Gizli katmanlar: İşlemleri gerçekleştiren katmanlardır. Modelde 24 nöronlu iki gizli katman bulunmaktadır. Aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU kullanılmıştır.
- Çıkış katmanı: Belli bir sayıda aksiyon olasılıklarını üretmektedir. Modelde çıktı katmanında doğrusal bir aktivasyon fonksiyonu kullanılmaktadır.

Önerilen modelde ajan, her biri farklı özelliklere sahip 5 farklı PSO algoritmasından birini eylem olarak seçmekte ve yürütmektedir. Eylemi gerçekleştirdikten sonra elde edilen uygunluk değeri DQN ağındaki durum olarak tanımlanmıştır. Algoritma aşağıda yer almaktadır:

Önerilen Algoritma

- PSO için başlangıç sürüsü, parçacıkların hızları ve pozisyonları oluşturulur.
- DQN algoritmasının adım metodu gereğince rasgele bir eylem seçilir, bu eylem yürütülür. Eylemin yürütülmesi sonucu elde edilen Gbest değeri durum olarak atanır ve ödül hesaplanır. Bu işlem belirlenen bölüm sayısı kadar tekrarlanır.
- Her bölümde skor, durum gibi parametreler başlangıç değerlerine göre ayarlanarak belirlenen iterasyon sayısı kadar eylem seçimi ve yürütülmesi gerçekleştirilir.
- Derin Q Ağı inşa edilir.
- Ajan, çevre üzerinde belirlenen adım sayısı kadar eğitilir.
- DQN ağının performansını değerlendirmek için test işlemi yapılır. Bu işlem belirlenen bölüm sayısı kadar tekrar edilir. Her bölümde elde edilen ödüller üzerinden ortalama bölüm ödülü, son çıktı olarak yazdırılır.

3. Bulgular

Önerilen algoritmanın performansını değerlendirebilmek için literatürde yaygın olarak kullanılan dokuz test fonksiyonu kullanılmıştır. Kullanılan test fonksiyonları optimum değerleri 0 olan minimizasyon problemleridir. Bu fonksiyonlardan 5 tanesi bir tane global minimumu olan tek modlu, 4 tanesi ise yine bir tane global minimumu

olan fakat çok sayıda yerel minimumlara sahip çok modlu fonksiyonlardır. Tablo 1’de kullanılan test fonksiyonlarının özellikleri verilmiştir. Tablo 2’de ise bu fonksiyonların matematiksel ifadeleri yer almaktadır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan test fonksiyonları.

Fonksiyon	Çözüm	Modu
F1: Sphere	-5.12, 5.12	Tek modlu
F2: Rosenbrock	-2.048, 2.048	Tek modlu
F3: Zakharov	-5.0, 5.0	Tek modlu
F4: Schwefel 2.21	-100.0, 100.0	Tek modlu
F5: Schwefel 2.22	-10.0, 10.0	Tek modlu
F6: Ackley	-32.768,	Çok modlu
F7: Rastrigin	-5.12, 5.12	Çok modlu
F8: Griewank	-600.0, 600.0	Çok modlu
F9: Weierstrass	-5.12, 5.12	Çok modlu

Tablo 2. Test fonksiyonlarının matematiksel ifadeleri.

Fonksiyon	Denklem
F1	$f(x) = \sum_{i=1}^d x_i^2$
F2	$f(x) = \sum_{i=1}^{d-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$
F3	$f(x) = \sum_{i=1}^d x_i^2 + \left(\sum_{i=1}^d 0.5ix_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^d 0.5ix_i \right)^4$
F4	$f(x) = \max\{ x_i , 1 \leq i \leq n\}$
F5	$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $
F6	$f(x) = -a \exp\left(-b \sqrt{\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \cos(cx_i)\right) + a + \exp(1)$
F7	$f(x) = 10d + \sum_{i=1}^d [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i)]$
F8	$f(x) = \sum_{i=1}^d \frac{x_i^2}{4000} + \prod_{i=1}^d \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$
F9	$f(x) = \sum_{n=1}^i \frac{\sin(\pi n^a x)}{\pi n^a}$

Önerilen model daha geniş bir sorun yelpazesine uygulanması olasılığını sağlayan ve daha yüksek boyutlu kıyaslamalar kullanılarak analiz edilmiştir. Bu amaçla dokuz test fonksiyonu kullanılmıştır. Testler, Intel(R) Core(TM) i5-6400 CPU @ 2.70GHz işlemci ve 8 GB RAM donanımına sahip Windows 10 Pro işletim sistemine sahip masaüstü bilgisayar ile gerçekleştirilmiştir. Proje kodları Python programlama dili ile yazılmıştır.

Her ne kadar 1995 yılında önerilen ilk PSO’da popülasyon sayısı 20-50 parçacık olarak söylenmişse de Piotrowski vd. [26] yaptıkları çalışmada test ettikleri gerçek dünya problemleri için 50-300 arası parçacığın, kıyaslama problemleri için ise 70-500 arası parçacığın güvenli bir seçim olduğunu belirtmiştir. Bu çalışma dikkate alınarak popülasyon sayısı n=100 olarak belirlenmiştir. Ancak daha küçük boyutlu bir sürüde önerilen yöntemin performansını araştırmak için popülasyon sayısı yarıya indirilerek testler tekrar edilmiştir. Derin ağdaki her bölümün uzunluğu PSO algoritmasının iterasyon sayısı kadardır. Derin ağın test edilmesi için ise bölüm sayısı 150 olarak seçilmiştir. Hem pekiştirmeli öğrenme hem de PSO için popülasyon sayısı ve problem boyutu dışındaki diğer tüm parametreler tüm deneylerde aynıdır.

Popülasyon sayısı n=100 ve problem boyutu d=50 olarak seçilerek yapılan testler sonucu elde edilen veriler incelendiğinde ortalama değerlerin optimum değer olan 0’a çok yakın olduğu görülmektedir. Farklı popülasyon sayısı ve farklı problem boyutları ile gerçekleştirilen testlerde birçok yerel minimuma sahip çok modlu bir kıyaslama problemi olan Griewank fonksiyonu için tüm test sonuçlarında optimum değer elde edilmiştir.

Popülasyon sayısı 100 ve problem boyutu 50 ve 100 parametreleri için elde edilen sonuçlar Tablo 3’te verilmiştir. Popülasyon sayısı 50 ve problem boyutu 50 ve 100 parametreleri için elde edilen sonuçlar ise Tablo 4’te verilmiştir. Elde edilen sonuçların kıyaslanabilmesi için bu çalışmada kullanılan tüm test fonksiyonları aynı parametre değerleriyle standart PSO kullanılarak da çalıştırılmıştır. Tablo 3 ve tablo 4 incelendiğinde önerilen model ile problem boyutunun 100 olduğu tüm testlerde daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Ayrıca çok modlu fonksiyonlar olan ackley, rastrigin, grienwank ve weierstrass fonksiyonlarında da hem 50 hem de 100 boyut ile yapılan testlerde standart PSO’dan daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Diğer testlerde ise başarıyı standart PSO’ya çok yakındır.

Tablo 3. Popülasyon sayısı 100 ve problem boyutu 50 ve 100 için elde edilen sonuçlar.

Fonk.		n = 100, d = 50				n = 100, d = 100			
		En Kötü	En İyi	Ort.	Std. Sapma	En Kötü	En İyi	Ort.	Std. Sapma
F1	DQN PSO	1,32E-78	3,10E-134	2,19E-79	5,88E-79	1,31E-57	1,62E-187	2,29E-58	5,31E-58
	STD PSO	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,24E+01	0,00E+00	1,75E+01	2,14E+01
F2	DQN PSO	1,03E-20	9,62E-22	4,90E-21	3,91E-21	1,40E+02	4,60E-27	2,43E+01	3,97E+01
	STD PSO	3,99E+00	3,61E-08	7,04E-01	1,61E+00	9,48E+02	1,89E+00	1,86E+02	3,75E+02
F3	DQN PSO	6,25E-09	4,53E-125	1,04E-09	2,55E-09	5,83E+02	2,42E-22	4,34E+01	1,25E+02
	STD PSO	2,43E+02	1,93E-107	1,15E+02	1,09E+02	9,49E+02	1,57E+02	5,11E+02	3,14E+02
F4	DQN PSO	3,08E-15	1,05E-92	5,18E-16	1,26E-15	9,37E-02	2,00E-04	1,68E-02	3,77E-02
	STD PSO	8,87E-22	5,90E-24	1,96E-22	3,45E-22	2,26E+01	8,88E+00	1,52E+01	4,42E+00
F5	DQN PSO	6,21E-36	4,83E-67	1,21E-36	2,48E-36	1,86E-31	9,17E-91	3,13E-32	7,60E-32
	STD PSO	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,10E+02	1,72E-139	8,86E+01	4,40E+01
F6	DQN PSO	7,55E-10	4,00E-15	2,52E-10	3,90E-10	7,55E-12	4,00E-15	1,27E-12	3,08E-12
	STD PSO	1,73E+00	1,47E-14	7,19E-01	8,21E-01	3,81E+00	2,60E+00	3,18E+00	4,99E-01
F7	DQN PSO	9,95E-01	0,00E+00	1,66E-01	4,06E-01	8,62E+02	0,00E+00	1,16E+02	1,92E+02
	STD PSO	2,45E+02	1,54E+02	1,97E+02	3,75E+01	6,08E+02	4,82E+02	5,26E+02	5,19E+01
F8	DQN PSO	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	STD PSO	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,10E+01	1,78E-15	3,65E+01	4,42E+01
F9	DQN PSO	4,35E+00	0,00E+00	1,22E+00	1,61E+00	7,21E+00	1,97E+00	4,39E+00	2,31E+00
	STD PSO	5,34E+01	2,59E+01	4,38E+01	1,05E+01	1,27E+02	1,03E+02	1,14E+02	8,22E+00

Tablo 4. Popülasyon sayısı 50 ve problem boyutu 50 ve 100 için elde edilen sonuçlar.

Fonk.		n = 50, d = 50				n = 50, d = 100			
		En Kötü	En İyi	Ort.	Std. Sapma	En Kötü	En İyi	Ort.	Std. Sapma
F1	DQN PSO	7,18E-53	4,94E-228	1,79E-53	3,59E-53	3,59E-36	6,72E-11	6,82E-37	1,44E-36
	STD PSO	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,24E+01	4,24E-21	2,62E+01	2,34E+01
F2	DQN PSO	3,72E+01	3,46E-27	4,33E+00	1,05E+01	9,49E+01	1,80E+01	4,57E+01	1,85E+01
	STD PSO	8,57E+00	1,34E-10	2,76E+00	3,45E+00	2,82E+03	2,45E+01	8,53E+02	5,88E+02
F3	DQN PSO	2,78E-11	4,05E-81	4,63E-12	1,13E-11	7,14E+02	4,19E-75	1,22E+02	1,65E+02
	STD PSO	2,52E+02	5,36E+01	1,67E+02	8,19E+01	2,07E+03	4,94E+02	1,07E+03	4,56E+02
F4	DQN PSO	1,76E-11	6,38E-14	6,51E-12	7,10E-12	2,12E-01	3,87E-02	1,11E-01	7,09E-02
	STD PSO	1,52E-12	1,40E-13	5,22E-13	5,46E-13	3,02E+01	1,80E+01	2,58E+01	5,33E+00
F5	DQN PSO	3,20E-26	2,28E-80	6,57E-27	1,26E-26	1,05E-27	1,09E-61	1,75E-28	4,29E-28
	STD PSO	1,10E+02	2,36E-268	3,67E+01	5,68E+01	2,20E+02	1,01E-83	1,10E+02	9,84E+01
F6	DQN PSO	1,47E-14	7,55E-15	9,92E-15	3,67E-15	2,89E-14	4,00E-15	1,76E-14	8,53E-15
	STD PSO	1,57E+01	1,08E+01	1,41E+01	1,74E+00	1,30E+01	1,27E+00	4,11E+00	4,39E+00
F7	DQN PSO	2,99E+02	0,00E+00	3,67E+01	8,85E+01	2,61E+02	2,27E-13	7,21E+01	7,21E+01
	STD PSO	3,14E+02	1,46E+02	2,28E+02	6,18E+01	6,28E+02	4,47E+02	5,47E+02	4,89E+01
F8	DQN PSO	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	STD PSO	8,79E-01	0,00E+00	1,80E-01	3,44E-01	2,71E+02	1,29E-14	9,05E+01	9,89E+01
F9	DQN PSO	3,94E+00	0,00E+00	2,13E+00	1,58E+00	1,54E+01	4,26E+00	8,30E+00	3,92E+00
	STD PSO	5,79E+01	1,61E+01	4,66E+01	1,54E+01	1,29E+02	1,09E+02	1,18E+02	7,32E+00

4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada parçacık sürü optimizasyonu ile derin pekiştirmeli öğrenme yöntemlerini birlikte kullanan bir model önerilmiştir. Önerilen model 50 ve 100 boyutlu 5 tane tek modlu ve 4 tane de çok modlu test fonksiyonu kullanılarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar modelin yakınsama ve küresel keşif yetenekleri açısından başarımının oldukça iyi olduğunu göstermektedir.

Plevris ve Solorzano [27] yaptıkları çalışmada kıyaslama amacıyla kullanılacak otuz test fonksiyonunun genetik algoritma, parçacık sürü optimizasyonu ve sıralı kuadratik programlama ile farklı boyutlar için çözümünü sağlamışlardır. Bu çalışmada yer alan test fonksiyonlarının 50 boyut için PSO ile çözümünde popülasyon sayısı 500 seçilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında önerilen modelin oldukça umut verici olduğu görülmektedir.

Derin pekiştirmeli öğrenme algoritmaları ve parçacık sürü optimizasyonu, keşif yeteneklerini bir araya getirerek çeşitli problemlerin üstesinden gelmek için güçlü bir yöntem sunmaktadır. Derin pekiştirmeli öğrenme modelleri ile metasezgisel algoritmaların keşif yeteneklerinin iyileştirilmesinin pek çok problemin üstesinden gelmek için güçlü bir yöntem olduğu görülmektedir. Derin pekiştirmeli öğrenme, çevreyi keşfetmek ve öğrenmek için kullanılırken, parçacık sürü optimizasyonu parçacıkların deneme-yanılma yöntemiyle arama alanını keşfetmelerine yardımcı olmaktadır. Bu iki yöntemin kombinasyonu daha geniş bir çözüm uzayında etkili bir şekilde gezinmeyi sağlamak için büyük bir potansiyel oluşturmaktadır.

Bu çalışmada görülmüştür ki parçacıkların problemin çözüm uzayında çözüme doğru hızlı bir şekilde ilerlemesi için yapacakları ve ajan tarafından seçilen eylemlerin belirlenmesi çok önemlidir. Parçacıkların lokal minimumlar gibi problemler alanları hızla atlayarak çözüme ilerlemesini sağlayacak şekilde eylemlerin tanımlanabilmesi, önerilen yöntemin pek çok problem için genelleştirilebilmesini ve geniş çözüm uzaylarında iyi çözümler elde edilebilmesini sağlayacaktır.

İlerleyen çalışmalarda literatürdeki güncel PSO varyantları incelenerek eylem uzayının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca modelin ayrık problemler ile gerçek dünya problemlerindeki başarısını ölçmek için çalışmalar yapılacaktır.

Kaynaklar

- [1] Calafiore G ve Ghaoui L E. Optimization Models. Cambridge University Press, 2014.
- [2] Seyyedabbasi A, Aliyev R, Kiani F, Gulle M U, Basyıldız H ve Shah M A. Hybrid Algorithms Based on Combining Reinforcement Learning and Metaheuristic Methods to Solve Global Optimization Problems. Knowledge-Based Systems 2021; 223: 1-20.
- [3] Kennedy J ve Eberhart R C. Particle Swarm Optimization. International Conference on Neural Networks; 1995; Perth, WA, Australia.
- [4] Xu G. An Adaptive Parameter Tuning of Particle Swarm Optimization Algorithm. Applied Mathematics and Computation 2013; 219(9): 4560-4569.
- [5] Zhang W, Ma D, Wei J ve Liang H. A Parameter Selection Strategy for Particle Swarm Optimization Based on Particle Positions. Expert Systems with Applications 2014; 41(7): 3576-3584.
- [6] Pedersen M ve Chipperfield A. Simplifying Particle Swarm Optimization. Applied Soft Computing 2010; 10(2): 618-628.
- [7] Garg H. A Hybrid PSO-GA Algorithm for Constrained Optimization Problems. Applied Mathematics and Computation 2016; 274: 292-305.
- [8] Kamboj V K. A Novel Hybrid PSO-GWO Approach for Unit Commitment Problem. Neural Computing and Applications 2016; 27: 1643-1655.
- [9] F. A. Şenel, F. Gökçe, A. S. Yüksel ve T. Yiğit, «A Novel Hybrid PSO-GWO Algorithm for Optimization Problems,» Engineering with Computers , cilt 35, pp. 1359-1373, 2018.
- [10] Premalatha K ve Natarajan A. Hybrid PSO and GA for Global Maximization. International Journal of Open Problems in Computer Science and Mathematics 2009; 2(4): 597-608.
- [11] Chegini S N, Bagheri A ve Najafi F. PSOSCALF: A New Hybrid PSO Based on Sine Cosine Algorithm and Levy Flight for Solving Optimization Problems. Applied Soft Computing 2018; 73: 697-726.
- [12] Hayat I, Tariq A, Shahzad W, Masud M, Ahmed S, Ali M U ve Zafar A. Hybridization of Particle Swarm Optimization with Variable Neighborhood Search and Simulated Annealing for Improved Handling of the Permutation Flow-Shop Scheduling Problem. Systems 2023; 11(5): 1-17.
- [13] Khaloo A ve Amirahmadi A. Performance Assessment of Steel Cantilever Beams Based on Connection Behaviour Using DIC Technique and Improved Hybrid PSO Algorithm. Structural Health Monitoring 2023.
- [14] Sutton R S ve Barto A G. Reinforcement Learning: An Introduction. Londra: The MIT Press, 2015.
- [15] Yin S, Jin M, Lu H, Gong G, Mao W, Chen G ve Li W. Reinforcement-learning-based Parameter Adaptation Method for Particle Swarm Optimization. Complex & Intelligent Systems 2023.
- [16] Meng X, Li H ve Chen A. Multi-strategy Self-learning Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Reinforcement Learning. Mathematical Biosciences and Engineering 2023; 20(5): 8498-8530.
- [17] Wang F, Wang X ve Sun S. A Reinforcement Learning Level-based Particle Swarm Optimization Algorithm for Large-scale Optimization. Information Sciences 2022; 602: 298-312.
- [18] Lu L, Zheng H, Jie J, Zhang M ve Dai R. Reinforcement Learning-based Particle Swarm Optimization for Sewage Treatment Control. Complex & Intelligent Systems 2021; 7: 2199-2210.
- [19] Wu D ve Wang G G. Employing Reinforcement Learning to Enhance Particle Swarm Optimization Methods. Engineering Optimization 2022; 54(2): 329-348.
- [20] Liu W ve Wang X. Dynamic Decision Model in Evolutionary Games Based on Reinforcement Learning. Systems Engineering - Theory & Practice 2009; 29(3): 28-33.
- [21] Zai A ve Brown B. Deep Reinforcement Learning in Action. Manning, 2020.
- [22] Abeyrathna K D ve Jeenanunta C. Escape Local Minima with Improved Particle Swarm Optimization Algorithm. In Norsk IKT-konferanse for Forskning Og Utdanning; 2019.
- [23] Çomak E. A Particle Swarm Optimizer with Modified Velocity Update and Adaptive Diversity Regulation. Expert Systems 2018; 36(1).
- [24] Freitas D, Lopes L G ve Morgado-Dias F. Particle Swarm Optimisation: A Historical Review Up to the Current Developments. Entropy 2020; 22(3).
- [25] He Y, Ma W J ve Zhang J P. The Parameters Selection of PSO Algorithm influencing on Performance of Fault Diagnosis. MATEC Web of Conferences; 2016; Amsterdam, Netherlands.
- [26] Piotrowski A P, Napiorkowski J J ve Piotrowska A E. Population size in Particle Swarm Optimization. Swarm and Evolutionary Computation 2020; 58.
- [27] Plevris V ve Solorzano G. A Collection of 30 Multidimensional Functions for Global Optimization Benchmarking. Data 2022; 7(4).

KOBİ'lerin Ekonomiye Sağladıkları Katkının Tahmini İçin Derin Öğrenme Tabanlı Model

Anıl UTKU^{1*}, Ali SEVİNÇ², M. Ali AKCAYOL³

¹ Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Munzur Üniversitesi, Tunceli, Türkiye

² Türkiye Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeleri Geliştirme ve Destekleme İdaresi, Ankara, Türkiye

³ Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

*¹ anilutku@munzur.edu.tr, ² alisevinc71@gmail.com, ³ akcayol@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 10/08/2023;

Kabul/Accepted: 30/08/2023)

Öz: Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletme (KOBİ)'ler, sermayesi, işgücü ve varlıkları, ulusal yönetmeliklere göre belirlenen eşik değerlerin altında olan özel sektör işletmeleridir. KOBİ'ler, özellikle gelişmekte olan ülkelerde olmak üzere dünyadaki çoğu ülkenin ekonomisinde önemli rol oynamaktadır. Dünya genelinde işletmelerin yaklaşık %90'ını oluşturan KOBİ'ler, istihdamın %50'sinden fazlasını sağlamaktadır. Ülke ölçeğinde KOBİ'lerin ekonomiye katkılarının tahin edilmesi planlama ve yatırım açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, KOBİ'lerin ekonomiye sağladıkları katkının tahminine yönelik derin öğrenme tabanlı bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen LSTM tabanlı derin öğrenme modelinin sonuçları, RF, SVM, CNN, MLP, RNN ve GRU ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, geliştirilen derin öğrenme modelinin 2,169 MSE, 1,473 RMSE, 1,175 MAE ve 0,959 R² değeri ile karşılaştırılan diğer modellerden daha başarılı tahmin performansına sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: KOBİ, ÇKKV, OCRA, ekonomi, derin öğrenme, makine öğrenmesi.

Deep Learning Based Model for Predicting the Contribution of SMEs to the Economy

Abstract: Small and Medium-sized Enterprises (SMEs) are private sector enterprises whose capital, workforce and assets are below the thresholds determined according to national regulations. SMEs play an important role in the economy of most countries in the world, especially in developing countries. SMEs, which make up approximately 90% of enterprises worldwide, provide more than 50% of employment. Estimating the contribution of SMEs to the economy at the country level is very important in terms of planning and investment. In this study, a deep learning-based model was developed to predict the contribution of SMEs to the economy. The developed LSTM-based deep learning model was compared with RF, SVM, CNN, GRU, MLP and RNN. Experimental results showed that the developed model had a better prediction performance than other models compared with 2.169 MSE, 1.473 RMSE, 1.175 MAE, and 0.959 R² values.

Key words: SME, MCDM, OCRA, economy, deep learning, machine learning.

1. Giriş

Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletme (KOBİ), gelirleri, varlıkları veya çalışan sayıları belirli bir eşğin altında olan işletmelerdir [1]. Her ülkenin kendi küçük ve orta ölçekli işletme tanımı vardır. Ülkeler, küçük bir işletmenin ne olduğunu tanımlamak için sektörler arasında farklı yönergeler belirler. KOBİ'ler dünya çapında faaliyet gösteren işletmelerin çoğunluğunu oluşturmaktadır. Genellikle 50'den az çalışanı olan bağımsız firmalardır [2]. Ancak, maksimum çalışan sayısı ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir. Çoğu şirket için üst limit 250 civarındadır. Bazı ülkeler toplam çalışan sayısını 200 olarak kabul etmektedir [3].

Türkiye'de KOBİ'ler, çeşitli kriterlere göre tanımlanmış olan işletmelerdir. Türkiye'deki KOBİ tanımı genellikle işletmelerin çalışan sayısı, yıllık net satış hasılatı veya aktif büyüklüğü gibi ölçütlere dayanmaktadır. Türkiye'deki KOBİ tanımı, 2005 yılında yürürlüğe giren küçük ve orta büyüklükteki işletmelerin tanımı ve sınıflandırılması hakkında yönetmeliğe dayanmaktadır. Bu yönetmelik çerçevesinde, Türkiye'de KOBİ'ler mikro işletmeler, küçük işletmeler ve orta büyüklükte işletmeler olarak tanımlanır. Mikro işletmeler, 0-9 arası çalışanı olan ve yıllık net satış hasılatı veya mali bilanço toplamı 3.500.000 TL'yi aşmayan işletmeler. Küçük işletmeler, 10-49 arası çalışanı olan ve yıllık net satış hasılatı veya mali bilanço toplamı 50.000.000 TL'yi aşmayan işletmelerdir. Orta büyüklükteki işletmeler ise 50-249 arası çalışanı olan ve yıllık net satış hasılatı veya mali bilanço toplamı 125.000.000 TL'yi aşmayan işletmelerdir. Bu tanımlar, işletmelerin büyüklüklerine göre

* Sorumlu yazar: anilutku@munzur.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-7240-8713, ² 0000-0002-3421-2357, ³ 0000-0002-6615-1237

sınıflandırılmasında temel kriterleri belirler. Bu sınıflandırma, Türkiye'de KOBİ'lere yönelik destek politikalarının belirlenmesi ve uygulanmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Değişen ekonomik manzara ve işletmelerin başarılı olmak için ihtiyaç duyduğu artan hız, KOBİ'ler için verimli bir zemin sağlamaktadır. Küçük boyutun rekabet avantajı da vardır. Birimler ve yönetim arasında doğrudan iletişim söz konusu olduğu için KOBİ'ler acil durumlara daha etkin ve hızlı tepki vermektedir [4]. Değişken koşullara ayak uydurmak veya pazardaki mevcut fırsatlardan yararlanmak için iş modellerinin değişmesi gerektiğinde, KOBİ'ler yeni veya revize edilmiş bir iş modelini uygulamak için daha iyi konumlandırılma eğilimindedir [5].

KOBİ'ler, çok sayıda insanı istihdam ederek ve inovasyonu şekillendirmeye yardımcı olarak ekonomide önemli bir rol oynar [6]. KOBİ'ler, sayıca büyük firmalardan fazla oldukları için çok sayıda çalışana istihdam ederler ve genellikle doğaları gereği girişimcidirler [7]. KOBİ'ler temelde farklı şekilde faaliyet gösterdikleri için büyük ve çok uluslu şirketlerden ayrılmıştır [8]. Büyük ve karmaşık firmalar muhasebe, tedarik zinciri yönetimi, finansal raporlama ve dünya çapındaki ofisler arasında bağlantı için gelişmiş kurumsal kaynak planlama sistemlerine veya daha derin organizasyonel süreçlere ihtiyaç duyabilir [9]. Ancak KOBİ'ler, faaliyet kapsamlarının dar olması nedeniyle daha az sisteme ihtiyaç duymaktadır.

KOBİ'lerin ülke ekonomisi üzerindeki büyük ekonomik etkilerini gösteren çok sayıda veri bulunmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'ne özgü olarak, KOBİ'ler çeşitli şekillerde katkıda bulunarak ülke ekonomisinin başarısında önemli bir rol oynamaktadır. KOBİ'ler, ABD'deki tüm firmaların %99'undan fazlasını oluşturmaktadır. KOBİ'ler tüm ABD gayri safi yurt içi hasılabın %43,5'ine katkıda bulunur [10]. Tüm ABD özel bordrosunun %39,7'sini KOBİ'ler ödemektedir. Ayrıca KOBİ'ler, büyük işletmelere kıyasla 1995'ten 2020'ye kadar ABD'de 4,8 milyon yeni iş imkânı yaratmıştır [11].

KOBİ'lerin büyük şirketlere göre belirgin avantajları vardır. KOBİ'ler genellikle daha güçlü bir topluluk duygusu kazandırır [12]. Yerel üreticilerin desteklenmesi konusundaki yönlendirmeler, ülke genelinde şubesi olmayan KOBİ'leri desteklemeye yöneliktir. KOBİ'lerin kendi topluluklarını finansal olarak destekleme olasılığı daha yüksektir. Gelir toplamak ve ülke çapında yeni bir mağazaya yatırım yapmak yerine, KOBİ'lerin yerel kalması, yerel işi sürdürmesi, yerel olarak vergi ödemelerine katkıda bulunması ve yakındaki tedarikçilerden satın alması daha olasıdır [13]. Ayrıca, KOBİ'lerin aile geleneğini taşıması ve aile mesleğini nesilden nesile aktarması daha olasıdır.

KOBİ'ler, büyük işletmelere göre doğrudan belirli bir odağa sahip olabilir. Sınırlı personele sahip olan KOBİ'ler, sundukları hizmetlerin de kapsamını sınırlamak zorundadır [14]. Geniş bir pazar hakimiyetine sahip olmaya çalışmak yerine, başarılı KOBİ'ler genellikle kendilerini daha küçük bir hedef pazara derinlemesine entegre ederler.

Birçok teknolojik süreç ve yenilik, esnekliği ve yeniliği desteklemeleri nedeniyle KOBİ'lere atfedilir [15]. KOBİ'ler başarılı olmak için yeni ürün veya hizmetler oluşturmaya odaklanır. Bu nedenle, pazarın değişen gereksinimlerine daha hızlı uyum sağlama yeteneğine sahiptirler [16]. KOBİ'ler ülke ekonomisinin şekillenmesinde hayati bir rol oynamaktadır. KOBİ'ler, sosyal ve ekonomik açıdan faydalı etkileri nedeniyle ekonomi açısından oldukça önemli olarak kabul edilmektedir [17].

KOBİ'ler ürün tasarımı, fiyatlar ve verimlilik için rekabeti teşvik eder. KOBİ'ler olmasaydı, büyük işletmeler hemen hemen tüm faaliyet alanlarında tekel olurlardı [18]. KOBİ'ler büyük şirketlere, daha iyi tedarik edebildikleri bazı faaliyet alanlarında yardımcı olur. Büyük işletmelerin yarattığı hammadde temini ve mamulün dağıtımını gibi faaliyetler KOBİ'ler tarafından daha verimli bir şekilde geliştirilmektedir [19].

Yapay zekâ, en basit haliyle, bilgisayar bilimi ile veri kümelerini birleştirerek problem çözmeye olanak sağlayan bir araştırma alanıdır [20]. Yapay zekâ, sıklıkla birlikte anılan makine öğrenmesi ve derin öğrenmenin alt alanlarını da kapsar. Bu disiplinler, girdi verilerine dayalı olarak tahminler veya sınıflandırmalar yapan uzman sistemler yaratmaya çalışan yapay zekâ algoritmalarından oluşur [21]. Yapay zekâ, iş uygulamalarını ve koşullarını kökten değiştirerek yeni bir üretim devrimini tetiklemektedir. Yapay zekâ, hayatımızda ve ekonomimizde giderek daha önemli bir rol oynamaktadır. Yapay zekâ, üretkenlik ve ekonomik büyümenin önemli bir faktörü olarak değerlendirilmektedir [22]. İş verimliliğini artırarak ve büyük miktarda veriyi analiz ederek karar verme sürecini büyük ölçüde iyileştirebilir. Aynı zamanda yeni ürün ve hizmetlerin, pazarların ve endüstrilerin yaratılmasını sağlayabilir. Böylece tüketici talebini artırabilir ve yeni gelir akışları yaratabilir.

Bu çalışmada, KOBİ'lerin ekonomiye sağladıkları katkının tahminine yönelik derin öğrenme tabanlı karşılaştırmalı bir analiz sunuldu. Bu çalışmanın literatüre olan katkıları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Synthetic Minority Over-sampling TEchnique for Time Series (SMOTE-TS) kullanılarak KOBİ verileri üzerinde veri arttırma işlemi gerçekleştirilmiştir.
- Geliştirilen Long-Short Term Memory (LSTM) tabanlı model, Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), Convolutional Neural Network (CNN), Multi-Layer Perceptron (MLP), Recurrent Neural Network (RNN) ve Gated Recurrent Unit (GRU) ile uygulamalı olarak karşılaştırılmıştır.
- Deneysel sonuçlar, geliştirilen LSTM tabanlı modelin, karşılaştırılan modellere göre daha başarılı olduğunu ve 0,959 R Squared (R^2) değeri ile KOBİ'lerin ekonomiye sağladıkları katkının tahmininde etkili bir tahmin performansına sahip olduğunu göstermiştir.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 1.1'de KOBİ'lerin mali durumlarına yönelik yapılmış literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Bölüm 2'de veriseti, veri boyutunun arttırılması, kullanılan yöntemler, geliştirilen LSTM tabanlı tahmin modeli ve değerlendirme metrikleri sunulmuştur. Bölüm 3'te deneysel sonuçlar ve Bölüm 4'te çalışmanın sonuçları sunulmuştur.

1.1. Literatürdeki çalışmalar

Bu bölümde, KOBİ'lerin mali durumlarına yönelik yapılmış literatürdeki yapay zekâ tabanlı çalışmalar incelenmiştir. Zhu ve ark. [23], KOBİ'lerin kredi riskini tahmin etme doğruluğunu arttırmak için Random Subspace (RS) ve MultiBoosting yöntemlerinin hibrit bir yaklaşımını sunmuştur. Geliştirilen model temel sınıflandırıcı olarak Decision Trees (DT) kullanılmaktadır. 31 Mart 2014 ile 31 Aralık 2015 tarihleri arasında Çin menkul kıymetler piyasasından elde edilen 46 KOBİ'ye ait veriler kullanılmıştır. Geliştirilen hibrit model, DT, RS ve MultiBoosting ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, geliştirilen modelin klasik yöntemlere göre daha başarılı olduğunu göstermiştir. Malakauskas ve Lakstutiene [24], KOBİ'lerin mali sıkıntı tahminlerine yönelik Lojistik Regresyon (LR), Yapay Sinir Ağları (YSA) ve RF algoritmalarının karşılaştırmalı bir analizini sunmuştur. Çalışmada, 12.000 KOBİ'ye ilişkin bir veriseti kullanılmıştır. Kısa dönemlik tahminler elde etmek için klasik mali oranlar kullanılarak zaman, kredi geçmişi ve yaş gibi faktörler kullanılarak geliştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, RF'nin 0,68 AUC değeri ile karşılaştırılan diğer algoritmalarından daha başarılı olduğunu göstermiştir. Schalck ve Yankol- Schalck [25], 2012-2018 tarih aralığındaki hem finansal hem de finansal olmayan değişkenleri içeren bir Fransız KOBİ veriseti kullanarak, işletmelerin başarısızlık tahminine yönelik makine öğrenmesi tabanlı karşılaştırmalı bir analiz sunmuştur. Probit, LR ve XGBoost algoritmaları kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar, XGBoost'un karşılaştırılan diğer modellerden daha başarılı olduğunu göstermiştir. Hamal ve Şenvar [26], 2013-2017 yılları arasındaki 341 Türk KOBİ'sinin mali tablolarını değerlendiren mali muhasebe sahtekârlığını tespit etmeye yönelik makine öğrenmesi yöntemlerinin karşılaştırmalı bir analizini sunmuştur. Çalışmada, kredi veren bankalardan elde edilen 321 hileli ve 1384 hileli olmayan bir veriseti kullanılmıştır. Verisetindeki sınıf dengesizliği sorununu azaltmak için SMOTE-TS örnekleme tekniği kullanılmıştır. SVM, Naive Bayes (NB), YSA, k-Nearest Neighbour (kNN), RF, LR ve Bagging algoritmaları kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar, RF'nin 0,9374 doğruluk değeri ile karşılaştırılan diğer algoritmalarından daha başarılı olduğunu göstermiştir. Dang ve ark. [27], tedarik zinciri finans piyasasının riskini değerlendirmek ve kontrol etmek için derin öğrenme ve blockchain teknolojisinin bir uygulamasını sunmuştur. Çalışmada tedarik zinciri finansmanının olası kredi riskini tartışmak için tedarik zinciri finansmanının finansman modeli analiz edilmiştir. Potansiyel kredi riskini tahmin etmek için derin öğrenme teknolojisine dayalı tedarik zinciri finansmanının kredi değerlendirme modeli oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlar, tedarik zinciri finansmanının kredi değerlendirme modelinin, 0,989 R^2 değerine sahip olduğunu göstermiştir. Zhang ve ark. [28], KOBİ'lerin tedarik zinciri finansında karşılaştığı kredi riskini tahmin etmek için demografik ve davranışsal verilerin birleştirilmesi yaklaşımını ele almıştır. Çalışmada, KOBİ'lerin finansal risklerini önceden tahmin etmek amacıyla demografik veriler (örneğin, işletmenin büyüklüğü, sektörü) ile davranışsal verilerin birleştirilmesi amaçlanmıştır. Deneysel sonuçlar, demografik ve davranışsal verilerin birleştirilmiş haliyle elde edilen tahminlerin, yalnızca bir tür veriyi kullanarak yapılan tahminlere göre daha doğru ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Wang ve ark. [29] makine öğrenmesi tabanlı bir örnekleme stratejisi kullanarak KOBİ'lerin kredi riskini tahmin etmeyi amaçlamıştır. Araştırmada, gelişmiş tekniklerden yararlanarak kredi riski değerlendirmesinin doğruluğunu arttırmak ve kredi verme uygulamalarında etkili karar almayı desteklemek hedeflenmiştir. Çalışmada, çeşitli makine öğrenmesi algoritmalarını ve yeni bir örnekleme stratejisini içeren kapsamlı bir deneysel yaklaşım sunulmuştur. Deneysel sonuçlar, önerilen stratejinin KOBİ'lerin kredi riski tahminini önemli ölçüde iyileştirdiğini ve makine öğrenmesini tedarik zinciri finansmanı senaryolarına entegre etmenin etkinliğini arttırdığını göstermiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, KOBİ'lerin 2009-2020 yılları arasındaki girdi ve çıktı verileri, OCRA yöntemiyle analiz edilerek ölçeklendirilmiş girdi ve çıktı tercih indeksleri elde edilmiştir. Kullanılan verisetinin boyutunun küçük olması sebebiyle veri artırma yapılmıştır. Veri artırma, mevcut verilerden yapay olarak yeni veriler oluşturmak ve modelleri eğitmek için mevcut verilerin çeşitliliğini artırmak amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bu, eğitim verilerinin alt kümesine alana özgü teknikler uygulanarak yapılır. Bir modelin performansı büyük ölçüde veri setinin kalitesine ve miktarına bağlı olduğundan, sentetik olarak üretilmiş verilerin kullanılması model performansını bir dereceye kadar iyileştirmeye yardımcı olabilir. Bu çalışmada, SMOTE-TS kullanılarak veri artırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

2.1. Veriseti

Bu çalışmada, TÜİK tarafından sunulan KOBİ'lere ait 2009-2020 yılları arası KOBİ sayısı, çalışan sayısı, personel maliyeti, Ar-Ge personel sayısı, ithalat, ücretli çalışanlar, üretim değeri, Ar-Ge harcaması girdi olarak, çalışan başına katma değer, ciro, patent tescil sayısı, ihracat yapan firma sayısı, katma değer ve ihracat verileri çıktı olarak alınmış, OCRA yöntemiyle analiz edilerek yıllar itibarıyla KOBİ'lerin performansı çıkarılmıştır. Şekil 1'de başlangıç verileri görülmektedir.

Yıllar	GİRDİ							ÇIKTI		
	KOBİ Sayısı	Çalışan Sayısı	Personel Maliyeti	Ar-Ge Personel Sayısı	Ücretli Çalışanlar	Üretim Değeri	Ar-Ge Harcaması	Çalışan başına Katma Değer	Ciro	Katma Değer
2009	2 625 455	7 650 393	64 962 202 566	16 641	5 395 836	465 356 998 744	924 404 844	26 692	1 778 426 955 243	116 277 117 269
2010	2 672 039	8 166 318	75 991 830 081	19 835	5 876 773	540 723 435 199	1 025 526 508	27 932	2 112 659 543 883	131 034 641 414
2011	2 728 856	8 887 281	91 398 374 116	22 457	6 561 303	662 813 157 423	1 188 256 016	31 406	2 696 959 678 958	157 757 024 994
2012	2 790 414	9 611 341	112 737 324 611	24 694	7 235 170	739 849 779 020	1 498 544 285	32 185	3 085 709 571 460	179 777 982 622
2013	2 839 698	10 247 166	138 502 379 496	31 484	7 832 741	914 773 885 226	2 081 139 758	36 670	3 507 294 609 147	227 055 355 689
2014	2 879 135	10 656 150	160 189 351 828	32 016	8 214 645	1 037 155 491 103	2 432 629 035	39 199	4 050 287 669 093	257 645 563 569
2015	2 931 040	10 972 438	183 046 654 098	35 023	8 499 570	1 145 775 164 785	2 976 736 090	45 287	4 553 370 394 668	290 080 377 375
2016	2 970 195	10 958 884	225 227 731 584	35 676	8 465 953	1 269 622 945 039	3 601 159 760	52 380	4 993 452 936 812	337 130 117 688
2017	3 087 152	11 211 604	246 059 671 248	40 235	8 626 976	1 504 357 421 199	4 484 162 991	60 650	6 298 907 064 719	382 845 711 002
2018	3 153 299	11 839 063	313 098 086 847	55 518	9 224 286	2 159 669 898 071	7 402 358 628	75 492	7 824 109 454 569	540 842 352 981
2019	3 221 233	11 329 276	360 686 433 737	59 631	8 662 465	2 340 488 812 456	8 984 450 850	88 519	8 940 593 564 475	609 412 130 719
2020	3 295 995	11 488 623	358 772 345 422	67 108	8 763 184	2 577 707 022 698	11 471 510 034	103 517	10 574 801 801 024	682 237 645 726

Şekil 1. Başlangıç verileri

Şekil 2'de OCRA yöntemiyle analiz edilerek ölçeklendirilmiş girdi ve çıktı tercih indeksleri görülmektedir.

Yıllar	Ölçeklendirilmiş girdi tercih indeksi	Ölçeklendirilmiş çıktı tercih indeksi	Ölçeklendirilmemiş genel tercih indeksi	Ölçeklendirilmiş genel tercih indeksi	Ekonomiye katkısının yıllar itibarıyla sıralanması
2009	0,0687	0,0850	0,0501	0,0163	12
2010	0,0595	0,0972	0,0515	0,1567	10
2011	0,0466	0,0491	0,1189	0,0025	11
2012	0,0336	0,0349	0,1700	0,0013	7
2013	0,0222	0,0457	0,1156	0,0679	9
2014	0,0149	0,0698	0,1433	0,0847	8
2015	0,0092	0,1351	0,2050	0,1443	6
2016	0,0095	0,1613	0,2166	0,1707	5
2017	0,0050	0,2131	0,2393	0,2180	4
2018	0,0063	0,3401	0,3401	0,3339	3
2019	0,0029	0,3778	0,3778	0,3807	2
2020	0,0000	0,4524	0,4524	0,4524	1

Şekil 2. Ölçeklendirilmiş girdi ve çıktı tercih indeksleri

Kullanılan veriseti 12 yıl için ölçeklendirilmiş girdi ve çıktı tercih indeksleri, ölçeklendirilmemiş genel tercih indeksi, ölçeklendirilmiş genel tercih indeksi ve ekonomiye katkısının yıllar itibarıyla sıralanması öz niteliklerinden oluşmaktadır. Orijinal verisetindeki veri sayısının az olması sebebiyle SMOTE-TS kullanılarak tablo verileri üzerinde veri artırma yapılmıştır.

2.2. Veri boyutunun arttırılması

SMOTE, zaman serisi verilerindeki sınıf dengesizliğini ele almak için tasarlanmış bir örnekleme yöntemidir. SMOTE'un zaman serisi verilerine uyarlanmış bir versiyonudur ve özellikle zaman serisi sınıflandırma problemlerinde nadir sınıfları daha iyi temsil etmek için kullanılır. Zaman serisi verileri, her örnek zaman bileşeni içerdiği için geleneksel SMOTE'un işleyişini doğrudan uygulamak zor olabilir. SMOTE-TS, zaman serileri içindeki yapıyı ve ilişkileri dikkate alarak sentetik örnekler oluşturur.

SMOTE-TS yaklaşımında öncelikle her zaman serisi örneği için, en yakın komşuları zaman serisinin benzer bölgelerinde aranır. Bu, zaman serisi verisinin yapısını koruyarak benzer örneklerin seçilmesini sağlar. Seçilen örnekler arasında bir çekirdeklenme yapılır ve sentetik örnekler oluşturulur. Bu çekirdeklenme işlemi, zaman serisi özelinde gerçekleştirilir ve verinin içsel yapısını korur. Oluşturulan sentetik örnekler veri kümesine eklenir. Orijinal veriseti, 2009-2020 yılları arasındaki verilerden oluşmaktadır. SMOTE-TS kullanılarak toplam veriseti boyutu 20000'e çıkarılmıştır.

2.3. Kullanılan yöntemler

RF, belirli bir verisetinin çeşitli alt kümelerinde birçok karar ağacı işleten ve tahmin doğruluğunu artırmak için karar ağaçlarından elde edilen sonuçları oylama yöntemiyle değerlendiren bir denetimli öğrenme algoritmasıdır [30]. RF, tek bir karar ağacına güvenmek yerine, her bir karar ağacından sonuçları toplar ve tahminlerini çoğunluk oylarına dayalı olarak belirler. Karmaşık bir sorunu çözmek ve modelin performansını iyileştirmek için birden çok sınıflandırıcıyı birleştirme süreci olan topluluk öğrenme kavramına dayanır [31].

SVM, önceden tanımlanmış sınıflara, etiketlere veya çıktılara dayalı olarak veri noktaları arasındaki sınırları belirleyen optimum veri dönüşümleri gerçekleştirerek karmaşık sınıflandırma, regresyon ve aykırı değer algılama sorunlarını çözmek için kullanan bir makine öğrenmesi algoritmasıdır [32]. SVM algoritmasının amacı, veri noktalarını belirgin bir şekilde sınıflandıran N boyutlu bir uzayda bir hiper düzlem bulmaktır. Hiper-düzlemin boyutu, özelliklerin sayısına bağlıdır. En iyi hiper-düzlem, iki sınıf arasındaki en büyük ayrımı veya marjı ifade etmektedir [33].

CNN, girdi verilerinden özellikleri çıkarmak için evrimsel katmanlar kullanan ve yaygın olarak bilgisayarla görme problemlerinde uygulanan bir derin öğrenme modelidir [34]. CNN, giriş verilerinden özellikleri otomatik olarak çıkarmak için evrimsel katmanlarını kullanır. Girdi verileri, evrimsel katmanları tarafından filtreleme tabi tutulur ve üretilen özellik haritaları daha sonraki işlem katmanlarına aktarılır [35]. Evrimsel katmanlar, girdi verileri üzerinde filtreleme ve özellik çıkarma işlemini gerçekleştiren CNN'in yapı taşlarıdır. Filtreleme, özellikleri çıkarmak için bir görüntüyü bir filtre ile evrimsel işlemidir. Özellik çıkarma ise, görüntülerden örüntüleri veya özellikleri belirleme işlemidir. Hesaplama maliyetini düşürmek ve ağıın yeni girdilere genelleştirme kapasitesini artırmak için havuzlama katmanları kullanılır.

MLP, hem doğrusal olarak ayrılabilen hem de doğrusal olarak ayrılamayan verileri işleyebilen bir sinir ağıdır [36]. Bir katmandaki nöronları, bir sonraki katmana herhangi bir döngü olmadan ileri bir şekilde bağlayan, ileri beslemeli bir sinir ağı modelidir. MLP, verileri üç veya daha fazla katman aracılığıyla işleyen birbirine bağlı nöronlardan oluşur. MLP'nin temel yapısında, bir giriş katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve bir çıkış katmanı ile bir aktivasyon fonksiyonu bulunmaktadır [37].

RNN, önceki adımın çıktısının mevcut adıma girdi olarak beslendiği bir sinir ağı türüdür. RNN'in en önemli özelliği, bir dizi hakkında bazı bilgileri hatırlayan gizli durumudur [38]. Durum aynı zamanda hafıza durumu olarak da adlandırılır. Çıktıyı üretmek için tüm girdilerde veya gizli katmanlarda aynı görevi yerine getirdiği için her girdi için aynı parametreleri kullanır. Bu durum, diğer sinir ağlarının aksine parametrelerin karmaşıklığını azaltır [39].

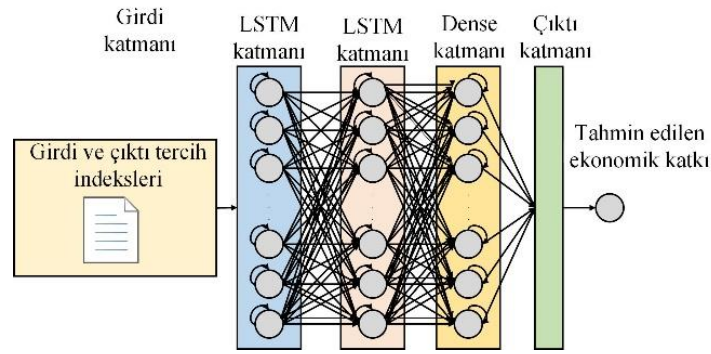
GRU, her zaman adımında ağıın gizli durumunu seçici olarak güncellemek için geçiş mekanizmalarını kullanan bir tekrarlı sinir ağı modelidir [40]. Geçiş mekanizmaları, ağa giren ve çıkan bilgi akışını kontrol etmek için kullanılır. GRU, sıfırlama kapısı ve güncelleme kapısı olarak adlandırılan iki kapı mekanizmasına sahiptir [41]. Sıfırlama kapısı, önceki gizli durumun ne kadarının unutulması gerektiğini belirlerken, güncelleme kapısı, gizli durumu güncellemek için yeni girişin ne kadarının kullanılmasını gerektiğini belirler. GRU'nun çıktısı, güncellenen gizli duruma göre hesaplanır.

LSTM, zaman serileri, ses ve metin gibi sıralı verileri işlemek için özel olarak tasarlanmış tekrarlı sinir ağı modelidir [42]. LSTM, sıralı verilerdeki uzun vadeli bağımlılıkları öğrenme yeteneğine sahiptir. Bu durum

LSTM'i dil çevirisi, konuşma tanıma ve zaman serisi tahmini gibi görevler için çok uygun hale getirir. Geleneksel bir RNN, ağır uzun vadeli bağımlılıkları öğrenmesini zorlaştırabilen, zaman içinde geçen tek bir gizli duruma sahiptir [43]. LSTM, bilgileri uzun süre tutabilen bir bellek hücresi sunarak bu sorunu çözer. Bellek hücresi giriş kapısı, unutma kapısı ve çıkış kapısı olmak üzere üç kapı tarafından kontrol edilir. Bu kapılar, bellek hücresine hangi bilgilerin ekleneceğine, çıkarılacağına ve buradan çıktı alınacağına karar verir. Giriş kapısı, bellek hücresine hangi bilgilerin eklendiğini kontrol eder. Unutma kapısı, bellek hücresinden hangi bilgilerin çıkarılacağını kontrol eder. Çıkış kapısı, bellek hücresinden hangi bilgilerin çıktığını kontrol eder. Bu durum, LSTM'in ağ üzerindeki bilgileri seçici olarak tutmasına veya atmasına izin vererek uzun vadeli bağımlılıkları öğrenmesine imkân sağlar [44].

2.4. Geliştirilen LSTM tabanlı tahmin modeli

Geliştirilen LSTM tabanlı tahmin modeli, girdi katmanı, iki LSTM katmanı, dense katmanı ve çıktı katmanından oluşmaktadır. Geliştirilen LSTM tabanlı tahmin modelinin mimarisi, Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. Geliştirilen LSTM modelinin mimarisi

Girdi katmanında, girdi ve çıktı tercih indekslerinden oluşan arttırılmış veriseti modele girdi olarak sunulmaktadır. Geliştirilen model çift katmanlı bir LSTM yapısına sahiptir. Grid search kullanılarak elde edilen LSTM'in hiper parametreleri, gizli katman sayısı 2, her bir katmandaki nöron sayısı 32, aktivasyon fonksiyonu tanh, dropout oranı 1.7e-3, epoch sayısı 124, batch size 64, optimizasyon fonksiyonu Adam ve öğrenme oranı 8e-3'tür.

2.5. Değerlendirme metrikleri

Uygulanan modellerin tahmin performanslarının değerlendirilmesi amacıyla Mean Squared Error (MSE), Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE) ve R^2 metrikleri kullanılmıştır. MSE gerçek değerler ve tahmin edilen değerler arasındaki ortalama kare farkını değerlendirir. Modelin hata oranı azaldıkça MSE sıfıra yakınsar. MSE Eş. 1 kullanılarak hesaplanır.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2 \quad (1)$$

Toplam örnek sayısı n , gerçek gözlem verileri y ve tahmin edilen değerler ise \hat{y} ile ifade edilmektedir. RMSE, MSE değerinin karekökü alınarak Eş. 2'de görüldüğü gibi hesaplanır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2} \quad (2)$$

MAE, gerçek gözlem değerleri ile tahmin edilen değerler arasındaki farkların mutlak değerlerinin ortalamasını ifade eder. MAE, Eş. 3 kullanılarak hesaplanır.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y - \hat{y}| \quad (3)$$

R^2 , verisetinin regresyon modeline ne kadar iyi uyduğunun göstergesidir. Korelasyon katsayısının kare değeridir. R^2 , Eş. 4 kullanılarak hesaplanır.

$$R^2 = \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{(y - \bar{y})^2} \quad (4)$$

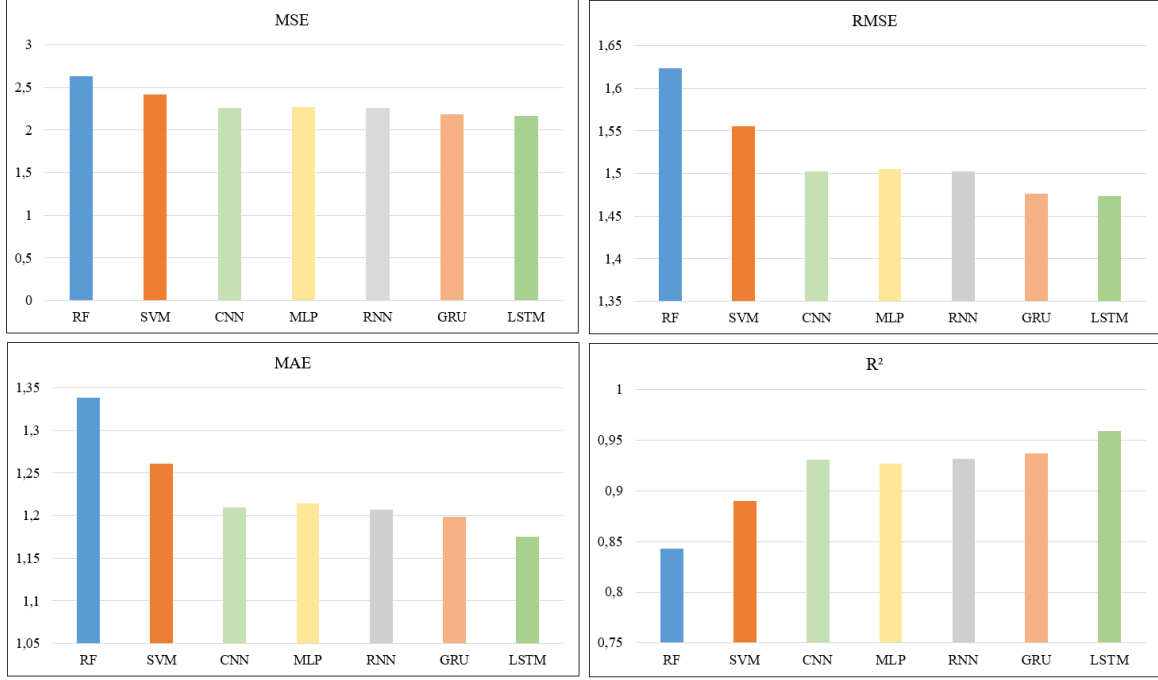
Gerçek gözlem verileri y , tahmin edilen değerler \hat{y} ve y değerlerinin ortalaması ise \bar{y} ile ifade edilmektedir.

3. Deneysel Analizler

Bu çalışmada, KOBİ'lerin ekonomiye katkılarının tahmin edilmesi amacıyla LSTM tabanlı bir derin öğrenme modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model, RF, SVM, CNN, MLP, RNN ve GRU gibi popüler makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleriyle uygulamalı olarak karşılaştırılmıştır. Uygulanan her bir modelin hiper-parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Grid Search kullanılmıştır. GridSearchCV, scikit-learn kütüphanesinin bir parçası olan bir hiper-parametre ayarlama tekniğidir. Makine öğrenimi algoritmalarının performansını artırmak için kullanılan hiper-parametreler, algoritmanın çalışma şeklini ve sonuçlarını etkiler. GridSearchCV bu hiper-parametrelerin en iyi kombinasyonunu bulmak için kullanılır. Grid Search, belirli bir hiperparametre kümesi üzerinde tüm olası kombinasyonları dener ve bu kombinasyonlardan hangisinin en iyi sonuçları verdiğini değerlendirir. Cross-validation kullanarak bu değerlendirmeyi yapar. GridSearchCV aynı zamanda k-fold cross-validation yaparak, veri kümesini k parçaya böler ve bu bölmeleri kullanarak modelin performansını değerlendirir. SMOTE-TS kullanılarak elde edilen artırılmış verisetinin %80'i eğitim, %20'si ise test için kullanılmıştır. Eğitim verilerinin %10'unu ise model parametrelerini optimize edebilmek amacıyla doğrulama için kullanılmıştır. Tablo 1 ve Şekil 4'te karşılaştırmalı deneysel sonuçlar görülmektedir.

Tablo 1. Deneysel sonuçlar

Model	MSE	RMSE	MAE	R^2
RF	2,635	1,623	1,338	0,843
SVM	2,417	1,555	1,261	0,890
CNN	2,255	1,502	1,210	0,931
MLP	2,265	1,505	1,214	0,927
RNN	2,257	1,502	1,207	0,932
GRU	2,180	1,476	1,199	0,937
LSTM	2,169	1,473	1,175	0,959



Şekil 4. Karşılaştırmalı deneysel sonuçlar

Deneysel sonuçlar, LSTM'in karşılaştırılan diğer modellerden tüm hata metriklerine göre daha başarılı olduğunu göstermiştir. SVM'in RF'dan daha başarılı deneysel sonuçlara sahip olması verisetindeki nümerik öznitelikler ile açıklanabilir. RF, kategorik ve nümerik özelliklerin bir arada olduğu durumlarda avantajlıdır. RF, girdi uzayını hiper dikdörtgenlere bölmenin sınıflandırma açısından mantıklı olduğu varsayımını yapar. SVM, verileri daha yüksek boyutlu bir alana yansıtır. Böylece bu alanda doğrusal olarak ayrılabilirler.

CNN'in MLP'den daha başarılı olması, CNN'in girdi olarak tensörü alması ve MLP'nin ise girdi olarak vektörleri alması ile açıklanabilir. CNN, tensörleri girdi olarak aldığı için özellik çıkarımını daha başarılı bir şekilde yapacaktır. RNN'in CNN'den daha başarılı olması ise RNN'in sonuçları ağa geri besleyen tekrarlı mimarisisiyle yorumlanabilir. CNN sabit bir girdi ve çıktı boyutuna sahiptir. RNN'de ise girdinin ve çıktının boyutu değişebilir.

GRU'nun RNN'den daha başarılı olması, GRU'da RNN'den farklı olarak bulunan geçiş mekanizmaları ile yorumlanabilir. GRU, bu sayede uzun vadeli bağımlılıkların hatırlanmasını sağlamaktadır. LSTM'in karşılaştırılan diğer modellerden daha başarılı olması ise LSTM'in RNN ve GRU gibi diğer tekrarlı sinir ağı modellerinden farklı olarak özel birimlere sahip olması ile yorumlanabilir. LSTM, bilgileri uzun süre hafızada tutabilen özel bellek birimleri içermektedir. Giriş kapısı, unutma kapısı ve çıkış kapısı gibi bu özel birimler yardımıyla uzun vadeli bağımlılıkların hatırlanması kolaylaşmaktadır.

4. Sonuç

KOBİ'ler, belirli bir sayıdan daha az çalışanı istihdam eden, bağlı ortaklık olmayan, bağımsız firmalar olarak tanımlanmaktadır. KOBİ belirleme kriterleri ülkeler ve sektörler arasında farklılık gösterir. KOBİ'ler çoğu ülkede işletmelerin büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır. Tüm ekonomilerde, KOBİ'ler istihdam yaratılmasına ve sürdürülebilir büyümeye önemli katkılarda bulunmaktadır ve ekonomik gelişimin teşvik edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. KOBİ'lere yönelik politika, başta yeni teknoloji sektörü olmak üzere yeni iş fırsatlarının yaratılması için artan bir önem kazanmaktadır. Yapay zekâ uygulamalarının çeşitliliği ve potansiyeli gün geçtikçe çeşitlenmektedir. Günümüzde giderek artan sayıda işletme, faaliyetlerini ve koşullarını iyileştirmek için yapay zekâ odaklı çözümlerden faydalanmaktadır.

Bu çalışmada, KOBİ'lerin ekonomiye sağladıkları katkının tahminine yönelik derin öğrenme tabanlı karşılaştırmalı bir analiz sunulmuştur. TÜİK tarafından sunulan KOBİ'lere ait 2009-2020 yılları arası KOBİ sayısı, çalışan sayısı, personel maliyeti, Ar-Ge personel sayısı, ithalat, ücretli çalışanlar, üretim değeri, Ar-Ge harcaması girdi olarak, çalışan başına katma değer, ciro, patent tescil sayısı, ihracat yapan firma sayısı, katma değer ve ihracat verileri çıktı olarak alınmıştır. Bu veriler, OCRA yöntemiyle analiz edilerek yıllar itibarıyla KOBİ'lerin performansı çıkarılmıştır. Geliştirilen LSTM tabanlı bir derin öğrenme modeli kullanılarak KOBİ'lerin ekonomiye olan katkı dereceleri tahmin edilmiştir. Geliştirilen model, RF, SVM, CNN, GRU, MLP ve RNN ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. MSE, RMSE, MAE ve R^2 metrikleri kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar, geliştirilen modelin 2,169 MSE, 1,473 RMSE, 1,175 MAE ve 0,959 R^2 değeri ile karşılaştırılan diğer modellerden daha başarılı bir tahmin performansına sahip olduğunu göstermiştir.

Kaynaklar

- [1] Pedraza JM. The micro, small, and medium-sized enterprises and its role in the economic development of a country. *Bus and Manag Res* 2021; 10(1): 33.
- [2] Naab R, Bans-Akutey A. Assessing the use of e-business strategies by SMEs in Ghana during the Covid-19 pandemic. *Ann. Manag and Org. Res* 2021; 2(3): 145-160.
- [3] Cegarra-Leiva D, Sánchez-Vidal ME, Gabriel Cegarra-Navarro J. Understanding the link between work life balance practices and organisational outcomes in SMEs: The mediating effect of a supportive culture. *Pers rev* 2012; 41(3): 359-379.
- [4] Ramírez de la Cruz EE, Grin EJ, Sanabria-Pulido P, Cravacuore D, Orellana A. The transaction costs of government responses to the COVID-19 emergency in Latin America. *Public Administration Review* 2020; 80(4): 683-695.
- [5] Becker W, Schmid O. The right digital strategy for your business: an empirical analysis of the design and implementation of digital strategies in SMEs and LSEs. *Bus Res* 2020; 13(3): 985-1005.
- [6] Järvenpää AM, Kunttu I, Mäntyneva M. Using foresight to shape future expectations in circular economy SMEs. *Tech Inn Man Rev* 2020; 10(7).
- [7] Zainudin MF, Adam S, Fuzi NM. The impact of customer buying behavior towards small and medium enterprises (SMEs) perception during pandemic (COVID-19) in Johor. *Adv Int J of Bus, Entrepreneurship and SMEs* 2021; 10.
- [8] Miklian J, Hoelscher K. SMEs and exogenous shocks: A conceptual literature review and forward research agenda. *Int Small Bus J* 2022; 40(2): 178-204.
- [9] Vu T, Nguyen D, Luong T, Nguyen T, Doan T. The impact of supply chain financing on SMEs performance in Global supply chain. *Unc Supp Ch Man* 2022; 10(1): 255-270.
- [10] Matt DT, Rauch E. SME 4.0: The role of small-and medium-sized enterprises in the digital transformation. *Ind 4.0 for SMEs: Chal, opp and req* 2020; 3-36.
- [11] Bakhtiari S, Breunig R, Magnani L, Zhang J. Financial constraints and small and medium enterprises: A review. *Ec Rec* 2020; 96(315): 506-523.
- [12] Weaven S, Quach S, Thaichon P, Frazer L, Billot K, Grace D. Surviving an economic downturn: Dynamic capabilities of SMEs. *J of Bus Res* 2021; 128: 109-123.
- [13] Jayathilaka UR, Park GC. The Impact of Amazon Global Selling on Innovation Performance of SMEs. *J of Artif Intell and Mach Lear in Man* 2022; 6(2): 1-13.
- [14] Rahman MS, Abdelfattah FA, Bag S, Gani MO. Survival strategies of SMEs amidst the COVID-19 pandemic: application of SEM and fsQCA. *J of Bus & Ind Mark* 2022; 37(10): 1990-2009.
- [15] Pu G, Qamruzzaman MD, Mehta AM, Naqvi FN, Karim S. Innovative finance, technological adaptation and SMEs sustainability: the mediating role of government support during COVID-19 pandemic. *Sust* 2021; 13(16): 9218.
- [16] Benzidia S, Makaoui N. Improving SMEs performance through supply chain flexibility and market agility: IT orchestration perspective. *Supp Ch Forum: An Int J* 2020; 21(3): 173-184.
- [17] Rodríguez-Espíndola O, Cuevas-Romo A, Chowdhury S, Díaz-Acevedo N, Albores P, Despoudi S, Dey P. The role of circular economy principles and sustainable-oriented innovation to enhance social, economic and environmental performance: Evidence from Mexican SMEs. *Int J of Prod Econ* 2020; 248.
- [18] Mierin LA, Korostyshevskaya EM, Ragimova NS. The Impact of Monopolies on Small Business Development in Russia. *Am J Econ Sociol* 2019; 78(5): 1201-1228.
- [19] D'Amato D, Veijonaho S, Toppinen A. Towards sustainability? Forest-based circular bioeconomy business models in Finnish SMEs. *For Policy Econ* 2020; 110: 101848.
- [20] Ezugwu AE, Ikotun AM, Oyelade OO, Abualigah L, Agushaka JO, Eke CI, Akinyelu AA. A comprehensive survey of clustering algorithms: State-of-the-art machine learning applications, taxonomy, challenges, and future research prospects. *Eng App of Artif Int* 2022; 110: 104743.

- [21] Confalonieri R, Coba L, Wagner B, Besold TR. A historical perspective of explainable Artificial Intelligence. *Wiley Interdiscip Rev Data Min Knowl Discov* 2021; 11(1): e1391.
- [22] Aly H. Digital transformation, development and productivity in developing countries: is artificial intelligence a curse or a blessing?. *Rev of Econ and Pol Sci* 2022; 7(4): 238-256.
- [23] Zhu Y, Zhou L, Xie C, Wang GJ, Nguyen TV. Forecasting SMEs' credit risk in supply chain finance with an enhanced hybrid ensemble machine learning approach. *Int J of Prod Econ* 2019; 211: 22-33.
- [24] Malakauskas A, Lakštutienė A. Financial distress prediction for small and medium enterprises using machine learning techniques. *Eng Econ* 2021; 32(1): 4-14.
- [25] Schalck C, Yankol-Schalck M. Predicting French SME failures: new evidence from machine learning techniques. *App Econ* 2021; 53(51): 5948-5963.
- [26] Hamal S, Senvar Ö. Comparing performances and effectiveness of machine learning classifiers in detecting financial accounting fraud for Turkish SMEs. *Int J Comput Intell Syst* 2021; 14(1): 769-782.
- [27] Dang C, Wang F, Yang Z, Zhang H, Qian Y. Evaluating and forecasting the risks of small to medium-sized enterprises in the supply chain finance market using blockchain technology and deep learning model. *Oper Manag Res* 2022; 15(3-4): 662-675.
- [28] Zhang W, Yan S, Li J, Tian X, Yoshida T. Credit risk prediction of SMEs in supply chain finance by fusing demographic and behavioral data. *Transp Res E: Logist Transp* 2022, 158, 102611.
- [29] Wang L, Jia F, Chen L, Xu Q. Forecasting SMEs' credit risk in supply chain finance with a sampling strategy based on machine learning techniques. *Ann Oper Res* 2022, 1-33.
- [30] Zhou X, Lu P, Zheng Z, Tolliver D, Keramati A. Accident prediction accuracy assessment for highway-rail grade crossings using random forest algorithm compared with decision tree. *Reliab Eng Syst Saf* 2020; 200: 106931.
- [31] Islam MR, Nahiduzzaman M. Complex features extraction with deep learning model for the detection of COVID19 from CT scan images using ensemble based machine learning approach. *Expert Syst Appl* 2022; 195: 116554.
- [32] Rizwan A, Iqbal N, Ahmad R, Kim DH. WR-SVM model based on the margin radius approach for solving the minimum enclosing ball problem in support vector machine classification. *App Sci* 2021; 11(10): 4657.
- [33] Sueno HT, Gerardo BD, Medina RP. Multi-class document classification using support vector machine (SVM) based on improved Naïve bayes vectorization technique. *Int J Adv Trends Comp Sci Eng* 2020; 9(3).
- [34] Sharma AK, Chaurasia S, Srivastava DK. Sentimental short sentences classification by using CNN deep learning model with fine-tuned Word2Vec. *Proc Com Sci* 2020; 167: 1139-1147.
- [35] Nguyen DT, Nguyen TN, Kim H, Lee HJ. A high-throughput and power-efficient FPGA implementation of YOLO CNN for object detection. *IEEE Trans Very Large Scale Integr Syst* 2019; 27(8): 1861-1873.
- [36] He T, Li Z, Gong Y, Yao Y, Nie X, Yin Y. Exploring linear feature disentanglement for neural networks. 2022 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), 18-22 June 2022, Taipei, Taiwan, pp. 1-6.
- [37] Djerioui M, Brik Y, Ladjal M, Attallah B. Heart Disease prediction using MLP and LSTM models. 2020 International Conference on Electrical Engineering (ICEE), 25-27 September 2020, Istanbul, Türkiye, pp. 1-5.
- [38] Eskandari H, Imani M, Moghaddam MP. Convolutional and recurrent neural network based model for short-term load forecasting. *Electr Power Syst Res* 2021; 195: 107173.
- [39] Ismail AA, Gunady M, Pessoa L, Corrada Bravo H, Feizi S. Input-cell attention reduces vanishing saliency of recurrent neural networks. *Adv. Neural Inf. Process Syst* 2019; 32.
- [40] Wang Y, Zheng D, Jia R. Fault diagnosis method for MMC-HVDC based on Bi-GRU neural network. *Energies* 2022; 15(3): 994.
- [41] Qin Y, Chen D, Xiang S, Zhu C. Gated dual attention unit neural networks for remaining useful life prediction of rolling bearings. *IEEE Trans Ind Inform* 2020; 17(9): 6438-6447.
- [42] Ding D, Zhang M, Huang Y, Pan X, Feng F, Jiang E, Yang M. Towards backdoor attack on deep learning based time series classification. 2022 IEEE 38th International Conference on Data Engineering (ICDE), 9-12 May 2022, Kuala Lumpur, Malezya, pp. 1274-1287.
- [43] Bynagari NB. The difficulty of learning long-term dependencies with gradient flow in recurrent nets. *Eng Int* 2020; 8(2): 127-138.
- [44] Patil S, Mudaliar VM, Kamat P, Gite S. LSTM based Ensemble Network to enhance the learning of long-term dependencies in chatbot. *Int J Simul Multidiscip Des Optim* 2020; 11: 25.

Doğal Dil İşleme Teknikleri Kullanarak E-Ticaret Kullanıcı İncelemelerinde Özellik Tabanlı Duygu Analizi

Serpil ASLAN^{1*}

¹ Yazılım Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye
^{*1} serpil.aslan@ozal.edu.tr

(Geliş/Received: 31/07/2023;

Kabul/Accepted: 30/08/2023)

Öz: Son yıllarda her zaman için her yerden ürün satın alma kolaylığı sağladığı ve ürünleri satın alan diğer kullanıcıların incelemelerinden kolayca ürün karşılaştırması sağladığından dolayı E-ticaret sitelerinden yapılan satın alma işlemleri oldukça artmıştır. E-Ticaret sitelerinde satılan ürünlerdeki kullanıcı puanları ve yorumları ürünlerin satın alma sayısını büyük ölçüde etkilemektedir. Müşteri incelemeleri aynı zamanda E-ticaret platformları için büyük miktarda metinsel veri üretmektedir. Üretilen bu verilerin analiz edilmesi satıcıların müşteri beklentilerini anlamalarını sağlayacakları için satışlarını da arttıracaktır. Bazı durumlarda müşteri değerlendirmeleri ve puanlamaları sadece ürünle ilgili olmayıp ürünün teslimatı gibi farklı konularla ilgili de olabilir. Bu durum diğer müşteriler için alışveriş riski oluşmasına sebep olmaktadır. Doğal Dil İşleme (DDİ) teknikleri aracılığıyla yapılacak olan duygu analizi, müşteriler tarafından herhangi bir ürün ile ilgili yapılan herkese açık incelemelerin analiz edilmesine odaklanır. Özellik tabanlı duygu analizi alanı, belirleyici önerilerde bulunmak için müşteri yorumlarında bulunan çeşitli görüşleri kategorize eder. Bu çalışmada E-ticaret platformlarından elde edilmiş müşteri yorumları veri setinde TF-IDF ve Word2Vec teknolojileri aracılığıyla müşteri incelemelerindeki özellikler tespit edilir. Daha sonra, tespit edilen her bir özellik ile ilgili duygu ifadeleri incelenir. Çalışma, hem E-ticaret platformlarına hem de satıcılara mal ve hizmetlerini iyileştirebilmeleri için ışık tutacaktır. Aynı zamanda müşterilere alışverişlerinde özellik düzeyinde detaylı inceleme olanağı sağlayacaktır.

Anahtar kelimeler: Özellik tabanlı, duygu analizi, doğal dil işleme, TF-IDF, Word2Vec.

Aspect-Based Sentiment Analysis in E-Commerce User Reviews Using Natural Language Processing Techniques

Abstract: In recent years, purchases made from E-commerce sites have increased considerably, as it provides the convenience of purchasing products from anywhere at all times and provides an easy product comparison from the reviews of other users who have purchased the products. User ratings and comments on products sold on e-commerce sites significantly affect the number of purchases of products. Customer reviews also generate large amounts of textual data for E-commerce platforms. Analyzing these produced data will increase the sellers' sales by enabling them to understand customer expectations. In some cases, customer reviews and ratings are not only about the product but also about different issues, such as the delivery of the product. This situation creates a shopping risk for other customers. Sentiment analysis through Natural Language Processing (DDI) techniques focuses on analyzing public reviews of any product by customers. The feature-based sentiment analysis field categorizes the various opinions found in customer reviews to make decisive recommendations. In this study, the features in customer reviews are determined through TF-IDF and Word2Vec technologies in the customer reviews dataset obtained from e-commerce platforms. Then, the emotional expressions related to each detected feature are examined. The study will shed light on both E-commerce platforms and sellers so that they can improve their goods and services. At the same time, it will allow customers to examine their purchases in detail at the feature level.

Key words: Aspect-based, sentiment analysis, natural language processing, TF-IDF, Word2Vec.

1. Giriş

İnternet, çeşitli ülkelerde E-ticaretin gelişmesinde önemli bir rol oynamıştır. Bir ülkede artan internet kullanımı, o ülkedeki E-ticaret pazarının artması anlamına gelmektedir. E-ticaret platformlarındaki yükseliş beraberinde hem ürünleri hem de verilen hizmeti iyileştirme zorunluluğunu getirmiştir. Müşterilere geniş bir seçenek yelpazesi sunan E-ticaret siteleri alışveriş için fiziksel bir mağazaya gitme durumunu ortadan kaldırarak bireylerin rahatlığında alışveriş yapma kolaylığı sağlamaktadır. Avantajlarının yanı sıra çeşitli dezavantajları da olan E-ticaret platformlarından alışveriş yaparken ürünlerin kalitesini belirlemek birçok insan için büyük bir sorun teşkil etmektedir. Çevrim içi alışveriş platformlarında kullanıcılar, bir ürünü satın alırken

* Sorumlu yazar: serpil.aslan@ozal.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-8009-063X

genellikle ürünlere ve ürün incelemelerine bakarlar. Bu incelemeler ürün alıcılarına fikir verme açısından oldukça önemlidir. Satılan ürünün ve verilen hizmetin kalitesi ürünlere verilen kullanıcı yorumları incelenerek tespit edilebilir. Burada ortaya çıkan en büyük sorun puanlandırma değeri verilen kullanıcı incelemelerinin tutarsızlığıdır. Satılan üründe ürün kalitesi kullanıcının isteklerine uygun olmadığı için düşük puan alabileceği gibi verilen hizmetten kaynaklı da düşük puan almış olabilir. Örneğin, ürün kalitesi müşterinin isteklerini karşılarken teslimat hizmeti veya ürünün beden kalıbı ile ilgili sorun yaşadığı için düşük puan verilen ürünler de olabilir. Puanlandırmalar ve incelemeler arasında ki uyumsuzluk, E-ticaret platform yöneticilerinin ürün kalitesini belirleme süreçlerini oldukça zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada bu problemlerin üstesinden gelmek ve daha objektif ürün değerlendirmelerini ortaya çıkarmak amacıyla DDİ teknikleri kullanılarak özellik tabanlı duygu analizi teknikleriyle müşteri yorumları analiz edilmiştir.

Duyarlılık analizi veya diğer bir adıyla fikir madenciliği, herhangi bir konuda bireylerin metin içerisinde belirtmek istedikleri düşünce, fikir, duygu veya tutum gibi öznel bilgilerin çıkarılmasını amaçlayan bir DDİ tekniğidir [1]. Geleneksel duygu analizi yöntemlerinde ilgili kişinin bir varlığa veya olguya karşı tutumunun olumsuz, olumlu veya tarafsız olup olmadığı tespit edilir. Duygu analizi, kullanıcıların yapılandırılmamış incelemelerini yararlı bilgilere dönüştürdüğü için birçok araştırmacının ilgi odağı olmuştur. Bu anlamda duygu analizi çalışmalarının uygulama alanları oldukça geniştir. Duygu analizi, şirketler için piyasaya yeni sürülecek bir ürünün ön pazar araştırması, herhangi bir olay karşısında toplumun genel tutumlarının veya psikolojik etkilerinin tespit edilmesi, film izleyecek kişilerin önceki yapılan yorumlara göre filmi izlemeye karar vermesi gibi farklı konularda yönlendirme yapılmasına imkân sağlar. Duygu analizi genel olarak üç farklı düzeyde yapılabilir: Belge düzeyinde [2], cümle düzeyinde [3] ve özellik (hedef) [4] düzeyinde. Belge düzeyinde duygu analizi yapılırken tüm belgenin tek seferde bir bütün olarak analiz edilmesi gerekir. Cümle düzeyinde duygu analizinde ise belgenin cümlelere ayrıştırılıp her bir cümlenin tek tek analiz edilmesi gerekir. Özellik düzeyinde duygu analizinde ise analiz esas olarak bir ürünün özellik terimlerine bağlıdır. Bu yöntem, metin verilerinde belirli özellikleri ve bu özelliklere ilişkin duyguları tespit etmeye odaklanır. Özellikler, genellikle belirli bir ürün, hizmet, kuruluş veya konuyla ilgili belirli özellikler, kavramlar veya anahtar kelimeler olabilir. Geleneksel duygu analizinde, metinlerin genel duygusu tespit edilirken, özellik tabanlı duygu analizinde, metin içinde belirli hedeflerin ne kadar olumlu veya olumsuz değerlendirildiği belirlenmeye çalışılır. Bu şekilde, insanlar veya işletmeler, belirli hedefleri ile ilgili duygusal tepkileri daha ayrıntılı bir şekilde anlayabilirler. Örneğin, bir restoran için yapılan bir incelemede; “yemek güzeldi fakat hizmet yeterli değildi” denilebilir. Bu cümlede restoranla ilgili hem olumsuz hem de olumlu özellikler vurgulanmaktadır. Özellik tabanlı duygu analizi, bu metni analiz ederek her bir özelliğin olumlu veya olumsuz değerlendirmelerini ayırt etmeye çalışır. Bu tür analizler, müşteri geri bildirimlerini anlamak, sosyal medya ortamlarında duygu analizi yapmak, ürün veya hizmetlerin performansını değerlendirmek ve pazarlama stratejilerini geliştirmek gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, E-ticaret platformlarında yapılan alışverişlerle ilgili yorumlar TF-IDF ve Word2Vec teknolojileri kullanılarak özellik tabanlı duygu analizi teknikleriyle analiz edilmiştir. Geleneksel yöntemlerin aksine özellik düzeyinde duygu analizi aracılığıyla müşterilere daha sağlıklı satın alma işlemi sunulacaktır. Bu amaçla kullanılan veri setinde bulunan ürün değerlendirmeleri; renk, beden ve kalite olmak üzere üç farklı özellik kullanılarak analiz edilmiştir.

2. İlgili Çalışmalar

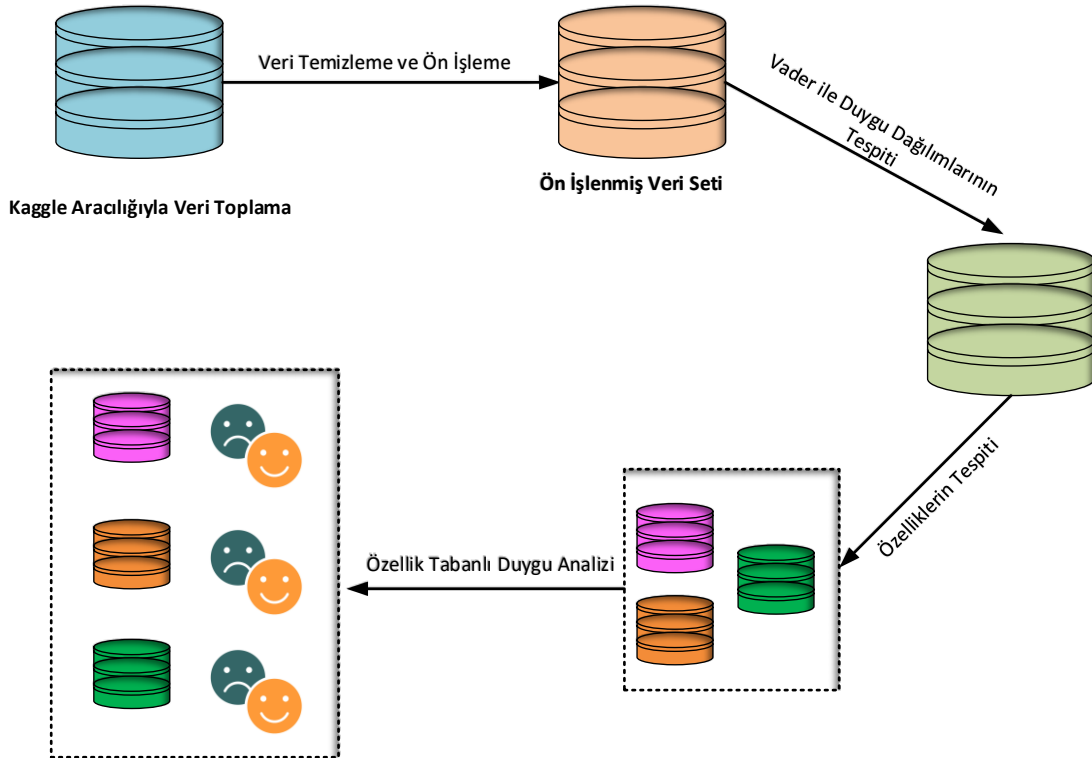
E-ticaret, ürün ve hizmetlerin alım satımının elektronik ortamda gerçekleştirildiği bir platformdur [5]. İnternet kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte E-ticaret sitelerinin popülaritesi hem daha fazla insana hizmet ettiğinden hem de ürünlerle ilgili diğer kullanıcıların ürün incelemeleri aracılığıyla tavsiye sağladığından dolayı gün geçtikçe artmaktadır [6]. E-ticaret platformlarında, insanların fikirlerini giderek daha fazla paylaşımlarından dolayı meydana gelen büyük veri miktarı kullanıcıların istenilen bilgileri bulmasını zorlaştırarak kafasını karıştırmaktadır. 2008 yılında yapılan bir araştırmaya göre çevrimiçi alıcıların %81'inin satın alma işlemi yapmadan önce internette bulunan bilgileri incelediği ve %79'unun verdiği karardan pişman olduğu tespit edilmiştir [7]. Bu zorluk, kullanıcı incelemelerini otomatik olarak analiz edebilen ve kullanıcılar için özel bilgileri çıkarabilen bir sistem sağlamak amacıyla duygu analizi alanında araştırmaların artmasına yol açmıştır [8]. Duygu analizinin amacı, bireyin konu hakkındaki görüşünü veya duygusunu bağlam içinde belirlemek ve kullanıcı tarafından oluşturulan incelemeleri olumlu veya olumsuz olarak kategorize etmektir [9]. Son yıllarda, ürün incelemelerinin müşteriler üzerinde ki etkilerini araştırmak amacıyla DDİ tekniklerinden biri olan duygu analizine dayalı birçok çalışma yapılmıştır. Tan ve ark. [10] çalışmalarında, Naive Bayes, SVM, KNN ve yenilenen sinir ağları sınıflandırıcılarının Amazon ürün yorumları üzerinde duygu analizi için tahmin etme başarımlarını

değerlendirmiştir. Sadhasivam ve ark. [11] ise Naive Bayes, SVM ve Ensemble yaklaşımlarının Amazon ürün yorumları üzerinde duygu analizi başarımlarını değerlendirmiştir. Bhatt ve ark. [12] çalışmalarında, Amazon ürün değerlendirmesi için hizmet ve ürün değerlendirmelerini ayrı ayrı değerlendirebilmek ve yorumların duygularını sınıflandırmak amacıyla Naive Bayes, Maximum Entropy and SVM makine öğrenmesi algoritmalarına dayalı bir sistem önermiştir. Zhang ve ark. [13], e ticaret incelemelerinde duyarlılık analizi yapmak için çoklu sınıflandırma modeli önerdi. Önerilen çalışma, özneliliklere sahip varlık sözcüklerinin çıkarılması, duygu örüntülerinin değerlendirilmesi ve düğümler arasındaki en kısa yolun değerlendirilmesi ile duygu benzerliği probleminin en kısa yol hesaplama problemine dönüştürülebileceğini belirtmiştir. Johnson ve ark. [14] çalışmalarında IMDB film ve Amazon'un elektronik ürünlerine yapılan yorumların olduğu bir veri seti kullanarak belge düzeyinde bir duygu analiz modeli önerdi.

E-ticaret platformlarında kullanıcı yorumlarının analizine yönelik önceki çalışmaların çoğu, bağlamdan bağımsız olarak cümle düzeyinde olumlu veya olumsuz olan yorumların tespitine dayalıdır. Kullanıcı yorumları kendi içerisinde belirli özelliklere göre olumlu ve olumsuz duyguları aynı anda içerebilir. Bu gerçekten dolayı cümle düzeyinde incelenmesi diğer müşterilere satın almayı düşündükleri ürün hakkında bilgi verme açısından genellikle yetersizdir. Tüm nedenlerden dolayı, bu çalışmada daha spesifik ve etkili sonuçlar elde etmek amacıyla özellikle ürün değerlendirmelerinde büyük etkiye sahip olan özellik düzeyinde duygu analizi teknikleri kullanılarak ürün değerlendirmeleri analiz edilmiştir.

3. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada E-ticaret platformlarında ürünlere yapılan yorumların içeriğine göre özellik tabanlı duygu analizi teknikleri kullanılarak analiz yapılmıştır. Bu çalışmanın amacını gerçekleştirmeye yönelik uygulamada kullanılacak verilerin hazırlanması gerekmektedir. Bu bölümde, verilerin toplanmasından deneylerin sonuçlandırılmasına ve değerlendirilmesine kadar kullanılan tüm materyaller ve izlenen yöntemler aşağıdaki alt başlıklar altında açıklanmıştır. Bu çalışmada gerçekleştirilen uygulama adımları Şekil 1'de verildiği gibidir.



Şekil 1. Önerilen yöntemin genel çerçevesi

3.1. Veri seti ve ön işleme

Bu çalışmada çevrim içi veri paylaşım platformlarından biri olan Kaggle'dan alınan müşteriler tarafından yapılan ürün inceleme yorumlarını içeren "Womens Clothing E-Commerce Reviews" [15] veri kümesi kullanılmıştır. Bu veri kümesi 23486 satır ve 10 özellikli değişkeni içerir. Her satır bir müşteri incelemesine karşılık gelmektedir. Veri analizi çalışmalarında yöntemlerin ideal bir şekilde çalışabilmesi için gürültülü verilerden ve veri içerisindeki diğer kusurlardan arındırılması gerekir. Duygu analizinde kullanılacak verilerin kolayca algılanması, standardize edilmesi ve çalışmaya uygun formata getirilmesiyle ilgili çalışmanın başarısını arttıran en önemli faktörlerden biridir. Veri kalitesini ve tutarlılığını arttırmak için yapılan tüm işlemler genellikle ön işleme olarak adlandırılır. Bu çalışmada uygulanan ön işleme adımları aşağıdaki gibidir:

Tokenleştirme: Metin verilerini makine öğrenimi modellerine veya DDİ algoritmalarına girdi olarak verebilirken, aynı zamanda metindeki kelimelerin ve ifadelerin anlamını daha iyi anlamak için de önemlidir. Ayrıca, tokenleştirme metin verilerini n-gramlar gibi farklı boyutlarda tokenlere bölmek suretiyle daha spesifik analizler yapmak için de kullanılabilir. Örneğin, "Bugün hava çok güzel" cümlesi tokenleştirildiğinde, genellikle şu şekilde olur: ["Bugün", "hava", "çok", "güzel"]. Tokenleştirme işlemi, metin verilerini sayısal gösterimlerle temsil edilen matematiksel yapılara dönüştürmeden önceki önemli bir adımdır. Bu sayede, duygu analizi gibi DDİ görevleri için metin verileri daha etkili bir şekilde işlenebilir ve analiz edilebilir hale gelir.

Durak sözcüklerin kaldırılması: Durak sözcükler, metinde sıkça kullanılan ve genellikle anlam taşımayan, dil bilgisel yapıyı destekleyen yaygın kelimelerdir. Bu tür kelimeler, dilin işleyişini anlamak için önemli olsa da, duygu analizi gibi görevlerde genellikle çok fazla bilgi taşımazlar ve analizi zorlaştırabilirler. Örneğin "ve", "ama", "veya", "bir", "iki", "üzeri", "oldu", "gibi" gibi kelimeler durak sözcüklere örnek olarak verilebilir. Durak sözcükler ve noktalama işaretleri, gürültüyü azaltmak ve önemli duyarlılık bilgileri taşıyan sözcüklere odaklanmak için veri setinden kaldırıldı.

Tekrar eden verilerin kaldırılması: Yanlılığı önlemek ve analizin doğruluğunu sağlamak için yinelenen girişler belirlendi ve veri setinden kaldırıldı.

Analiz için biçimlendirme: Veri seti, analiz araçlarının ve makine öğrenimi algoritmalarının gereksinimlerine uyacak şekilde biçimlendirilmesi için TF-IDF [16] kelime gömme yaklaşımı kullanılarak veriler biçimlendirildi. TF-IDF (Terim Frekansı-Ters Doküman Frekansı) kelime gömme vektörü, DDİ alanında metin verilerini sayısal vektörlerle temsil etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, belirli bir metindeki her bir kelimenin, o metindeki önemini ölçmek amacıyla kullanılır. TF-IDF kelime gömme vektörü, bir kelimenin hem bir belgedeki sıklığını (TF) hem de genel belge koleksiyonundaki nadirliğini (IDF) dikkate alarak, metin verilerini sayısal bir vektörle temsil eder.

3.2. Duygu analizi aracı: VADER

Sözlük tabanlı duygu analizi aracı olan Vader, Hutto ve ark. [17] tarafından 2014 yılında önerilmiştir. VADER, özellikle sosyal medya verilerinden elde edilen duygulara göre uyarlanmış, sözlük ve kural tabanlı değerleri kullanan önceden eğitilmiş bir duyarlılık analizi kütüphanesidir. VADER, her kelimenin pozitif, negatif ve nötr duygusal yoğunlukları için önceden tanımlanmış bir sözlük kullanır. Sözlük, kelimelerin duygusal yoğunluğunu ifade eden puanlarla eşleştirilir. Metindeki her kelimenin bu skorları toplanarak metnin duygusal yoğunluğu hesaplanır. VADER sözlük listesinde özelliklere [-4,+4] arasında duygu kutupluluğunu ve duygu yoğunluğunu gösteren bir değer atanır. Daha sonra, sözlükteki her kelimenin değerleri toplanır, ardından kurallara göre ayarlanır ve son olarak [-1,+1] aralığında olacak şekilde standardize edilen birleşik bir puan hesaplanır. VADER, önceden işlenmiş kullanıcı yorumlarını pozitif, negatif veya nötr olarak sınıflandırmak için kullanıldı. Bu çalışmada, kullanıcı yorumlarını pozitif, negatif veya nötr olarak sınıflandırmak için kullanılan eşik değerler aşağıdaki gibidir:

$$Fp_i = \begin{cases} \text{pozitif } v_s \geq 0.05, \\ \text{negatif } v_s \leq -0.05, \\ \text{nötr diğer durumlarda,} \end{cases} \quad (1)$$

Burada v_s , i . yorumun birleşik puanı ve Fp_i , ise i . yorumun duygu polaritesi (pozitif, negatif veya nötr) olarak hesaplanır. Yorumların duygu kutupları tespit edildikten sonra çalışmada sadece pozitif ve negatif duygu polaritesine sahip yorumlara odaklanıldı.

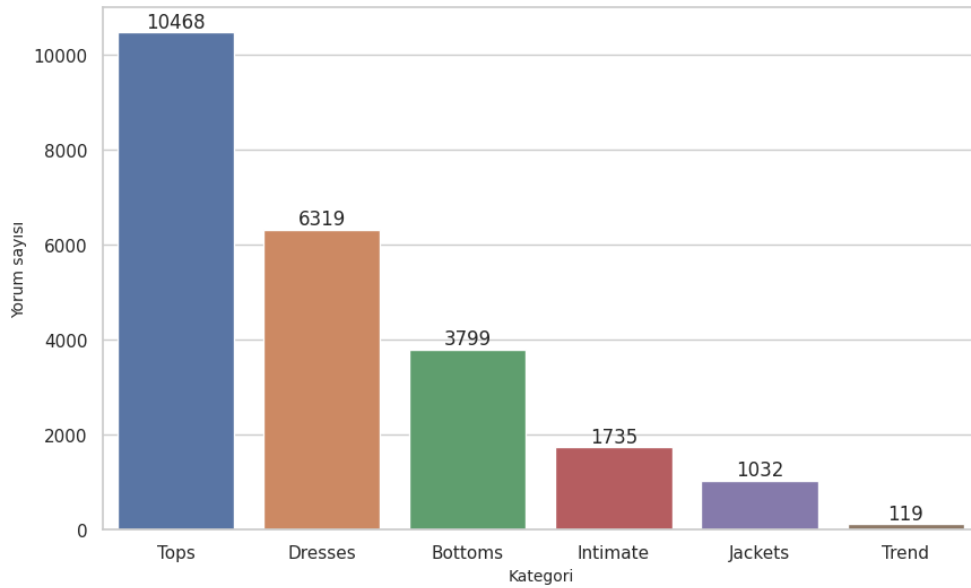
3.3. Özelliklerin tespiti

Çalışmada, tanımlayıcı özellikleri tespit etmek amacıyla ön işleme adımlarından geçirilmiş kullanıcı yorumları öncelikle TF-IDF [16] daha sonra Word2Vec [18] adımları uygulanmıştır. Yorumlarda en sık kullanılan kelimeler TF-IDF yöntemi ile tespit edildikten sonra veri setinde en çok geçen Top 50 kelime tespit edilmiştir. Daha sonra Top 50 listesinde yer alan her kelime için Word2Vec modelinin en çok benzeyen özelliği ile birbirleriyle yakından ilişkili 3 kelime elde edilmiştir. 150 kelimelik yakın eş anlamlılar listesinde renk, beden ve kalite (“color”, “size” ve “fabric”) en sık tekrarlanan ifadeler olmuştur. Bu nedenle çalışmada özellikler belirlenirken bu 3 kavram seçilmiştir.

4. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada, deneysel uygulamalarda kullanılmak üzere ön işleme adımlarının uygulandığı 23486 E-ticaret kullanıcı yorumundan oluşan “Womens Clothing E-Commerce Reviews” veri seti kullanılmıştır. 23486 satır ve 10 sütundan oluşan veri setinde; Yorum Metni, Puanlama (1 (en kötü) – 5 (en iyi)), Kategori ve Sınıf sütunları kullanılmıştır. Çalışmada özellik tabanlı duygu analizi için ürünlere yapılan yorumların kategorilere göre analiz edilip duygu dağılımlarının analiz edildiği bölümdür. Bu bölümde deneysel sonuçlar ve bu sonuçların değerlendirmeleri sunulmuştur.

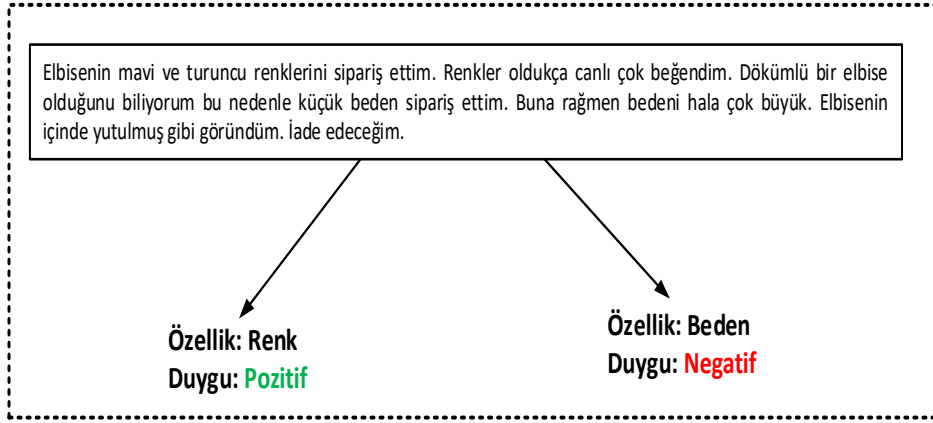
Özellik tabanlı duygu analizi için öncelikle ürün kategorilerine göre yapılan yorum sayıları tespit edilmiştir. Şekil 2, ürün kategorileri ve yorum sayıları dağılımını göstermektedir. Şekil 2’de görüleceği üzere en fazla yorum “Üst GiyimT ve “Elbise” (“Tops” ve “Dresses”) kategorilerindeki ürünler için yapılmıştır.



Şekil 2. Kategori ve yorum sayısı dağılımı.

Her bir kategori altında birçok ürün bulunmaktadır. Örneğin; *Tops* (üst giyim) kategorisinde bluz, ceket, vb. alt ürün kategorileri bulunmaktadır. Sınıf isimleri kategorilerde ki alt ürün sınıflarını temsil etmektedir. Şekil 3, her bir kategori altındaki alt sınıfların dağılımlarını temsil eder. Şekil 3 incelendiğinde “Dresses” kategorisindeki en yüksek orana sahip alt sınıfın “dresses” sınıfı olduğu açıkça görülmektedir. Bu analizler ışığında özellik tabanlı duygu analizi için “Dresses” kategorisi seçilmiştir. Seçilen bu kategoriyle birlikte analiz edilen veri miktarı 6319 satıra indirgenmiştir.

Çalışmada öncelikle ön işleme adımlarından sonra elde edilen ön işlenmiş veri setinde bulunan tüm kullanıcı değerlendirmeleri TF-IDF kelime gömme vektörü tekniği kullanılarak sayısal verilere dönüştürüldü. Daha sonra VADER duygu analizi aracı kullanılarak duygu polariteleri tespit edildi. DDİ teknikleri yardımıyla, duygu analizi ve kelime bulutu görselleştirme (WordCloud) [19] teknikleriyle devasa boyuttaki karmaşık yorumların analizi kolaylaşacaktır. Şekil 4, kullanılan veri setinde “Dresses” kategorisi ile ilgili yapılan yorumların kelime bulutu temsilidir.



Şekil 5. İki farklı özellik içeren kullanıcı değerlendirmesi örneği.



Şekil 6. Pozitif müşteri yorumlarının (a): “renk”, (c): “beden”, (d): kalite ve negatif müşteri yorumlarının (b): “renk”, (d): “beden”, (f): kalite özellik düzeyinde kelime temsili gösterimi.

5. Sonuç

Web 2.0 teknolojisinin hızlı gelişimi ve uygulanmasıyla birlikte E-ticaret platformlarında müşterilerin çevrimiçi ortamda fikirlerini ifade etmeleri ve alışverişinde deneyiminde bulunmaları için popüler bir yol haline geldi. Müşteri yorumları, E-ticaret mal ve hizmetlerinin kalitesini ve alışveriş sonrası var olan sorunlarını yansıtan önemli bilgilerdir. E-ticaret incelemelerinin bilgileri, malların performansı, kalitesi ve fiyatı da dâhil olmak üzere, tüketicilerin mal ve hizmetlerle ilgili çeşitli değerlendirmelerini ve yorumlarını içerebilir. Müşterilerin mal ve hizmet kalitesiyle ilgili deneyimlerinde ki olası farklılıklar nedeniyle, tüketici incelemeleri duygu veya düşüncelerin farklı açılardan özelliklerini içerebilir. Bu durum, bir tüketici tarafından aynı incelemede ifade edilen

tutumların bazen çeşitli duygulara sahip olmasına neden olabilir. Bir ürün hakkında yapılan yorum birçok farklı özelliğe değinilebilir. Bu özellik hakkındaki inceleme bilgileri çok sayıda tüketici tarafından yayınlanır ve güncellenir. Bu hızlı bilgi paylaşımı zaman içinde karmaşık yapıya, çeşitli içeriğe ve duygulara sahip çok sınıflandırmalı bir veri seti oluşmasına sebep olur. Bu tür veriler, kullanıcıların olaylar, mallar ve hizmetler gibi belirli şeylere yönelik değerlendirmeleri, tutumları ve davranışları dâhil olmak üzere birçok bilgi türünü içerir. İşletmelere, kurumlara ve bireylere değerli hizmetler sunmak için bu büyük miktardaki veriden bu değerli bilgiyi çıkarmak çok önemlidir. Bu gerçekten dolayı cümle düzeyinde incelenmesi diğer müşterilere satın almayı düşündükleri ürün hakkında bilgi verme açısından genellikle yetersizdir. Tüm nedenlerden dolayı, bu çalışmada daha spesifik ve etkili sonuçlar elde etmek amacıyla özellikle ürün değerlendirmelerinde büyük etkiye sahip duygu analizi düzeyi olan özellik düzeyinde duygu analizi teknikleri kullanılarak ürün değerlendirmeleri analiz edilmiştir.

Bu çalışmada, E-ticaret platformlarında yapılan alışverişlerle ilgili yorumlar özellik tabanlı duygu analizi teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir. Geleneksel yöntemlerin aksine özellik düzeyli duygu analizi aracılığıyla bu platformlarda alışveriş yapan müşterilere daha sağlıklı satın alma işlemi sunulacaktır. Bu amaçla kullanılan veri setinde bulunan ürün değerlendirmeleri; renk, beden ve kalite olmak üzere üç farklı özellik kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ürün değerlendirmelerinde farklı yorumların duygu dağılımlarının farklı olduğunu kanıtlar niteliktedir.

Kaynaklar

- [1] Ganesan, K., & Kim, H. D. (2016). Opinion Mining Tutorial (Sentiment Analysis). Opinion Mining Tutorial (Sentiment Analysis).
- [2] Pang, B., & Lee, L. (2004). A sentimental education: Sentiment analysis using subjectivity summarization based on minimum cuts. arXiv preprint cs/0409058.
- [3] Kim, S. M., & Hovy, E. (2004). Determining the sentiment of opinions. In COLING 2004: Proceedings of the 20th International Conference on Computational Linguistics (pp. 1367-1373).
- [4] Liang, B., Su, H., Gui, L., Cambria, E., & Xu, R. (2022). Aspect-based sentiment analysis via affective knowledge enhanced graph convolutional networks. Knowledge-Based Systems, 235, 107643.
- [5] Bhuvaneshwari, P., Rao, A. N., Robinson, Y. H., & Thippeswamy, M. N. (2022). Sentiment analysis for user reviews using Bi-LSTM self-attention based CNN model. Multimedia Tools and Applications, 81(9), 12405-12419.
- [6] Fernandes, L. M., O'Connor, M., & Weaver, V. (2012). Big data, bigger outcomes. Journal of AHIMA, 83(10), 38-43.
- [7] Vinodhini, G., & Chandrasekaran, R. M. (2012). Sentiment analysis and opinion mining: a survey. International Journal, 2(6), 282-292.
- [8] Horrigan, J. (2008). Online shopping, Pew Internet & American Life project. Washington, DC Available at: <http://www.pewinternet.org/Reports/2008/Online-Shopping/01-Summary-of-Findings.aspx> [Accessed 8/8/2014].
- [9] Brody, S., & Elhadad, N. (2010, June). An unsupervised aspect-sentiment model for online reviews. In Human language technologies: The 2010 annual conference of the North American chapter of the association for computational linguistics (pp. 804-812).
- [10] Tang, D., Qin, B., & Liu, T. (2015, July). Learning semantic representations of users and products for document level sentiment classification. In Proceedings of the 53rd annual meeting of the Association for Computational Linguistics and the 7th international joint conference on natural language processing (volume 1: long papers) (pp. 1014-1023).
- [11] Tan, W., Wang, X., & Xu, X. (2018). Sentiment analysis for Amazon reviews. In International Conference (pp. 1-5).
- [12] Sadhasivam, J., & Kalivaradhan, R. B. (2019). Sentiment analysis of Amazon products using ensemble machine learning algorithm. International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences, 4(2), 508.
- [13] Bhatt, A., Patel, A., Chheda, H., & Gawande, K. (2015). Amazon review classification and sentiment analysis. International Journal of Computer Science and Information Technologies, 6(6), 5107-5110.
- [14] Zhang, S., Zhang, D., Zhong, H., & Wang, G. (2020). A multiclassification model of sentiment for E-commerce reviews. IEEE Access, 8, 189513-189526.
- [15] Johnson, R., & Zhang, T. (2014). Effective use of word order for text categorization with convolutional neural networks. arXiv preprint arXiv:1412.1058.
- [16] Kaggle Dataset available at: <https://www.kaggle.com/nicapotato/womens-ecommerce-clothing>.
- [17] Onan, A. (2021). Sentiment analysis on product reviews based on weighted word embeddings and deep neural networks. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 33(23), e5909.
- [18] Hutto, C., & Gilbert, E. (2014, May). Vader: A parsimonious rule-based model for sentiment analysis of social media text. In Proceedings of the international AAAI conference on web and social media (Vol. 8, No. 1, pp. 216-225).
- [19] Rong, X. (2014). word2vec parameter learning explained. arXiv preprint arXiv:1411.2738.
- [20] Heimerl, F., Lohmann, S., Lange, S., & Ertl, T. (2014, January). Word cloud explorer: Text analytics based on word clouds. In 2014 47th Hawaii international conference on system sciences (pp. 1833-1842). IEEE.

Acı meyan bitkisinin çiçek, tohum ve yapraklarından ekstrakte edilen boyaların BDGP'lerin performansına etkisi

Fehmi ASLAN^{1*}

¹ Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, Yesilyurt Vocational School, Malatya Turgut Ozal University, Malatya, Türkiye

*¹ fehmi.aslan@ozal.edu.tr

(Geliş/Received: 03/05/2023;

Kabul/Accepted: 29/08/2023)

Öz: Enerji krizleri, fosil yakıtların yakın gelecekte tükenen olmaları ve sera gazı etkisi dünyanın en büyük sorunları arasında yer almaktadır. Bu sorunlara çözüm noktasında güneş enerjisi teknolojileri ön plana çıkmaktadır. 3. nesil güneş pili teknolojileri arasında yer alan boya duyarlı güneş pilleri (BDGP) üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır. BDGP'lerin verimleri silisyum tabanlı güneş pillerine kıyasla daha düşük olmasına rağmen hassaslaştırıcı boyada yapılacak değişikliklerle bu hücrelerin performansları geliştirilebilir. Bu çalışmada acı meyan (*Sophora alopecuroides*) bitkisinin çiçek, tohum ve yaprak kısımlarından ekstrakte edilmiş boyalarla duyarlılaştırılmış BDGP'lerin fotovoltaiik performansları araştırıldı. Fotoanot katmanı oluşturan titanyum dioksit'in (TiO₂) mineralojik ve morfolojik analizleri X-ışını difraksiyonu (XRD) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile gerçekleştirildi. XRD sonuçları TiO₂'nin anataz fazını ve kristal yapısını doğruladı. SEM görüntüleri birbirine sıkıca paketlenmiş mikro kürecik yapının varlığını ortaya çıkardı. Üretilen BDGP'ler arasında en yüksek hücre verimini 0.057 ile fotoanodu yaprak boyasıyla duyarlılaştırılmış hücre gösterdi.

Anahtar kelimeler: Boya duyarlı güneş pili, acı meyan, hücre performansı, titanyum dioksit.

The effect of flower, seed and leaf extracts of *Sophora alopecuroides* plant on the performance of dye sensitive solar cells

Abstract: Energy crises, the depletion of fossil fuels in the near future and the greenhouse effect are among the biggest problems in the world. Solar energy technologies come to the fore at the point of solution to these problems. Intensive research is being carried out on dye-sensitized solar cells (DSSCs), which is among the 3rd generation solar cell technologies. Although the efficiencies of DSSCs are lower than silicon-based solar cells, the performance of these cells can be improved with changes in the sensitizing. In this study, it was investigated how dyes obtained from the flower, seed and leaf parts of *Sophora alopecuroides* affect the efficiency of DSSCs. Mineralogical and morphological analyzes of titanium dioxide (TiO₂) forming the photoanode layer were performed with X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM). XRD results confirmed the anatase phase and microcrystalline structure of TiO₂. SEM images revealed the presence of tightly packed microspheres. Among the DSSCs produced, the cell sensitized with photoanode leaf dye showed the highest cell efficiency with 0.057.

Keywords: Dye-sensitized solar cell, *Sophora alopecuroides* plant, cell performance, titanium dioxide (TiO₂).

1. Giriş

Endüstrinin gelişmesiyle birlikte enerjiye olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Fosil yakıtların çevre üzerindeki olumsuz etkileri ve yakın zamanda tükenen olmaları alternatif enerji kaynakları arayışlarını hızlandırmaktadır. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynakları, geleneksel fosil yakıtlara bir alternatif olarak görülebilir. Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en büyük enerji potansiyeline sahiptir ve tüm insanların enerji ihtiyacını karşılayabilecek tek kaynak olarak bilinmektedir [1,2].

Boya duyarlı güneş pilleri (BDGP), üretim kolaylıkları ve düşük maliyetleri nedeniyle bilimsel ve teknolojik öneme sahiptir [3]. Tipik bir BDGP, reaksiyonu katalize etmek için fotoanot, boya maddesi, redoks elektroliti ve karşıt elektrottan oluşur [4]. İlk kez 1991 yılında Gratzel ve ark. titanyum dioksit (TiO₂) bazlı fotoanotlar kullanarak yaklaşık % 7 güç dönüşüm verimliliğine sahip BDGP'ler üretmeyi başarmıştır [5]. BDGP'ler kısa sürede büyük ilerleme kaydederek güç dönüşüm verimlerini % 15'in üzerine çıkarmıştır. Bu durum gelecekte BDGP'lerin ticarileşmesi için önemli bir adımdır. Fakat BDGP'lerin performansı halen istenilen düzeyde olmadığı için

* Sorumlu yazar: fehmi.aslan@ozal.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-5304-0503

ticarileşme yolunda bu hücrelerin kararlılığını ve enerji dönüşüm verimliliğini arttırmak, daha kapsamlı çalışmalar yapılmasını gerekli kılmıştır. Araştırmacılar, yüksek sönme katsayısına sahip boyalar, özgül yüzey alanı artırılmış metal oksit fotoanotlar, yeni redoks elektrolitler ve karşıt elektrotlar üreterek BDGP'lerin güç dönüşüm verimliliğini arttırmak için çalışmalar yapmışlardır [6,7].

Bitki pigmentasyonu, doğal boyadaki aktif fotoabsorpsiyon bölgesini belirlemede önemli rol oynamaktadır. Bitkinin çiçek, gövde, yaprak, dal ve tohum gibi çeşitli kısımlarından çeşitli boya ları ekstrakte etmek mümkündür. Ekstrakte edilmiş doğal boya ların elektronik yapısı, görünür bölgede absorpsiyonu etkileyebilmektedir. Farklı doğal boya türleri; boyanın kaynağına, kimyasal yapısına ve boya molekülü-fotoanot etkileşimine bağlı olarak farklı güç dönüşüm verimleri gösterebilmektedir. Boyanın BDGP'lerdeki ana işlevi, güneş spektrumunun görünür veya yakın kızılötesi bölgelerini absorbe ederek aygıtta elektron kaynağı sağlamaktır [8,9].

Halk arasında acı piyan olarak da tanımlanan acı meyan (*Sophora alopecuroides*) bitkisi çeşitli biyolojik ve farmakolojik etkilere sahiptir. Anavatanı Çin ve Rusya olan bu bitki Türkiye'de özellikle de Güneydoğu Anadolu Bölgesi'ndeki doğal ortamlarda yaygın bir şekilde yetişen çalı türü bir bitkidir. Kahverengi, sarı ve mavi renkte çiçekler açmaktadır. Bu bitkinin kök kısımları yoğun miktarda silisyum ve magnezyum içermektedir. Ayrıca acı meyan bitkisi bazı tıbbi hastalıklarının tedavisinde de yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [10].

Bu çalışmada kullanılan acı meyan bitkisi Kocaeli ili ve çevresinden temin edilmiştir. Bu bitkinin çiçek ve yaprakları ilkbaharda, tohumları ise sonbaharda hasat edilmiştir. Ekstrakte edilen boya ların BDGP'lerdeki güç dönüşüm verimlilikleri araştırılmıştır. Ayrıca bu doğal boya ların görünür ve yakın kızılötesi bölgelerdeki absorpsiyon özellikleri de incelenmiştir. Yapılan kapsamlı literatür çalışmasında acı meyan bitkisi ile hassaslaştırılmış BDGP'ler ile ilgili yapılmış herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışma bu yönüyle özgün değere sahiptir.

2. Dene yler

Bu çalışma için gerekli olan tüm kimyasal malzemeler ticari olarak satın alındı ve daha fazla saflaştırma olmaksızın kullanıldı. Tüm deneyler laboratuvar ortamında temiz şartlarda gerçekleştirildi.

2.1. Dene yde kullanılan malzemeler

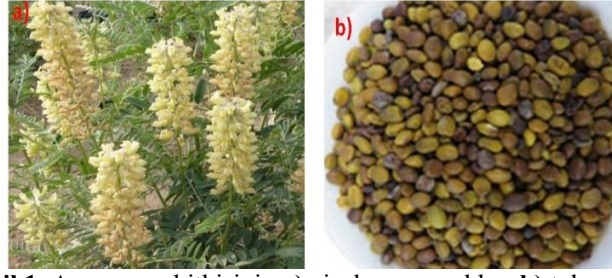
Bu çalışmada; TiO₂ partiküllerinin üretimi için titanyum IV isopropoxide (TTIP, ≥97.0%, Sigma-Aldrich) kullanıldı. Çözücü olarak etil alkolden (≥99.5%, Sigma-Aldrich) faydalandı. Pasta yapımında bağlayıcı olarak etil selüloz (Sigma-Aldrich) ve terpinol (Sigma-Aldrich) kullanıldı. İletken camların temizleme işlemi aseton (99.5%, Sigma-Aldrich) ile yapıldı. İletken cam olarak, yüzey direnci yaklaşık 13 Ω/sq olan fluorine katkılı tin oxide kaplı cam (FTO, Sigma) kullanıldı. Redox çözeltisi olarak Iodolyte AN-50 (Solaronix) ve karşıt elektrot olarak da platinyum (Solaronix) kullanıldı.

2.2. Titanyum Dioksit (TiO₂) partiküllerinin üretimi

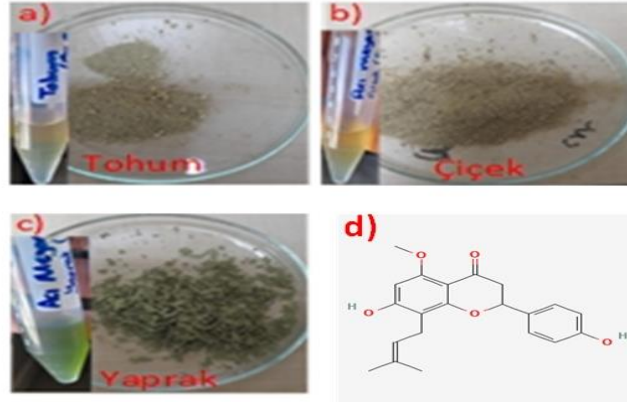
TiO₂ partikülleri hidrotermal yöntem kullanılarak üretildi. 40 ml de-iyonize su ve 1,6 g üre homojen bir yapı oluşana kadar 1 saat karıştırıldı. Karıştırma işlemi devam ederken 3,5 ml TTIP damla damla ilave edilip yarım saat daha karıştırıldı. Oluşan çözelti yarım saat ultrasonik işlem gördükten sonra 120 °C'de 24 saat teflon otoklav hazneli hidrotermal sisteme yerleştirildi. Teflon otoklav oda sıcaklığına soğutulduktan sonra, toplanan partiküller istenmeyen kalıntıları uzaklaştırmak için birkaç defa saf su ve alkol ile yıkandı. Bu partiküller etüvde 50 °C'de 12 saat kurutulup 450 °C'de kül fırınında 1 saat kalsine edildi. Oluşan TiO₂ partikülleri bir havanda dövülerek pasta yapımı için hazır hale getirildi.

2.3. Boya ların hazırlanması

Acı meyan bitkisinin çiçek, yaprak ve tohumları Şekil 1'de görülmektedir. Bitki kısımları saf su ile yıkandıktan sonra etüvde 50 °C'de karanlık ortamda 12 saat boyunca kurutuldu. Kurutulan bitki kısımları ışığa maruz kalmayacak şekilde 4 °C'de depolandı. Kurutulan acı meyan bitkisinin çiçek, tohum ve yaprak kısımları yüksek devirli bir öğütücü yardımıyla toz haline getirildi. Tozlardan boya ekstraktları elde etmek için Soxhlet yöntemi kullanıldı. Bu bağlamda her bir tozdan 2.5 g tartılarak ekstraksiyon kartuşlarına yerleştirdi ve daha sonra 150 ml etil alkol ortamında 3 kez sifon yaptırıldı. Alkolün bir kısmı döner buharlaştırıcı yardımıyla geri kazanılarak boya lar uygun konsantrasyona getirildi. Ekstrakte edilen boya lar deneylerde kullanılmak üzere 4 °C'de karanlık bir ortamda depolandı. Üretilen boya ların toz formları ve kimyasal yapısı Şekil 2'de görülmektedir.



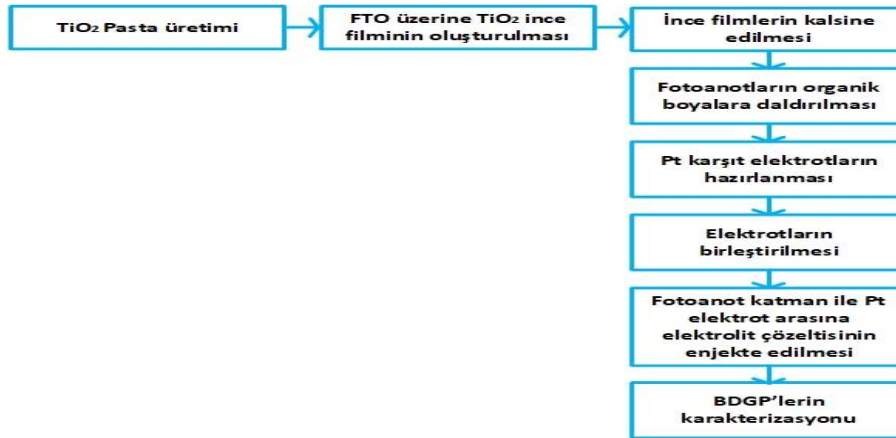
Şekil 1. Acı meyan bitkisinin a) çiçek ve yaprakları b) tohumları.



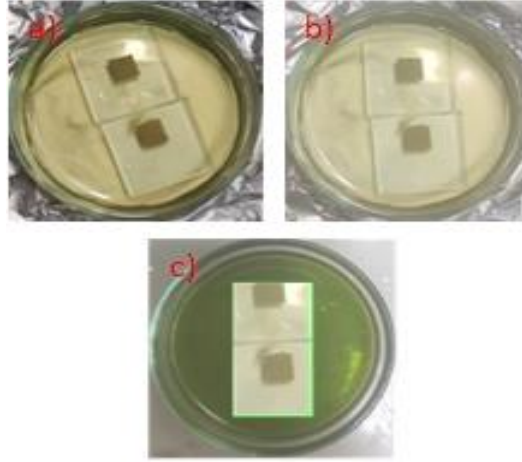
Şekil 2. a) Tohumdan b) çiçekten c) yapraktan üretilen boyalar ve toz formları d) boyaların kimyasal yapısı.

2.4. Boya duyarlı güneş pillerinin (BDGP) üretimi

BDGP'leri hazırlamak için 1 g TiO_2 , 0.45 g etil selüloz ve 3 ml terpinol bir havanda uygun pasta kıvamı yakalanıncaya kadar karıştırıldı. Hazırlanan pastalar bir maske yardımıyla FTO'nun iletken yüzeyi üzerine doctor-blade teknik ile kaplandı. Üretilen fotoanotlar $450\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 45 dakika kalsine edildi. Fotoanotlar oda sıcaklığında soğutulduktan sonra boyaların içerisine yerleştirildi ve 24 saat karanlık bir ortamda bekletildi. Boyaya daldırılmış fotoanotlar Şekil 4'de görülmektedir. Boyayı emen fotoanotlar birkaç kez alkolle yıkandı ve hızlıca kurutuldu. Fotoanot tabaka üzerindeki TiO_2 'nin bulunduğu kısma birkaç damla elektrolit çözeltisi damlatılıp Pt karşıt elektrot ile birleştirildi. Bu işlemten sonra BDGP'ler ölçüm almak için hazır hale getirilmiş oldu. BDGP'lerin üretim aşamaları Şekil 3'deki akış şemasında özetlenmiştir.



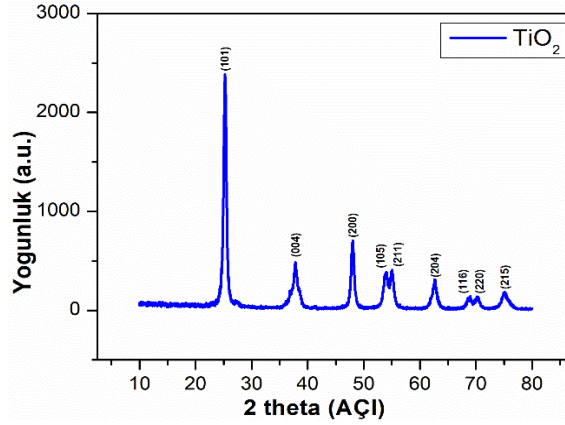
Şekil 3. BDGP üretiminin akış şeması.



Şekil 4. Fotoanotların boyaya daldırılmış görünüşleri a) Tohum boyası b) Çiçek boyası c) Yaprak boyası.

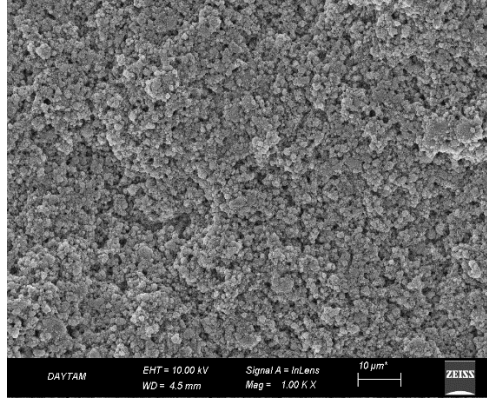
3. Tartışma ve Sonuç

XRD analizleri Rigaku X-ray Diffraction marka cihaz tarafından gerçekleştirildi. XRD analizleri TiO_2 'nin yüksek kaliteli kristal yapısını ve anataz fazını doğruladı. XRD desenlerinin, (101), (004), (200), (105), (211), (204), (116), (220), (215) kristal düzlemlere karşılık gelen 2θ açılarıyla 25.25, 37.73, 47.94, 53.85, 54.94, 62.68, 68.85, 70.31, 74.90 uyumlu olduğu Şekil 5'de görülmektedir. Anataz fazlı ve 141:141/aml birim hücre simetrisine sahip TiO_2 partikülleri, 50-00-223 numaralı JCPDS kart numarasıyla eşleşmektedir. TiO_2 'nin doğası gereği sahip olduğu üç kristal yapı arasında BDGP'lerde en çok tercih edilen anataz formudur. BDGP'lerde en yüksek verimler anataz TiO_2 ile oluşturulmuş hücrelerden elde edilmiştir. Çünkü anataz TiO_2 geniş bir bant aralığına (3.2 eV) ve yüksek elektron taşıma kabiliyetine sahiptir [11,12]. Ayrıca TiO_2 'nin üstün foto katalitik aktivitesi, yarı iletken cihazlarla mükemmel uyumluluğu ve düşük maliyeti bu metal oksit yarı iletkeni BDGP'ler için cazip hale getirmiştir [13].



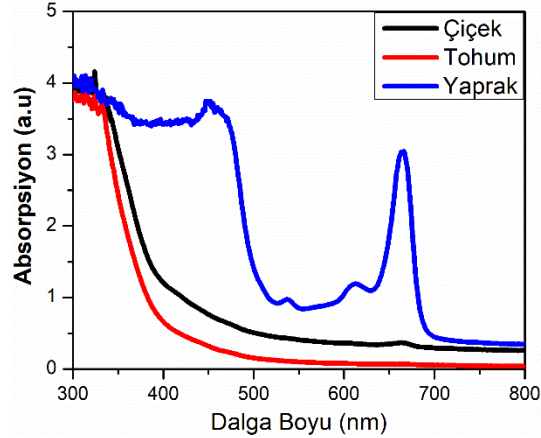
Şekil 5. Üretilen TiO_2 tozunun XRD örneği.

Üretilen TiO_2 tozlarının yüzey morfolojisi SEM analizleri ZEISS Sigma-300 cihazı ile gerçekleştirildi. Şekil 6'da TiO_2 taneciklerinin yüzey morfolojileri verilmiştir. Taneciklerin birbirine sıkıca paketlenmiş mikro küreciklerden oluştuğu görülmektedir. Partiküller arasındaki bu sıkı temas elektron taşınımını kolaylaştırmaktadır [14]. Ayrıca SEM görüntüsünden partiküllerin homojen bir şekilde dağıldığı ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Böyle bir morfolojik yapı BDGP'ler için iyi bir boya emilimi sağlayabilir.



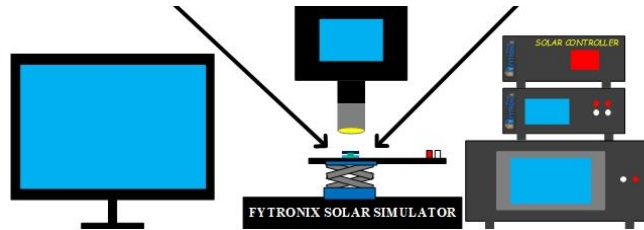
Şekil 6. Üretilen TiO₂ taneciklerinin SEM görüntüsü.

Üretilen boyaların optik özelliklerini araştırmak için Thermo UV-1200 cihazı kullanıldı. Şekil 7'de boyaların absorpsiyon eğrileri verilmiştir. Yapraktan elde edilen boya, tohum ve çiçekten ekstrakte edilen boyaya nazaran daha geniş bir dalga boyu aralığında absorpsiyon göstermiştir. Yapraktan elde edilen boyanın 475 ve 660 nm'de sergilediği iki yoğun pik, duyarlılaştırıcı olarak kullanıldığı hücrenin daha yüksek verim değerine ($\eta=0.057$) sahip olmasıyla ilişkilendirildi. Çünkü görünür bölgede yüksek absorpsiyon davranışı gösteren boyalar, BDGP'lerde daha yüksek verim (η) değerleri gösterirler [15]. Çiçek ve tohumdan ekstrakte edilen boyalar görünür bölgede benzer absorpsiyon davranışı sergilemişlerdir. Ayrıca yaprak boyasına nazaran daha dar bir dalga boyunda absorpsiyon göstermişlerdir. Bu durum, çiçek ve tohuma ait boya ile hassaslaştırılmış BDGP'lerin daha düşük hücre performansına sahip olmasıyla ilişkilendirildi.



Şekil 7. Ekstrakte edilen boyaların absorpsiyon eğrileri.

Üretilen BDGP'lerin fotovoltaik parametreleri ve yük transfer özellikleri, 100 mW/cm² yapay güneş ışığı altında (AM1.5G) Şekil 8'de görülen Fytronix Solar Simulater LSS 9000 tarafından kaydedildi. Şekil 9'da farklı boyalarla duyarlılaştırılmış BDGP'lerin J_{sc}-V (kısa devre akım yoğunluğu- voltaj) eğrileri verilmiştir.



Şekil 8. BDGP'lerin ölçümlerinin alındığı Fytronix Solar Simulater cihazı.

Üretilen hücrelerin fotoelektrik dönüşüm verimleri (η) ve doldurma faktörleri (FF) sırasıyla Denklem 1 ve 2 ile hesaplandı [16]. Bu denklemlerde η güç dönüşüm verimliliğidir; P_{in} , P_{max} , J_{sc} ve V_{oc} sırasıyla giriş gücünü, maksimum gücü, kısa devre akım yoğunluğunu ve açık devre voltajını temsil etmektedir. V_{max} ve J_{max} ise sırayla maksimum voltaja ve akım yoğunluğuna karşılık gelmektedir.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times J_{sc} \times FF}{P_{in}} \quad (1)$$

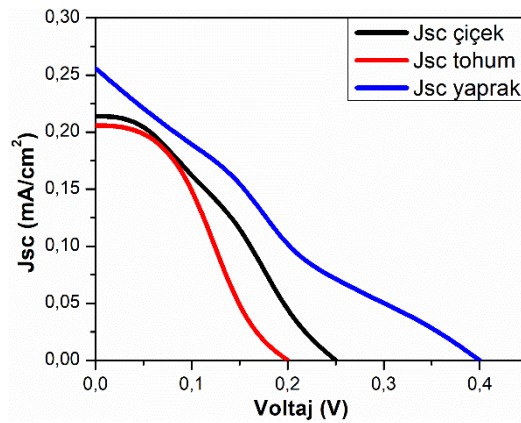
$$FF = \frac{J_{max} \times V_{max}}{J_{sc} \times V_{oc}} \times 100 \quad (2)$$

Hesaplanan tüm fotovoltaik parametreler Tablo 1'de listelenmiştir. Acı meyan bitkisinden elde edilen boyalar BDGP'lerde farklı fotovoltaik parametreler göstermiştir. Öte yandan kullanılan organik boya çeşidi, BDGP'lerin η ve J_{sc} değerlerini önemli ölçüde etkilemiştir. En yüksek J_{sc} (0.26 mA/cm^2) ve η (0.057) değerleri yaprak boyasıyla duyarlılaştırılmış BDGP'de tespit edilmiştir. Bu durum yaprak boyasıyla duyarlılaştırılmış hücrenin daha geniş bir aralıkta sergilediği absorpsiyon ve düşük empedans değeri ile bağdaştırıldı [17]. Tohum ve çiçek boyasıyla hassaslaştırılmış hücrelerin sahip olduğu daha düşük V_{oc} ve J_{sc} değerleri, boyalardaki bazı fonksiyonel grupların düşük konsantrasyonu ve yüksek empedans değerleri ile açıklandı [18]. Öte yandan yaprak boyasıyla duyarlılaştırılmış hücrede görülen daha yüksek V_{oc} ve J_{sc} değerleri, TiO_2 yüzeyi ile boyadaki bazı alkil zincinlerinin yüksek etkileşimine bağlandı [19].

Tablo 1. BDGP'lerin fotovoltaik parametreleri.

Örnek	J_{sc} (mAcm^{-2})	V_{oc} (V)	FF	η (%)
Çiçek boyası kullanılan BDGP	0.21	0.25	0.43	0.022
Tohum boyası kullanılan BDGP	0.20	0.20	0.53	0.021
Yaprak boyası kullanılan BDGP	0.26	0.40	0.55	0.057

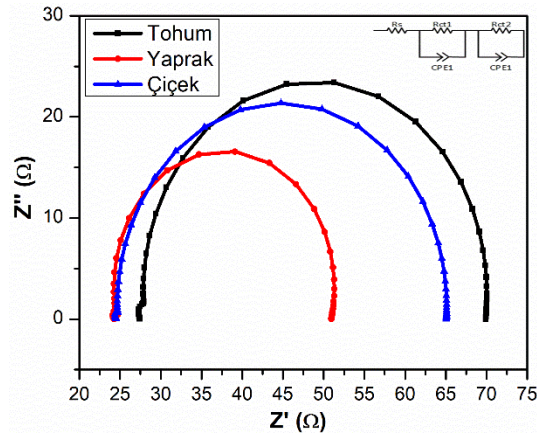
Ayrıca acı meyan bitkisinin yaprak, çiçek ve tohum kısımlarından ekstrakte edilen boyalar görünür bölgede farklı absorpsiyon davranışları gösterdi. Görünür bölgede daha geniş bir dalga boyu aralığında absorpsiyon sergileyen yaprak boyasının daha üstün fotovoltaik parametrelere sahip olduğu tespit edildi.



Şekil 9. Üretilen BDGP'lerin J_{sc} -V eğrileri.

BDGP'lerin arayüz yük transfer direncini karakterize etmek için elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) kullanıldı. Hücrelerin 100 mW/cm^2 ışık yoğunluğu altında ve $0.1\text{-}100 \text{ kHz}$ frekans aralığında 10 mV 'luk açık devre voltajına verdiği tepki Fytronix Impedance Analysis System cihazıyla kaydedildi. Şekil 10'da

fotoanotların sanal kısmını gerçek kısma karşı çizerek Nyquist eğrileri elde edildi. Yüksek frekans bölgesindeki en küçük birinci yarım daire elektrolit/karşıt-elektrot/FTO arayüzündeki elektronik etkileşimleri gösterirken orta frekans bölgesindeki daha büyük olan yarım daireler yük transfer direncini tanımlamaktadır [20]. Nyquist eğrilerini temsil eden yarım dairelerin çapı arttıkça BDGP'lerin empedans değerleri artmaktadır [21]. Şekil 10 incelendiğinde çiçek ve tohum boyasıyla üretilen BDGP'lerin yaprak boyasıyla üretilen hücreye göre daha büyük empedans değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Yüksek EIS değerleri elektronların yaşam sürelerini kısaltmakta ve yük rekombinasyon direncini arttırmaktadır. Bu durum çiçek ve tohum boyasıyla duyarlılaştırılmış hücrelerin fotovoltaiik parametrelerini olumsuz yönde etkilemiştir. Nyquist eğrilerinden de anlaşılacağı gibi yaprak boyasıyla duyarlılaştırılmış hücrenin en düşük empedansa sahip olduğu görülmektedir. Bu durum yaprak boyasıyla hassaslaştırılmış BDGP'nin daha yüksek J_{sc} (0.26 mA/cm^2) ve η (0.057) değerine sahip olmasıyla ilişkilendirildi.



Şekil 10. BDGP'lerin Nyquist eğrileri.

4. Sonuçlar

TiO₂ parçacıkları hidrotermal yöntem kullanılarak başarılı bir şekilde üretildi ve minerolojik yapıları XRD ile doğrulandı. SEM resimleri, elektron taşınımını kolaylaştıran birbirine sıkıca paketlenmiş mikrokürecik yapılar ortaya koydu. UV analizleri, 300-800 nm dalga boyu aralığında acı meyan bitkisinin yaprağından ekstrakte edilen boyanın görünür bölgede daha geniş bir aralıkta absorpsiyon sergilediğini gösterdi. Yaprak boyasıyla hassaslaştırılmış hücrenin daha düşük empedans değeri, sahip olduğu yüksek J_{sc} ve V_{oc} değerleriyle bağdaştırıldı. Üretilen BDGP'ler arasında en yüksek verim ($\eta=0.057$) değerinin yaprak boyasıyla duyarlılaştırılmış hücrede olduğu tespit edildi.

Kaynaklar

- [1] Hernandez RR, Hoffacker MK, Field CB. Efficient use of land to meet sustainable energy needs. *Nat Clim Change* 2015; 5: 353–358.
- [2] Zatirostami A. A dramatic improvement in the efficiency of TiO₂-based DSSCs by simultaneous incorporation of Cu and Se into its lattice. *Opt Mater* 2021; 117: 111110.
- [3] Parisi ML, Maranghi S, Basosi R. The evolution of the dye sensitized solar cells from Grätzel prototype to up-scaled solar applications: A life cycle assessment approach. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2014; 39: 124–138.
- [4] Chu L, Qin Z, Zhang Q, Chen W, Yeng J, Yang J, Li X. Mesoporous anatase TiO₂ microspheres with interconnected nanoparticles delivering enhanced dye-loading and charge transport for efficient dye-sensitized solar cells. *Appl Surf Sci* 2016; 360: 634–640.
- [5] Li H, Zheng B, Xue Y, Liu S, Gao C, Liu X. Spray deposited lanthanum doped TiO₂ compact layers as electron selective contact for perovskite solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2017; 168: 85–90.
- [6] Arı DA, Sezgin A, Unal M, Akman E, Yavuz I, Liang FC, Yılmaz M, Akın S. Desing of an amorphous ZnWSe₂ alloy-based counter electrode for highly efficient dye-sensitized solar cells. *Mater Chem Front* 2023; 10: 1039.
- [7] Tolu MC, Carbas BB, Sonmezoğlu S. Cost-effective polythiophene counter electrodes for dye-sensitized solar cells. *E3S web of conferences*; 2016; Russia. 1-3.
- [8] Ludin NA, Mahmoud AM, Bakar A, Kadhum AH, Sopian K, Karim NS. Review on the development of natural dye photosensitizer for dye-sensitized solar cells. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2014; 31: 386–396.

- [9] Shalini S, Prabhu R, Prasanna S, Mallick TK, Senthilarasu S. Review on natural dye sensitized solar cells: Operation, materials and methods, *Renewable Sustainable Energy Rev* 2015; 51: 1306–1325.
- [10] Durmaz H, Hulul M, Celik H. Meyan (*Glycyrrhiza glabra* L.) bitkisinin antibakteriyel ve antioksidan aktiviteleri. *Harran Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi* 2018; 7: 37–41.
- [11] Liang L, Liu Y, Bu C, Guo K, Sun W, Huang N, Peng T, Sebo B, et al. Highly uniform, bifunctional core/double-shell-structured β -NaYF₄:Er³⁺, Yb³⁺@SiO₂@TiO₂ hexagonal sub-micropri sms for high-performance dye sensitized solar cell. *Adv Mater* 2013; 25: 2174–2180.
- [12] Ansari AA, Sumana G, Pandey MK, Malhotra BD. Sol-gel-derived titanium oxide-cerium oxide biocompatible nanocomposite film for urea sensor. *J Mater Res* 2009; 24: 1667–1673.
- [13] Xu Z, Quintanilla M, Vetrone F, Govorov AO, Chaker M, Ma D. Harvesting lost photons: Plasmon and upconversion enhanced broadband photocatalytic activity in core@shell microspheres based on lanthanide-doped NaYF₄, TiO₂, and Au. *Adv Funct Mater* 2015; 25: 2950–2960.
- [14] Nelson J, Chandler RE. Random walk models of charge transfer and transport in dye sensitized systems. *Coord Chem Rev* 2004; 248: 1181–1194.
- [15] Fouad H, Ansari SG, Khan AA, Ansari ZA. Europium doped TiO₂: an efficient photoanode material for dye sensitized solar cell. *J Mater Sci-Mater Electron* 2017; 28: 6873–6879.
- [16] Kumar K, Manonmani J, Senthilselvan J. Effect on interfacial charge transfer resistance by hybrid co-sensitization in DSSC applications. *J Mater Sci-Mater Electron* 2014; 25: 5296–5301.
- [17] Omar A, Ali MS, Rahim N. Electron transport properties analysis of titanium dioxide dye-sensitized solar cells (TiO₂-DSSCs) based natural dyes using electrochemical impedance spectroscopy concept: A review. *Sol Energy* 2020; 207: 1088–1121.
- [18] Hamadani an M, Jabbari V, Gravand A, Asad M. Band gap engineering of TiO₂ nanostructure-based dye solar cells (DSSCs) fabricated via electrophoresis. *Surf Coat Technol* 2012; 206: 4531–4538.
- [19] Lin L, Peng B, Shi W, Guo Y, Li R. Synthesis of zinc phthalocyanine with large steric hindrance and its photovoltaic performance for dye-sensitized solar cells. *Dalton Trans* 2015; 44: 5867–5874.
- [20] Maurya I, Singh S, Srivastava P, Maiti B, Bahadur L. Natural dye extract from *Cassia fistula* and its application in dye-sensitized solar cell: Experimental and density functional theory studies. *Opt Mater* 2019; 90: 273–280.
- [21] Lohrasbi M, Pattanapanishawat P, Isenberg M, Chuang SC. Degradation study of dye-sensitized solar cells by electrochemical impedance and FTIR spectroscopy. *IEEE Energytech*; 2013; Cleveland-USA. 1–4.

Simetrik ve Asimetrik Şifreleme Algoritmalarının Performans Karşılaştırılması

Alev KAYA^{1*}, İbrahim TÜRKÖĞLU²

^{1,2} Yazılım Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ alev.kaya@firat.edu.tr, ² iturkoglu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 12/05/2023;

Kabul/Accepted: 28/08/2023)

Öz: İnternet tabanlı teknolojilerin her geçen gün artması, dünyadaki veri oluşumunu da sürekli artırmakta ve veri büyüklüğü genişledikçe kullanıcılar için bilginin güvenliği ve gizliliği risk taşımaktadır. Güvenli olmayan bir iletişim kanalı üzerinden veriler iletildiğinde tehlikeli durumların minimuma indirgenmesi veya tamamen önlenmesi için önerilen yöntemlerden biri kriptografik algoritmalar. Temeli matematiksel ifadelerle dayanan tekniklerin ve uygulamalarının birleşimini içeren tüm şifreleme algoritmaları; verilerin kullanılabilirliğini, gizliliğini ve bütünlüğünü korumayı amaçlamaktadır. Ancak başarımları; seçilen dosya türü, boyutu, karmaşıklığı, anahtar yapısı ve kullanılan bilgisayar platformu (yazılım ve donanım) gibi çeşitli faktörlere göre değişmektedir. Bu faktörler temelinde, üç farklı simetrik (AES, Blowfish, Cast-128) ve asimetrik (ECDH, El-Gamal, RSA) şifreleme algoritması kullanılarak bir uygulama yapılmıştır. "The Da Vinci Code" adlı içerikten üretilen 100 KB, 1, 5 ve 100 MB arasında değişen 4 adet çeşitli metinsel dosya boyutlarının karmaşıklığı; UTF-8 tablo yapısındaki birleşimleridir. Anahtar (gizli ve açık) sistemi; 32 karakterden (256 bit) oluşan mimaridir ve uygulama platformu; yazılım için, Windows, Python VS Code, donanım için, Intel I7-CPU, 16 GB RAM, 4 GB-GPU kullanılmıştır. Literatürde kabul edilen performans kriterleri; şifreleme ve şifre-çözmedeki hızı (s), bellek (MB) ve CPU (%) kullanım oranları temel alınarak başarımları değerlendirilmiştir. Böylece, simetrik ve asimetrik şifreleme algoritmalarının başarımları aynı veri setleri üzerinde karşılaştırılmıştır. Simetrik şifreleme algoritmalarının başarımlarının daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Bilgi güvenliği, simetrik kriptografi, asimetrik kriptografi, performans analizi.

Performance Comparison of Symmetric and Asymmetric Encryption Algorithms

Abstract: The increasing use of Internet-based technologies is constantly increasing the formation of data in the world, and as the size of data expands, the security and privacy of information for users carries risks. When data is transmitted over an unsecured communication channel, one of the recommended methods for minimizing or completely preventing dangerous situations are cryptographic algorithms. All encryption algorithms, the basis of which includes the combination of techniques and their application based on mathematical expressions; aims to protect the availability, confidentiality and integrity of data. However, their achievements; The file type chosen varies according to various factors such as size, complexity, key structure and the computer platform (software and hardware) used. On the basis of these factors, an application was made using three different symmetric (AES, Blowfish, Cast-128) and asymmetric (ECDH, El-Gamal, RSA) encryption algorithms. The complexity of the 4 various textual file sizes ranging from 100 KB, 1, 5 and 100 MB generated from the content called "The Da Vinci Code"; UTF-8 are combinations in a table structure. Key (hidden and public) system; It is the architecture consisting of 32 characters (256 bits) and the application platform; For software, Windows, Python VS Code, for hardware, Intel I7-CPU, 16 GB RAM, 4 GB-GPU are used. Performance criteria accepted in the literature; performance in encryption and decryption was evaluated based on speed (s), memory (MB), and CPU (%) utilization rates. Thus, the performances of symmetric and asymmetric encryption algorithms are compared on the same data sets. It has been observed that symmetric encryption algorithms have better performance results.

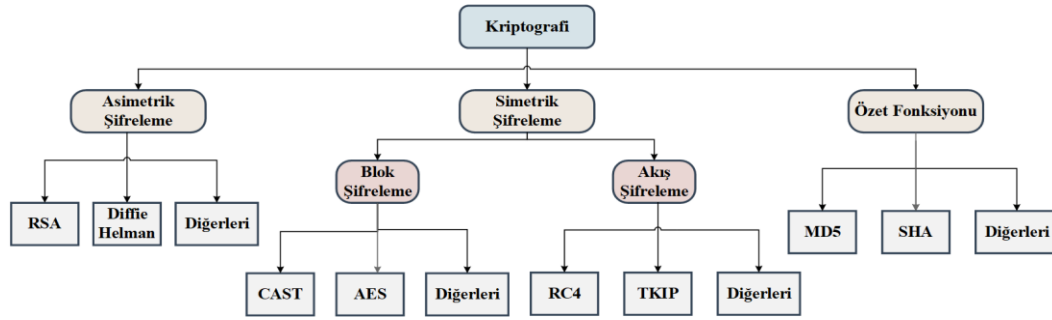
Key words: Information security, symmetric cryptography, asymmetric cryptography, performance analysis.

1. Giriş

Günümüzde internet tabanlı teknolojilerin her geçen gün artması, veri hacmini de artırmakta ve veri büyüklüğü genişledikçe dijital ortamdaki bilgilerin kullanıcıları için güvenliği ve gizliliği risk taşımaktadır [1]. Güvenli olmayan bir iletişim kanalı üzerinden veriler iletildiğinde tehlikeli durumların minimuma indirgenmesi veya tamamen kaldırılması için önerilen yöntemlerden biri de bilgi güvenliğinin alt dalı olan kriptografik algoritmalar. Kriptoloji, iletişim sağlanması planlanan taraflar arasında paylaşılacak dosya türlerinin belirli bir sisteme göre şifrelenmesi (kriptografi) ve bu mesajların güvenli bir ortamda iletilmesi ve iletilmiş mesajın bozulmadan orijinal haline şifre çözme ile geri (kriptanaliz) getirilmesidir. Temeli matematiksel ifadelerle dayanan tekniklerin ve uygulamalarının birleşimi olan ve Şekil 1' de "kriptolojinin kategorik sınıflandırması"

* Sorumlu yazar: alev.kaya@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-3544-5267, ² 0000-0003-4938-4167

başlığı ile görselleştirilen kriptografik algoritmaların tümü; verilerin kullanılabilirliğini, gizliliğini ve bütünlüğünü korumayı amaçlamaktadır. Ancak başarıları; seçilen dosya türü (örneğin; metin, video, sinyal, görüntü vb.), boyutu (örneğin; KB, MB, GB, ...), karmaşıklığı (örneğin; karakter yapısı, multi özellikler vb.), anahtar yapısı (örneğin; anahtarlı, anahtarsız, hibrit) ve kullanılan bilgisayar platformu (örneğin; Python, Java vb. yazılım ve ram gibi vb. donanım) gibi çeşitli faktörlere göre değişim göstermektedir [2]. Bu faktörler temelinde, simetrik olarak Gelişmiş Şifreleme Standardı (Advanced Encryption Standard: AES), Blowfish, Cast-128 ve asimetrik olarak Eliptik Eğri Diffie-Hellman (Elliptic-Curve Diffie–Hellman: ECDH), El-Gamal, Rivest–Shamir–Adleman (RSA) adlı altı farklı şifreleme algoritması kullanılarak bir uygulama yapılmıştır. Çalışmada gerçek bir veri seti olan “*The Da Vinci Code*” adlı içerikten 100 KB, 1, 5 ve 100 MB arasında üretilen dört adet metinsel dosya boyutlarının karmaşıklığı; 8-bitlik bir Unicode dönüşümlü (Unicode Transformation Format- 8: UTF-8) tablo yapısındaki birleşimleridir. Anahtar (gizli ve açık) sistemi; 32 karakterden (256 bit) oluşan mimaridir ve uygulama platformu; yazılım için; *Windows, Python VS Code*, donanım için, *Intel I7-CPU, 16 GB RAM, 4 GB-GPU* hafızadır. Literatürde kabul edilen performans kriterleri; şifreleme ve şifre-çözmedeki hızı (s), bellek (MB) ve CPU (%) kullanım oranları temel alınarak başarıları değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Kriptolojinin kategorik sınıflandırması

Çalışmanın geri kalanı aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümde ilgili çalışmalar başlığı altında; literatürdeki son beş yılı içeren benzer veya yakın çalışmalar incelenmiş, çalışmaların performans sonuçları, çalışmalarda kullanılan farklı veri setleri ve yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde materyal ve metot başlığı altında; çalışmada kullanılan veri seti, şifreleme algoritmaları ve performans kriterleri hakkında bilgiler verilmiş görsel içeriklerle zenginleştirilmiştir. Uygulama sonuçları dördüncü bölümde Tablo 1 ile verilmiş ve benzer çalışmalarla kıyasın yapıldığı tartışma ve sonuç başlığı altındaki son bölümünde (beşinci bölüm) çalışmanın avantaj ve dezavantajları vurgulanmış ve ileriye dönük çalışmalar tartışılmış ve ikinci bölümdeki çalışmalar ile sonuçlar karşılaştırılmalı incelenmiştir. Çalışmanın öne çıkan özellikleri şu şekilde ifade edilebilir;

- Gerçek bir veri kümesi olan “*The Da Vinci Code*” adlı metinsel içerikten üretilen farklı boyutlardaki (100 KB, 1,5 ve 100 MB) yapay veri setlerinin şifrenmesi,
- Uygulama için seçilen simetrik ve asimetrik algoritmaların, literatürde metinsel dosya türü için kabul edilen performans kriterleri; şifreleme ve şifre-çözmedeki hızı (s), bellek (MB) ve CPU (%) kullanım oranları temel alınarak başarılarının değerlendirilmesi,
- Türkçe literatüre, son beş yılı kapsayan benzer çalışmaların özeti niteliğinde güncel ve genel bir kaynak araştırması ve uygulamasının sunulması.

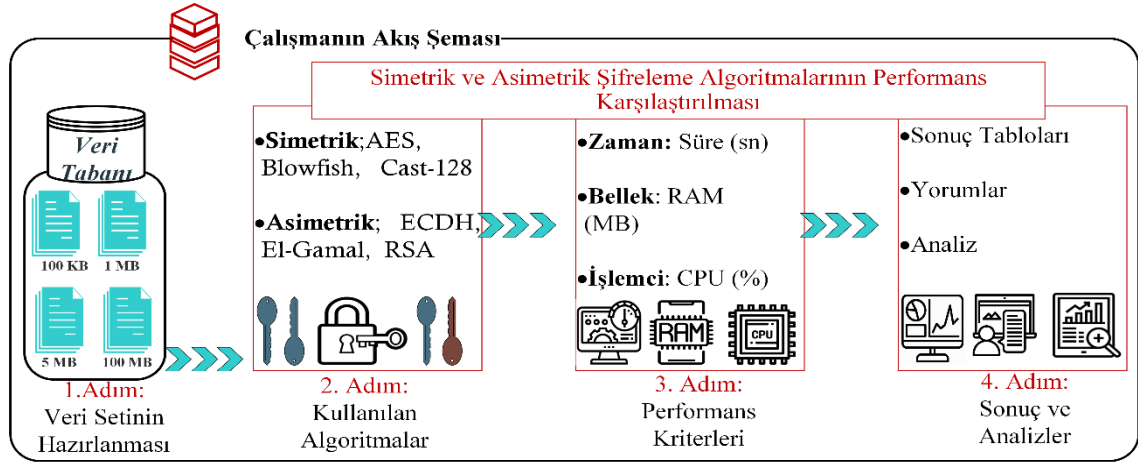
2. İlgili Çalışmalar

Farklı boyutlardaki metinsel veri türü üzerinde 10 farklı simetrik şifreleme algoritmalarının uygulandığı çalışmada [3], performans kriterleri olarak süre, CPU, RAM ölçülmüştür. Şifreleme ve şifre çözme sonuçlarında; Blowfish, Salsa20, 3DES, Cast, AES ve DES algoritmalarının daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Farklı boyutlardaki metinsel veri türü üzerinde 3 farklı asimetrik şifreleme algoritmalarının uygulandığı bir başka çalışmada [4] ise performans kriterleri olarak süre, CPU, RAM ölçülmüştür. Şifreleme ve şifre çözme sonuçlarında; ECDH, El-Gamal ve RSA sıralaması çıkmıştır. 3 farklı simetrik ve asimetrik şifreleme algoritmalarının (AES, DES, RSA) metinsel veri türü üzerinde değerlendirildiği uygulamada [5], performans kriterleri olarak hız, süre, verim, çığ etkisi dikkate alınmıştır. Çıkan sonuçta AES algoritmasının en verimli olduğu bulunmuştur. AES ve RSA algoritmalarının süre, anahtar uzunluğu ve şifre uzunluğu kriterlerine göre metinsel veri türünde yapılan karşılaştırmalı çalışmada [6], AES' nin iki şifreleme tekniği arasından daha iyi olduğu ve

özellikle mobil uygulamaların geliştirilmesinde güvenlik önlemi için iyi bir algoritma olarak önerisi verilmiştir. AES, DES ve RSA algoritmalarının metinsel veri türü üzerinde, hesaplama süresi, bellek kullanımı ve çıkış baytı kriterlerine göre kıyaslandığı bir diğer çalışma [7] yapılmıştır. Sonuçlara göre, DES algoritmasının en az şifreleme süresi tükettiğini ve AES algoritmasının en az bellek kullanımına sahip olduğunu, AES ve DES algoritması durumunda ise şifreleme süresi farkının küçük olduğunu gösterdiği söylenmiştir. Ayrıca RSA, en uzun şifreleme süresini tükettiği ve belleği çok yüksek kullandığını ancak çıkış baytı en az olduğu sonuçlarına varılmıştır. Süre, CPU, RAM kriterlerine göre kıyaslanan çalışmada [8] ise asimetrik ve simetrik anahtar algoritmalarının zayıflıklarını ve güçleri açıklanmıştır. RC5 ve RC4 güvenliği sorgulanması gerektiği ve ayrıca RC4, RC5'ten daha hızlı olduğu verilmiştir. Bu şifreleme algoritmaları AES, 256 bitlik anahtar boyutlarına izin vererek ve gelecekteki saldırılara karşı koruma sağlayarak tüm algoritmalarından daha güvenli, verimli ve hızlıdır sonucuna varılmıştır. RSA'nın en iyi asimetrik anahtar algoritması olduğuna ancak şifre çözme sürecinde büyük tamsayılar için şifreleme ve çarpanlarına ayırma sorunu için daha fazla zaman harcamasına değinilmiştir. Metinsel veri türünde yapılan bir diğer çalışma [9], simetrik ve asimetrik şifreleme algoritmalarının kıyasını; güvenlik, anahtar boyutu, karmaşıklık, süreye göre yapmıştır. Bu çalışmaya göre şifreleme, zaman, hız ve esneklik açısından AES, BlowFish, RC4, E-DES ve TDES en hızlı algoritmalar. AES'in şifreleme hızı, kod çözme karmaşıklığı, anahtar uzunluğu, güvenlik ve esneklik açısından en güvenilir algoritma olduğu sonucuna varılmıştır. Hibrit, geliştirme, döngü sayısı, anahtar uzunluğu, blok boyutu, bulunan saldırılar, güvenlik düzeyi, olası anahtarlar, tüm olası anahtarları kontrol etmek için gereken süre gibi kriterlerin temel alındığı uygulama [10]; metinsel veri türünde simetrik, asimetrik ve hibrit anahtarlı algoritmalar oluşmaktadır. AES-ECC'nin zaman ve mekân karmaşıklığını azalttığı ve DSA-RSA hibrit algoritmasının daha iyi performans ve verime sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

3. Materyal ve Yöntem

Tasarımı güvenlik ve verimlilik üzerine inşa edilen kriptografik algoritmalar; farklı platformlarda kullanılabilir yapısı, bellek hacmi tasarrufu ve optimal maliyet sunan kolay uygulaması gibi vb. özellikleri içermektedir. Bu özellikler temelinde, kriptosisteme ulaşmaya çalışan üçüncü (kriptanalizler) şahıslardan kaynaklı zorluklar, yüzde yüz güvenli bir kriptografik algoritma geliştirmeyi de oldukça zorlamaktadır. İletişimde uygun, doğru ve yüksek güvenlik düzeyi sağlayan algoritmaların seçilmesine ek bir gereksinim vardır [11]. Yapılan çalışma kapsamında; kriptografik anahtarlı sistemlere dayanan asimetrik ve simetrik şifreleme algoritmalarıyla uygulamalar yapılmış ve farklı boyutlardaki metinsel veri türü üzerinde performans analizleri karşılaştırılmıştır. Çalışmanın akış şeması Şekil 2' te görselleştirilerek ve alt bölümlerde takiben açıklanarak aktarılmıştır.



Şekil 2. Çalışmanın akış şeması

3.1. Veri setinin hazırlanması

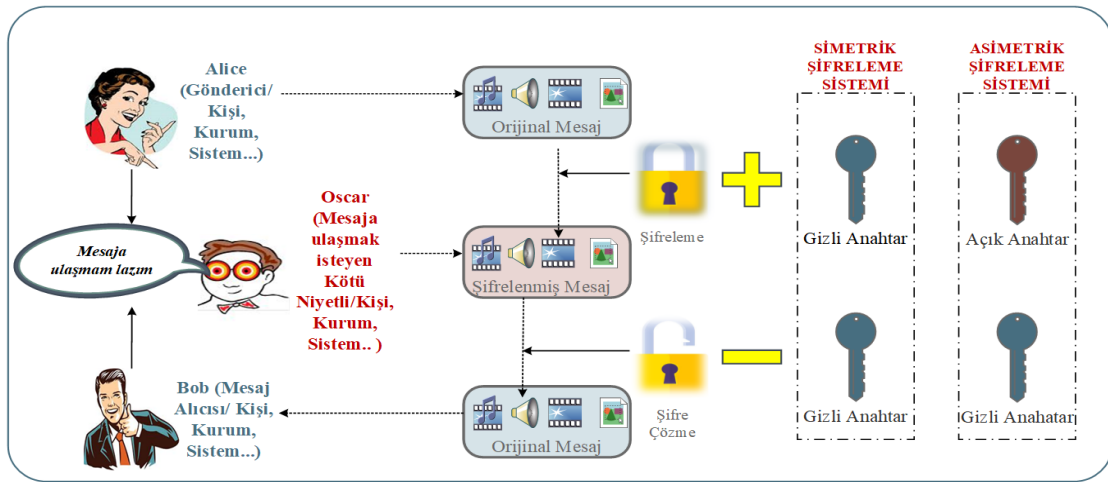
Bu çalışmada; "The Da Vinci Code" adlı içerikten [12] dört farklı boyutta yapay olarak üretilen veri setleri kullanılmaktadır. Orijinal ve yapay üretilen veri formu metinsel türdür. Yapay veri setlerinin boyutları; 100 KB, 1 MB, 5 MB ve 100 MB arasında değişmektedir.

3.2. Kullanılan Şifreleme Algoritmaları

Herhangi bir modern şifreleme sistemi kısa açıklamasıyla[13] aşağıdaki bileşenlerden ve algoritmalarından oluşur.

- **Gönderici- Alıcı:** Mesaj iletişimde bilgiyi gönderen ve alan taraflar.
- **Kanal:** Mesaj iletiminin yapıldığı ortam (internet, telefon, ...).
- **Orijinal (Düz) Form:** Şifreli forma dönüştürülecek veri türünün orijinal hali.
- **Şifreli Form:** Ham veri türünün işlenmiş (şifreleme) hali.
- **Şifreleme:** Herhangi bir mesajın orijinal halini değiştirmek için yapılan gizleme işlemi.
- **Şifre Çözme:** Şifrelenerek gizlenmiş veriyi tekrar eski orijinal haline bozulmadan geri döndürme işlemi.
- **Anahtar:** Orijinal veri türünün şifreli forma dönüştürülmesinde ve tekrar orijinal hale çevrilmesinde yararlanılan karakter dizisi yani şifreleme ve şifre çözme sürecinin (anahtarlı sistemlerde) ana aracı.
- **Anahtar Arama Algoritması:** Her türlü olası kombinasyonu denerek anahtara ulaşılmaya çalışılan süreç.
- **Açık (Genel) Anahtar:** Asimetrik şifrelemede herkes tarafından erişilebilen ve sadece şifreleme sürecinde kullanılan ayrıca şifre çözme sürecinde de özel anahtara yardımcı olan anahtar tipi.
- **Gizli (Özel) Anahtar:** Asimetrik şifreleme algoritmasında kullanılan ve sadece sahibi tarafından bilinen ve paylaşılmayan anahtar türü.
- **Şifre Kırma:** Şifrelemede kullanılan yapıyı öğrenmek için yapılan teşebbüs.
- **Saldırgan:** Mesaj iletişimde ilgili tarafların arasında olmayan yapılar (kişi, kurum, sistem, ...).
- **Saldırı:** Şifrelenmiş sistemin yapısını (şifresini) kırmak için yapılan uygulama.
- **Kriptanalist:** Şifrelenmiş mesajı çözen kişi.
- **Kerckhoffs Prensipleri:** Auguste Kerckhoffs [14] tarafından ortaya atılan prensibe göre; tasarlanması gereken kriptolojik sistemlerin güvenlik riski yalnızca anahtar sisteminin gizlilik riskine bağlıdır. Şifrenmiş yapının anahtar haricinde her detayı bilinse dahi şifre çözme işlemi başarısızlıkla sonuçlanacaktır.
- **Shannon Prensipleri:** Claude Shannon [15] tarafından ortaya atılan prensibe göre; şifreleme sisteminin güçlülüğünden bahsetmek için karıştırma ve yayılma özellikleri olmalıdır. Karıştırma özelliği, şifrelenmiş form ile anahtar arasındaki ilişkinin istatistiksel tekniklerle tespiti yapılmamalıdır. Yayılma özelliği; orijinal formun bir karakterinde gerçekleştirilecek değişimle şifrelenmiş formdaki birden fazla karakteri etkilemesinin sonucuyla oluşan yapıdır. Buradaki amaç; şifrelemede ve şifre çözme sürecinde anahtar yapısının istatistiksel tekniklerle belirlenmemesi için yapılan gizlemedir.

Yukarıda açıklamalara dayanarak güvenli bir kripto sistemin tasarımı için geliştirilen şifreleme algoritmaları Şekil 3 ile gösterildiği gibi anahtar yapısına göre; simetrik ve asimetrik şifreleme sistemleri olarak sınıflandırılmıştır.



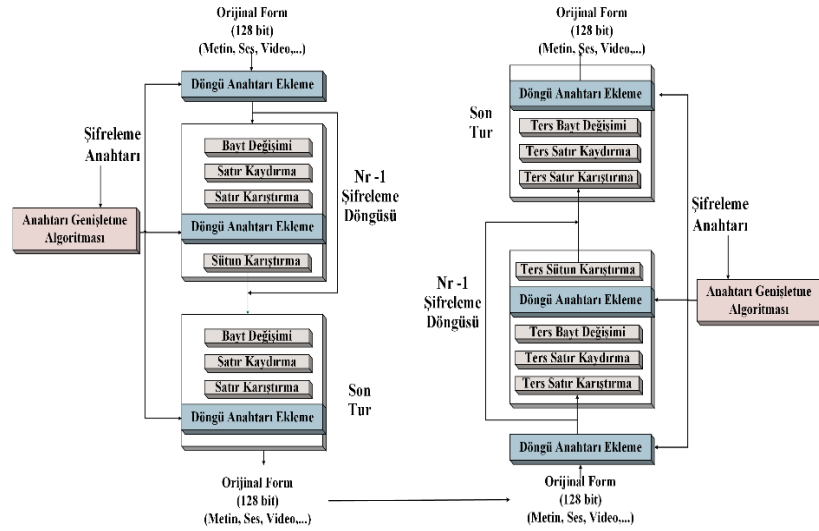
Şekil 3. Simetrik ve asimetrik şifreleme sistemleri

3.2.1. Kullanılan simetrik şifreleme algoritmaları

Bu çalışmada kullanılan simetrik anahtarlı şifreleme algoritmaları; AES, Blowfish ve Cast-128' tir. Simetrik anahtarlı sistemler şifreleme ve şifre çözme sürecinde aynı anahtar (gizli) kullanılır ve bu anahtar gizli tutulmalıdır. Ayrıca anahtarların aynı olmasından dolayı asimetrik yapılara göre sık sık anahtar değişikliği gerekebilir. Gönderici taraf alıcı tarafın gizli anahtarı hakkında tamamen bilgi sahibidir. Asimetrik şifrelenmeye göre kırılma durumları daha az dirençlidir. Gizlilik kriteri hariç bütünlük- kimlik doğrulama- inkâr edilememe kriterlerini sağlamamaktadır. Taraflar arasında bilinen tek bir anahtar yapısı olduğu için şifre çözme süreci asimetrik yapıya göre daha düşüktür (hızlıdır) ve buda önemli avantajlardan biridir. Şifrelenebilecek veri miktarı asimetrik yapılara göre daha yüksektir. İşlemciyi ve diğer kaynakları asimetriklere göre daha az tüketir. Tüm güvenlik, anahtara ve anahtar uzunluğuna bağlıdır. Asimetrik yapılara göre daha uzun anahtar dizinine sahip olabilir. Güvenli bir şekilde anahtarın iletilmesi ve kapasite sınırı dezavantajdır. Donanım ile uyumludur. Modern şifreleme sistemlerinin temelini oluşturmaktadır [16-19].

3.2.1.1. AES

1997 yılında Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (National Institute of Standards and Technology: NIST), yüksek güvenlik ve verimlilik gibi öncelikli ihtiyaçları karşılayan yeni bir şifreleme algoritması AES'i duyurmuştur. Mevcutta bulunan Veri Şifreleme Standardı (Data Encryption Standard: DES) ve Üçlü DES (Triple DES; TDES) algoritmalarının yerini almaya (uzunluk değişkenli tuşlar, daha hızlı oluşu) çalışan AES; 128(10 tur), 192(12 tur) ve 256(14) bit anahtar uzunluklarıyla esnek bir yapıda tasarlanmıştır. Çok büyük blok boyutlarına sahip olduğundan daha fazla işlem için güç ve kaynak harcaması, bu basit matematiksel yapının dezavantajıdır [20,21]. AES kriptografik süreci Şekil 4 ile görselleştirilmiştir. AES kriptografik mimarisi; bayt değişimi, satır kaydırma, sütun karıştırma ve döngü anahtarının eklenmesi olarak dört aşamalı döngüsel bir sürecin tekrarıdır. Her bir adım sırasını bozmadan işlemleri gerçekleştirir yalnızca sütunları karıştırma son döngüde işleme katılmaz. Şifre çözme süreci ise bu adımların tam teri olarak uygulanır. Süreç; 128 bit =16 bayt uzunluğunda sadece veri girişlerinin (ve çıkışlarının), 4×4 (satır \times sütun) matrisler aracılığıyla, her bölmesi bir bayt= 8 bit ve her satırı 4 baytlık =32 bitlik bir kelime olacak şekilde toplamda 16 bölümlü bir yapıyla başlar.

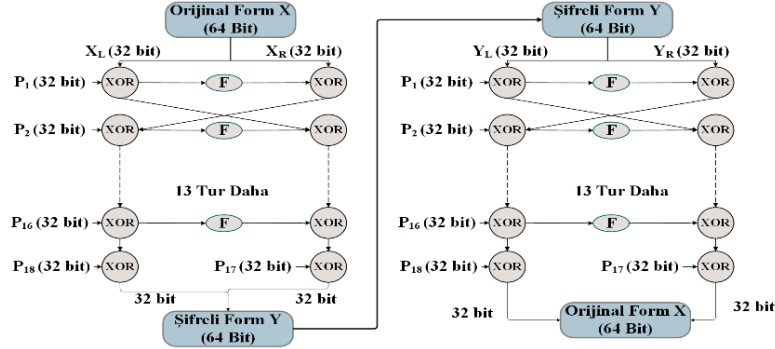


Şekil 4. AES kriptografik süreci

3.2.1.2. Blowfish

Anahtar uzunluğu (32- 448 bit arasında değişen) esnek ve DES' ten daha hızlı yapısıyla Blowfish algoritması, 64 bitlik bloklara mesajları bölerek kodlama yapmaktadır. Ayrıca bu 64 bitlik bloklar, anahtar ve veri genişletmeye bölünerek çalıştırılır. Kendine özgü diğer avantajlar (karmaşık tuş programı, verimlilik, yüksek hız ve bağımsız S kutuları gibi) sayesinde Blowfish en hızlı algoritmalarından biri konumundadır. Güvenlik riski taşıyan durumlarda

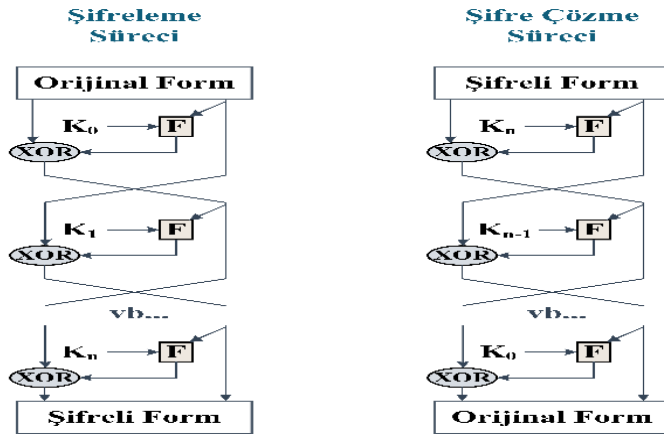
anahtarın aktarılmasındaki hassasiyet, zaman faktöründeki tüketim hacmi gibi vb. durumlar algoritmanın dezavantajlarıdır [20,21]. Blowfish kriptografik süreci Şekil 5 ile görselleştirilmiştir.



Şekil 5. Blowfish kriptografik süreci

3.2.1.3. Cast-128

Anahtar uzunluğu 8 bit artışla 40- 128 bit aralığında değişen Cast-128, 64 bitlik düz metin şablonunu 64 bitlik kodlanmış forma dönüştürürken 16 döngümlük yapısıyla çalışmaktadır [22]. Cast-128 kriptografik süreci Şekil 6 ile görselleştirilmiştir.



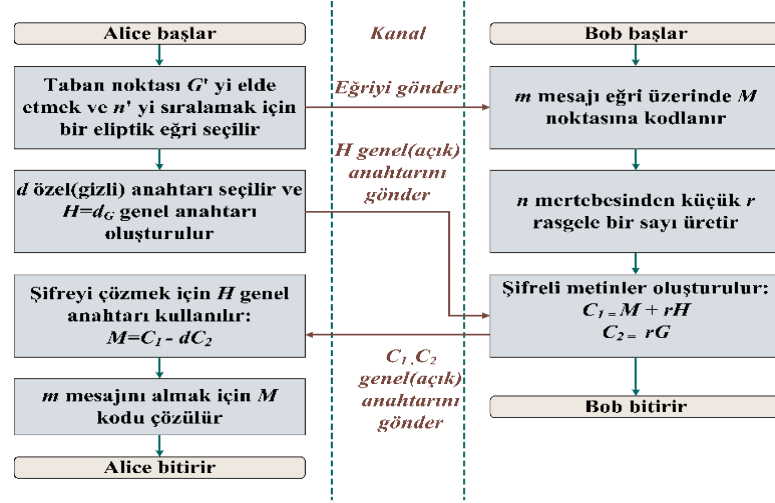
Şekil 6. Cast-128 kriptografik süreci

3.2.2. Kullanılan asimetrik şifreleme algoritmaları

Bu çalışmada kullanılan asimetrik anahtarlı şifreleme algoritmaları; ECDH, El- Gamal ve RSA' dır. Asimetrik anahtarlı sistemler, şifreleme ve şifre çözme sürecinde farklı anahtarlar (gizli ve açık) kullanılır. Şifreleme için kullanılan anahtar herkes tarafından bilinebilir fakat şifre çözüme kullanılan gizli anahtar sadece alıcı tarafından bilinmelidir. Simetrik yapılar kadar sık anahtar değişimine gerek duymaz çünkü şifrelemede kullanılan açık anahtar şifreli formu çözememektedir. Gönderici taraf alıcı tarafın gizli anahtarını bilemez ama açık anahtarı hakkında tamamen bilgi sahibidir. Simetrik şifrelenmeye göre daha zor kırılırlar. Gizlilik- bütünlük- kimlik doğrulama- inkâr edilememe kriterlerini sağlamaktadır. Taraflar arasında bilinmeyen tek bir anahtar(gizli) yapısı olduğu için şifre çözme süreci simetrik yapıya göre daha yüksektir (yavaştır) ve buda önemli dezavantajlardan biridir. Dosya türünün boyutuna göre üssel olarak artış göstermektedir. Ayrıca veri güvenliğini sağlamada çözülmesi zor matematiksel hesaplamalar yani büyük asal sayılar üzerine kurulu olduğundan işlemciyi ve diğer kaynakları daha fazla tüketir. Anahtar uzunluğu, simetrik yapılara göre daha kısa anahtar dizinine sahiptir. Güvenlik, anahtar uzunluğuna bağlıdır ve iki farklı anahtar yapısı olduğu için simetrik yapıya göre daha güvenlidir. Çok büyük sayılar ile işlem yapılmasından dolayı donanımsal yapıların entegrasyonu zordur. Şifrelenebilecek veri miktarı simetrik yapılara göre daha düşüktür. Elektronik imzaların ortaya çıkmasının temelini oluşturmaktadır[16-19].

3.2.2.1. ECDH

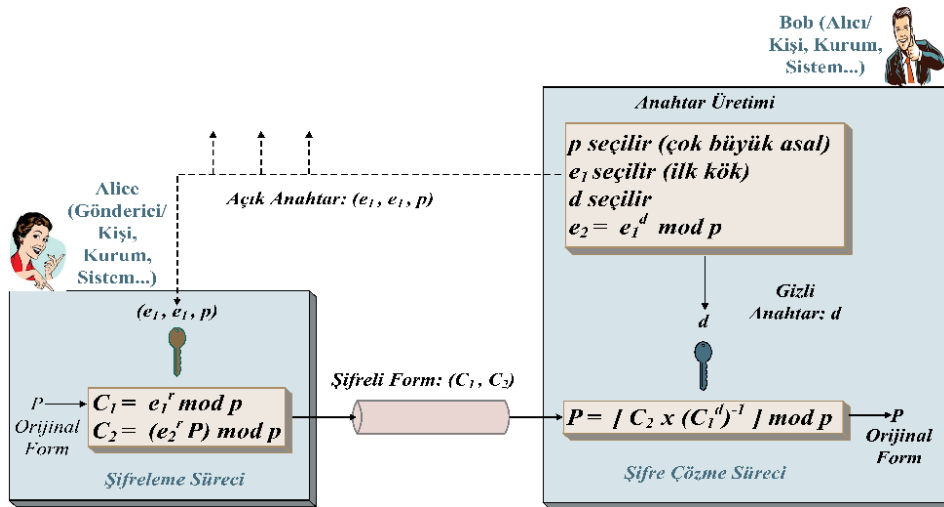
ECDH kriptografik süreci Şekil 7 ile görselleştirilmiştir. Görselde iletişim kanalı incelendiğinde; eğrinin bilgileri, ortak kullanılan anahtarı ve şifreli metni yansıttığı görülmektedir. Yani üçüncü şahıslar (kötü niyetli kişi, kurum vb.) özel anahtar erişimine sahip olmadan bu yapıya müdahalede bulunamazlar. Asimetrik şifreleme sistemlerinin avantajlarından biri olan ek güvenli hali, bu yansımanın karşılığıdır [22].



Şekil 7. ECDH kriptografik süreci

3.2.2.2. El- Gamal

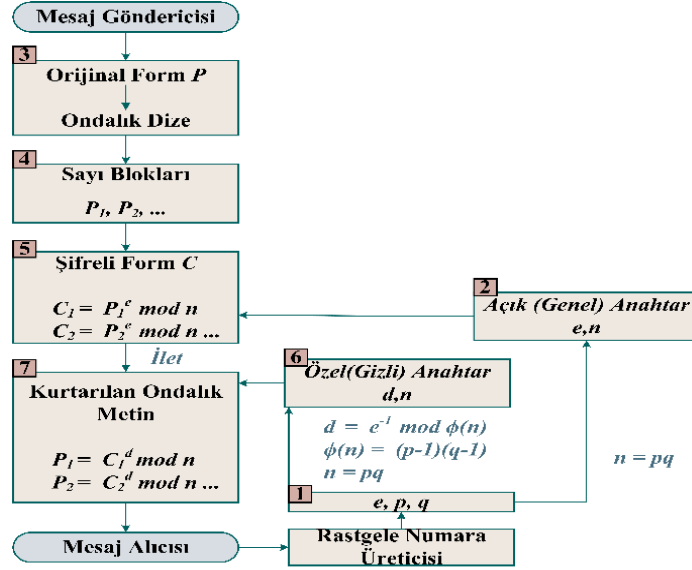
Asimetrik kripto sistemlerinden biri olan ve temeli Diffie – Hellman (DH) anahtar değişimine dayanan El Gamal algoritması; Taher Elgamal [23] tarafından önerilmiştir. Ayrık logaritma problemleri önerisi, imzalama yapısı ve şifreleme algoritmasından oluşan şablonuyla çoğu kriptografik yöntemlerin esinlenilen durumunda konumlanmıştır [24,25]. RSA asimetrik şifreleme algoritması gibi tekniklerden ayrılan yönü; güvenlik sağlamada El- Gamal’ da büyük bir asal modülün ayrık logaritmalarının hesabına dayanmasıdır. RSA’ da güvenlik; büyük tamsayılardan oluşan çarpanların bulunma zorluk derecesidir. El- Gamal’ın diğer bir üstünlüğü; kullanılacak mesajın her şifreli yapısında farklı bir forma dönüştürülmesidir yani sabit olmayan dinamik yapısı vardır [26-29]. Şekil 8 ile El- Gamal kriptografik süreci tasvir edilmiştir.



Şekil 8. El- Gamal kriptografik süreci

3.2.2.3. RSA

1977'de Ron Rivest, Adi Shamir ve Leonard Adleman'ın soyadlarının baş harflerinden ismini alan RSA algoritması; gizli tutulan iki büyük asal sayıyla birlikte bir yardımcı değer birleşimi sonucu açık anahtar oluşturulur. İletilmek istenilen bilgi paylaşılan ortak anahtar ile herkes tarafından şifrelenebilir ama sadece gizli olan asal sayılara ulaşılmadıkça şifre çözme olamaz [30-32]. RSA' nın güvenliği kullanılan asal sayılarının çarpımlarındaki sonucunun çarpanlara ayrılmasının zorluğuyla eşdeğerdir yani anahtar boyutu ne kadar büyükse bu algoritmanın kırılması da o kadar güvenlidir. 2048 ve daha büyük bit uzunluğundaki anahtar boyutları yeterli güvenlikte kabul edilir (1024 bit uzunluğundaki anahtar boyutlu sistemlerin yakın gelecekte kırılacağı düşünülmekte [33]. Şekil 9 ile RSA kriptografik süreci verilmektedir.



Şekil 9. RSA kriptografik süreci

3.3. Kriptografik algoritmalarının başarımları

Kullanılan veri türü kapsamında değişkenlik gösteren kriptografik bir sürecin başarımları, metinsel veri türünde aşağıdaki metriklere göre kıyaslanabilir [19]

- Şifrelenmiş veriye erişim için saldırı süresinin uzunluğu (sn),
- Şifreleme ve şifre çözme aşamalarında toplam harcanan zaman(sn),
- Şifreleme ve şifre çözme aşamalarında toplam ihtiyaç duyulan bellek miktarı(),
- Kurulacak sistem ile kullanılan algoritmanın uyumu.

4. Uygulama Sonuçları

Çalışmaya ait şifreleme ve şifre çözme performans sonuçları Tablo 1 ile bu bölümde verilmektedir. Ancak başarımları; seçilen dosya türü (örneğin; metin, video, sinyal, görüntü vb.), boyutu(örneğin; KB, MB, GB, ...), karmaşıklığı(örneğin; karakter yapısı, multi özellikler vb.), anahtar yapısı(örneğin; anahtarlı, anahtarsız, hibrit) ve kullanılan bilgisayar platformu (örneğin; python, java vb. yazılım ve ram gibi vb. donanım) gibi çeşitli faktörlere göre değişim göstermektedir. Bu faktörler temelinde çalışmada, kullanılan bilgisayarın donanım özellikleri;

- İşlemci (CPU): 11th Gen Intel(R) Core(TM) @2.70GHz
- Bellek (RAM): 16,0 GB, Intel I7-CPU, 16 GB RAM, 4 GB-GPU
- İşletim Sistemi: Windows 11 Pro 64-bit.

Kullanılan bilgisayar yazılımı özellikleri; Python 3.9.13, Vs Code 1.78.0.

Tablo 1: Şifreleme ve şifre çözme performans sonuçları

BOYUT	ALGORİTMA	CPU		RAM		SÜRE		TOPLAM	
		Şifreleme	Çözme	Şifreleme	Çözme	Şifreleme	Çözme	Şifreleme	Çözme
100 KB	AES	4.2	3.5	3	3	0.12	0.5	7.32	7
	Blowfish	3.99	7	2	6	0.08	0.03	6.07	13.03
	Cast-128	4	4.2	4	1	0.07	0.003	8.07	5.203
	ECDH	2.95	2.4	2	1	0.071	0.002	5.021	3.402
	El-Gamal	3.3	4.7	4	6	0.045	0.035	7.345	10.735
	RSA	3.4	3.2	2	3	1.8	1.2	7.2	7.4
1 MB	AES	5.4	5.5	4	6	0.14	0.7	9.54	12.2
	Blowfish	3.55	5.9	9	10	0.09	0.01	12.64	15.91
	Cast-128	6	8.3	10	3	0.11	0.1	16.11	11.4
	ECDH	4.65	4.8	8	9	0.087	0.007	12.737	13.807
	El-Gamal	5.125	5.65	23	66	0.346	0.253	28.471	71.903
	RSA	-	-	-	-	-	-	-	-
5 MB	AES	6.5	6.8	11	12	0.26	0.12	17.76	18.92
	Blowfish	5.6	5.9	10	21	0.17	0.08	15.77	26.98
	Cast-128	7.1	8.5	25	5	0.24	0.12	32.34	13.62
	ECDH	6.36	7.36	8	7	0.144	0.023	14.504	14.383
	El-Gamal	6.1	9.52	25	352	1.95	1.74	33.05	363.26
	RSA	-	-	-	-	-	-	-	-
100 MB	AES	7.47	9.47	128	381	2.1	1.1	137.57	391.57
	Blowfish	8.52	10.63	84	396	2.39	1.98	94.91	408.61
	Cast-128	7.25	9.68	34	371	3.42	1.64	44.67	382.32
	ECDH	7.683	8.12	178	403	1.71	0.54	187.393	411.66
	El-Gamal	9.07	6.36	3447	5162	72.96	50.76	3529.03	5219.12
	RSA	-	-	-	-	-	-	-	-

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, gerçek ve tam bir veri seti olan “*The Da Vinci Code*” adlı içerik üzerinde, simetrik ve asimetrik şifrelemeye ait uygulama yapılmıştır. Veri seti üzerinden; 100 KB, 1, 5 ve 100 MB arasında değişen dört adet çeşitli metinsel dosya boyutları yapay olarak üretilmiştir. Yapay olarak üretilen bu dört farklı veri seti; üç farklı simetrik ve asimetrik şifreleme algoritması (AES, Blowfish, Cast-128, ECDH, El-Gamal ve RSA) ile performans analizi yapılmıştır. Şifreleme algoritmalarının metinsel dosya türleri için literatürde kabul edilen performans kriterleri; şifreleme ve şifre çözümedeki hızı (sn), bellek (MB) ve CPU(%) kullanım oranları temel alınarak başarımları değerlendirilmiştir. Çıkan sonuçlar incelendiğinde;

- 100 KB ölçekli bir veri seti ile **şifrelemede**; ECDH, Blowfish, RSA ve **şifre çözümede**; ECDH, Cast-128, AES,
- 1 MB ölçekli bir veri seti ile **şifrelemede**; AES, Blowfish, ECDH, ve **şifre çözümede**; Cast-128, AES, ECDH,
- 5 MB ölçekli bir veri seti ile **şifrelemede**; ECDH, Blowfish, AES ve **şifre çözümede**; Cast-128, ECDH, AES,
- 100 MB ölçekli bir veri seti ile **şifrelemede**; Cast-128, Blowfish, AES ve **şifre çözümede**; Cast-128, AES,

Blowfish, algoritmalarının ilk üç sırada daha optimal sonuçlar ürettiği görülmüştür. Girişlere göre farklı algoritmaların performansının da farklı olduğu ve ikinci bölümde verilen literatürle neredeyse benzer veya yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. RSA algoritmasının, anahtar yapısından kaynaklı kısıtlama gereği 100 kb dan sonraki boyutlandırmalarda kıyaslanmaya dâhil edilmediği ve en uzun şifreleme süresini tükettiği ayrıca belleği çok yüksek kullandığı, sonuçlarla teyit edilmiştir. Bu çalışmadaki ana hedef; farklı boyutlardaki veri setlerinin güvenliğini sağlamak için simetrik ve asimetrik anahtarlı algoritmaların performans sonuçlarını kapsayacak şekilde, literatüre son yıllara ait güncel bir uygulama sunmaktır. Simetrik algoritmaların yüksek boyutlu verilerde daha iyi çıkması, veriler arasındaki bağımlılıkların daha az olmasından asimetrik algoritmalarla göre daha yüksek hızda süreci tamamlamaktadır. Taraflar arasında bilinen tek bir anahtar yapısı olduğu için şifre çözme süreci asimetrik yapıya göre daha düşüktür (hızlıdır) ve buda önemli avantajlardan biridir. Ayrıca donanım ile esneklik süreci ve özellikle 2000 yıllardan itibaren donanım platformlarındaki hızlı gelişmeler nedeniyle, başarımların artırılması daha çok simetrik kriptosistemler üzerinden yapılmaktadır. İlerideki çalışmalar, simetrik şifrelemede; gizli anahtarın güvenlik sorunu ve asimetrik şifrelemede; hız ve bellek sorunlarının giderilmesine yönelik hibrit veya yeni nesil olarak adlandırılan kriptosistemlerin tasarımları olabilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından ADEP.22.06 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Şatir E, Kendirli O. A symmetric dna encryption process with a biotechnical hardware. *Journal of King Saud University – Science* 2022; 34(3): 1-10.
- [2] Alenezi MN, Alabdulrazzaq H & Mohammad NQ. Symmetric encryption algorithms: review and evaluation study. *International Journal of Communication Networks and Information Security* 2020; 12(2): 256-272.
- [3] Kaya A, Türkoğlu İ. Evaluation of symmetric cryptography algorithms in terms of performance analysis. *Cukurova 10th International Scientific Researches Conference*; 2-4 April 2023; Adana-Türkiye. pp. 4048-462.
- [4] Kaya A, Türkoğlu İ. Evaluation of asymmetric cryptography algorithms in terms of performance analysis. 4. *International Cappadocia Scientific Research Congress*; 16-17 April 2023; Nevşehir- Türkiye. pp. 1056-1070.
- [5] Sood R, Kaur H. A literature review on rsa, des and aes encryption algorithms. In *Vikram Dhiman & Pooja Dhand (eds.), Emerging Trends in Engineering and Management 2023*; 57–63.
- [6] Olutola A, Olumuyiwa M. Comparative analysis of encryption algorithms. *European Journal of Tech.* 2023;7(1): 1 -9.
- [7] Luo Z, Shen K, Hu R, Yang Y & Deng R. Optimization of aes-128 encryption algorithm for security layer in zig bee networking of internet of things. *Computational Intelligence and Neuroscience* 2022; 1-11.
- [8] Thirupalu U, Reddy EK. Performance analysis of cryptographic algorithms in the information security. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* 2019; 8(2):63-69.
- [9] Abood OG, Guirguis SK. A survey on cryptography algorithms. *International Journal of Scientific and Research Publications* 2018; 8(7): 410–415.
- [10] Dixit P, Gupta AK, Trivedi MC, Yadav VK. Traditional and hybrid encryption techniques: a survey. In *Networking Communication and Data Knowledge Engineering* 2018; 4: 239–248.
- [11] Mushtaq MF, Jamel S, Disina AH, Pindar ZA, Shakir NSA, Deris MM. A survey on the cryptographic encryption algorithms. *(IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 2017; 8(11): 333-344.
- [12] Brown D. *The Da Vinci Code*. ABD; Random House, 2003.
- [13] Basu S, Karupiah M, Nasipuri M, Halder AK, Radhakrishnan N. Bio-inspired cryptosystem with dna cryptography and neural networks. *Journal Of Systems Architecture* 2019; 94: 27-31.
- [14] Kerckhoffs A. *La cryptographie militaire*. *Journal Des Sciences Militaires* 1883; 9: 5–38.
- [15] Shannon CE. *Communication theory of secrecy system*. *Bell Syst. Tech. J.* 1949; 28: 656–715.
- [16] Indrasena RM, Siva KAP, Subba RK. A secured cryptographic system based on dna and a hybrid key generation approach. *Biosystems* 2020; 197: 1-10.
- [17] Rahman G, Wen CC. Omega network pseudorandom key generation based on dna cryptography. *Applied Sciences* 2022; 12(16): 1-19.
- [18] Erişim Tarihi:10.07.2023, <https://www.ssl2buy.com/wiki/symmetric-vs-asymmetric-encryption-what-are-differences>
- [19] Kodaz H, Botsalı FM. Simetrik ve asimetrik şifreleme algoritmalarının karşılaştırılması. *Selçuk-Teknik Dergisi* 2010; 9(1): 10-23.
- [20] Panhwar MA, Khuhro SA, Panhwar G, Ali K. Saca: a study of symmetric and asymmetric cryptographic algorithms. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security* 2019; 19(1): 48-55.
- [21] Al-Shabi MA. A survey on symmetric and asymmetric cryptography algorithms in information security. *International Journal of Scientific and Research Publications* 2019; 9(3): 576-589.
- [22] Krishnamurthy GN, Ramaswamy V. Encryption quality analysis and security evaluation of cast-128 algorithm and its modified version using digital images. *International Journal of Network Security & Its Applications* 2009; 1(1):28-33.
- [23] Li J, Luo Y, Wang E, Gao W. Design and implementation of real-time image acquisition chip based on triple-hybrid encryption system. *Electronics* 2022; 11(18): 1-29.
- [24] ElGamal T. A public-key cryptosystem and a signature scheme based on discrete logarithms. *IEEE Transactions on Information Theory* 1985; 31 (4): 469-472.
- [25] Erişim Tarihi:17.04.2023, https://en.wikipedia.org/wiki/ElGamal_encryption
- [26] Erişim Tarihi:10.04.2023, <https://www.educba.com/elgamal-encryption/>
- [27] Imran OA, Yousif SF, Hameed LS, Al-Din Abed WN, Hammid AT. Implementation of el-gamal algorithm for speech signals encryption and decryption. *Procedia Computer Science* 2020; 167: 1028–1037.
- [28] Rani S, Kaur H. Technical review on symmetric and asymmetric cryptography algorithms. *International Journal of Advanced Research in Computer Science* 2017; 8(4): 182-186.
- [29] Erişim Tarihi:10.04.2023, <https://www.ques10.com/p/33937/el-gamal-cryptography-algorithm/>
- [30] Rivest R, Shamir A, Adleman L. A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems. *Communications of the ACM* 1978; 21 (2): 120–126.
- [31] Erişim Tarihi:10.04.2023, [https://en.wikipedia.org/wiki/RSA_\(cryptosystem\)](https://en.wikipedia.org/wiki/RSA_(cryptosystem))
- [32] Erişim Tarihi:18.04.2023, <https://www.geeksforgeeks.org/rsa-algorithm-cryptography/>
- [33] Al-Juaid N, Gutub A. Combining rsa and audio steganography on personal computers for enhancing security. *SN Appl. Sci.* 2019; 1(830): 1-11.

Fotodiyot Dizi Boyutunun Görünür Işıklı Haberleşme (VLC) Performansına Etkileri

Ramin ZOLFi¹, Yavuz EROL^{2*}

^{1,2} Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

¹ ramin.zolfi@yahoo.com, ^{2*} yerol@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 24/08/2023;

Kabul/Accepted: 30/08/2023)

Öz: Bu çalışmada görünür ışık haberleşme sistemlerinde fotodiyot dizisi kullanımının haberleşme performansına etkileri incelenmiştir. Optik verici kısmında farklı dalga boylarında ışımaya yeteneğine sahip yeni nesil power LED'ler ve farklı açılı lensler; optik alıcı kısmında ise görünür ışık bandında ışığa duyarlı PIN fotodiyotlardan oluşan bir algılayıcı dizisi, opamp'li karşılaştırma devresi ve ortalama gerilim izleyici bloğu bulunmaktadır. Tasarlanan haberleşme sistemiyle LED akımının büyüklüğünün, lens açısının değerinin, optik verici ile optik alıcı arasındaki mesafenin veri transfer hızına etkileri incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Görünür Işıklı Haberleşmesi, VLC, Li-Fi, Fotodiyot Dizisi

Effects of Photodiode Array Size on Visible Light Communication (VLC) Performance

Abstract: In this study, the effects of the use of photodiode arrays in visible light communication systems on communication performance are investigated. In the optical transmitter part, there are new generation power LEDs with different wavelengths and lenses with different angles; in the optical receiver part, there is a sensor array consisting of photosensitive PIN photodiodes in the visible light band, a comparator circuit with an opamp and an average voltage tracking block. With the designed communication system, the effects of the magnitude of the LED current, the value of the lens angle, the distance between the optical transmitter and the optical receiver on the data transfer rate were investigated.

Key words: Visible Light Communication, VLC, Li-Fi, Photodiode Array

1. Giriş

Son yıllarda haberleşme sistemlerinde hızla yaşanan gelişmelerle birlikte özellikle mobil cihazların kullanımında çok hızlı bir artış olmuştur. Cihaz çeşitliliğinin ve kullanıcı sayısının artmış olması haberleşmenin önemimizdeki yıllarda radyo frekans (Radio Frequency, RF) bandında sürdürülmesini zorlayacak niteliktedir. Kablosuz mobil haberleşme sistemlerinin çalışması için tahsis edilen frekans bandlarının yetersiz kalmaya başlamasıyla birlikte dünya çapında haberleşme teknolojileri üreten firmalar ve bilim insanları tarafından RF bandı dışında haberleşmeyi sağlayabilecek yeni teknolojiler geliştirilmeye başlanmıştır. RF kablosuz haberleşme sistemlerine duyulan ilgi dışında, görünür ışık haberleşmesi kavramı ön plana çıkmaktadır. Literatürde görünür ışık haberleşmesi VLC (Visible Light Communication), OWC (Optical Wireless Communication) veya Li-Fi (Light Fidelity) olarak adlandırılmaktadır [1].

VLC sistemlerinde veri iletimi görünür ışık bandında yapılmakta olup, sinyal iletim hızından dolayı ışık seviyesindeki değişimleri göz algılayamamaktadır. Bu özelliğinden dolayı, aydınlatma amacıyla kullanılan ışık yayan diyot (Light Emitting Diode, LED) armatürlerin birer haberleşme ünitesine dönüşmesi söz konusudur. Yüksek hızlarda veri haberleşmesi sağlanabilmesi için ışık kaynağı olarak görev yapan yeni nesil LED'lerin yüksek frekansta anahtarlanması gereklidir. Yarıiletken LED teknolojisi bu gereksinimi karşıladığı için akkor filamanlı, halojen veya floresan armatürlerin sahip olmadığı bu teknik özellik LED teknolojisini bir adım öne çıkarmaktadır. Son yıllarda aydınlatma sektöründe LED içeren ürünlere olan yönelimden dolayı ilerleyen süreçte görünür ışık haberleşmesinin de hızla yaygınlaşacağı öngörülmektedir.

Görünür ışık haberleşme sistemleri, RF kablosuz haberleşme sistemlerine kıyasla önemli avantajlara sahiptir. Elektromanyetik spektrumda morötesi sınırından başlayarak kızılötesine kadar uzanan bölge görünür ışık bölgesi olarak adlandırılır ve 380 nm ile 780 nm dalgaboyu aralığını kapsar. Bu aralık yaklaşık 400 THz'lik band genişliğine sahip olup lisans gerektirmeyen bir haberleşme kanalı sunmaktadır. Bununla birlikte, görünür ışık bandındaki elektromanyetik dalgalar duvarlardan geçemediği için haberleşme mesafesi RF sistemlerdeki

* Sorumlu yazar: yerol@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-6606-2330, ² 0000-0001-6953-0630

gibi uzun değildir. Görünür ışık haberleşme sistemleri, yüksek bilgi taşıma kapasitesi ve sağlık açısından olumsuz etkiler oluşturmaması özelliklerinden dolayı önümüzdeki yıllarda haberleşme alanındaki gereksinimleri karşılayabilecek teknolojik bir çözüm sunmaktadır. Mevcut RF bandları ile girişim (enterferans) oluşturmaması nedeniyle bu iki teknoloji birlikte kullanılabilir.

2. Literatür Taraması

2011 yılında Edinburgh Üniversitesinden Prof. Harald Haas tarafından yürütülen çalışmalarla, aydınlatma için kullanılan ışık kaynaklarının kablosuz veri aktarım cihazlarına dönüşmesinin temeli atılmıştır [2]. Bu alandaki gelişmeler LED'lerin ilerleyen zamanlarda görünür ışıkla haberleşme için yeni bir potansiyel kaynak olduğunu göstermektedir. Yüksek hızda bilgi transferinin Li-Fi sistemi tarafından gerçekleştirilebilmesi için herhangi bir LED ampul ile fotodiyot içeren bir optik alıcının kullanılması yeterlidir. Li-Fi teknolojisi, LED'li aydınlatma armatürünü optik haberleşme sistemine dönüştürmektedir. Vericide, elektriksel sinyal formatında bilgi taşıyan veri bitleri LED aydınlatmasıyla ışığa dönüştürülerek ve alıcı birimde ise fotodiyotlar vasıtasıyla ışıkla taşınan bilgi sinyali yeniden geri elde edilerek haberleşme sağlanmaktadır.

Literatürde VLC konusu üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır. Zhou ve arkadaşları tarafından görünür ışık temelli, yüksek performanslı bir IoT sistemi üzerinde çalışmalar yürütülmüştür [3]. Wang ve arkadaşları [4] sualtı görünür ışık iletişimi (Underwater Visible Light Communication, UVLC) amacıyla yürüttükleri çalışmada vericideki optik yoğunluğu arttırmak için ışık yayan diyotun yarı güç açısının daraltıldığı ve tek foton çığ diyotunun (Single-Photon Avalanche *Diode*, SPAD) kullanıldığı uzun mesafeli bir UVLC sistemi tasarlamıştır. Li ve arkadaşları VLC sistemleri için çok girişli çok çıkışlı (Multi Input Multi Output, MIMO) destekli bir ışık kısma (dimming) tasarımı oluşturmuştur ve bu sistemin bit hata oranını azalttığını göstermiştir [5]. Wijayanto ve arkadaşları tarafından yapılan VLC tasarımı, fototransistör dizisi kullanılarak 134 cm uzaktan mesaj, resim, MPEG formatında video ve WAV/MP3 formatında ses dosyası gönderilmesi sağlanmıştır. Prototip sistemin veri iletim hızı 9600 bps seviyesindedir [6]. Goswami ve arkadaşları Arduino platformu kullanarak yüksek performanslı bir Li-Fi verici-alıcı sistemi tasarlamıştır [7]. 115200 bps hızda iletişim sağlayan sistemde MATLAB yazılımı kullanılmış ve optik olarak iletilen video sinyali Java arayüzü yardımıyla izlenmiştir. Do ve arkadaşları görünür ışık haberleşmesi temeline dayanarak konum belirlenmesi konusunda literatürde yapılan çalışmaları ayrıntılı olarak incelemiştir [8]. Saadi ve arkadaşları [9] görünür ışıkla haberleşme sistemlerinde veri hızının iyileştirilmesi için stratejiler sunmuştur. Rajbhandari ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada optik verici kısmında LED dizisi, optik alıcı kısmında fotodiyot dizisi kullanılarak, yaklaşık 1 Gbps hıza çıkabilen bir haberleşme sistemi tasarımı verilmiş, dikgen frekans bölme (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) ve darbe genlik modülasyonu (Pulse Amplitude Modulation, PAM) tekniklerinin deneysel karşılaştırması yapılmıştır [10]. Haigh ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada verici kısmında silikon LED, alıcı kısmında organik fotodiyot kullanılan, MIMO sistemi tasarlanmış, yüksek veri hızlarına ulaşabilmek için hata düzeltme algoritmaları sunulmuştur [11]. Habib ve arkadaşları [12], Xilinx firmasının Virtex-VII model FPGA donanımını kullanarak iç mekanda propagasyon kanalları modellenmiştir. Che ve arkadaşları tarafından VLC sistemleri için IEEE 802.15.7 standardına uyumlu yüksek verimli LED sürücü tasarımı yapılmıştır [13]. Yan ve arkadaşları fosforesans içeren beyaz LED'li VLC sistemi için bit hata oranını düşük seviyede tutan entegre sürücü devre tasarımı gerçekleştirmiştir [14]. Yanyan Zhu ve Xiao Chen 2020 yılında yaptıkları çalışmada, optik verici kısmında beyaz power LED ve OPA2614 serisi opamp, optik alıcı kısmında PIN fotodiyot ve OPA657 serisi opamp kullanarak bir Li-Fi haberleşme sistemi tasarlamışlardır [15].

3. Görünür Işıklı Haberleşme Sisteminin Bileşenleri

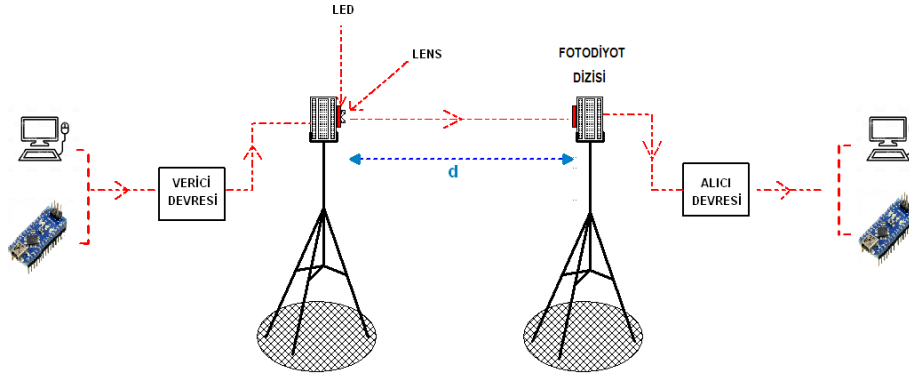
Günümüzde üretilen yarı iletken ışık kaynakları optik spektrumun morötesi bölgesinden başlayarak kızılötesi bölgesine kadar olan bölgeyi kapsamaktadır. LED'in ışık yayma mekanizması kuantum fiziği yasalarına dayanır ve P-N jonksiyonundan akım geçtiğinde ortama spektrumun görünür ışık bölgesine denk düşen frekansta ışık yayılır [16]. 380-780 nm aralığı, uluslararası aydınlatma komisyonu (CIE, Commission Internationale de l'Eclairage) tarafından görünür ışık bandı olarak kabul edilmektedir. Görünür ışık haberleşmesinde optik verici olarak SMD kılıflı, yüksek ışık salıncığına sahip, yeni nesil power LED'ler kullanılmaktadır. Bu LED'ler aynı zamanda ortamı aydınlatma görevi de üstlendiğinden LED çiplerinin ışık akıları yüksektir ve haberleşme sırasında yüksek anahtarlama frekanslarına çıkabilmek için jonksiyon kapasiteleri düşüktür. Genel aydınlatma için üretilen sıradan LED çiplerinin veri haberleşme hızından bir miktar taviz verilerek VLC haberleşme sistemlerinde kullanılması da mümkündür.

VLC sistemlerinin optik alıcı kısmında genellikle fotodiyot yer alır. Fotodiyot ışığa karşı çok hassastır ve ters yönde kutuplandığında üzerine düşen ışıkla sızıntı akımı değişir. Fotodiyotlar diyot gibi bir P-N jonksiyonu olduğundan yarıiletken diyodun elektriksel davranışı hakkında bilinenler fotodiyot için de geçerlidir. Jonksiyon üzerine düşen ışık şiddeti arttığında P-N yüzey birleşimindeki direnç azalır ve fotodiyot üzerinden geçen akım artar. Benzer şekilde ışık şiddeti azaldığında P-N yüzey birleşimindeki direnç artar ve fotodiyot üzerinden geçen akım azalır. Fotodiyodun tepki süresi LDR'den daha küçüktür. Örneğin LDR için ms seviyesinde olan tepki süreleri, fotodiyot için ns seviyelerindedir. Fotodiyot ışıktaki değişimlere karşı çok hızlı tepki verdiği için, görünür ışıkla haberleşme sistemlerinde optik alıcı olarak fotodiyot tercih edilmektedir.

4. Donanım Tasarımı

4.1. Optik haberleşme sisteminin genel yapısı

Tasarlanan görünür ışık haberleşme sisteminde optik verici ve optik alıcı olmak üzere iki ayrı ünite bulunmaktadır. Her iki ünite de mikrodenetleyici kontrollüdür. Verici ve alıcı tarafında birer kişisel bilgisayar bulunmaktadır. Tasarlanan sistem ile, verici üniteye bağlı bilgisayardan gönderilen metin belgesi, resim ya da video dosyasının alıcı üniteye bağlı bilgisayarın ekranına iletilmesi hedeflenmiştir. Optik verici ve alıcı üniteleri tripod (uçayak) mekanizması üzerine monte edilmiştir. Prototip sistemin genel görünümü Şekil 1'de görülmektedir.



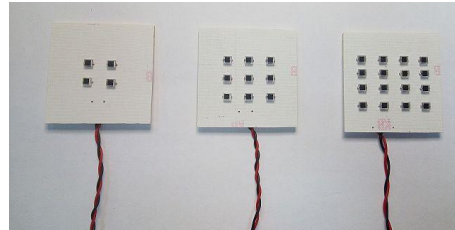
Şekil 1. Sistemin genel görünümü

Verici kısmında yüksek ışıksal etkinliğe sahip yeni nesil power LED ve ışınma açısını değiştirmek amacıyla LED kılıfıyla uyumlu lens kullanılmıştır. Farklı dalga boylarında sistemin davranışını görebilmek amacıyla verici devresine kırmızı, mavi, yeşil, beyaz, günışığı LED'ler bağlanabilmektedir. Lens açıları 8, 16, 30, 45, 60 derece seçilebilmektedir. Alıcı ünitesi üzerinde ise 2x2, 3x3 veya 4x4 formunda dizilmiş fotodiyot dizisi yer almaktadır. Bilgi aktarma amacıyla verici ve alıcı kısmında Arduino UNO ve veri paketlerinin izlenmesi amacıyla seri monitör (serial monitor) arayüzü kullanılmıştır.

Sistemin tasarımında kullanılan power LED'ler, lensler ve fotodiyotlardan oluşan optik bileşenler Şekil 2'de görülmektedir. Power LED'lerin montajında termal macun ve alüminyum PCB kullanılmıştır. Optik alıcı kısmında farklı sayılarda BPW34 serisi fotodiyotlar ile oluşturulan fotodiyot dizileri bulunmaktadır. Testler sırasında kullanılmak üzere paralel bağlı 4, 9 ve 16 fotodiyottan oluşan 2x2, 3x3, 4x4 formunda alıcı üniteler yapılmıştır. Şekil 3'de dizi yapıları görülmektedir.



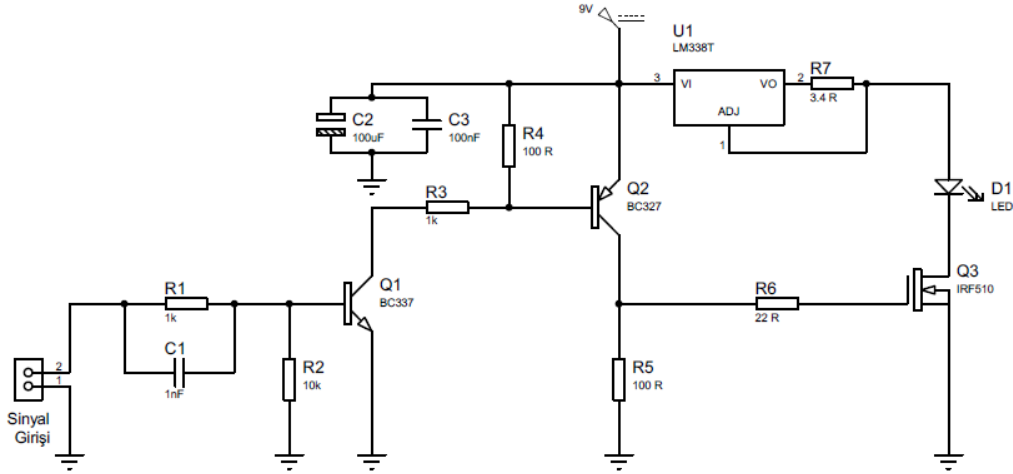
Şekil 2. Optik bileşenler



Şekil 3. 2x2, 3x3, 4x4 fotodiyot dizileri

4.2. Mikrodeneyleyici kontrollü verici tasarımı

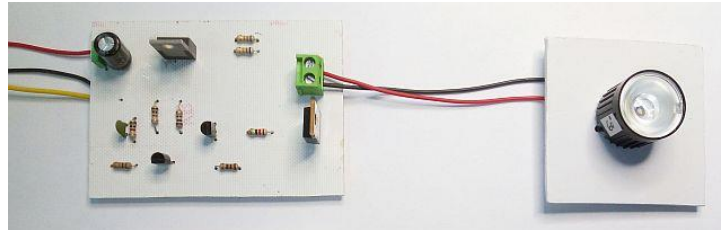
Tasarlanan verici devresi Şekil 4’de görülmektedir. Devrenin girişine kare dalga formunda TTL sinyal uygulanmaktadır. Girişteki C1 kondansatörü, sinyalin bozulmadan ve büyük zaman gecikmesi olmadan iletilmesi için gereklidir. Anahtarlama elemanı olarak IRF510 MOSFET kullanılmıştır. NPN ve PNP transistörden oluşan devre yapısı MOSFET sürücü olarak çalışmaktadır. LM338 ile oluşturulan akım regülatörü sayesinde power LED akımının sabit kalması sağlanır. Bu sayede LED’in ısınmasından veya farklı renklerde LED kullanıldığında ileri yön gerilimindeki değişimlerden LED akımı etkilenmemiş olur.



Şekil 4. Optik verici devre şeması

Devredeki eleman değerleri, en yüksek veri iletim hızını elde etmek üzere sinyal dalga şekilleri osiloskop ile izlenerek belirlenmiştir. Q1 transistörü olarak BC107, BC109, BC237, BC238, BC547 ve BC337 ile denemeler yapıldığında, en iyi sonuç BC337 ile alınmıştır. Q1 transistörünün kolektör ucunun toprağa göre gerilimi ölçüldüğünde, 100 kHz’lik giriş sinyali için zaman gecikmesi 200-300 ns civarında iken BC337 kullanıldığında 100 ns gecikme elde edilmiştir. Q3 MOSFET’i için IRF510, IRFZ44N, IRF840, IRL540N, ZXMN20B28KTC ile denemeler yapıldığında, anahtarlama sırasında oluşan zaman gecikmesi IRF510 ile en düşük seviyede kalmıştır. Osiloskop ile MOSFET’in drain ucunun toprağa göre gerilimi ölçüldüğünde, 100 kHz’lik giriş sinyali için giriş ile çıkış arasındaki zaman gecikmesi IRF510 kullanıldığı durumda 500 ns elde edilmiştir. Bu değer IRF840 için 1 μ s, IRL540N için 2.6 μ s ölçülmüştür. Girişteki 1 nF kapasiteli C1 kondansatörü yokken 100 kHz frekanslı giriş sinyali için giriş-çıkış zaman gecikmesi 1.75 μ s olurken, 1 nF’lık kondansatör varken bu süre 500 ns seviyesinde kalmaktadır. Böylece eleman değerlerinin veri iletim hızına büyük oranda etkilerinin olduğu ve parametreleri doğru seçilmiş elemanlarla tasarım yapılmasının büyük önem arzettiği görülmüştür.

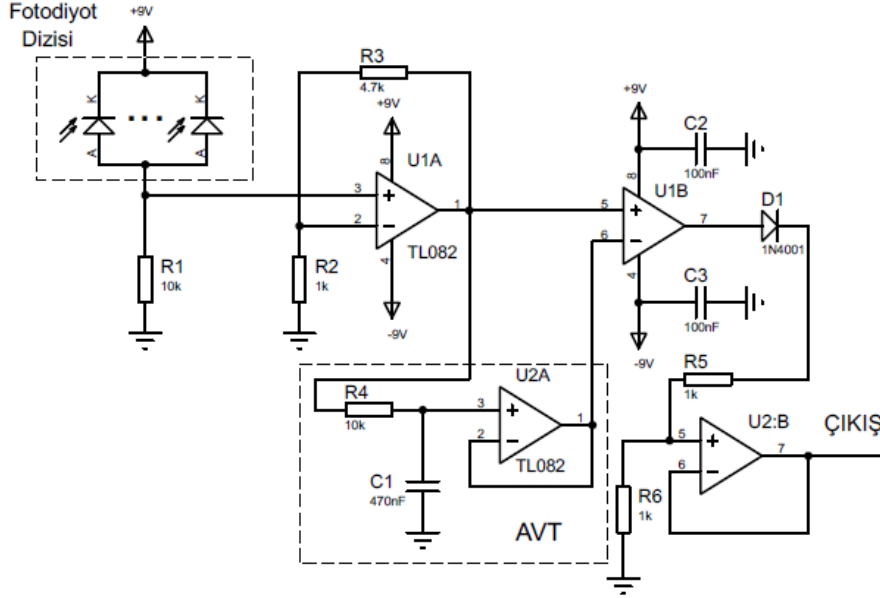
Devredeki R7 direnci ile LED akımının tepe değeri ayarlanabilmektedir. Direnç değeri 3.4 ohm seçildiğinde, LM338 kataloğunda belirtilen $1.25/R$ formülüne göre akım değeri 367 mA elde edilmiştir. Bu değer power LED’in güvenli çalışması için uygundur. Alıcı devresinin girişine pozitif sinyal uygulandığında Q1 ve Q2 ilettime geçerek MOSFET’in gate ucuna darbe (pals) uygular. MOSFET’in ilettime geçmesiyle, tepe akım değeri sabit olacak şekilde power LED’den darbeleri bir akım geçer. Şekil 5’de optik verici devresinin monte edilmiş hali görülmektedir.



Şekil 5. Verici devresinin genel görünümü

4.3. Mikrodeneleyici kontrollü alıcı tasarımı

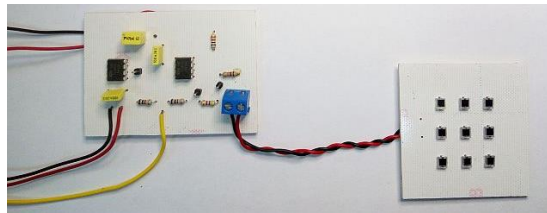
Tasarlanan optik alıcı devresi Şekil 6'da görülmektedir. Devrede BPW34 fotodiyot dizisi, TL082 opamp ile tasarlanan ters çevirmeyen kuvvetlendirici, ortalama gerilim izleyici (Average Voltage Tracking, AVT), karşılaştırıcı ve tampon (buffer) birimleri bulunmaktadır.



Şekil 6. Optik alıcı devre şeması

Devredeki R1 direnci yardımıyla fotodiyodun ters yönde kutuplanması sağlanmıştır. Fotodiyot üzerine düşen ışığın yoğunluğuna bağlı olarak ters yön sızıntı akımı değiştiğinden, R1 uçlarındaki gerilim optik bilgi sinyalinin formundadır. Sinyal genliği düşük olduğu için öncelikle U1A ve R2, R3 dirençleri yardımıyla $1+R3/R2$ formülüne göre sinyal 5.7 kat kuvvetlendirilmiştir. U1A opampının çıkışındaki sinyal hem U1B karşılaştırıcısının (+) girişine, hem de AVT devresinin girişine uygulanmıştır. R4 ve C1'den oluşan RC integratör devresi, AVT girişine uygulanan sinyalin ortalama değerini almaktadır. Girişe 5 V genlikli 1 kHz ve 5 kHz frekanslı iki farklı kare dalga sinyal sırayla uygulandığında, kondansatör uçlarındaki gerilimin 20 ms gecikmenin ardından girişin ortalama değeri olan 2.5 V seviyesini yakaladığı geçici rejim analizi sonucunda görülmüştür. Giriş frekansı 1 kHz seçildiğinde dalgalanma 250 mV iken, 5 kHz seçildiğinde 50 mV olmaktadır. Li-Fi sistemlerinde alıcıya ulaşan sinyal frekansı çok daha yüksek seviyelerde olduğundan AVT devresinin çıkışındaki dalgalanmanın birkaç mV civarında olması beklenir.

U1B opampı ile oluşturulan karşılaştırıcı devresi, (+) uca uygulanan analog sinyal ile (-) uca uygulanan ortalama değeri karşılaştırmaktadır. Ters çevirmeyen girişin gerilim seviyesi ters çeviren girişin gerilim seviyesinden büyük olduğunda U1B çıkışı +Vcc, tersi durumda -Vcc olmaktadır. D1 diyodu yardımıyla sinyalin negatif alternansı çıkışa yansıtılmamaktadır. R5, R6 gerilim bölücü dirençleri ve U2B tampon devresi ile karşılaştırıcı devresinin çıkışındaki +Vcc seviyesindeki gerilim, $(Vcc-0.7)/2$ seviyesine düşürülmüştür. Besleme geriliminin 9 V olması durumunda çıkış genliği 4 V seviyelerinde olmaktadır. Şekil 7'de alıcı devresine ait PCB tasarımları görülmektedir.

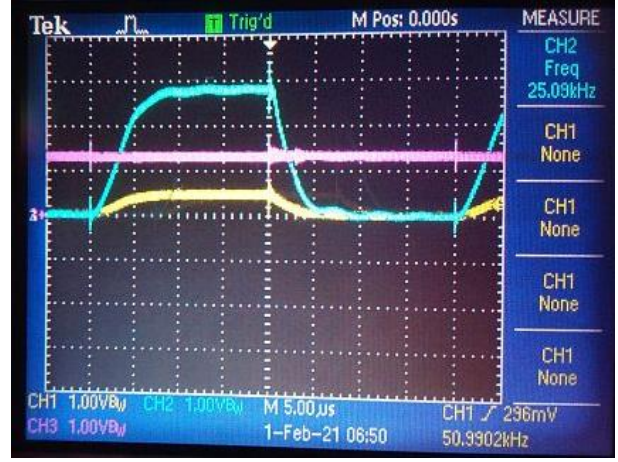


Şekil 7. Alıcı devresinin genel görünümü

Verici alıcı devrelerinin tripod mekanizması üzerine monte edilmiş hali Şekil 8’de görülmektedir. Verici ve alıcı devrelerinin beslenmesi için AATECH APS-3303DD ve SANTECH 33010 model güç kaynakları, TTL sinyal gönderme testleri için GWINSTEK SFG-212 model sinyal jeneratörü, dalga şekillerini izlemek için TEKTRONIX TPS 2024 model osiloskop kullanılmıştır.



Şekil 8. Verici-alıcı sisteminin genel görünümü

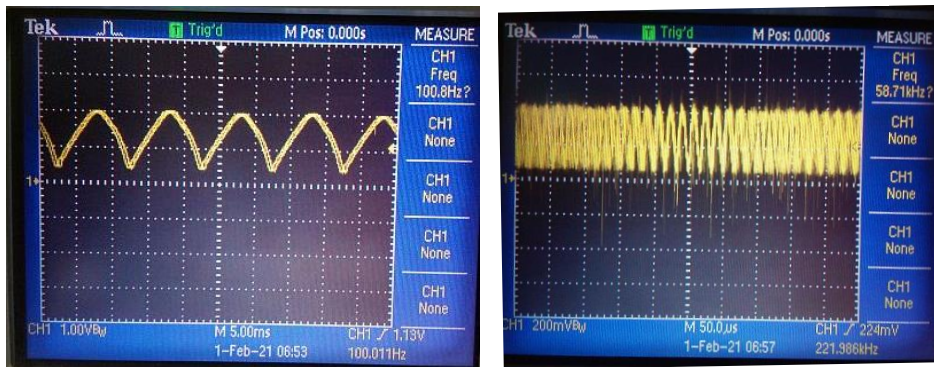


Şekil 9. Alıcı devresi dalga şekilleri

4.4. Dalga şekilleri

Verici devresinin girişine 25 kHz frekanslı kare dalga uygulandığında, alıcı devresindeki 3 farklı noktadaki gerilim dalga şekilleri Şekil 9’daki gibi olmaktadır. Ölçümler sırasıyla R1 direnci uçlarından (CH1), kuvvetlendirici çıkışından (CH2) ve ortalama gerilim izleyici (CH3) çıkışından yapılmıştır. Ortamdaki yapay ışık kaynakları alıcı devresi üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Verici devresi çalışmadığı durumda, ortamdaki 4x18W floresan armatürün ve lineer LED armatürün yaydığı ışıkların fotodiyot üzerine düşmesi sonucu, kuvvetlendirici çıkışında görülen dalga şekilleri sırasıyla Şekil 10a ve Şekil 10b’deki gibi gözlenmektedir. Görüldüğü gibi floresan armatür 100 Hz frekanslı değişim oluştururken, lineer LED armatür 58 kHz frekanslı değişim oluşturmaktadır.

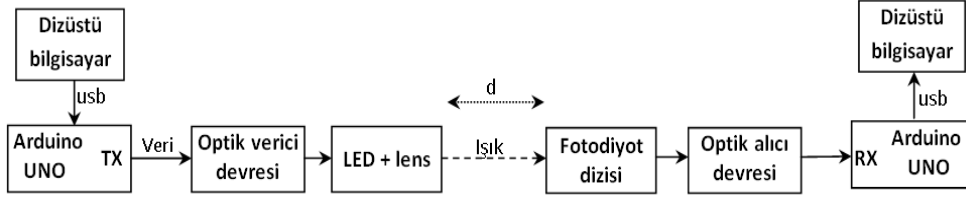
Verici devresindeki LED’in fotodiyot dizisine ilettiği ışık dışında, harici bir ışık kaynağı tarafından üretilen titreşimsiz bir ışık sisteme ulaştığında devrenin çalışmasında bir problem oluşmamaktadır. Alıcı devresinin çıkışı belirli bir frekansta kare dalga üretirken, fotodiyot dizisi üzerine harici bir ışık kaynağı yardımıyla farklı yoğunlukta ışıklar düşürüldüğünde, AVT devresinin yeni duruma göre eşik gerilimi değerini hızla değiştirdiği ve her durumda alıcı devresinin çıkışında kare dalga sinyal olduğu gözlenmiştir. Bu test yoğun gün ışığı altında yapıldığında fotodiyotlar saturasyona girdiğinden dolayı alıcı çıkışındaki sinyal bozulmaktadır. Li-Fi sistemlerinin temel bir sorunu günışığından kaynaklanan sinyal bozulmaları olup bu çalışma kapsamında dikkate alınmamıştır.



Şekil 10. Ortamdaki armatürlerin etkisi a) Floresan armatür b) LED armatür

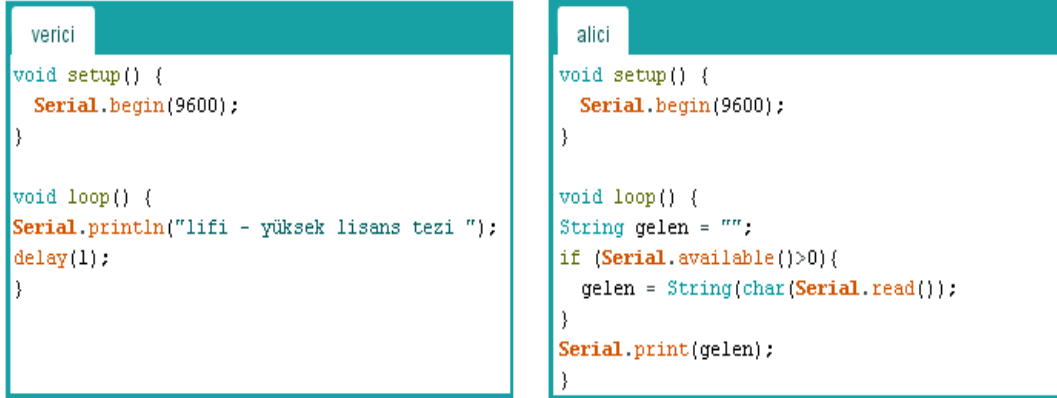
5. Testler

Tasarlanan görünür ışık haberleşme sisteminin performansını gözlemek amacıyla Arduino tabanlı bilgi gönderme ve alma devresi kullanılarak çeşitli testler yapılmıştır. Lens açısının, fotodiyot dizi boyutunun, LED ışık şiddetinin ve haberleşme hızının verici-alıcı arasındaki mesafeye etkileri incelenmiştir. Şekil 11’de test sisteminin blok şeması görülmektedir.



Şekil 11. Test sisteminin blok şeması

Verici ve alıcı kısmında birer dizüstü bilgisayar bulunmaktadır. Arduino arayüz programında verici ve alıcı ünite için Şekil 12’de verilen programlar yazılmıştır.



Şekil 12. Verici ve alıcı için Arduino programları

Veri olarak “lifi – yüksek lisans tezi “ adlı karakter dizisi belirlenmiştir. Vericideki Arduino 1 ms aralıkla bu diziyi optik verici devresinin girişine göndermektedir. Haberleşme hızı için her iki programda aynı bps değeri girilmektedir. Alıcı kısmındaki Arduino sürekli olarak seri porttan veri gelip gelmediğini kontrol etmekte, alınan verileri string türündeki “gelen” isimli diziye yazmaktadır. Alınan veri paketi seri monitör aracılığıyla bilgisayar ekranından izlenebilmektedir. Bu ekran görüntüsü, veri paketinde ortaya çıkan bozulmalar ve düzgün veri akış durumu hakkında bilgi vermektedir. Böylece test sırasında programlardaki bps değerleri eş zamanlı olarak ayarlanarak lens tipi, fotodiyot dizi boyutu ve mesafe değeri değişimine göre veri paketinin doğru alınıp alınmadığı gözlenmiştir.

5.1. Lens açısının haberleşme performansına etkileri

Power LED’ler ile uyumlu lenslerin açıları ve ışık dağılım eğrileri firmalara göre değişiklik göstermektedir. Piyasada 8, 16, 20, 30, 45, 60, 90 derece açılıya sahip lensler bulmak mümkündür. Testler sırasında 16 ve 60 derecelik iki farklı lens kullanılmıştır. LED’lerin ışınma açısı yaklaşık 120 derece olduğundan, ek olarak lensiz durum da dikkate alınmıştır. Böylece dar açılı ve geniş açılı ışınma arasındaki farklılıklar ortaya konulmuştur.

Tablo 1’de 1W gücünde 6500 °K beyaz ışık yayan power LED kullanıldığı durum için farklı lenslere ait mesafe ve hız testi sonuçları verilmiştir. Haberleşme hızına bağlı olarak haberleşme mesafesinin değişimi 3 farklı fotodiyot dizisi için ölçümler yoluyla belirlenmiştir. Tablodaki mesafe değerleri, alıcı ünitenin bağlı olduğu seri monitör ekranından izlenen veri paketinin ardarda hatasız şekilde alındığı en uzak değer olarak not

edilmiştir. 74880 bps değerinden daha yüksek hızlarda veri paketinin doğru alınabildiği mesafe önemli oranda düştüğünden tabloda bu hızlara yer verilmemiştir.

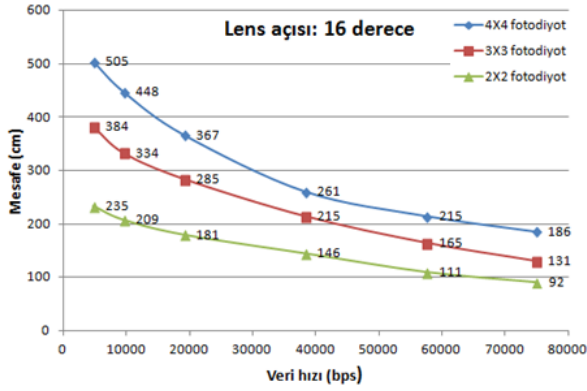
Tablo 1'deki değerler dikkate alındığında 60 derecelik lens ile elde edilen mesafe değerlerinin 16 derecelik lens ile elde edilen mesafe değerlerine göre daha kısa olduğu görülmektedir. Örneğin 4800 bps hızda 16 derece lens ile haberleşme mesafesi 505 cm olurken, 60 derece lens ile 257 cm olmuştur. Lens kullanılmadığı durumda ise bu mesafe 90 cm'ye kadar düşmüştür. Fotodiyot dizi boyutunun artması haberleşme mesafesini arttırmaktadır.

Tablo 1. Lens açısının, fotodiyot dizi boyutunun ve veri hızının mesafeye etkileri

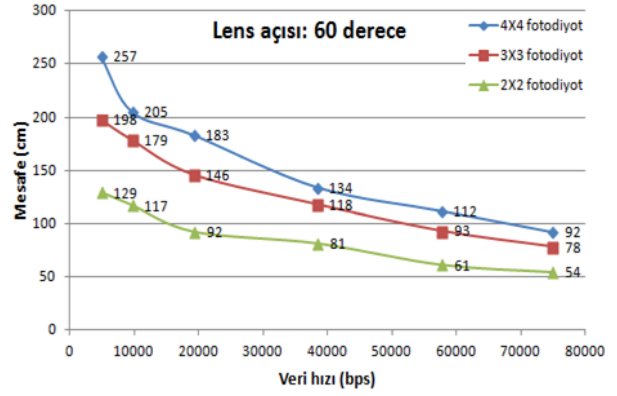
Veri hızı (bps)	Lens açısı	Haberleşme mesafesi (cm)		
		4x4 fotodiyot dizisi	3x3 fotodiyot dizisi	2x2 fotodiyot dizisi
74880	16°	186	131	92
	60°	92	78	54
	Lenssiz	34	29	20
57600	16°	215	165	111
	60°	112	93	61
	Lenssiz	36	33	22
38400	16°	261	215	146
	60°	134	118	81
	Lenssiz	43	41	29
19200	16°	367	285	181
	60°	183	146	92
	Lenssiz	60	52	36
9600	16°	448	334	209
	60°	205	179	117
	Lenssiz	77	58	43
4800	16°	505	384	235
	60°	257	198	129
	Lenssiz	90	69	47

Testler sırasında ortam karanlık olup, harici bir ışık kaynağı bulunmamaktadır. Ayrıca verici devresindeki LED akımını sınırlayan R7 direnci 3.4 ohm yerine 110 ohm kullanılarak LED akımının maksimum değerinin 11.3 mA olması sağlanmıştır. Düşük akım değeri sayesinde mesafe testini 6 m x 6 m ölçülerindeki bir oda içerisinde gerçekleştirmek mümkün olmaktadır.

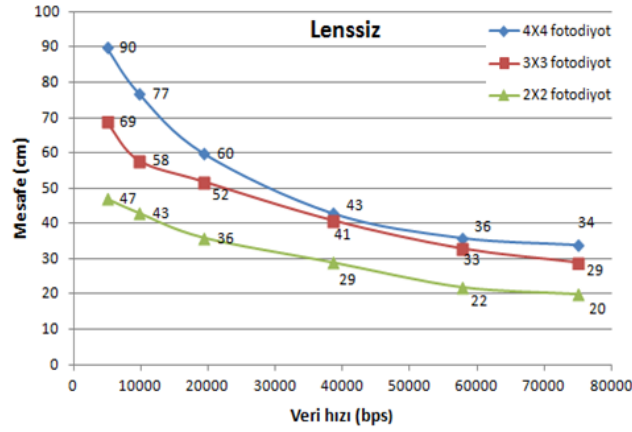
Tablo 1'deki değerler kullanılarak haberleşme mesafesinin veri hızına bağlı değişimleri Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15'de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi veri iletim hızı düştükçe daha uzak mesafelerden haberleşme kurulabilmektedir. 4800 bps'de, 16 derece lens ve 4x4 fotodiyot dizisi ile yaklaşık 5 metre mesafeden haberleşme kurulabilirken, 2x2 fotodiyot dizisi ile mesafe 2.35 m olmaktadır. 60 derece lens kullanıldığında bu değerler sırasıyla 2.57 m ve 1.29 m'dir. Lenssiz durumda ise en düşük veri iletim hızında mesafe 47 cm ile 90 cm arasında değişmektedir.



Şekil 13. Haberleşme mesafesinin veri hızına bağlı değişimi (16 derecelik lens ile)



Şekil 14. Haberleşme mesafesinin veri hızına bağlı değişimi (60 derecelik lens ile)



Şekil 15. Haberleşme mesafesinin veri hızına bağlı değişimi (lenssiz durum)

5.2. LED akımının haberleşme mesafesine etkisi

LED akımının maksimum değeri, optik verici devresindeki R7 direnci ile ayarlanmaktadır. Yukarıda verilen testler sırasında 110 ohm'luk direnç kullanılarak maksimum akım değerinin 11.3 mA olması sağlanmıştır. Test sonuçlarını gösteren tablolar incelendiğinde, veri haberleşme hızının en yüksek olduğu durumda haberleşme mesafesinin en kısa değerde olduğu görülmektedir. Örneğin Tablo 1'e göre, lens kullanılmadığı durumda 4x4 fotodiyot dizisi ile 74880 bps'de test yapıldığında haberleşme mesafesi 34 cm'dir. LED akımının haberleşme mesafesine etkisini görmek amacıyla R7 direnci 110 ohm yerine 3.4 ohm seçilmiştir. Bu durumda akımın tepe değeri 367 mA olmaktadır. Bu akım değeri ile test tekrarlandığında, sorunsuz şekilde haberleşme yapılabilen mesafenin 34 cm'den 174 cm'ye çıktığı görülmüştür. Bu değer, Li-Fi haberleşme sistemlerinde tavanda kullanılan LED armatür ile masa düzlemi arasındaki mesafeye yakın bir değer olduğundan, oda içerisinde lens kullanılmadan yüksek veri iletim hızlarında haberleşmenin mümkün olabileceği söylenebilir.

6. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada optik verici ve optik alıcı performansını etkileyen donanım parametreleri üzerine yoğunlaşmıştır. Verici kısmında yer alan yeni nesil LED'lerin ışınma açısı, farklı açılarda lens kullanılmasının etkileri ve alıcı kısmında farklı yerleşim planına sahip fotodiyot dizisi kullanımının etkileri incelenmiştir.

Yapılan testler sonucunda BPW34 serisi PIN fotodiyot dizisinin 2x2, 3x3 ve 4x4 yapısında olduğunda, dizi boyutlarına bağlı olarak mesafe değerinin değiştiği, fotodiyot sayısının fazla olması durumunda daha uzaktan sinyal algılanabildiği görülmüştür. Vericinin gönderdiği sinyalin saniyedeki bit sayısı (bps) arttıkça mesafe

değerinin düştüğü ve mevcut tasarım ile yaklaşık 75 kbps hızlara ulaşılabildiği tespit edilmiştir. 6500 °K beyaz LED kullanıldığında ve lens açısı 45 derece olduğunda iletişim mesafesinin 225cm'ye ulaştığı gözlenmiştir.

4800 bps'de 16 derece lens ve 4x4 fotodiyot dizisi ile yaklaşık 5 metre mesafeden haberleşme kurulabilirken, 2x2 fotodiyot dizisi ile mesafe 235 cm olmaktadır. 16 derece lens kullanıldığında 4800 bps'de 505 cm olan mesafe değeri 60 derece lens ile 257 cm olmuştur. Veri iletim hızı düştükçe daha uzak mesafelerden haberleşme kurmak mümkün olmaktadır. Işığın geniş açıyla ortama yayılması durumunda mesafe değerlerinin diğer test sonuçlarına göre büyük oranda düştüğü gözlenmiştir. 4800 bps'de 16 ve 60 derece lens ile sırasıyla 505 cm ve 257 cm olan değer, lensiz durumda 77 cm olmuştur. Lensiz durumda da veri iletim hızı düştükçe daha uzak mesafelerden haberleşme kurmak mümkün olmaktadır.

Dizilerdeki fotodiyot sayılarının oranının karekökü ile mesafe değerlerinin oranı arasında bir benzerlik tespit edilmiştir. Fotodiyot sayılarının oranı ile elde edilen katsayılar, mesafe değerlerinin oranlanması yoluyla da yaklaşık olarak elde edilebilmektedir. Bu katsayılar aynı zamanda ölçümlerin doğruluğunu test etmede bir parametre olarak kullanılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma, Ramin ZOLFİ'nin "Fotodiyot Dizisi İle Görünür Işık Haberleşme Sistemi Tasarımı ve Gerçeklenmesi" isimli yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Ghassemlooy Z., Alves L.N., Zvanovec S., Khalighi M. A. Visible Light Communications: Theory and Applications, Birleşik Krallık: CRC Press, 2017.
- [2] Haas, H., Wireless Data From Every Light Bulb, New York, NY, USA: TED, 2011.
- [3] Zhou, H., Zhang M., Ren, X., Design and Implementation of Wireless Optical Access System for VLC-IoT Networks in Journal of Lightwave Technology, 2023, vol. 41, no. 8, pp. 2369-2380.
- [4] Wang, C., Yu, H.Y., Zhu Y.J., A Long Distance Underwater Visible Light Communication System With Single Photon Avalanche Diode, *IEEE Photonics Journal*, 2016, vol. 8, no. 5, pp. 1-11.
- [5] Li, B., Zhang, R., Xu, W., Zhao, C., Hanzo, L., Joint Dimming Control and Transceiver Design for MIMO-Aided Visible Light Communication, *IEEE Communications Letters*, 2016, vol. 20, no. 11, pp. 2193-2196.
- [6] Wijayanto, B., Hadiyoso, S., Renggani, R., Prototype of Visible Light Communication Transceiver Using Array Photo Transistor for Real Time Digital Media Transfer, 2019, J. Phys.: Conf. Ser. 1201 012019.
- [7] Goswami, P. and Shukla, M., Design of a Li-Fi Transceiver. *Wireless Engineering and Technology*, 2017, 8, 71-86.
- [8] Do, T. and Yoo, M., An in-Depth Survey of Visible Light Communication Based Positioning Systems, School of Electronic Engineering, 2016, Soongsil University, Seoul 06978, Korea
- [9] Saadi M., Ahmad T., Kamran Saleem M., Wuttisittikulkij L., Visible light communication—an architectural perspective on the applications and data rate improvement strategies, *Trans Emerg Telecommun Technol.* 2019, 30(2):e3436.
- [10] Rajbhandari, S., Chun, H., Faulkner, G., et al., High-Speed Integrated Visible Light Communication System: Device Constraints and Design Considerations, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, Volume: 33, Issue: 9, Journal Article, Publisher: IEEE.
- [11] Haigh, P. A. et al., A MIMO-ANN system for increasing data rates in organic visible light communications systems, 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2013, Budapest, Hungary, pp. 5322-5327.
- [12] Habib, B., Farhat, H., Channel hardware simulator design and implementation for MIMO time-varying 802.15.7 VLC indoor signals, 2018 IEEE Middle East and North Africa Communications Conference (MENACOMM), 2018, Jounieh, Lebanon, pp. 1-5.
- [13] Che, F., Wu, L., Hussain, B., Li X, and Yue, C. P., A Fully Integrated IEEE 802.15.7 Visible Light Communication Transmitter With On-Chip 8-W 85% Efficiency Boost LED Driver, *Journal of Lightwave Technology*, 2016, vol. 34, no. 10, pp. 2419-2430.
- [14] Yan, D., Mao, X., Xie, S., Cong, J., Chen, H., Design Fully Integrated Driver Circuit for Phosphorescent White Light-Emitting-Diode High Speed Real-Time Wireless Communication, *IEEE Photonics Journal*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 1-10.
- [15] Zhu, Y., Chen, X., Visible Light Communication System Based on White LED, 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA), 2020, Dalian, China, pp. 1015-1018.
- [16] Erol, Y., Akım Regüleli LED Test Cihazı Tasarımı, ELECO'2010 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 2010, Bursa, 370-374.

Sol-Jel Yöntemiyle Sentezlenen Magnezyum Oksit ve Kadmiyum Oksit Nanoparçacıkların Yapısal ve Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Cevher Kürşat MACİT^{1*}, Cihan ÖZEL², Turan GÜRGENÇ³

^{1,2} Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

³ Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

^{1*}macitkursatcevher@gmail.com, ²cozel@firat.edu.tr, ³tgurgenc@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 26/04/2023;

Kabul/Accepted:31/08/2023)

Öz: Bu çalışmada, magnezyum oksit (MgO), kadmiyum oksit (CdO) ve MgO-CdO nanoparçacıkları sol-jel sentezleme yöntemiyle üretildi. Magnezyum kaynağı olarak magnezyum asetat tetrahidrat $Mg(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O$, kadmiyum kaynağı olarak kadmiyum asetat dihidrat ($C_4H_6CdO_4 \cdot 2H_2O$) kullanıldı. Sol-jel nanoparçacık sentezleme işleminde çözücüler 80°C sıcaklıkta 4 saat manyetik karıştırıcıda çözündürülerek gerçekleştirildi. Çözünen nanoparçacıkların süzme, kurutma, havanda dövme ve tavlama işlemleri gerçekleştirildi. Sentezlenen nanoparçacıkların yapısal ve morfolojik özellikleri Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskopu (FE-SEM), X-Işını Kırınımı (XRD), Enerji Dispersiv Spektrum (EDX) ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) analizleri ile incelendi. Yapılan analizler sonucunda XRD analizlerinde MgO ve CdO nanoparçacıklarının karakteristik piklerine rastlandı. XRD analiz sonuçlarında nanoparçacıkların karakteristik piklerinde artışlar ve kaymalar meydana geldi. MgO-CdO numunesinde hem MgO 'nun hem de CdO 'nun kafes parametrelerinde değişiklikler meydana geldiği gözlemlendi. FE-SEM analizleri sonucunda, MgO ve CdO nanoparçacıklarının oluştuğu görüldü. EDX analizlerinde Mg, O, Cd katkılarının oluştuğu ve nanoparçacıkların sentezlendiği görüldü. MgO ve CdO nanoparçacıklarının kullanım alanları göz önünde bulundurulduğunda üretilen MgO-CdO nanoparçacıklarının yarı iletken metal oksit içeren elektronik cihazlarda kullanılabileceği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Sol-jel, Magnezyum oksit, Kadmiyum oksit, Nanoparçacık sentezi

Investigation of Structural and Morphological Properties of Magnesium Oxide and Cadmium Oxide Nanoparticles Synthesized by Sol-Gel Method

Abstract: In this study, magnesium oxide (MgO), cadmium oxide (CdO) and MgO-CdO nanoparticles were produced by sol-gel synthesis method. Magnesium acetate tetrahydrate $Mg(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O$ as magnesium source, cadmium acetate dihydrate ($C_4H_6CdO_4 \cdot 2H_2O$) as cadmium source were used. Sol-gel nanoparticle synthesis was carried out by dissolving the solvents in a magnetic stirrer at 80°C for 4 hours. The filtration, drying, pestle and annealing processes of the dissolved nanoparticles were carried out. The structural and morphological properties of the synthesized nanoparticles were investigated by Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM), X-Ray Diffractometer (XRD), Energy Dispersive Spectrum (EDX) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) analyses. As a result of the analysis, characteristic peaks of MgO and CdO nanoparticles were found in XRD analysis. In the XRD analysis results, increases and shifts occurred in the characteristic peaks of the nanoparticles. In the MgO-CdO sample, changes occurred in the lattice parameters of both MgO and CdO. As a result of FE-SEM analysis, it was observed that MgO and CdO nanoparticles were formed. In EDX analysis, Mg, O, Cd contributions were formed and nanoparticles were successfully produced. Considering the usage areas of MgO and CdO nanoparticles, it is thought that the produced MgO-CdO nanoparticles can be used in electronic devices containing semiconductor metal oxide.

Keywords: Sol-gel, Magnesium oxide, Cadmium oxide, Nanoparticle synthesis

1. Giriş

Son zamanlarda, nanobilim ve nanoteknoloji, önemli ölçüde yeni ve iyileştirilmiş fiziksel, kimyasal, yapısal ve biyolojik özelliklere sahip malzemelerle ilgilenen dünyada teknolojik bir devrime öncülük etmektedir [1,2]. Günümüzde nanomalzemeler, yüksek katma değerli teknoloji, savunma sanayi, tıp, otomotiv ve tekstil uygulamaları gibi yoğun rekabet gerektiren iş hatları için oldukça önemli bir malzeme haline gelmiştir. Nano malzemelerin üretimleri esnasında yapısal ve morfolojik özelliklerinin kontrol edilmesi yönünde önemli derecede

* Sorumlu yazar: macitkursatcevher@gmail.com Yazarların ORCID Numarası: ¹0000-0003-0466-7788, ²0000-0002-3227-6875, ³0000-0002-7678-2673

çalışmalar yapılmaktadır [1,2]. Metal oksit nanopartiküller, kataliz, sensörler, (opto) elektronik malzemeler ve çevresel iyileştirme dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalar için ilgi çeken malzemeler olarak bilinmektedir [1-3]. Yarı iletken metal oksit nanoparçacıkların keşfinden bu yana, optik, optoelektronik, kataliz ve piezoelektrikteki benzersiz ve yeni uygulamaları nedeniyle fonksiyonel oksit bazlı, tek boyutlu nano yapıya yönelik araştırmalar hızla genişlemektedir. Yarı iletken oksit nanoparçacıkları, farklı kimyasal bileşimlere ve kristalografik yapılara sahip çok çeşitli malzemeler için sistematik olarak çalışılmış, yarı-tek boyutlu nanomalzemelerin benzersiz bir grubudur [2]. Yarı iletken nanomalzemelerin, bazı önemli teknolojilerin yakın zamandaki ilerlemesinde kritik roller oynaması beklenmektedir [1-3].

Magnezyum oksit (MgO), olağanüstü kırılma indeksi gibi benzersiz fizikokimyasal davranışları nedeniyle çevre dostu, ekonomik olarak uygulanabilir ve endüstriyel açıdan önemli bir nanoparçacıktır. Mükemmel korozyon direnci, yüksek termal iletkenlik, düşük elektrik iletkenliği, büyük bant aralığı, mükemmel termodinamik kararlılık, düşük dielektrik sabiti ve düşük kırılma indeksi gibi çeşitli özelliklere sahip çok yönlü bir oksit malzemedir. MgO yarı iletken malzeme olarak, kataliz, seramik, toksik atık iyileştirme, antibakteriyel malzemeler, boya, elektro-optik cihazlar, fotonik cihazlar, süper iletken ürünler ve refrakter uygulamalarında kullanılan bir katkı maddesi olarak geniş uygulama alanları bulmaktadır [4-9].

Kadmiyum oksit (CdO), önemli bir II-VI n-tipi yarı iletkenidir. Kristal yapısı nedeniyle umut verici optik uygulamalara sahiptir. Kafes kusurları, bant aralığı enerjisinde çeşitliliğe ve güneş spektrumunun görünür bölgesinde yüksek optik geçirgenliğe neden olur. Ayrıca, toksik organik bileşiklerin, boyaların, pigmentlerin ve çevresel kirleticilerin fotokatalitik bozunmasına sahiptir. CdO, kadmiyum kaplama banyolarında, kadmiyum tuzlarının, seramik sırların ve akümülatörler için elektrotların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kadmiyum oksitler büyük ölçüde galvanik kaplama banyoları ve pigmentler için bir bileşen olarak kullanılır [10-12]. Kadmiyum oksit ayrıca düşük elektrik direnci, yüksek iletim katsayısı gibi bir dizi ilginç özelliğe sahip yarı iletken bir malzemedir. CdO'nun görünür bölge ve dikkat çekici parlaklık özellikleri; ayrıca 2,5 eV'lik doğrudan bant aralığına ve 1,98 eV'lik dolaylı bant aralığına sahiptir [13]. CdO yalnızca benzersiz optik elektriksel özelliklere sahip olmakla kalmaz, aynı zamanda boyalar, pigmentler ve bir dizi diğer çevresel kirleticiler gibi organik bileşiklerin ışıkla bozunması için kullanılabilen bir dizi seçici katalitik özelliğe de sahiptir [10,14-16].

MgO ve CdO nanoparçacıklarını çökeltme, yanma, karbotermik indirgeme, ultrasonikleştirme, lazer buharlaştırma, mikrodalga destekli yeşil sentez, kimyasal gaz fazı biriktirme, biyolojik sentez ve sol-jel yöntemi gibi çeşitli sentez yolları mevcuttur. Çalışmada kullanılan Sol-jel sentezleme yöntemi, basitliği, maliyet etkinliği ve oldukça saf nihai ürün üretme kabiliyeti nedeniyle, ilginç manyetik ve optik özelliklere sahip nanopartikül tozların sentezlenmesinde en umut verici yaklaşımlardan biridir [17-22]. Ayrıca, yalnızca nispeten düşük bir sıcaklık gerektirir ve metal oksitlerin mükemmel bileşim kontrolüne izin verir [23,24]. Sol-jel işleminde kullanılan ham maddeler, kontrollü morfoloji ve boyuta sahip MgO ve CdO nanoparçacıklarının sentezi için kolaylıkla temin edilebilir [25].

Bu çalışmada MgO, CdO ve Mg-CdO nanoparçacıkları sol-jel üretim yöntemi ile sentezlenmeleri gerçekleştirildi. Çalışmada sentezlenen nanoparçacıkların yarı iletken malzeme olarak uygulamalarda kullanılabilmesi düşünülerek sentezlenmeleri yapıldı. Sentezlenen nanoparçacıkların yapısal ve morfolojik karakterizasyonu XRD, FT-IR, FE-SEM, EDX analizleriyle incelendi. Nanoparçacıkların yapısal ve morfolojik özellikleri detaylı bir şekilde analiz edildi.

2. Materyal ve Metot

2.1 MgO nanoparçacıklarının sentezlenmesi

Çalışmada kullanılan MgO nanoparçacıklarının Sol-jel sentezleme yöntemi ile üretimine bir beherde 50 ml metanol içerisine 0.1 M magnezyum asetat tetrahidrat $Mg(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O$ eklenerek başlandı ve karışım çözünene kadar manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Diğer bir beherde 50 ml metanole 0.5 M sodyum hidroksit (NaOH) eklenerek çözeltinin pH dengesi sağlanarak çözünene kadar manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Bu iki çözelti bir beherde birleştirildi ve elde edilen çözeltiye amonyak solüsyonu, karıştırılan çözeltinin içerisine damla damla ilave edildi ve pH 10'a ayarlandı. Çözelti 80 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Karıştırılma sonrasında çözelti oda sıcaklığına gelinceye kadar beklenildi. Daha sonra süzgeç kâğıdıyla çökmesi gerçekleşen nanoparçacıklar süzüldü ve alkole ile yıkama işlemi gerçekleştirildi. Alkol ile yıkama işleminden sonra saf su ile birkaç defa durulama işlemi yapıldı. Nanoparçacıklar 80 °C'de 4 saat etüvde kurutuldu. Kurutulan

parçacıklar havan ile dövüldü ve sonrasında 400 °C’de 1 saat süreyle fırında tavlandı. Böylelikle 1.Numune olan Saf MgO nanoparçacıkları elde edildi. Nanoparçacıkların sentezlenmesinde literatür çalışmalarından yararlanıldı [42,43].

2.2 CdO nanoparçacıklarının sentezlenmesi

Çalışmada kullanılan 2.numune olan CdO nanoparçacıklarının Sol-jel sentezleme yöntemi ile üretimine bir beherde 50 ml metanol içerisine 0.1 M kadmiyum asetat dihidrat ($C_4H_6CdO_4 \cdot 2H_2O$) eklenerek başlandı ve karışım çözünene kadar manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Diğer bir beherde 50 ml metanole 0.5 M sodyum hidroksit NaOH eklenerek çözeltinin pH dengesi sağlanarak çözünene kadar manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Bu iki çözelti bir beherde birleştirildi ve elde edilen çözeltiye amonyak solüsyonu, karıştırılan çözeltinin içerisine damla damla ilave edildi ve pH 10'a ayarlandı. Çözelti 80 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Karıştırılma sonrasında çözelti oda sıcaklığına gelinceye kadar beklenildi. Daha sonra süzgeç kâğıdıyla çökmesi gerçekleşen nanoparçacıklar süzüldü ve alkolle ile yıkama işlemi gerçekleştirildi. Alkol ile yıkama işleminden sonra saf su ile birkaç defa durulama işlemi yapıldı. Nanoparçacıklar 80 °C’de 4 saat etüvde kurutuldu. Kurutulan parçacıklar havan ile dövüldü ve sonrasında 400 °C’de 1 saat süreyle fırında tavlandı. Böylelikle 2.Numune olan saf CdO nanoparçacıkları elde edildi. Nanoparçacıkların sentezlenmesinde literatür çalışmalarından yararlanıldı [42,43].

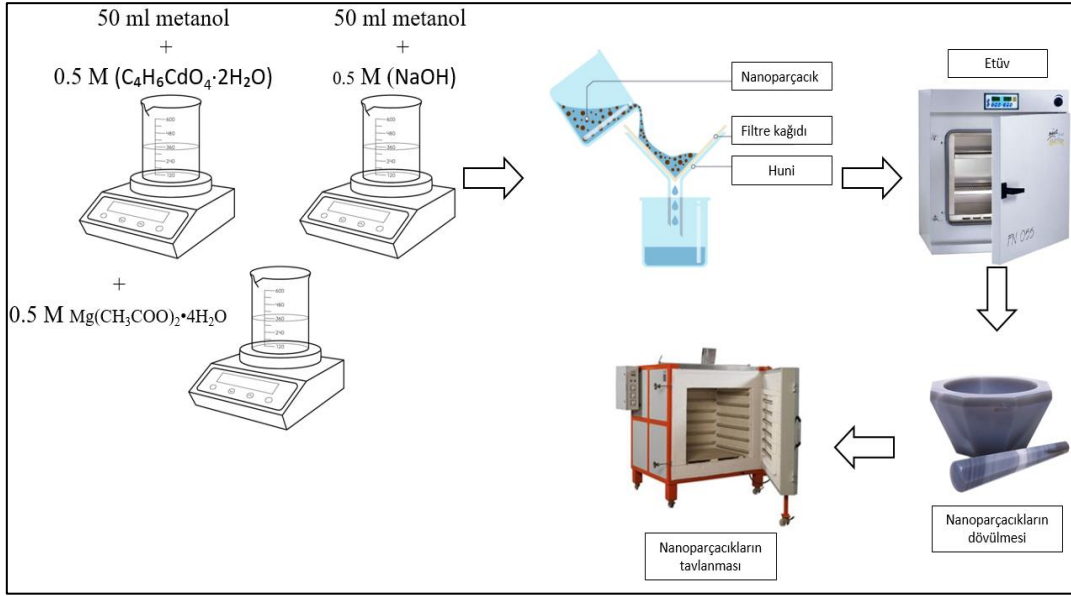
2.3 MgO-CdO nanoparçacıklarının sentezlenmesi

Çalışmada kullanılan son numune olan MgO-CdO nanoparçacıklarının Sol-jel sentezleme yöntemi ile üretimine bir beherde 50 ml metanol içerisine 0.5 M kadmiyum asetat dihidrat ($C_4H_6CdO_4 \cdot 2H_2O$) eklenerek başlandı ve karışım çözünene kadar manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Diğer bir beherde 50 ml metanole 0.5 M sodyum hidroksit NaOH eklenerek çözeltinin pH dengesi sağlanarak çözünene kadar manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Üçüncü bir beherde ise 50 ml metanol içerisinde 0.5 M magnezyum asetat tetrahidrat $Mg(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O$ eklendi ve çözünene kadar manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Bu üç çözelti bir beherde birleştirildi ve elde edilen çözelti 80 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Karıştırılma sonrasında çözelti oda sıcaklığına gelinceye kadar beklenildi. Daha sonra süzgeç kâğıdıyla çökmesi gerçekleşen nanoparçacıklar süzüldü ve alkolle ile yıkama işlemi gerçekleştirildi. Alkol ile yıkama işleminden sonra saf su ile birkaç defa durulama işlemi yapıldı. Nanoparçacıklar 80 °C’de 4 saat etüvde kurutuldu. Kurutulan parçacıklar havan ile dövüldü ve sonrasında 400 °C’de 1 saat süreyle fırında tavlandı.

Böylelikle 3.Numune olan MgO-CdO numunesi elde edildi. Nanoparçacıkların sentezlenmesinde literatür çalışmalarından yararlanıldı [42,43]. Sentezlenmeleri tamamlanan numunelerin isimlendirilmesi Tablo 1’de gösterildi. MgO-CdO nanoparçacıklarının üretim şeması Şekil 1’de gösterildi.

Tablo 1. Sentezlenen nanoparçacıkların isimlendirilmesi

Numune	İçeriği
1	MgO
2	CdO
3	MgO-CdO



Şekil 1. Nanoparçacık üretim şeması

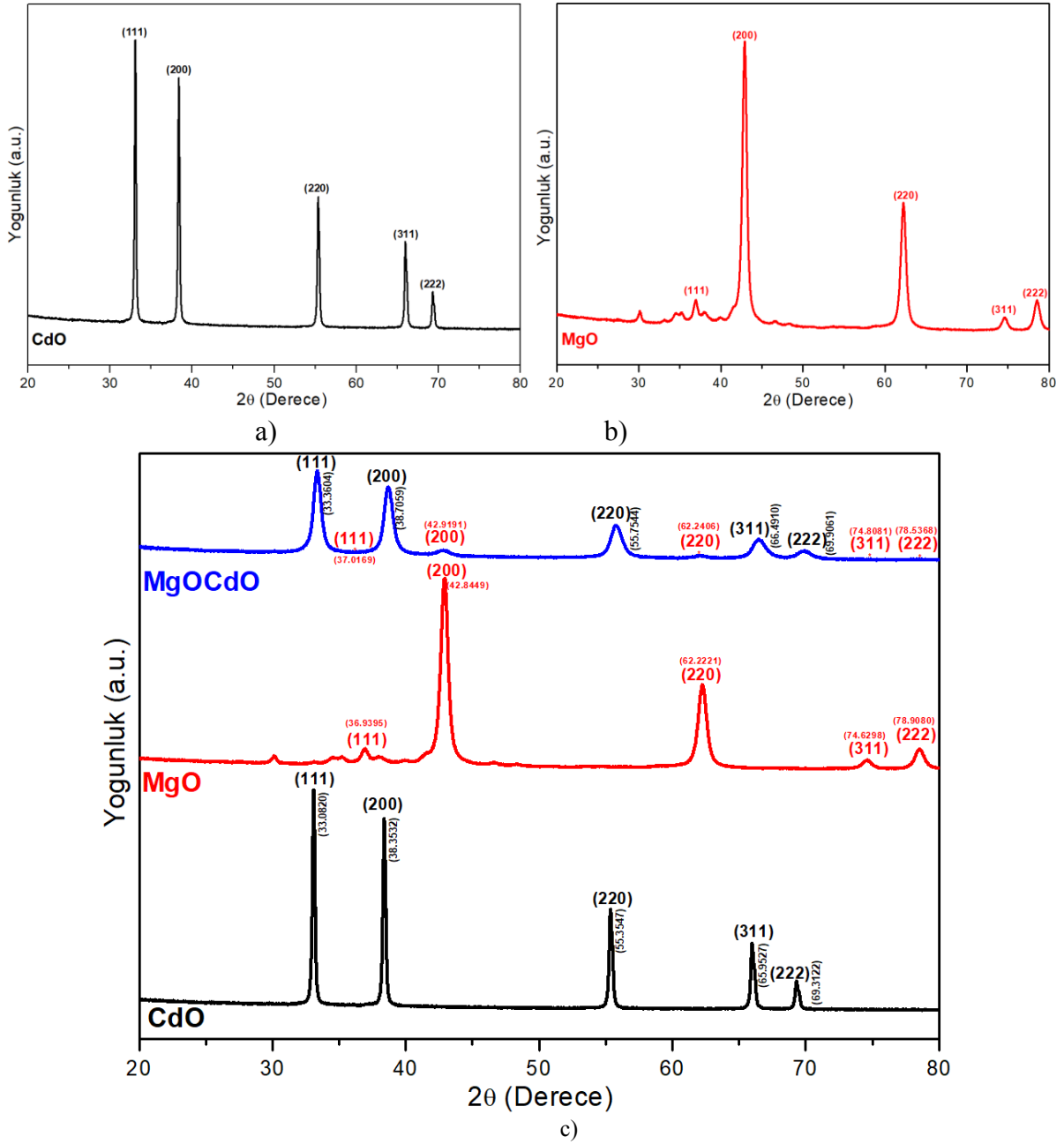
2.4 Nanoparçacıkların karakterizasyonu

Sol-Jel yöntemi ile sentezlenmiş nanoparçacıkların XRD kırınım desenleri $Cu\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) radyasyonunda $2\theta = 20$ ile 80° tarama aralığı ve $40 \text{ kV}/40 \text{ mA}$ da gerçekleştirildi. Nanoparçacıkların morfolojileri ve kimyasal bileşimleri sırasıyla Zeiss Sigma 300 marka emisyon FE-SEM ve EDX analizi ile incelemeleri yapılarak tanecik boyutları ve oluşan katkı oranları incelendi. FT-IR analizi, Thermo Scientific Nicolet IS5 FT-IR spektrometre cihazında $4000\text{-}500 \text{ cm}^{-1}$ tarama aralığında yapıldı.

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1 Nanoparçacıkların karakterizasyonu

MgO, CdO ve MgO-CdO nanoparçacıklarının XRD kırınım sonuçları Şekil 2'de gösterildi. MgO nanoparçacıklarının XRD modelini göstermektedir. XRD modeli, standart JCPDS78-0430 numaralı kart ve literatür çalışmaları ile iyi bir uyum içinde olan yüz merkezli kübik yapıya sahiptir. MgO 'nun sırasıyla (111), (200), (220), (311) ve (222) düzlemlerine karşılık gelen 2θ derece $36.9395^\circ, 42.8449^\circ, 62.2221^\circ, 74.6298^\circ$ ve 78.5368° 'de ana yansımaları görülmüştür. XRD modelinde $Mg(OH)_2$, Mg veya diğer safsızlıkların karakteristik pikleri kırınım tepe noktalarının geniş doğası, kristalitlerin nanometre rejiminde olduğu açıkça görülmektedir [26-31]. MgO nanoparçacıklarının 2θ dereceleri Tablo 2'de gösterildi. CdO nanoparçacıklarında $33.0820^\circ, 38.7059^\circ, 55.7444^\circ, 66.4910^\circ$ ve 69.9061° 'lik 2θ dereceye karşılık gelen yoğun pikler JCPDS78-0653 numaralı kart ile ve literatür çalışmalarıyla uyumludur [26-31]. Bu zirveler, CdO 'nun kübik fazına karşılık gelir ve sırasıyla (111), (200), (220), (311) ve (222) düzlemlerine atfedilir [32-35]. CdO nanoparçacıklarının 2θ dereceleri Tablo 3'te gösterildi. MgO-CdO nanoparçacıklarında ise hem MgO 'nun hem de CdO 'nun karakteristik piklerine rastlandı. Aynı zamanda MgO 'nun ve CdO 'nun bir arada katkılanmasıyla karakteristik piklerinde daha büyük derecelere yönlü kaymaların meydana geldiği görülmüştür (Tablo2, Tablo3). MgO-CdO numunesinde MgO 'ya ait olan karakteristik piklerin şiddetlerinin düştüğü gözlemlendi. Bu duruma MgO 'nun oksitlendiğinden ve CdO katkısının MgO 'nun kristalleşmesini, tane büyüme derecesini etkileyebileceğini ve NaOH ile titrasyon sırasında $\text{pH} = 10$ 'da magnezyum asetat tetrahidrat 'ta eksik bir azalma olduğu düşünülmektedir [44]. Diğer bir durum olarak nanoparçacıklardaki MgO fazının pik yoğunluğu, diğer metal içeriğinin neden olduğu etki nedeniyle azalır ve daha yüksek teta açısını daha düşük bir değere kaydırır, böylece kafeste verilen deformasyonlardan dolayı kristal yapının yokluğunu, kaybını ve şiddetindeki azalmaları doğrulamaktadır [59,60]. Sonuçlar MgO, CdO ve MgO-CdO nanoparçacıklarının başarılı bir şekilde sentezlendiği ve nanoparçacıkların kendi karakteristik piklerini korudukları gözlemlendi.



Şekil 2. a-) MgO, b-) CdO, c-) MgO-CdO nanoparçacıklarının XRD analiz sonuçları

Tablo 2. Sentezlenen MgO nanoparçacıklarının 2θ değerleri

Numune/ Kırınım Düzlemi	(111)	(200)	(220)	(311)	(222)
MgO	36.9395	42.8449	62.2221	74.6298	78.5368
MgO-CdO	37.0169	42.9191	62.2406	74.8061	78.9080

Tablo 3. Sentezlenen CdO nanoparçacıklarının 2θ değerleri

Numune/ Düzlemi	Kırınım	(111)	(200)	(220)	(311)	(222)
CdO		33.0820	38.3532	55.3547	65.9527	69.3122
MgO-CdO		33.3604	38.7059	55.7444	66.4910	69.9061

MgO, CdO ve Mg-CdO numunelerinin kristal boyutlarını belirlemek için yüksek yoğunluklu pikler MgO için (200) ve (220) CdO için ise (111) ve (200) pik değerleri kullanıldı ve numunelerin yapısal parametreleri aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplandı [36-40]. İki bitişik düzlem arasındaki mesafeyi (d) bulmak için aşağıdaki denklem kullanıldı [15].

$$d = \frac{a}{\sqrt{(h+k+l)}} \quad (1)$$

d, iki bitişik düzlem arasındaki mesafe ve h, k ve l, Miller indisleridir. Sentezlenen nanoparçacıklar güçlü kırınım zirvelerinin gösterdiği gibi, güçlü bir kristallığe sahiptir. Kristalit boyutunun hesaplanması için, Origin yazılımı kullanılarak yarı maksimumda tam genişlik (FWHM) belirlenir. Kırınım tepelerini örten en güçlü yoğun tepe noktası için nanoparçacıkların kristal boyutu Debye-Scherrer Denklemi kullanılarak hesaplandı.

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (2)$$

Burada λ , X-ışınının nm cinsinden dalga boyu, β radyan cinsinden yarı maksimumdaki tam genişlik ve θ derece cinsinden kırınım açısıdır. Birim hücrelerin hacimleri (V) aşağıdaki eşitlikten hesaplandı [19,26].

$$V = a^3 \quad (3)$$

Nanoparçacıkların kırınım düzlemleri, kafes parametreleri, birim hücre hacimleri, kristal boyutları ve ortalama kristal boyutları için hesaplanan değerler Tablo 4 ve Tablo 5'te verildi. Sentezlenen nanoparçacıkların kafes parametrelerinde CdO takviyesiyle MgO'nun kafes parametresinde, birim hücre hacminde ve ortalama kristal boyutlarında azalmalar meydana geldiği görüldü.

Tablo 4. MgO nanoparçacıklarının kırınım düzlemlerinin, kafes boyutlarının, birim hücre hacimlerinin, kristal boyutlarının ve ortalama kristal boyutlarının hesaplanan değerleri

Numune	MgO	MgO-CdO
Kırınım Düzlemleri	200	200
	220	220
2θ Kırınım Açıları (derece)	42.8449	42.9191
	62.2221	62.2406
a=b=c (Å)	3.6529	3.6469
V (Å ³) Kristal Boyutu (nm)	48.7439	48.5034
Ortalama Kristal Boyutu (nm)	12.3289	11.5752

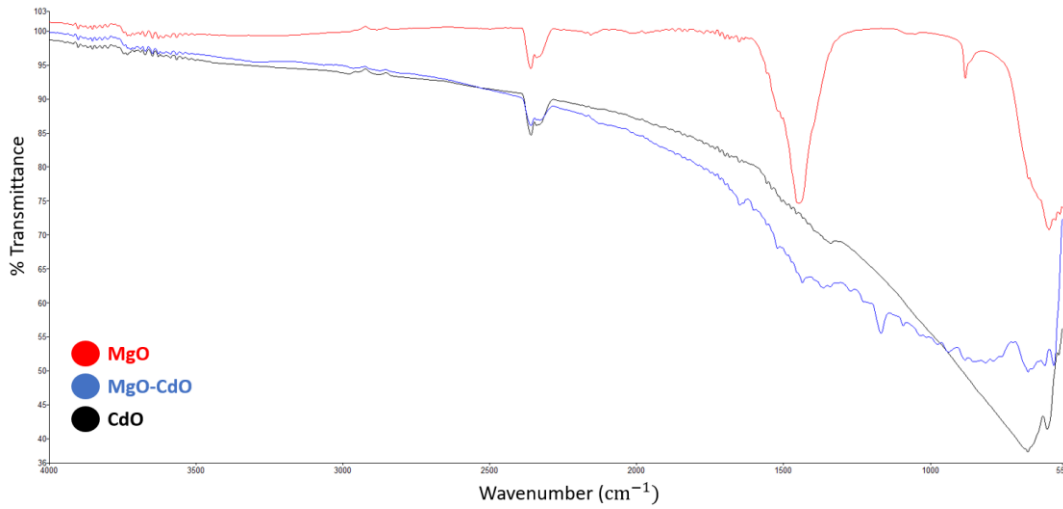
CdO nanoparçacıklarına ait olan kafes parametrelerinde ve birim hücre hacminde azalma görülmüşken, ortalama kristal boyutlarında artışlar meydana geldi [42]. Hesaplanan yapısal parametrelerdeki azalma MgO'nun biriktirilmesinden sonra kristalit boyutlarında artış olduğunu gösterir [42, 59, 60]. CdO ve Cd iyonlarında Mg

katkılı periyodik kristal kafesi artırması nedeniyle MgO içinde çok az miktarda gerinim oluşur. Bu nedenle, kafesin yer değiştirmesi, kristalin düzenliliğinde değişikliğe yol açtığı da düşünülmektedir [60].

Tablo 5. CdO nanoparçacıklarının kırınım düzlemlerinin, kafes boyutlarının, birim hücre hacimlerinin, kristal boyutlarının ve ortalama kristal boyutlarının hesaplanan değerleri

Numune	CdO	Mg-CdO
Kırınım Düzlemleri	111	111
	200	200
2θ Kırınım Açılı (derece)	33.0820	33.3604
	38.3532	38.7059
a=b=c (Å)	4.6863	4.6483
V (Å ³) Kristal Boyutu (nm)	102.9183	100.4342
Ortalama Kristal Boyutu (nm)	32.2784	33.7447

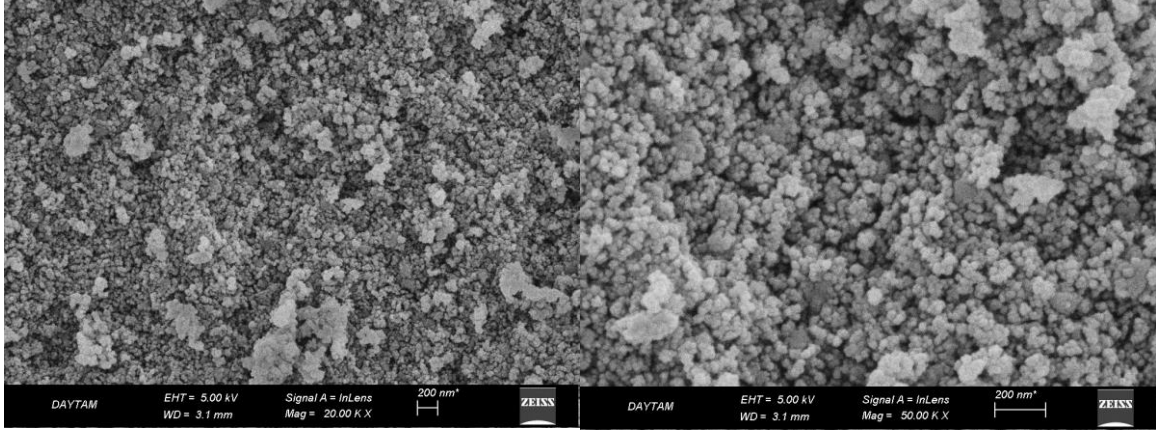
Sentezlenmeleri tamamlanan nanoparçacıkların FT-IR analiz sonuçları Şekil 3'te gösterildi. FT-IR analizlerinde 3434 cm⁻¹, 3414 cm⁻¹ ve 3424 cm⁻¹'deki tepe noktaları hidroksil gruplarının O-H gerilme moduna karşılık gelmektedir [50-53]. 863 cm⁻¹'deki görülen keskin zirve, CdO titreşiminin karakteristik bir metalik bağıdır [54]. 697 cm⁻¹'de gözlemlenen güçlü tepe noktaları, sırasıyla iyi tanımlanmış MgO kristalinin özelliği olan Mg-O gerilme titreşimine ve uzunlamasına optik fonon modlarına atanır [55]. 1435 cm⁻¹'deki bant, numune yüzeyindeki karbonat iyonlarının (CO₃²⁻) absorpsiyon karakteristiklerine karşılık gelirken, 2365 cm⁻¹'deki zayıf absorpsiyon bandı, atmosferik karbon dioksit absorpsiyonu nedeniyle CO₂'nin gerilme titreşimlerine atfedilir [56-58].



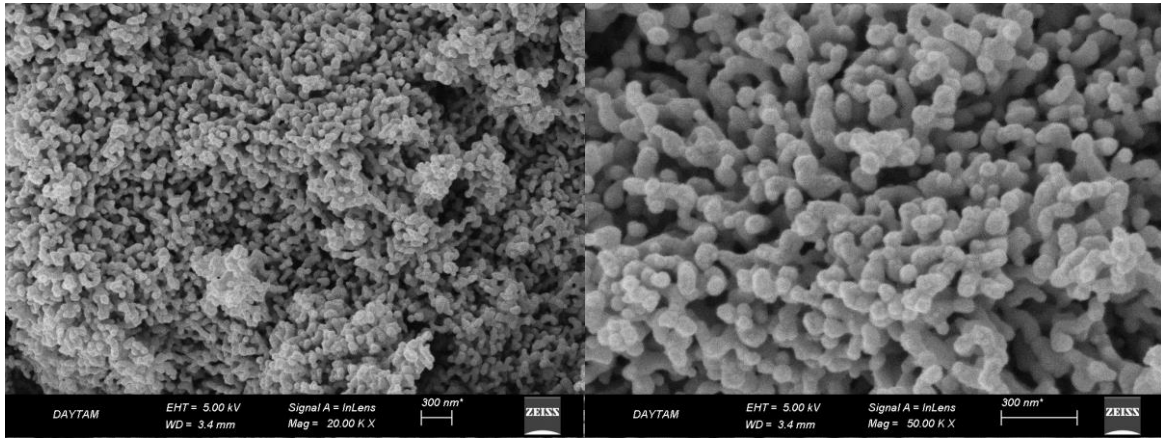
Şekil 3. FT-IR analiz sonuçları

Sentezlenen MgO, CdO ve Mg-CdO nanoparçacıklarının FE-SEM ve EDX analizi ile incelemeleri yapılarak tanecik boyutları ve oluşan atomik katkı oranları incelendi. Alınan FE-SEM görüntüleri ve EDX analiz sonuçları Şekil 4-7'de gösterildi. FE-SEM görüntülerinde MgO, CdO ve Mg-CdO nanoparçacıklarının nano boyutlarda üretildikleri görüldü. FE-SEM görüntülerinde nanoparçacıkların küre şeklinde oluştuğu görülmüştür. FE-SEM görüntülerinden, nanoparçacıkların nano ölçekli rejimde oluştuğu görülmektedir ve nanoparçacıkların yüzeylerinde biriktiği de gözlemlendi. Parçacığın yüzeyde toplanması, sentezlenen nanopartiküllerin yüksek yüzey enerjisinden kaynaklanmış olabilir [48]. EDX analiz sonuçlarında sentezlenen nanoparçacıkların kimyasal

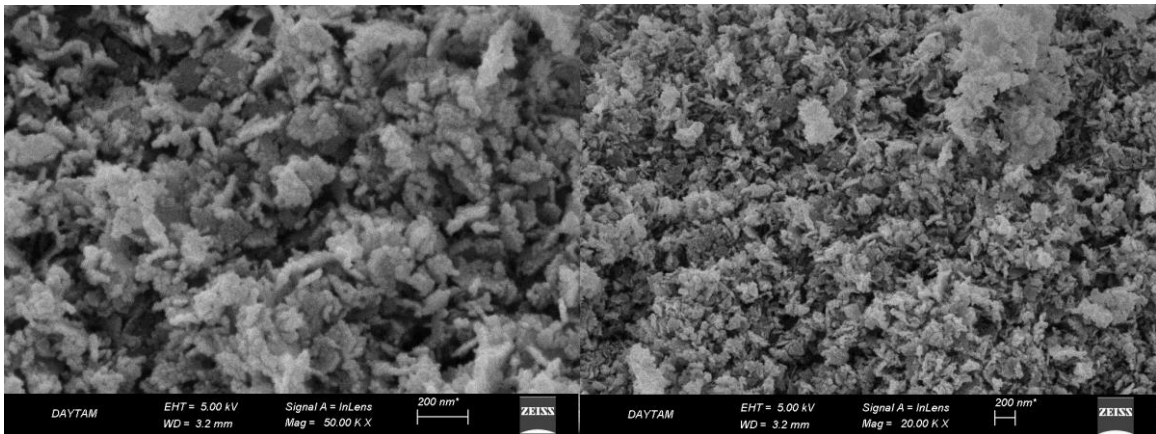
bileşimleri Tablo 6'da gösterildi. MgO, CdO ve Mg-CdO numunelerinde kullanılan bütün katkıların oluştuğu ve oluşan katkıların molar dağılımlarına göre orantılı oldukları görüldü. EDX analiz sonuçlarında numunelerde Mg, Cd ve O katkılarının oluştuğu görüldü.



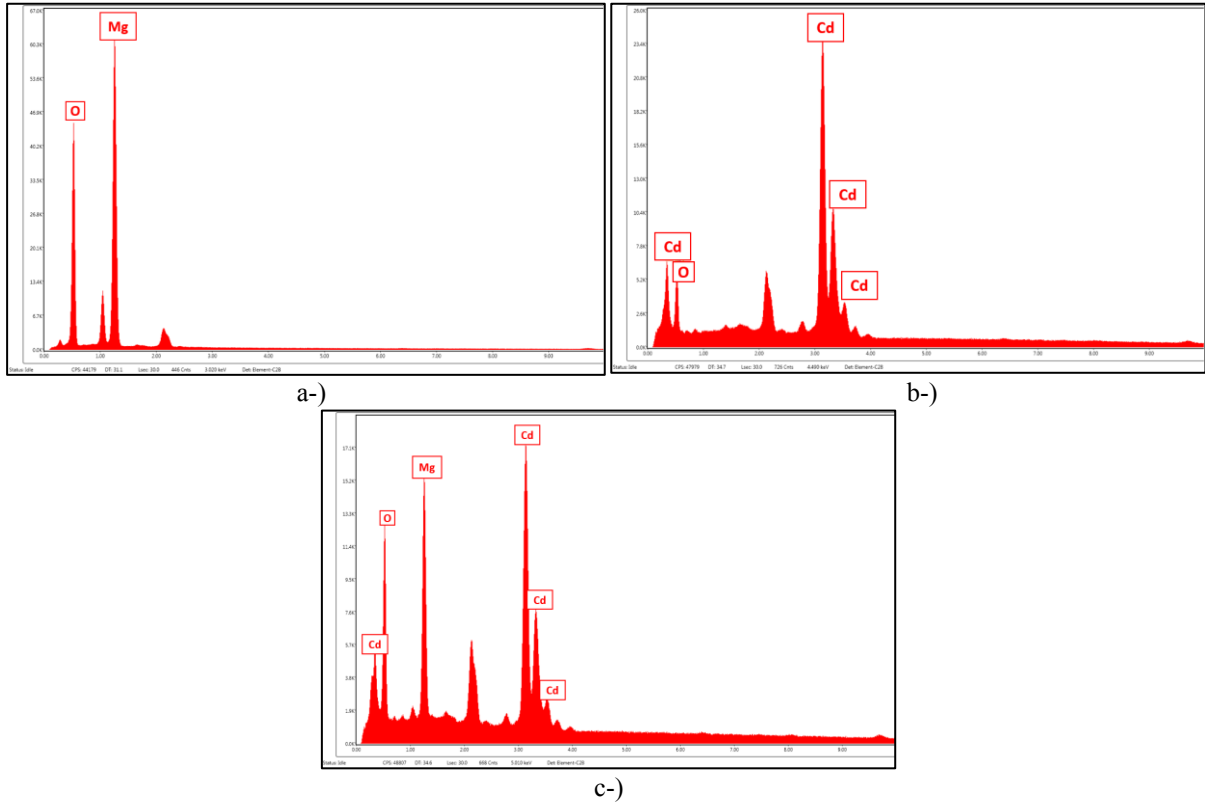
Şekil 4. MgO nanoparçacıklarının FE-SEM görüntüleri



Şekil 5. CdO nanoparçacıklarının FE-SEM görüntüleri



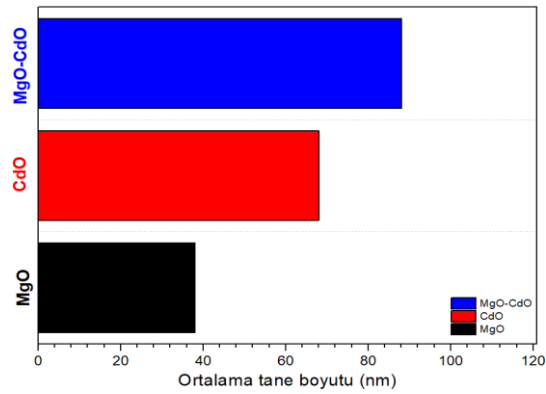
Şekil 6. Mg-CdO nanoparçacıklarının FE-SEM görüntüleri



Şekil 7. a-) MgO, b-) CdO ve c-) MgO-CdO nanoparçacıklarının EDX analiz sonuçları

Tablo 6. Sentezlenen numunelerin EDX analiz sonuçları

Numune	İçerik (at.%)		
	Mg	Cd	O
MgO	% 48.03	-	%51.97
CdO	-	% 41.25	% 58.75
Mg-CdO	% 28.12	% 23.43	% 48.45



Şekil 8. Nanoparçacıkların ortalama tane boyutları

FE-SEM analizleri sonucunda sentezlenen nanoparçacıkların tane boyutlarının ortalama değerleri Şekil 8’de gösterildi. Sentezlenme sonucunda nanoparçacıkların tanecik boyutlarının büyüdüğü gözlemlendi. FE-SEM görüntülerinde MgO-CdO nanoparçacıklarının bir arada sentezlenmesiyle ortalama tanecik boyutlarında büyümeler meydana geldi. Şekil 4’teki FE-SEM görüntülerinde de görüldüğü gibi MgO-CdO nanoparçacıklarının sentezlenmesiyle ortalama tane boyutlarının büyüdüğü ve MgO, CdO nanoparçacıklarına farklı katkı maddelerinin eklenmesiyle de tane boyutlarının büyüdüğü literatür çalışmalarıyla desteklenmektedir [45-47,49].

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, MgO, CdO ve Mg-CdO nanoparçacıkları sol-jel sentezleme yöntemiyle nano ölçekte başarı ile sentezlenmesi gerçekleştirildi. Çalışmada, MgO ve CdO nanoparçacıkları başarılı bir şekilde katkılındı ve yüksek saflıkta nanoparçacıklar sentezlendi. XRD tepe yoğunlukları ve konumlarında, MgO ve CdO ’ya ait olan karakteristik piklerin korunduğu görüldü. MgO-CdO numunesinde kırınım düzlemlerinde kaymalar meydana geldi. FT-IR analizlerinde de benzer şekilde MgO ve CdO ’ya ait olan karakteristik piklerin gözlemlendiği görüldü. FE-SEM görüntülerinde ise MgO nanoparçacıkları ile CdO nanoparçacıklarının homojen bir şekilde birleştikleri ve tanecik boyutlarının büyüdüğü görülmüştür. EDX analiz sonuçlarında Mg, Cd ve O ’nun oluştukları ve oluşan katkıların katkı oranları benzer oranlarda olduğu görüldü. MgO-CdO nanoparçacıklarının yarı iletken metal oksit içeren elektronik cihazlarda kullanılabileceğini ve yapılan çalışmaların geliştirilebileceğini göstermektedir.

Kaynaklar

- [1] Wani AH, Shah MA, A unique and profound effect of MgO and ZnO nanoparticles on some plant pathogenic fungi. *J Appl Pharm Sci* 2012; 2: 40-44.
- [2] Sundrarajan M, Suresh J, Gandhi RR. A comparative study on antibacterial properties of MgO nanoparticles prepared under different calcination temperature. *Dig J Nanomater Biostructures* 2012; 7: 983-989.
- [3] Wu MC, Corneille JS, Estrada CA, He JW, Goodman D. W. Synthesis and characterization of ultra-thin MgO films on Mo (100). *Chem Phys Lett* 1991; 182(5): 472-478.
- [4] Mageshwari K, Mali S. S, Sathyamoorthy R, Patil P. S. Template-free synthesis of MgO nanoparticles for effective photocatalytic applications. *Powder Technol* 2013; 249: 456-462.
- [5] Shah M A, Qurashi A. Novel surfactant-free synthesis of MgO nanoflakes *J Alloys Compd* 2009; 482:548-551
- [6] Niu H, Yang Q, Tang K, Xie Y. Self-assembly of porous MgO nanoparticles into coral-like microcrystals *Scr. Mater* 2006; 54: 1791-1796.
- [7] Duan G, Yang X, Chen J, Huang G, Lu L, Wang X. Wang The catalytic effect of nanosized MgO on the decomposition of ammonium perchlorate *Powder Technol* 2007;172: 27-29
- [8] Khan MI, Akhtar MN, Ashraf N, Najeeb J, Munir H, Awan TI, Kabli MR. Green synthesis of magnesium oxide nanoparticles using *Dalbergia sissoo* extract for photocatalytic activity and antibacterial efficacy. *Appl Nanosci* 2020;10: 2351-2364.
- [9] Duong THY, Nguyen TN, Oanh HT, Dang Thi TA, Giang LNT, Phuong HT, Nguyen TV. Synthesis of magnesium oxide nanoplates and their application in nitrogen dioxide and sulfur dioxide adsorption. *J Chem* 2019.
- [10] Karunakaran C, Dhanalakshmi R. Selectivity in photocatalysis by particulate semiconductors. *Cent Eur J Chem* 2009; 7(1): 134.
- [11] Khan SA, Zahera M, Khan IA, Khan MS, Azam A, Arshad M, Elgorban AM. Photocatalytic degradation of methyl orange by cadmium oxide nanoparticles synthesized by the sol-gel method. *Optik* 2022; 251: 168401.
- [12] Hampel Clifford A, Gessner GH. The encyclopedia of chemistry. The encyclopedia of chemistry 1973. xvii-1197.
- [13] Tadjarodi A, Imani M. Synthesis and characterization of CdO nanocrystalline structure by mechanochemical method. *Mater Lett* 2011; 65.6: 1025-1027.
- [14] Karunakaran C, Dhanalakshmi R, Gomathisankar P, Manikandan G. Enhanced phenol-photodegradation by particulate semiconductor mixtures: interparticle electron-jump. *J Hazard Mater* 2010; 176.1-3: 799-806.
- [15] Nezamzadeh-Ejehieh A, Zohreh B. A comparison between the efficiency of CdS nanoparticles/zeolite A and CdO/zeolite A as catalysts in photodecolorization of crystal violet. *Desalination* 2011; 279.1-3: 146-151.
- [16] Rane YN, Shende DA, Raghuvanshi MG, Koli RR, Gosavi SR, Deshpande NG. Visible-light assisted CdO nanowires photocatalyst for toxic dye degradation studies. *Optik* 2019; 179: 535-544.
- [17] Ashour AH, El-Batal AI, Maksoud MA, El-Sayyad GS, Labib S, Abdeltwab E, El-Okr MM. Antimicrobial activity of metal-substituted cobalt ferrite nanoparticles synthesized by sol-gel technique. *Particuology* 2018; 40: 141-151.
- [18] Abdel Maksoud MIA, El-ghandour A, El-Sayyad GS, Awed AS, Ashour AH, El-Batal AI, El-Okr MM. Incorporation of Mn 2+ into cobalt ferrite via sol-gel method: insights on induced changes in the structural, thermal, dielectric, and magnetic properties. *J Sol gel Sci Technol* 2019; 90: 631-642.
- [19] Karthik K, Shashank M, Revathi V, Tatarchuk T. Facile microwave-assisted green synthesis of NiO nanoparticles from *Andrographis paniculata* leaf extract and evaluation of their photocatalytic and anticancer activities. *Mol Cryst Liq* 2019.

- [20] Suresh S. Investigations on synthesis, structural and electrical properties of MgO nanoparticles by sol–gel method. *Ovonic Res* 2014; 10(6): 205-210.
- [21] Karthik K, Dhanuskodi S, Gobinath C, Prabukumar S, Sivaramakrishnan S. Ultrasonic-assisted CdO–MgO nanocomposite for multifunctional applications. *Mater Technol* 2019; 34(7): 403-414.
- [22] Yoshimura M, Sōmiya S. Hydrothermal synthesis of crystallized nano-particles of rare earth-doped zirconia and hafnia. *Mater Chem Phys* 1999; 61(1): 1–8.
- [23] Maksoud MA, El-Sayyad GS, Ashour AH, El-Batal AI, Abd-Elmonem MS, Hendawy HA, El-Okr MM. Synthesis and characterization of metals-substituted cobalt ferrite [$M_x Co (1-x) Fe_2O_4$; (M= Zn, Cu and Mn; x= 0 and 0.5)] nanoparticles as antimicrobial agents and sensors for Anagrelide determination in biological samples. *Mater Sci Eng* 2018; C 92: 644-656.
- [24] Athar T, Hakeem A, Ahmed W. Synthesis of MgO nanopowder via non aqueous sol–gel method. *Adv. Sci. Lett.* 2012; 7: 27–29.
- [25] Maksoud MA, El-ghandour A, El-Sayyad GS, Awed AS, Fahim RA, Atta MM, El-Okr MM. Tunable structures of copper substituted cobalt nanoferrites with prospective electrical and magnetic applications. *J. Mater Sci Mater Electron* 2019; 30: 4908-4919.
- [26] Suresh J, Yuvakkumar R, Sundrarajan M, Hong SI. Green synthesis of magnesium oxide nanoparticles. *Adv Mater Res* 2014; 952: 141-144.
- [27] Mageshwari K, Mali SS, Sathyamoorthy R, Patil PS. Template-free synthesis of MgO nanoparticles for effective photocatalytic applications. *Powder Technol* 2013; 249: 456-462.
- [28] Dabhane H, Ghotekar S, Tambade P, Pansambal S, Oza R, Medhane V. MgO nanoparticles: Synthesis, characterization, and applications as a catalyst for organic transformations. *Eur J Chem* 2021; 12(1): 86-108.
- [29] Tang ZX, Lv BF. MgO nanoparticles as antibacterial agent: preparation and activity. *Braz J Chem Eng* 2014; 31: 591-601.
- [30] Sutapa IW, Wahab AW, Taba P, La NN. Synthesis and structural profile analysis of the MgO nanoparticles produced through the sol-gel method followed by annealing process. *Orient J Chem* 2018; 34(2): 1016.
- [31] Wong CW, Chan YS, Jeevanandam J, Pal K, Bechelany M, Abd EM, El-Sayyad GS. Response surface methodology optimization of mono-dispersed MgO nanoparticles fabricated by ultrasonic-assisted sol–gel method for outstanding antimicrobial and antibiofilm activities. *J Clust Sci* 2020; 31: 367-389.
- [32] Hanifah MFR, Jaafar J, Aziz M, Ismail AF, Rahman MA, Othman MHD. Synthesis of graphene oxide nanosheets via modified hummers' method and its physicochemical properties. *J Teknol* 2015; 74(1): 189-192.
- [33] Macit CK, Gürğenç T, Özel C. Synthesis of Se doped CdO nanoparticles by sol-gel method, determination of structural and morphological properties. *JMED*, 2022; 2(1): 26-33.
- [34] Gürğenç E, Dikici A, Biryant F, Aslan F, Koran K. Sol-Jel Yöntemi ile Sentezlenen La katkılı CdO Nanoparçacıkların, Yapısal Karakterizasyonu ve Dielektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi. *FÜMBD* 2022; 34(1): 229-237.
- [35] Mohanraj K, Balasubramanian D, Chandrasekaran J, Bose AC. Synthesis and characterizations of Ag-doped CdO nanoparticles for PN junction diode application. *Mater Sci Semicond* 2018; 79: 74-91.
- [36] Bhoi H, Joshi P, Punia K, Lal G, Kumar S. Synthesis and rietveld refinement of MgO nanoparticles. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2220, No. 1). AIP Publishing.
- [37] Yousefi S, Ghasemi B, Nikolova MP. Morpho/Opto-structural characterizations and XRD-assisted estimation of crystallite size and strain in MgO nanoparticles by applying Williamson–Hall and size–strain techniques. *J Clust Sci* 2022; 33(5): 2197-2207.
- [38] El-Sayyad GS, Mosallam FM, El-Batal AI. One-pot green synthesis of magnesium oxide nanoparticles using *Penicillium chrysogenum* melanin pigment and gamma rays with antimicrobial activity against multidrug-resistant microbes. *Adv Powder Technol* 2018; 29(11): 2616-2625.
- [39] Demirci S, Öztürk B, Yildirim S, Bakal F, Erol M, Sancakoğlu O., Batar T. Synthesis and comparison of the photocatalytic activities of flame spray pyrolysis and sol–gel derived magnesium oxide nano-scale particles. *Mater Sci Semicond* 2015; 34: 154-161.
- [40] Bindhu MR, Umadevi M, Micheal MK, Arasu MV, Al-Dhabi NA. Structural, morphological and optical properties of MgO nanoparticles for antibacterial applications. *Mater Lett* 2016; 166: 19-22.
- [41] Moorthy SK, Ashok CH, Rao KV, Viswanathan C. Synthesis and characterization of MgO nanoparticles by Neem leaves through green method. *Mater Today Proc* 2015; 2(9): 4360-4368.
- [42] Karthik K, Dhanuskodi S, Gobinath C, Prabukumar S, Sivaramakrishnan S. Nanostructured CdO–NiO composite for multifunctional applications. *J Phys Chem* 2018; 112: 106-118.
- [43] Revathi V, Karthik K. Microwave assisted CdO–ZnO–MgO nanocomposite and its photocatalytic and antibacterial studies. *J Mater Sci Mater Electron* 2018; 29: 18519-18530.
- [44] Tian Q, Ye J, Yuan W, Zhang S, Shi L, Zhong J, Ning G. Highly effective antibacterial activity of lithium-doped magnesium oxide particles synthesized by the microwave-assisted hydrothermal route. *Powder Technol* 2020; 371: 130-141.
- [45] Rao Y, Wang W, Tan F, Cai Y, Lu J, Qiao X. Sol–gel preparation and antibacterial properties of Li-doped MgO nanoplates. *Ceram Int* 2014; 40(9): 14397-14403.
- [46] Ling Z, Zheng M, Du Q, Wang Y, Song J, Dai W, Cao J. Synthesis of mesoporous MgO nanoplate by an easy solvothermal–annealing method. *Solid State Sci* 2011; 13(12): 2073-2079.

- [47] Ravichandran AT, Robert XA, Pushpanathan K, Nagabhushana BM, Chandramohan R. Structural and optical properties of Zn doped CdO nanoparticles synthesized by chemical precipitation method. *J Mater Sci Mater Electron* 2016; 27: 2693-2700.
- [48] Fakhri A, Kahi DS. Synthesis and characterization of MnS₂/reduced graphene oxide nanohybrids for with photocatalytic and antibacterial activity. *J Photochem Photobiol B Biol* 2017; 166: 259-263.
- [49] Prakash T, Kumar ER, Gnanamoorthi K, Munshi AM, Almehmadi SJ, Mersal GA, El Metwaly NM. Evaluation of phase, morphological, optical and electrical properties of microwave synthesized Sn doped CdO nanostructures. *Solid State Commun* 2021; 336: 114388.
- [50] Rajaboopathi S, Thambidurai S. Green synthesis of seaweed surfactant based CdO-ZnO nanoparticles for better thermal and photocatalytic activity. *Curr Appl Phys*. 2017; 17:1622–1638.
- [51] Karthik K, Dhanuskodi S, Gobinath C, Prabukumar S, Sivaramakrishnan S. Multifunctional properties of microwave assisted CdO–NiO–ZnO mixed metal oxide nanocomposite: enhanced photocatalytic and antibacterial activities. *J Mater Sci: Mater Electron*. 2018; 29:5459–5471.
- [52] Dhanuskodi S. Structural and optical properties of microwave assisted CdO–NiO nanocomposite. *Aip Conf Proc*. 2016; 1731:050021–050023.
- [53] Revathi V, Karthik K. Microwave assisted CdO–ZnO– MgO nanocomposite and its photocatalytic and antibacterial studies. *J Mater Sci: Mater Electron*. 2018; 29:18519–18530.
- [54] Karthik K, Dhanuskodi S, Gobinath C, Prabukumar S, Sivaramakrishnan S. Andrographis paniculata extract mediated green synthesis of CdO nanoparticles and its electrochemical and antibacterial studies. *J Mater Sci Mater Electron* 2017; 28: 7991-8001.
- [55] Wada S, Yano M, Suzuki T, Noma T. Crystal structure of barium titanate fine particles including Mg and analysis of their lattice vibration. *J Mater Sci* 2000; 35: 3889-3902.
- [56] Selvam NCS, Kumar RT, Kennedy LJ, Vijaya JJ. Comparative study of microwave and conventional methods for the preparation and optical properties of novel MgO-micro and nano-structures. *J Alloys Compd* 2011; 509(41): 9809-9815.
- [57] Zhou J, Yang S, Yu J. Facile fabrication of mesoporous MgO microspheres and their enhanced adsorption performance for phosphate from aqueous solutions *Colloids Surf A* 2011; 379: 102-108.
- [58] Niu H, Yang Q, Tang K, Xie Y. Large-scale synthesis of single-crystalline MgO with bone-like nanostructures *J. Nanopart Res* 2006; 8: 881-888.
- [59] Stella RJ, Rao GT, Manjari VP, Babu B, Krishna CR, Ravikumar RVSSN. Structural and optical properties of CdO/ZnS core/shell nanocomposites. *J Alloys Compd* 2015; 628: 39-45.
- [60] Panchal P, Paul DR, Sharma A, Hooda D, Yadav R, Meena P, Nehra SP. Phytoextract mediated ZnO/MgO nanocomposites for photocatalytic and antibacterial activities. *J Photochem Photobiol A* 2019; 385: 112049.

Asansör Kabininin Farklı Konumu İçin Kılavuz Raylarında Oluşan Gerilme Dağılımının Sonlu Elemanlar Metodu ile Analizi

Cebeli ÖZEK^{1*}, Emre SÜER

^{1,2} Makine Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
cozek@firat.edu.tr, emre.suer3@gmail.com

(Geliş/Received: 29/03/2023;

Kabul/Accepted: 01/09/2023)

Öz: Asansör kabini asansör kuyusu içinde bir kaide üzerinde kılavuz raylar aracılığıyla aşağı-yukarı hareket etmektedir. Kılavuz raylar hareket sırasında ani hareket dalgalarının meydana getirdiği zorlanmalar nedeniyle hasar görebilirler. Çalışma ani hareket dalgalanmaları sırasında kılavuz raylarda oluşan gerilmelerin tespit edilmesi amacıyla yapılmıştır. Çalışmada 10 katlı her katında 2 daire bulunan 10 kişilik bir asansörün trafik hesabı dikkate alınmıştır. Kabin yüklemelerine bağlı olarak kabin kılavuz raylarında oluşacak gerilmeler ANSYS21.R2'de ANSYS Workbench ile maksimum 6300 N'luk yükün kabin zemininde etki ettiği ve 1.5 güvenlik faktöründe Sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Teorik ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Merkezden kılavuzlanmış asılı kabin güvenlik durumu için teorik Normal gerilme 3,407 MPa, Von-misses gerilmesi 5,735 MPa, analizde normal gerilme 12,182 MPa ve Von-misses gerilmesi 17,933 MPa olarak elde edilmişlerdir. Merkezden kaçık tip kabin güvenlik tertibatında teorik Normal gerilme 4,32 MPa, Von-misses gerilmesi 7,705 MPa, analizde normal gerilme 15,401 MPa, Von-misses gerilmesi 22,4 MPa dır. Yandan kılavuzlanmış kabin güvenlik tertibatında teorik Normal gerilme 9.052 MPa, Von-misses gerilmesi 12.438 MPa, analizde normal gerilme 31.139 MPa, Von-misses gerilmesi 48.234 MPa olarak elde edilmişlerdir. Sonuç olarak, teorik elde edilen normal ve Von-misses gerilmelerinin analizde elde edilen normal ve Von-misses gerilmelerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Buna göre en uygun kabin tipinin merkezden kılavuzlanmış kabin tipi olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Asansör, Gerilme analizi, Kabin kılavuz rayları, Sonlu elemanlar metodu.

Analysis of Stress Distribution Occurring in Guide Rails for Different Positions of Elevator Car by Finite Element Method

Abstract: The elevator car moves up and down by means of guide rails on a pedestal inside the hoistway. Guide rails can be damaged during movement due to the stresses caused by suddenly movement waves. The study was carried out to determine the stresses that occur in the guide rails during sudden movement fluctuations. In the study, the traffic calculation of a 10-person elevator with 2 apartments on each floor of 10 floors was taken into account. The stresses that will occur in the car guide rails depending on the car loadings were investigated in ANSYS21.R2 with ANSYS Workbench, where a maximum load of 6300 N acts on the car floor and with a finite element analysis with a safety factor of 1.5. Theoretical and analysis results were compared. Theoretical and analysis results were compared. Theoretical Normal stress is 3,407 MPa, Von-misses stress is 5,735 MPa, normal stress is 12,182 MPa and Von-misses stress 17,933 MPa in the analysis for the centrally guided suspended cabin safety condition. For decentralized cabinet safety situation, stresses were obtained 4,32 and 7,705 MPa Normal stress, Von-misses stress in theory, 15,401 and 22,4 MPa Normal stress and Von-misses stresses in analysis, respectively. In the side-guided cabin safety gear, the theoretical Normal stress was 9,052 MPa, the Von-misses stress was 12,438 MPa, the normal stress was 31,139 MPa, and the Von-misses stress was 48,234 MPa in the analysis. As a result, it was seen that the normal and Von-misses stresses obtained in theory were lower than the normal and Von-misses stresses obtained in the numerical analysis. Accordingly, it has been determined that the most suitable cabin type is the centrally guided cabin type.

Key words: Elevator, Stress analysis, Car guide rails, Finite element method.

1. Giriş

Asansör esas olarak mekanik bir sistemle yukarı-aşağı hareket eden, asansör kuyusu adı verilen kapalı bir alan içindeki kaide üzerine monte edilmiş arabadan oluşan bir platform olarak ifade edilebilir. Hareket sırasında yapısal elemanların kritik olanlarından biri, karşı ağırlık ve kabin kılavuz raylarıdır. Kılavuz raylar hareket dalgalarının oluşturduğu gerilmeler yüzünden zarar görebilirler.

Asansör, binalarda yolcuları ve eşyaları güvenli, hızlı ve konforlu bir şekilde taşımak için kullanılan mekatronik bir sistemdir [1]. Onur ve İmrak [2], gerilme analizi için çerçeve şekilli çelik yapıyı önermiş ve araba platformundaki yük dağılımını dikkate alarak yer değiştirme ve gerilme için hesaplamalar yapmışlardır.

* Sorumlu yazar: cozek@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹0000-0001-7603-415X, ²0000-0003-4632-963X

Babalık vd. [3], araba çerçeve sistemi davranışının süspansiyonunu araştırmak için sonlu elemanlar yöntemini (FEM) ve geleneksel yöntemi kullanmışlardır. Çalışmalarında genellikle hizmet kalitesi ve asansörlerin tükettiği enerjiyi dikkate almışlardır. Dünyamız kaynaklarının hızla tükenmesine maruz kaldığı için enerji kaynakları dikkatli kullanılmalıdır. Asansör sayısının veya asansör kapasitelerinin gereğinden fazla olduğu bir binada aşırı enerji tüketiminin olduğunu söylemek mümkündür. Binalarda tüketilen enerji miktarı ile ilgili yapılan araştırmalarda, asansör ve yürüyen merdivenlerin tükettiği enerjinin, binanın toplam enerji tüketiminin %5-%25'ini oluşturduğunu göstermektedir [4, 5]. Lindegger yaptığı çalışmada asansörlerin enerji tüketiminin doğru bir şekilde tahmin edilmesi, asansörlerin kapasite ve hızı gibi temel tasarım parametrelerinin farklı durumlar için analiz edilmesinin önemli olduğunu ifade etmiştir. Bir binanın toplam enerji tüketimi ancak ölçüm yoluyla kesin olarak bilinebilir. Son yıllarda, asansörün gidiş-dönüşte tükettiği enerjiye, bekleme gücüne ve asansörün enerji sınıfına dayalı olarak asansörlerin enerji tüketimini tahmin etmek için bazı yöntemler önermişlerdir [6]. Aynı amaca yönelik bir diğer yöntem ise daha önce hizmet süresi ve çalışma süresini tahmin etmek için kullanılan simülatörlerin enerji tüketimini de hesaplayacak şekilde geliştirilerek elde edilen yöntemdir. Bu yöntem çoğunlukla pahalı yazılım paketleri ve uluslararası asansör üreticileri tarafından geliştirilen özel yazılımlar kullanılarak kullanılmaktadır. Düşük maliyetle ve güvenlik kaygısı olmadan yapılan simülasyonlar sayesinde gerçek sistemler daha iyi ve daha doğru kurulabilir ve mevcut sistemler geliştirilebilir [7, 8, 9]. Artan kentleşmeyle birlikte, büyük metropollerde ve yoğun nüfuslu şehirlerde konut, ticari ve kurumsal tüm sektörlerde yüksek binaların yapımında önemli bir artış yaşanmaktadır. Rahat ve konforlu bir hizmet için binalar tarafından tüketilen toplam enerjinin yaklaşık %4'ünü asansörler oluşturmaktadır. Bu nedenle, asansörlerin enerji tüketimini azaltmanın önemi gün geçtikçe artmaktadır [10, 11]. Hamad vd. yeni bir asansörün tasarım aşamasında motorun maksimum boyutunu belirlemek için bir model sunmuşlardır. Bu modelde her adım için önceden kurulmuş bir asansörün belirli bir boyuttaki motoru tarafından tüketilen elektrik enerjisini hesaplamak için bu modeli geliştirmek üzere modifiye etmişlerdir. Çin'de kentleşmenin sürekli ilerlemesi ve yüksek binaların çoğalması ile insan ve eşya taşınmasında asansörler önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle asansörlerin tasarımı güvenlik, güvenilirlik, sürüş konforu ve enerji tasarrufu için doğru ve net hesaplamaları ortaya koymuşlardır [12, 13]. Yapılan bir başka çalışmada asansörün yukarı ve aşağı hareketini kontrol eden asansörün güç cihazının acil bir durum oluştuğunda yolcuların güvenliğinin sağlanması için hareket mekanizmasının acilen frenlenmesi gerektiği, bu nedenle frenin güvenilirliği asansörün güvenliğini doğrudan etkilediğini ifade etmişlerdir [14, 15]. Pan vd. asansörlerde en yaygın kullanılan frenin pabuçlu fren olduğunu ve pabuçlu frenlerde, fren pabucu ve fren tekerleği arasındaki sürtünme yoluyla asansör kabininin frenlenmesini sağladığını, asansör durduğunda fren yayının etkisi altında fren pabucu ve fren tekerleği asansörü durdurarak kilitlemektedir [16]. Asansörlerde fren sistemi, asansörün güvenli çalışmasını sağlamanın önemli bir parçasıdır. Asansörün çalışma kontrolü ve güvenlik korumasının önemi, nihai olarak fren sistemi aracılığıyla sağlanmalıdır [17, 18]. Skog vd. çalışmalarında hızlanma sensörü ve manyetik indüksiyon sensörü ile asansör konumu, yolcu düzen takibi, motor sistemi, anormal duruş ve anormal kapı duruş ve açılıp kapanma durumlarını test etmişlerdir. Frenlerin malzeme özelliklerinin ve bu özelliklerin doğru belirlenmesinin önemli olduğu sonucuna varmışlardır [19]. Asansörlerde kılavuz sistem kirliliğinin sürtünme kaldırmasındaki sarmal dişlilerin frenleme gecikmesi üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Frenin güvenlik aşaması doğru yapılmadığında genellikle düşme, çerçeve kaplaması ve asansör kabininin kayması veya düşmesi gibi ciddi kazalara yol açarak yolcuların can ve mal güvenliği için kabul edilemez riskler ve büyük tehlikeler oluşturmaktadır [20, 21]. Hao Yan vd. sürtünme analizinde termal yapısal bağlantı modeli ile senkronizasyon sürecinde sıcaklık ve sürtünmenin değişimini sürtünme konisi yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Asansör frenleri için denetim güvenliğini ve verimliliğini artırmak için frenleme sürecinde frenin dinamik tepkisini ölçmüşlerdir [22]. Saba vd. yaptıkları çalışmada lineer bir asansör kabini kılavuz rayları ve yapısı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal olarak incelemişlerdir. Asansör kılavuz rayları ANSYS workbench kullanılarak analiz edilmiştir. Maksimum Von-Misses gerilimleri ve maksimum yükte çerçeve ve plakanın deformasyonları incelenmiştir. Maksimum tasarım yükünde ince plakanın maksimum sapsmasının emniyet sınırlarını aşmadığı tespit edilmiştir [23]. Adak vd. yaptıkları çalışmada, bir asansörün hizmet kalitesi ve enerji tüketim düzeylerinin sonuçlarını görmek için kılavuz rayların analizinin simülasyonunu yapmışlardır. Asansör tasarım kalitesi artırıldığında hizmet kalitesinin istenilen seviyeye geldiği ve beklentilerin aksine enerji tüketim seviyesinin düştüğü tespit edilmiştir [24]. Jiang vd. tarafından yapılan çalışmalarda, asansörün acil frenlemesi sırasında fren torkunun değişiminin analizi yapılmıştır. Sabit miktatsız senkron asansör cer makinesi örnek alınarak acil frenlemede fren tekerleği ve fren pabucunun fren üzerindeki mekanik özellikleri analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi ve hesaplama sonuçlarına göre, asansörün darbe yükü ve gerilmesi kademeli olarak artarak acil frenleme anında maksimum 270.3 MPa olarak elde etmişlerdir [25]. Asansör freninin verimliliğini ve frenleme kapasitesinin doğruluğunu geliştirmek ve yüksüz durumda frenleme performansını görmek amacıyla tam yüklü frenleme performansını analiz etmek için yeni bir yöntem kullanılmış ve frenleme torkunu ölçmek için bir model geliştirilmiştir. Frenleme torkunun fren ivmesinin artmasıyla doğrusal olarak arttığını ifade etmişlerdir. Kullanılan bir asansör modeli ile uygulamalı olarak deneyler yapılmış ve hesaplamalar

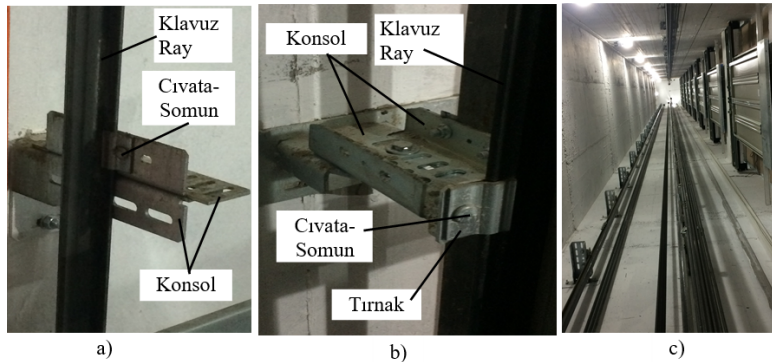
mukayese edilmiştir. Asansör performansında deneysel sonuçların analiz sonuçlarındaki frenleme ivmesinin teorik değerinden %11,95 daha az olduğunu göstermektedir. Analizin geleneksel test yöntemiyle karşılaştırıldığında tasarlanan frenleme torkunun test yönteminde daha doğru ve güvenli olduğunu ifade etmişlerdir [26]. Acil zamanlarda asansörlerin daha güvenli hale getirilmesi için çeşitli araştırmalar günümüzde bulunmaktadır. 2011 Van Depremi'nde asansörlerde oluşan hasarların asansör yapısına göre dağılımlarının tespit durumu araştırılmış ve yapılan tespit çalışmalarında konsollarda meydana gelen kalıcı şekil değiştirmeler ve hasarlar tespit edilmiştir [27]. Karşı ağırlığın montajı sırasında titreşim yüklerinin etkisinde patenler ile kılavuz raylar arasında montajının matematik olarak modeli üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Konsol elemanlarının yer değiştirmeleri üzerinde yapılan bu çalışmalarda özellikle beş katlı gerçek ölçekte bir bina modelinde deprem modellemesi yapmışlar ve konsol elemanlarının farklı yer değiştirmeleri sonucunda raylarda plastik deformasyon meydana gelebileceğini belirtmişlerdir [28, 29, 30]. Asansör kuyularının izolasyonu hakkında yapılan çalışmalarda asansör kuyularının izolasyonu ile asansör sistemi üzerine etkileyen sismik yüklerin azaltılabileceğini gösteren sayısal modellemeler yapılmıştır [31]. Kayaoğlu vd. asansör kabinini asansör kuyusunun duvarlarına bağlayan ve rayların düşey doğrultuda bir hat halinde sabitlenmesini sağlayan konsol elemanları üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Karşı ağırlık ve kabin raylarını asansör kuyusunun duvarlarına bağlayan ve rayların düşey doğrultuda bir hat halinde sabitlenmesini sağlamakta olduğu ve konsol elemanlarının deprem dalgalarının meydana getirdiği zorlanmalar nedeniyle hasar görebileceğini ifade etmişlerdir. Bu tip ani zorlanmalar neticesinde karşı ağırlığın ve kabinin ray üzerindeki doğrusal hareketinin bozulması sonucu asansörler kullanılamaz hale gelebilir [32].

Bu çalışmada, TS EN 81-77 (TSE, 2020a) standartlarında yer alan asansör kılavuz raylarının asansör yükleri altında sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılmıştır. Bu kapsamda asansörün kılavuz ray ve konsol bağlantısının 3 boyutlu tasarımı yapılmış ve asansör yüklerine ilişkin hesaplama yöntemleri kullanılarak modelleme parametreleri açıklanmıştır.

Bu çalışma ani hareket dalgalanmaları sırasında kılavuz raylarda oluşan gerilmelerin tespit edilmesi amacıyla yapılmıştır. Hesaplamalar sonucunda bulunan kılavuz ray yüklerine göre kılavuz rayların analizi yapılmış ve teorik hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır.

2. Teorik Hesaplar Ve Metot

Asansörler, asansör kuyusu adı verilen bölüm içerisinde çalışmaktadır. Kabin ve karşı ağırlık kılavuz raylar ile bağlantısı yapılarak düşeyde aşağı yukarı gidip gelmeleri sağlanır. Konsol elemanları ile kılavuz rayların duvara bağlantısı sağlanarak rayların düşeyde doğrultusunu koruması yapılmaktadır. Kılavuz raylar kabinin aşağı yukarı hareketini sağlayan, yatayda hareket sınırlaması getiren ve paraşüt fren sistemi devreye girdiğinde kabini durduran asansör elemanlarıdır [33]. Kılavuz raylar belirli mesafelerde konsollar aracılığı ile asansör kuyu duvarına bağlanırlar. Konsollar kılavuz rayların asansör kuyusunun duvarına sabitlenmektedir. Konsollar St37 çeliğinden üretilmiş ve mukavemeti en az 360 MPa'dır (TSE, 2012). Ray kavrama tırnağı konsol ile kılavuz rayı birbirine bağlayan ve kılavuz rayla uyumlu olarak rayı iki taraftan tutan çelik bir elemandır. Ray kavrama tırnağının malzemesi St52 kalitesindeki çelik ve en az 510 MPa çekme dayanımına sahip olmalıdır (TSE, 2012). Şekil 1'de kılavuz ray-konsol bağlantısı ve asansör kuyusu gösterilmiştir.

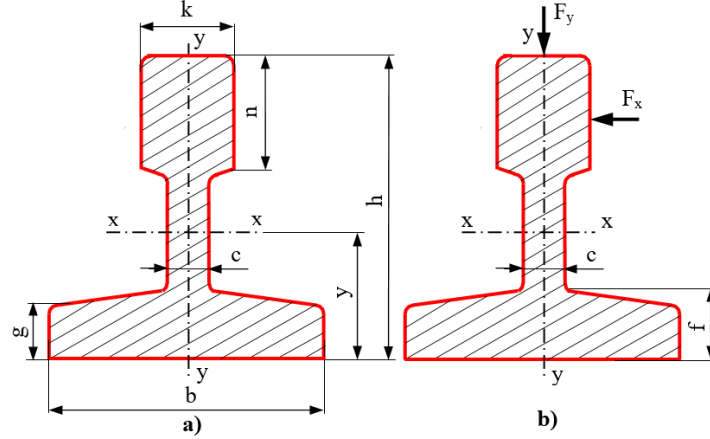


Şekil 1. Kılavuz ray/konsol bağlantısının a) ön görünüşü, b) arka görünüşü, c) asansör kuyusu.

Çalışmada kabin kılavuz ray ve konsol elemanlarının tasarım ilkeleri açıklandıktan sonra kullanılan parametreler verilmiştir. EN 81-77 (TSE, 2020a) standartlarına göre kılavuz ray yüklerinin hesaplamaları yapılarak ve analiz sonuçları ile mukayese edilmiştir.

2.1 Tasarım parametreleri

Bu çalışmada, 10 katlı, her katında 2 daire bulunan 10 kişilik bir asansörün kılavuz ray hesabı dikkate alınmıştır. Kılavuz ray boyu ve etki eden kuvvetler Şekil 2’de gösterilmiş, tasarımda ve analizlerde kullanılan parametreler Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 2. Kılavuz ray boyu ve etki eden kuvvetler [34]:

a) Asansör kılavuz ray profil ve ölçüleri b) Ray eksenleri ve raya etkiyen kuvvetler.

Tablo 1. T90/B Ray tipi ölçüleri (mm)

Kılavuz Ray	b	h	k	n	c	g	f	y
T 90B	90.0	75.0	16.0	42.0	10.0	8.0	10.0	26.12

Şekil 2a’da bir kılavuz raya ait ölçüler, Şekil 2b’de ise standart olan bir kılavuz raya etki eden kılavuz ray kuvvetlerinin yönleri ve eksen takımı verilmiştir. Kullanılan T90/B ray çeşidinin boyutları Tablo 2’de olduğu gibi alınmıştır. Konsollar ile kılavuz raylar arasında kullanılan yağ dolayısıyla konsol ile kılavuz ray arasında sürtünme kuvveti katsayısı 0,17 değerinde alınmıştır.

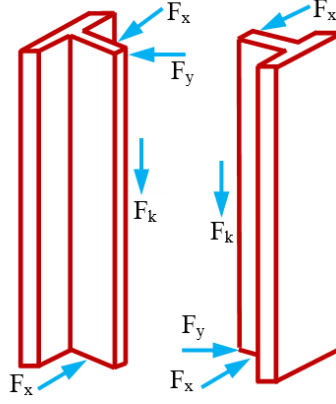
Tablo 2. Asansör tasarım parametreleri

Açıklamalar	Simge	Değer
Asansör cinsi	--	Konut asansörü
Asansör kapasitesi	--	10 kişi
Asansör beyan yükü	Q	800 kg
Asansör boş kabin ağırlığı	F	1100 kg
Bina kat sayısı	--	10
Asansör kuyusu yüksekliği	--	32 m
Kılavuz ray sıra sayısı	n	Simetrik 2
Bir kılavuz ray sırasında bulunan kılavuz ray sayısı	--	5
Kabin kılavuz patenleri arası mesafe	h_p	2200
Asansör kabin boyutları	C_w	1350
	C_d	1400
	C_h	2200
Normal kullanımda x ekseninde oluşan kuvvet	F_x	566 N
Normal kullanımda y ekseninde oluşan kuvvet	F_y	1119 N
Normal kullanımda dikey ekseninde oluşan kuvvet	F_v	3325 N

2.2 Bükülme (Burkulma) kuvveti ve gerilmesi

Kılavuz raylarda yük etkileri, güvenlik tertibatının çalışması, x-ekseni ve y-ekseni; normal kullanma-hareket, x-ekseni ve y-ekseni ve normal kullanma-yüklenme durumu olmak üzere üç durum dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Bu yüklerin oluşturduğu kuvvetler kılavuz rayda bükülme (burkulma), eğilme ve basma

gerilmelerine sebep olmaktadır. Kılavuz raylara etki eden kuvvetler ve kılavuz rayların montajı Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Kılavuz raylara etki eden kuvvetler ve etki yüzeyleri.

Bükülme kuvveti güvenlik tertibatının çalışması sonucu rayı ezmeye veya koparmaya çalışan kuvettir. Kabin anma yükü ile yüklendiğinde güvenlik tertibatı devreye girdiğinde hareket halinde kabin tarafından raylara etki eden kuvvet denklem (1), karşı ağırlık tarafından raylara etki eden kuvvet denklem (2), kabin raylarındaki bükülme gerilmesi denklem (3) ve karşı ağırlık raylarındaki gerilme denklem (4) dikkate alınarak hesaplanmıştır.

$$F_k = \frac{k_1 \cdot g \cdot (G_k + G_y)}{n} \quad (1)$$

$$F_c = \frac{k_1 \cdot g \cdot (G_k + q \cdot G_y)}{n} \quad (2)$$

$$\sigma_k = \frac{(F_k + k_3 \cdot F_2) \cdot \omega}{A} \quad (3)$$

$$\sigma_c = \frac{F_k \cdot \omega}{A} \quad (4)$$

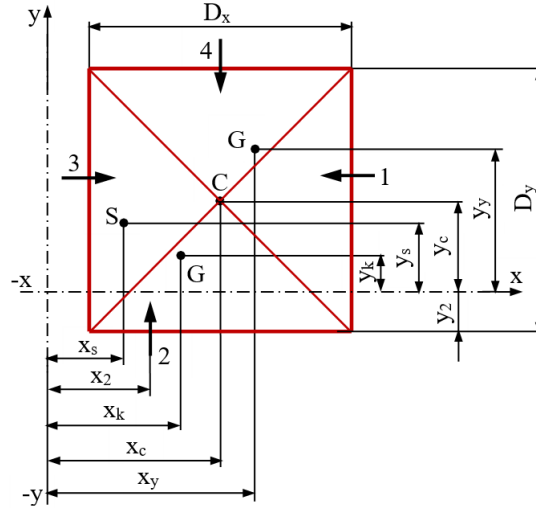
$$F_x = \frac{k_1 \cdot g \cdot (G_y \cdot X_y + G_k \cdot X_k)}{n \cdot h} \quad (5)$$

$$F_y = \frac{k_1 \cdot g \cdot (G_y \cdot Y_y + G_k \cdot Y_k)}{h \cdot \frac{n}{2}} \quad (6)$$

A kılavuz rayın kesit alanı, F₂ yardımcı donanımın kılavuz raylarda meydana getirdiği kuvvet, ω bükülme faktörü, λ kılavuz rayın narinlik katsayısı.

2.3 Eğilme kuvveti ve gerilmesi

Kabinin ağırlık merkezi ve kabin ölçüleri şematik olarak Şekil 4'de verilmiştir. C noktası kabinin geometrik ağırlık merkezidir. Kabin tarafından taşınan ve bükülebilen kablounun belli bir kısmı, dengeleme halatı (varsa) veya zinciri, kabin kapıları, güvenlik tertibatı, kontrol kablosu, kabine yerleştirilen klima vb. ağırlıkların da göz önünde bulundurulması halinde kabin ağırlık merkezi (G_k) noktası olmaktadır. G_y anma yükünün ağırlık merkezi, yük kabin alanına düzgün yayılmamaktadır. G_k kabin kütlesi, kabin iskeleti kütlesi, süspansiyon sistemi kütlesi ve kapı ağırlığı kütlesinden oluşmaktadır.



Şekil 4. Kabin boyutları ve kabin ağırlık merkezi.

- S : Kabinin askı (bağlantı) noktası,
 D_x : x doğrultusundaki kabin boyutu (kabin derinliği),
 D_y : y doğrultusundaki kabin boyutu (kabin genişliği),
 x_c, y_c : Kabin geometrik merkezinin kılavuz ray eksenlerine uzaklığı,
 x_s, y_s : Kabinaskı noktasının kılavuz ray eksenlerine uzaklığı,
 x_k, y_k : Boş kabinin ağırlık merkezinin kılavuz ray eksenlerine uzaklığı,
 x_y, y_y : Ana yükü ağırlık merkezinin kılavuz ray eksenlerine uzaklığı,
1,2,3,4 : Kabin kapılarının merkezi,
n : Kılavuz ray sayısı,
h : Kabin kılavuz ray patenleri arasındaki uzaklık.

Eğilme gerilmesi kılavuz rayların ekseninde dengelenmemiş durumdaki yük ve kabin ağırlıklarının sebep olduğu gerilmedir. Eğilme etkisi oluşturan kuvvetler denklem (5) ve (6), eğilme momentleri (7) denklemleri, eğilme gerilmeleri de (8) denklemleri dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Kuvvet x doğrultusunda raya iki taraftan, y doğrultusunda tek taraftan etki ettiği için F_y kuvvetinin hesabında kılavuz ray sayısı ($n/2$) olarak alınmıştır.

$$M_x = \frac{3}{16} \cdot F_y \cdot L_k \text{ ve } M_y = \frac{3}{16} \cdot F_x \cdot L_k \cdot \quad (7)$$

$$\sigma_x = \frac{M_x}{W_x} \text{ ve } \sigma_y = \frac{M_y}{W_x} \quad (8)$$

Raylardaki toplam eğilme gerilmesi denklem (9), raylardaki toplam eğilme ve basma gerilmesinin bileşkesi denklem (10) ve burkulma ve eğilme gerilmelerinin bileşkesi ise denklem (11) dikkate alınarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_t = \sigma_x + \sigma_y \quad (9)$$

$$\sigma_k = \sigma_t + \frac{F_k + k_3 \cdot F_z}{A} \quad (10)$$

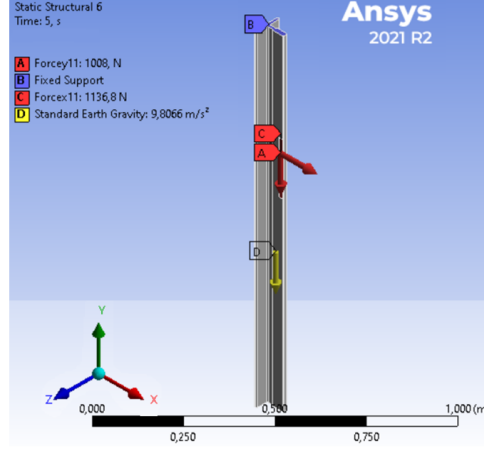
$$\sigma_{eş} = \sigma_k + 0,95 \cdot \sigma_t \quad (11)$$

L_k kılavuz rayın konsolları arasındaki uzaklık, W_x ve W_y kılavuz rayın mukavemet momentleridir.

3. Asansör Kılavuz Rayların Sonlu Elemanlarla Gerilme Analizi

Kılavuz rayların gerilme dağılımı, Merkezden kılavuzlanmış ve asılı kabin, Merkezden kaçık tip kılavuzlanmış ve asılı kabin ve Yandan kılavuzlanmış tip kabin durumu olmak üzere üç farklı yükleme durumu dikkate alınarak yapılmıştır.

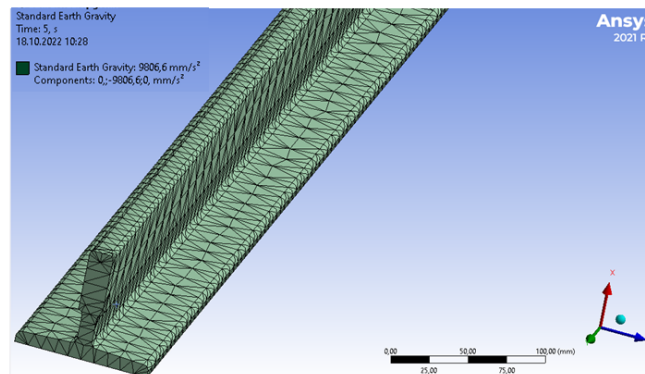
Teorik hesaplamalar yapıldıktan sonra tasarım parametrelerine göre belirlenen montajın üç boyutlu tasarımları yapılmıştır. Analiz çalışmasında, SolidWorks'de çizimi yapılan asansör kılavuz raylarının sonlu elemanlar analizi için ANSYS21.2 programı kullanılarak kabin yüklemelerine bağlı olarak kabin kılavuz rayları üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir. Şekil 5'de ANSYS 2021R2.1.2 analizi için tanımlanan kılavuz raya etki eden kuvvetler (Fx, Fy, Fz) gösterilmiştir.



Şekil 5. Kılavuz ray ve etki eden kuvvetler.

Kılavuz raya etki eden kuvvetler B noktası sabit olmak üzere A, C ve D noktalarından uygulanmıştır. Duvar tarafındaki konsollar sabitlenmiş destek ve kılavuz raylar rijit olarak kabul edilmiştir. Analiz işleminde kabindeki kişilerin ağırlığına ve kabinin konumuna bağlı olarak farklı yüklere maruz kalan kılavuz ray kenetlenmiş sabit bir yapı olarak ele alınmaktadır. Asansör, 1,5 güvenlik faktöründe maksimum 6300 N yük ile yüklenmiş ve desteklenen sabit parçalar, ANSYS Workbench yardımıyla 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi kullanılarak analiz edilmiştir. Bu nedenle, sayısal analizde taban plakasının merkezinde hareket eden 6300 N uygulanan yük dikkate alınmıştır. Kabin yüklemeleri için gerekli olan kuvvetler asansör kapasitesi dikkate alınarak hesaplanmış ve programa tanımlanmıştır. Teorik hesaplamalarda kullanılan denklemler aracılığı ile kuvvetin hesaplanması için veri girişi yapılmış ve kılavuz raylarda oluşacak gerilme değerleri elde edilmiştir.

En kritik konumda bulunan kılavuz ray konsol montajı konsolları ele alınmıştır. Şekil 6'da kılavuz ray için sonlu eleman modeli gösterilmiştir.



Şekil 6. Kılavuz ray için sonlu eleman modeli

Kılavuz ray çözümü 23393 düğümlü, 120 eleman ve 11808 rijit eleman olmak üzere toplam 11928 elemandan oluşturulmuş ve analizde daha iyi doğruluk elde etmek için çözücü adımında sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm

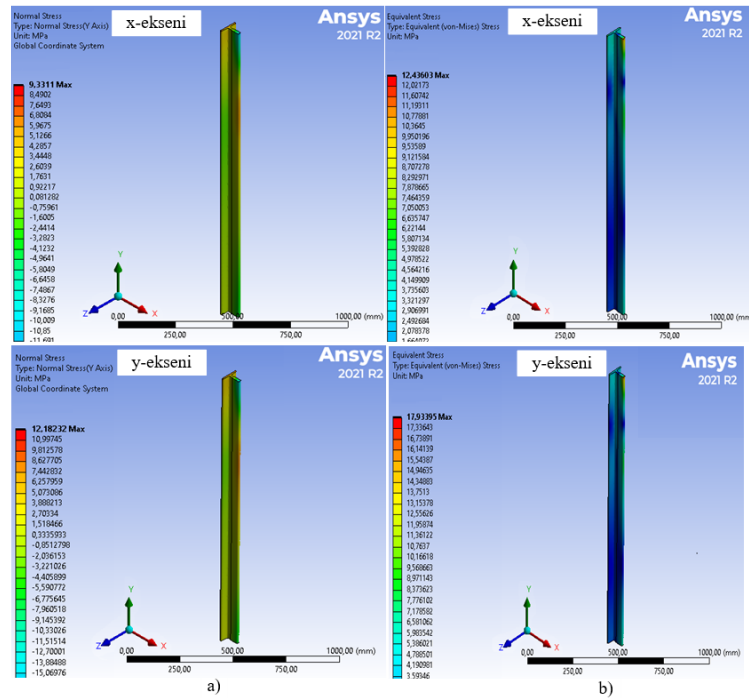
yapılmıştır. Genel koordinatlarda eleman maksimum matris katsayılarının aralığı 11164 ögesinde maksimum $3,07 \cdot 10^{10}$ eleman ve 8612 ögesinde minimum $5,07 \cdot 10^6$ eleman bulunmuştur.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Gerçekte kabin kılavuz raylarında meydana gelen kuvvetlerin yönü ve şiddeti değiştiğinden dolayı hesaplamaları son derece zor olmaktadır. Bu kuvvetlerin anlık değişimleri nedeniyle bilgisayar modellerinden elde edilen sonuçlardan daha yüksek gerilmeler meydana gelebilir. Bu yüzden meydana gelen gerilmeler akma gerilmelerini aşabilir. Buna benzer araştırmalar yapılırken kontrol dışı etkiler dikkate alınmalıdır.

4.1 Merkezden kılavuzlanmış asılı kabin durumu

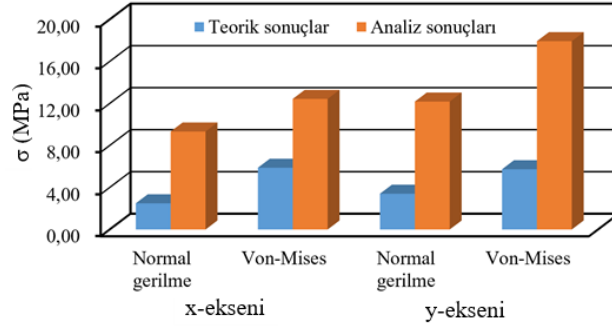
Merkezden kılavuzlanmış asılı kabin ve güvenlik tertibatının çalışması durumunda x eksenine ve y ekseninde yükleme esnasında analiz sonucu kabin raylarında meydana gelen normal gerilme ve Von-mises gerilmeleri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Merkezden kılavuzlanmış asılı kabin güvenlik tertibatının çalışması durumu gerilme dağılımı:
a) Normal gerilme b) Von-mises gerilmesi.

Şekil 7a'da x ekseninde düşey yönde normal gerilmenin maksimum olduğu bölge kabin ray profilinin arka kısmı ve değeri de 9,331 MPa, minimum gerilme ise profilin üst yüzeyinde ve değeri -11,691 MPa'dır. y ekseninde düşey yönde normal gerilmenin maksimum olduğu bölge kabin ray profilinin arka kısmı ve değeri 12,182 MPa ve minimum gerilme ise profilin üst yüzeyinde ve -16,254 MPa'dır. Şekil 7b'de x ekseninde maksimum Von-mises gerilmesi profilin üst yüzeyinde ve 17,933 MPa, minimum gerilme ise kabin ray profilinin alt kısımlarında ve 2,995 MPa, y ekseninde maksimum Von-mises gerilmesinin profilin üst yüzeyinde 17,933 MPa ve minimum gerilme ise kabin ray profilinin alt kısımlarında 2,995 MPa olarak tespit edilmiştir. Maksimum değer, kabin yüklemesinin rayın üst bölümüne yakın olmasından, minimum olduğu bölge ise alt kısım kuvvete çok maruz kalmadığından ve kısmen yükleme yerinden uzak kalmasından kaynaklanmaktadır.

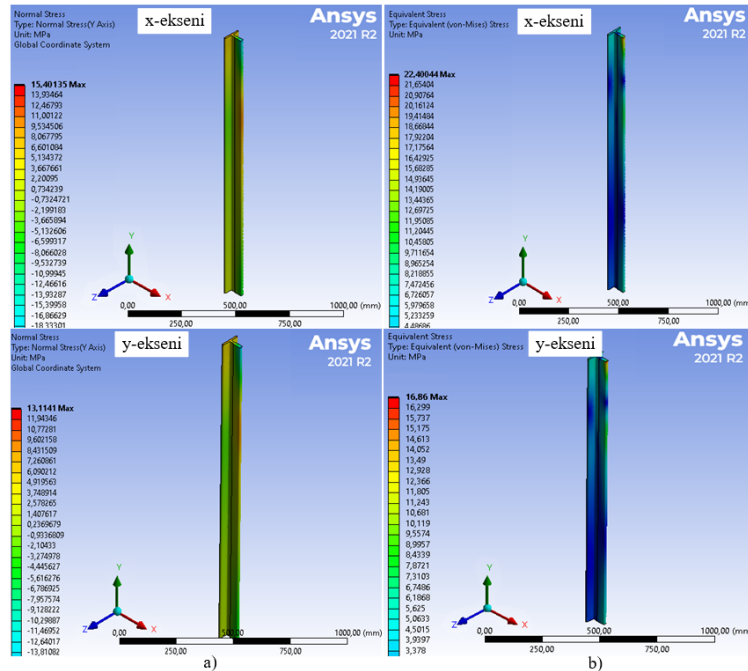
Merkezden kılavuzlanmış asılı kabinlerde kabin güvenlik tertibatının çalışması durumunda teorik ve analiz sonucu elde edilen Normal gerilme ve Von-mises gerilmelerinin değişimi Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8’de görüldüğü gibi x ekseninde teorik elde edilen Normal gerilme 2,494 MPa, Von misses gerilmesi 5,88 MPa, analizden elde edilen normal gerilme 9,331 MPa ve Von-misses gerilmesi ise 12,436 MPa, y ekseninde teorik elde edilen Normal gerilme 3,407 MPa, Von misses gerilmesi 5,735 MPa, analizden elde edilen normal gerilme 12,182 MPa ve Von-misses gerilmesi ise 17,933 MPa’dır. Teorik olarak elde edilen normal ve Von misses gerilmelerinin sayısal analizde elde edilen normal ve Von-misses gerilmelerinden daha düşük olarak elde edildiği görülmektedir. Bunun merkezden kılavuzlanmış kabin yüklemesi durumunda kuvvetin homojen etki etmesinden kaynaklandığı öngörülmektedir.

4.2 Merkezden kaçık asılı kabin durumu

Merkezden kaçık tip ve asılı kabin güvenlik tertibatının devreye girmesi halinde x eksen ve y eksen için yükleme esnasında analiz sonucu kabin kılavuz raylarında meydana gelen normal gerilme ve Von-misses gerilmeleri Şekil 9’da verilmiştir.

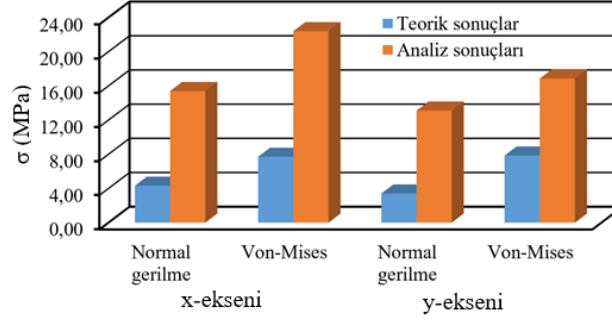


Şekil 9. Merkezden kaçık tip güvenlik tertibatının çalışması durumu gerilme dağılımı:
a) Normal gerilme, b) Von-misses gerilmesi.

Şekil 9a’da x ekseninde normal gerilmenin maksimum olduğu kabin kılavuz ray profilinin arka kısmı 15,401 MPa, minimum normal gerilme ise profilin üst yüzeyinde -19,799 MPa, y ekseninde maksimum normal gerilme kabin kılavuz ray profilinin arka kısmında ve 13,114 MPa, minimum gerilme ise profilin üst yüzeyinde ve -14,981 MPa olarak elde edildiği görülmektedir. Şekil 9b’de x eksen için maksimum Von-misses gerilmesi profilin üst yüzeyinde ve 22,4 MPa, minimum gerilme ise kabin ray profilinin alt kısımlarında ve 3,740 MPa, y ekseninde maksimum Von-misses gerilmesi profilin üst yüzeyinde ve 16,86 MPa, minimum gerilme ise kabin kılavuz ray

profilinin alt kısımlarında ve 2,816 MPa olduğu tespit edilmiştir. Gerilme değerlerinin negatif çıkması kılavuz rayların alt bağlantı noktalarında kuvvetlerin baskı kuvveti şeklinde etki etmesinin bir sonucu olduğu kabul edilmektedir.

Merkezden kaçık tip güvenlik tertibatının çalışması, normal çalışma yüklenme durumunda teorik ve analiz sonucu elde edilen normal gerilme ve Von-misses gerilmesinin değişimi Şekil 10’da verilmiştir.

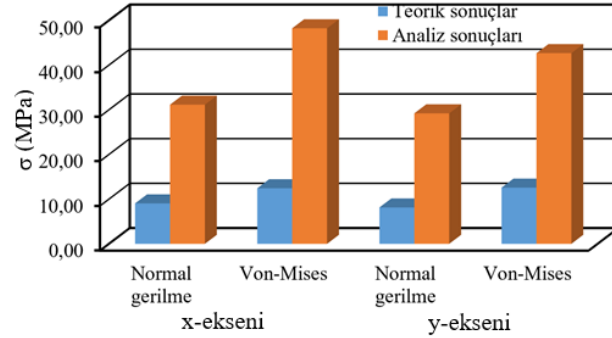


Şekil 10. Merkezden kaçık tip güvenlik tertibatının çalışması durumu için teorik Normal gerilme ve Von-misses gerilmesinin değişimi.

Şekil 10’da görüldüğü gibi x ekseninde teorik elde edilen Normal gerilme 4,32 MPa, Von misses gerilmesi 7,705 MPa, analizden elde edilen normal gerilme 15,401 MPa ve Von-misses gerilmesi ise 22,4 MPa ve y ekseninde teorik elde edilen Normal gerilme 3,407 MPa, Von misses gerilmesi 7,851 MPa, analizden elde edilen normal gerilme 13,114 MPa ve Von-misses gerilmesi ise 16,86 MPa dır. Teorik olarak elde edilen normal ve Von misses gerilmelerinin sayısal analizde elde edilen normal ve Von-misses gerilmelerinden daha düşük olduğu görülmektedir.

4.3 Yandan kılavuzlanmış asılı kabin durumu

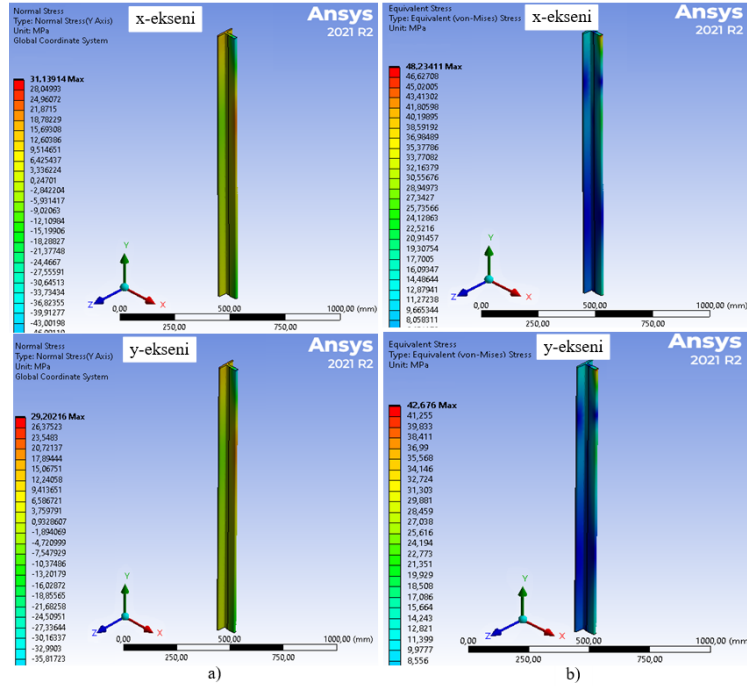
Yandan kılavuzlanmış kabin ve güvenlik tertibatının çalışması durumunda teorik olarak hesaplanan ve analiz sonucu elde edilen Normal gerilme ve Von-misses gerilmesinin değişimi Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. Yandan kılavuzlanmış kabin güvenlik tertibatının çalışması durumu için teorik Normal gerilme ve Von-misses gerilmesinin değişimi.

Şekil 11’de, Yandan kılavuzlanmış kabin güvenlik tertibatının çalışması durumunda x ekseninde teorik elde edilen Normal gerilme 9,052 MPa, Von misses gerilmesi 12,438 MPa, analizden elde edilen normal gerilme 31,139 MPa ve Von-misses gerilmesi ise 48,234 MPa ve y ekseninde teorik elde edilen Normal gerilme 8,139 MPa, Von misses gerilmesi 12,583 MPa, analizden elde edilen normal gerilme 29,202 MPa ve Von-misses gerilmesi ise 42,646 MPa dır. Teorik olarak elde edilen normal ve Von misses gerilmelerinin sayısal analizde elde edilen normal ve Von-misses gerilmelerinden daha düşük elde edildiği birbirlerine yakın sonuçlar olduğu görülmektedir.

Yandan kılavuzlanmış asılı kabin durumunda güvenlik tertibatının çalışmasında x ve y ekseninde yüklenme esnasında analiz sonucu kabin kılavuz raylarında meydana gelen normal gerilme ve Von-misses gerilmelerinin dağılımı Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Yandan kılavuzlanmış kabin güvenlik tertibatının çalışması gerilme dağılımı:
a) Normal gerilme, b) Von-misses gerilmesi

Şekil 12a'da x ekseninde düşeyde normal gerilmenin maksimum olduğu kılavuz ray profilinin arka kısmı ve 31,139 MPa, minimum normal gerilme ise profilin üst yüzeyinde -46,091 MPa, y ekseninde düşey yöndeki maksimum normal gerilme kabin kılavuz ray profilinin arka kısmı ve 29,202 MPa, minimum normal gerilme ise profilin üst yüzeyinde ve -38,644 MPa'dır. Şekil 12b'de x ekseninde maksimum Von-misses gerilmesi profil üst yüzeyinde 48,234 MPa, minimum Von-misses gerilmesi ise kabin kılavuz ray profilinin alt kısmında ve 6,451 MPa, y eksenini için maksimum Von-misses gerilmesi profilin üst yüzeyinde ve 42,676 MPa, minimum Von-misses gerilmesi ise kabin ray profilinin alt kısımlarında ve 7,134 MPa olduğu görülmektedir.

5. Sonuçlar

Sonlu elemanlar analizi yöntemi ile elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde kılavuz ray tasarımlarının analizleri tutarlı sonuçlar vermektedir. Kılavuz ray tasarımı için yapılan uygulamalarda merkezi tip kılavuz ray tasarımının merkezden kaçık ve yandan askılı tip kılavuz ray tasarımlarına göre daha yüksek gerilme değerleri bulunmuştur. Seçimi yapılan parametreler için incelenen tasarımların simülasyon sonuçlarına göre konsollarda kalıcı bir deformasyon görülmemiştir. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Merkezden kılavuzlanmış asılı kabin güvenlik tertibatının çalışması durumu, x eksenini için teorik olarak elde edilen Normal gerilme 2,494 MPa, Von-misses gerilmesi 5,88 MPa, analizden elde edilen normal gerilme 9,331 MPa ve Von-misses gerilmesi ise 12,436 MPa ve y ekseninde teorik olarak elde edilen Normal gerilme 3,407 MPa, Von misses gerilmesi 5,735 MPa, analizden elde edilen normal gerilme 12,182 MPa ve Von-misses gerilmesi ise 17,933 MPa tespit edilmiştir.

2. Merkezden kaçık tip ve asılı kabin güvenlik tertibatının devreye girmesi x ekseninde analiz sonucu maksimum normal gerilme 15,401 MPa, y eksenini için maksimum normal gerilme 13,114 MPa, x eksenini için maksimum Von-misses gerilmesi 22,400 MPa, y eksenini için maksimum Von-misses gerilmesi 16,86 MPa, minimum Von-misses gerilmesi ise 2,816 MPa hesaplanmıştır.

3. Yandan kılavuzlanmış kabin güvenlik tertibatında x ekseninde teorik Normal gerilme 9,052 MPa, Von misses gerilmesi 12,438 MPa, analizde normal gerilme 31,139 MPa, Von-misses gerilmesi 48,234 MPa, y ekseninde teorik Normal gerilme 8,139 MPa, Von misses gerilmesi 12,583 MPa, analizde normal gerilme 29,202 MPa ve Von-misses gerilmesi ise 42,646 MPa olarak elde edilmiştir.

Sonuç olarak yapılan teorik hesaplar ile analiz sonuçlarının birbirlerine yakınsadığı, kabin kılavuzlanma durumuna göre en uygun kabin kılavuz tipinin merkezden kılavuzlanmış kabin tipi olduğu belirlenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Tyni T, Ylinen J. Evolutionary bi-objective optimization in the elevator car routing problem. *European Journal of Operational Research (EJOR)*. 169 (3): 960-977, 2006.
- [2] Onur YA, İmrak CE. Computer aided car frame modelling and stress analysis. *Elevator Technology 16: Proceedings of Elevcon*. Helsinki, Finland: IAEE Public. 2006.
- [3] Babalık FC, Çavdar K, Sakalar M, Meshur B. Analysis and finite elements method aided design of elevator car suspensions. *Asansör Dünyası*, 55: 74–79, 2003.
- [4] Sachs HM. Opportunities for Elevator Energy Efficiency Improvements. American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), Washington, DC, April, 2005.
- [5] Liu J, Qiao F, Chang L. The hybrid predictive model of elevator system for energy consumption. *Proceedings of the 2010 International Conference on Modeling, Identification and Control*, Okayama, Japan, 17-19 Jul. 2010.
- [6] Lindegger U. The studies in europe and the energy efficiency guideline. VDI 4707, Elevcon, 2010.
- [7] Hakala H, Siikonen ML, Tyni T, Ylinen J. Energy-Efficient Elevators for Tall Buildings. 6th World Congress on Tall Buildings and Urban Habitat, February/March, 2001.
- [8] Patrao C, Rivet L, Fong J, Almedia A. Energy efficient elevators and escalators. *ECEEE (2009)*; 803–813, 2009.
- [9] Bennet BS. *Simulation fundamentals*. 1st ed., Prentice Hall International Series in System and Control Engineering, UK, 1995.
- [10] Patrão C, Almeida AD, Fong J, Ferreira F. Elevators and escalators energy performance analysis. *Proc. 2010 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, Pacific Grove, CA, USA, August 2010.
- [11] De Almeida A, Hirtzelb S, Patrão C, Fonga J, Dütschkeb E. Energy-efficient elevators and escalators in Europe: an analysis of energy efficiency potentials and policy measures. *Energy and Buildings*, 47: 151-158, 2012.
- [12] Hamad QS, Ali Y, Fadhil HA, Al-Janabi M, Ahmed F. Elevator exhaustion time reduction by eliminating fake demands. *2020 International Multi-Disciplinary Conference: Sustainable Development and Smart Planning*. June 28-30, 2020.
- [13] Ongun E, Demir A. Improving the performance and energy efficiency of elevators by direct-landing elevator position control system. *International Conference on Electrical & Electronic Engineering*. IEEE. 2017.
- [14] Hamad QS, Croock MS, Qaraawi SA. Efficient infrared sensor and camera based monitoring system. *2013 International Conference on Electrical Communication, Computer, Power, and Control Engineering (ICECCPCE)*. 2014.
- [15] Peng Q, Li Z, Yuan H, Huang G, Li S, Sun X. A model-based unloaded test method for analysis of braking capacity of elevator brake. *Advances in Materials Science and Engineering*, pp: 1-10. 2018.
- [16] Durak E, Yurtseven HA. Experimental study of the tribological properties of an elevator's brake linings. *Industrial Lubrication & Tribology*, 68(6): 683-688, 2016.
- [17] Pan G, Lei C. Impact analysis of brake pad backplate structure and friction lining material on disc-brake noise. *Advances in Materials Science & Engineering*, pp.1-9, 2018.
- [18] Durak E, Yurtseven HA. Experimental study of the tribological properties of an elevator's brake linings. *Industrial Lubrication and Tribology*, 68(6): 683-688, 2016.
- [19] Kalikate SM, Patil SR, Sawant SM. Simulationbased estimation of an automotive magnetorheological brake system performance. *Journal of Advanced Research*, 14, 43-51, 2018.
- [20] Skog I, Karagiannis I, Bergsten, H`ard`en J, Gustafsson L, H`andel P. A smart sensor node for the internet-of-elevators-non-invasive condition and fault monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 17(16): 5198–5208, 2017.
- [21] Xu B, Cheng M, Yang H, Zhang J, Yang M. Safety brake performance evaluation and optimization of hydraulic lifting systems in case of overspeed dropping. *Mechatronics*, 23(8), 1180-1190. 2013.
- [22] Longwic R, Szydło K. E impact of the elevator guides contamination on the braking process delay for selected progressive gears. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 11(2): 1-7, 2017.
- [23] Yan H, Xu Z, Yuan J, Liang L, Cao T, W. Ge W. Friction characteristics of synchronization process based on triho thermodynamics. *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2018, Article ID 8467921, 9 pages, 2018.
- [24] Othman Saba A, Mohammed Jamal AK, Mohammed Farag M. Numerical Analysis of Linear Elevator Structure Using Finite Element Method. *Engineering and Technology Journal*, 39(09): 1430-1436, 2021.
- [25] Adak MF, Duru N, Duru HT. Elevator simulator design and estimating energy consumption of an elevator system. *Energy and Buildings*, 65: 272-280, 2013.

- [26] Jiang T, Wang Z, Ren Z, Liu G, Ren F. Analysis on mechanical characteristics of brake wheel and brake shoe of elevator traction machine. 4th International Conference on Mechanical, Electrical and Material Application (MEMA-2021) Vol. 2125, 29-31 October 2021, Chongqing, China, 2021.
- [27] Peng Q, Li Z, Yuan H, Sun X, Huang G, Li S. A Model-Based Unloaded Test Method for Analysis of Braking Capacity of Elevator Brake. *Advances in Materials Science and Engineering-Hindawi*, Volume 2018, Article ID 8047490, 10 pages, 2018.
- [28] İmrak CE. A Survey for the Effect of 2011 Van Earthquakes on Elevators. Erişim:[https://www.aysad.org.tr/wp-content/uploads/2018/09/Van Survey Appendixes.pdf](https://www.aysad.org.tr/wp-content/uploads/2018/09/Van-Survey-Appendixes.pdf), 2012.
- [29] Wang X, Hutchinson TC, Astroza R, Conte JP, Restrepo JI, Hoehler MS, Ribeiro W. Shake table testing of an elevator system in a full-scale five-story building. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 46(3): 391-407. 2017.
- [30] Wang X, Günay S, Lu W. Seismic analysis of the rail-counterweight system in elevators considering the stiffness of rail brackets. *Advances in Structural Engineering*, 2020.
- [31] Wang X, Günay S, Lu W. Mechanical model and seismic study of the roller guide-rail assembly in the counterweight system of elevators. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 50(2): 518-537, 2021.
- [32] Mazza F, Labernarda R. Internal Pounding Between Structural Parts of Seismically Isolated Buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 2021.
- [33] Kayaoğlu E, Salman Ö, Candaş, A. Study on stress and deformation of an elevator safety gear brake block using experimental and FEA methods. *Advanced Materials Research*, 308-310: 2011.
- [34] İmrak CE, Gerdemeli İ. *Asansörler ve Yürüyen Merdivenler*. Birsen Yayınevi, İstanbul, 2000.



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 yayımlandığına 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.